



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

CREACIÓN Y DESARROLLO DE UN DISPOSITIVO ELECTROMECAÁNICO DE  
RELIEVE DINÁMICO CON APLICACIÓN EN ARTE PARA PERSONAS CON  
DISCAPACIDAD VISUAL

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL ELÉCTRICO

CRISTIAN ALFREDO ORTIZ DE ZÁRATE CARRASCO

PROFESOR GUÍA:  
ANDRÉS CABA RUTTE

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
FRANCISCO CASADO CASTRO  
FRANCISCO RIVERA SERRANO

SANTIAGO DE CHILE  
2022

# Resumen

En el presente trabajo se investigan en detalle distintas tecnologías que pueden ayudar a lograr en Chile un dispositivo capaz de acercar el arte visual, de manera tangible y dinámica, a personas con discapacidad visual, además de revisar iniciativas similares existentes alrededor del mundo, para estar al tanto de la situación actual.

En base a la investigación, tomando además en cuenta factores logísticos y económicos en el contexto de pandemia que se vive actualmente, se escogen tecnologías viables para diseñar e implementar una prueba de aplicación con miras a la construcción de dicho dispositivo.

Se realizan pruebas de concepto tanto para el control de actuadores como para el mecanismo de esta primera iteración, así como también de comunicación computador-dispositivo y entre dispositivos para demostrar escalabilidad. El funcionamiento mecánico es simulado mediante un modelo de CAD animado, mostrando el resultado que tendría el dispositivo una vez construido.

*A mi madre, por su apoyo incondicional y amor infinito.*

# Agradecimientos

El presente trabajo representa el fin de una larguísima etapa, donde he conocido a grandes personas tanto dentro como fuera de la universidad, que han sido parte esencial de mi desarrollo, tantas que no podría terminar de nombrarlas una por una. Pero sin duda hay quienes siempre estuvieron ahí desde antes de tener consciencia sobre mi propia existencia; mi querida madre, que siempre ha sido una fuente enorme de apoyo, amor y comprensión en todo momento; mi padre que quizá observa desde algún lugar entre las estrellas, cuyo trabajo despertó la curiosidad por las máquinas y la tecnología que de una u otra manera me atrajeron hasta acá; mi hermana, siempre fiel e incondicional confidente. Por ellos es imposible no sentir enorme agradecimiento y admiración.

A mis profesores guía, Andrés y Francisco por su enorme apoyo, por estar siempre pendientes y tender una mano amable en incontables momentos de flaqueza.

A mi maestro de Taekwondo, profesor Alejandro, y a toda la escuela, por enseñarme tantas lecciones de perseverancia y esfuerzo, por no cansarse nunca de impulsarme a ponerme de pie sin importar cuántas veces caiga.

A mis amigos de la vida, esos seres maravillosos que siempre han estado ahí en las buenas y las malas, algunos desde tiempos más ancestrales que otros, ya sea para celebrar hasta más no poder, compartir unas cervezas, reír, llorar, escucharnos y apoyarnos, para jugar pool, comer en *La Picá del Chicken*, hacer música, o simplemente hablar de la vida y ver monos. En fin, fuente de tantos bellos recuerdos.

A quienes además de convertirse en grandes amigos, fueron un enorme apoyo y orientación a lo largo de toda la carrera, tanto cuando era un mechón perdido por la vida, como al final cuando más necesité un impulso.

A todos, por llenar de color este proceso y mi vida entera, muchas gracias.

# Tabla de Contenido

<b>Resumen</b>	<b>i</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Motivación . . . . .	1
1.2. Objetivo General . . . . .	2
1.3. Objetivos Específicos . . . . .	2
<b>2. Marco Teórico</b>	<b>3</b>
2.1. Situación Actual del Arte Inclusivo . . . . .	3
2.1.1. TacTile . . . . .	3
2.1.2. Screw Paintings . . . . .	4
2.1.3. Manos a la Pared . . . . .	4
2.2. Tipos de Actuador Lineal . . . . .	5
2.2.1. SMA (Shape-Memory Alloy) . . . . .	5
2.2.2. Tipos comunes de motor . . . . .	7
2.2.3. Transmisión de hilo . . . . .	8
2.2.4. Transmisión de engrane . . . . .	8
2.2.5. Piezomotor Lineal . . . . .	9
2.2.6. Telescópicos . . . . .	9
2.2.7. Hidráulica . . . . .	10
2.2.8. Neumática . . . . .	10
2.2.9. EAP (Electroactive Polymer) . . . . .	11
2.3. Paneles existentes . . . . .	11
2.3.1. InForm . . . . .	12
2.3.2. Materiable . . . . .	12
2.3.3. InForce . . . . .	13
2.3.4. shapeShift . . . . .	13
2.3.5. Mediante freno electrostático . . . . .	14
2.3.6. Mediante actuadores blandos de vacío . . . . .	15
2.3.7. Shape Clip . . . . .	15
2.4. Interfaces de Comunicación en Microcontroladores . . . . .	16
2.4.1. UART: Universal Asynchronous Receiver/Transmitter . . . . .	16
2.4.2. SPI: Serial Peripheral Interface . . . . .	17
2.4.3. I2C: Inter-Integrated-Circuit . . . . .	18
<b>3. Metodología</b>	<b>20</b>

3.1.	Ruta Crítica . . . . .	20
3.1.1.	Diseño electromecánico . . . . .	20
3.1.2.	Prueba de un actuador . . . . .	21
3.1.3.	Construcción de estructura . . . . .	21
3.1.4.	Implementación de la electrónica . . . . .	21
3.1.5.	Prueba de matriz base . . . . .	22
3.1.6.	Integración y pruebas finales . . . . .	22
<b>4.</b>	<b>Desarrollo</b>	<b>23</b>
4.1.	Esquema general . . . . .	23
4.2.	Elección de actuadores . . . . .	23
4.2.1.	Características constructivas . . . . .	24
4.3.	Drivers . . . . .	25
4.3.1.	Opciones . . . . .	25
4.3.2.	Configuración . . . . .	26
4.4.	Elementos esenciales del control . . . . .	26
4.5.	Secuencia de funcionamiento . . . . .	27
4.6.	Opción de movimiento: Multiplexado . . . . .	28
4.6.1.	Esquema de multiplexión . . . . .	28
4.6.2.	Requisitos de tiempo . . . . .	28
4.6.3.	Circuito . . . . .	29
4.7.	Opción de movimiento: Directo . . . . .	30
4.7.1.	Pros y Contras versus multiplexado . . . . .	31
4.7.2.	Circuito . . . . .	31
4.8.	Alimentación . . . . .	31
4.9.	Comunicación . . . . .	31
4.9.1.	Hacia Computador . . . . .	32
4.9.2.	Entre uC . . . . .	32
4.9.3.	Pruebas a realizar . . . . .	32
4.10.	Mecanismo uno a uno . . . . .	33
4.11.	Mecanismo de matriz secuencial . . . . .	33
4.11.1.	Inspiración . . . . .	33
4.11.2.	Requisitos de la estructura . . . . .	34
4.11.3.	Prototipo de baja resolución . . . . .	35
4.11.4.	Modelo en CAD . . . . .	36
4.11.5.	Comparativa . . . . .	37
<b>5.</b>	<b>Resultados</b>	<b>39</b>
5.1.	Movimiento . . . . .	39
5.1.1.	Con Multiplexión . . . . .	39
5.1.2.	Con Conexión directa . . . . .	40
5.2.	Interfaz y Demo . . . . .	40
5.2.1.	Comunicación: UART . . . . .	40
5.2.2.	Comunicación: TWI (I2C) . . . . .	40
5.3.	Representación . . . . .	41
5.3.1.	Modelo CAD . . . . .	41

<b>6. Conclusión</b>	<b>42</b>
6.1. Trabajo Futuro . . . . .	43
<b>Bibliografía</b>	<b>44</b>
<b>Anexo</b>	<b>46</b>
Códigos . . . . .	46

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Motivación

En el mundo de hoy y siempre, entre la vorágine del día a día en las grandes ciudades, con un ritmo de trabajo que no perdona, viviendo rodeados de infinitos estímulos y estridencia, hallamos muchas veces en el arte un respiro. El pequeño encanto de apreciar por un instante una bella obra, ya sea en forma de música, baile, teatro, cine o pintura, muchas veces sin notarlo puede agregar un giro interesante a nuestro día.

Una importante rama ha trascendido a través de los siglos, y podemos experimentarla sólo gracias a nuestros ojos, es la pintura, el dibujo, el arte visual en todas sus formas y colores, cuyo acceso se suele dar por sentado. Sin embargo, hay muchas personas que no tienen la posibilidad de ver el mundo como nosotros lo vemos, y es a ellos a quienes se dirige este trabajo.

En un intento por dar un paso en camino a la accesibilidad e inclusión en el arte, por aportar un granito de arena a los esfuerzos que se están realizando alrededor del mundo, este proyecto se ha enfocado en diseñar y probar una primera aproximación a lo que será un dispositivo para representar, de manera tangible y dinámica, superficies tridimensionales para ser experimentadas por personas en situación de discapacidad visual.

En el mundo del arte, permanentemente se están realizando esfuerzos para hacerlo llegar a cada vez más personas, innovando en la estimulación de diversos sentidos como el oído, el olfato y el tacto, abriendo puertas para trascender la visión. Pero en nuestro país existe una deuda enorme con la inclusión en todos sus sentidos y el arte no es la excepción. Recientemente se han llevado a cabo iniciativas para ayudar a personas no videntes a experimentar el arte visual de otra manera, como por ejemplo el circuito de murales en los alrededores del barrio Bellas Artes, donde se instalaron pequeñas placas con una representación en relieve de lo pintado el 2018, pero es un tema que al menos en Chile está apenas despegando.

Actualmente en el mundo se utilizan principalmente dos métodos para acercar el arte gráfico a personas con discapacidad visual (parcial o total), idealmente en conjunto. Por una parte, se emplea audio o texto en braille para explicar obras y describirlas detalladamente,

mientras que el segundo método involucra directamente la experiencia táctil más allá de la lectura, utilizando relieves generados mediante escultura, técnicas de fabricación digital, grabado o moldeado, entre otros, para crear un reflejo tangible de lo que originalmente sólo se podía ver.

La implementación de estos métodos, si bien efectiva, suele ser bastante costosa en términos de tiempo y esfuerzo, además de ser específica a una obra a la vez. Un medio que produzca texturas de forma dinámica permitiría acercar gran cantidad de obras al público no vidente usando más eficientemente recursos y espacio. Esta tecnología, con suficiente miniaturización, también podría en un futuro—de forma similar a los monitores habituales—servir para mostrar no sólo imágenes, sino también texto en braille, presentando una solución compacta y rápida para el uso de libros sin la necesidad de una aparatosa transcripción en papel.

De esta forma, el objetivo es desarrollar un dispositivo electromecánico capaz de generar dinámicamente representaciones en relieve a partir de imágenes o texto en braille, para así contribuir a la integración y acercamiento del arte visual a personas con visión altamente reducida.

## 1.2. Objetivo General

Diseñar un dispositivo electromecánico programable capaz de crear representaciones tangibles de superficies tridimensionales a partir de modelos computacionales, para aplicaciones en arte inclusivo.

## 1.3. Objetivos Específicos

- Implementación de actuadores lineales a pequeña escala como módulos básicos.
- Caracterización de estos actuadores respecto a los aspectos necesarios para su control e integración, tales como resolución, tiempo de respuesta, tolerancia a esfuerzos, consistencia y replicabilidad.
- Implementación de un sistema de control para manejar adecuadamente los actuadores.
- Implementación de interfaz capaz de entregar al dispositivo las instrucciones necesarias.
- Integrar los módulos en un arreglo funcional y controlable.

# Capítulo 2

## Marco Teórico

A continuación se presenta una revisión de lo que se ha realizado los últimos años en el mundo del arte para acercarlo a personas en alguna situación de discapacidad, poniendo especial énfasis en aquellas expresiones enfocadas a quienes viven con discapacidad visual. Estas obras nos llevan a establecer una posible y deseable conexión con la tecnología, que puede ser capaz de abrir otras formas de generarlas.

Se realizó también una cuidadosa investigación sobre técnicas que pudieran haber sido de utilidad para el proyecto. Dada la naturaleza de éste, se ha puesto especial atención en las tecnologías y dispositivos de actuación lineal, para utilizar lo que mejor se ajuste a las necesidades y restricciones presentes.

### 2.1. Situación Actual del Arte Inclusivo

Durante los últimos años, muchos artistas han incursionado en otras formas en que el espectador puede relacionarse con sus creaciones, utilizando sentidos más allá de la vista, como el tacto, el olfato o la audición para experimentar su expresión, abriendo un amplio abanico de posibilidades por explorar. Documentarlas en detalle escapa del marco de este trabajo, sin embargo, hay algunas que resultan de particular interés e inspiración por su uso del tacto como medio para traducir la experiencia visual. Se presentan a continuación:

#### 2.1.1. TacTile

Como parte del amplio programa de exhibiciones para personas con impedimentos visuales del Instituto de Arte de Chicago, se encuentra *TacTile*, un proyecto que busca representar y transmitir obras visuales mediante el uso del tacto. Cada pieza consiste de un bloque de 8x10 pulgadas, esculpido a máquina para representar de forma tangible una obra de arte visual, añadiendo así una nueva dimensión que se puede experimentar con las manos. (Figura 2.1)



Figura 2.1: Trompe-l'Oeil Still Life with a Flower Garland and a Curtain, Adriaen van der Spelt. Representado en TacTile

### 2.1.2. Screw Paintings

El artista Andrew Meyer se ha dedicado los últimos años a elaborar pinturas tangibles tridimensionales utilizando madera y miles de tornillos, combinando elementos visuales junto al factor táctil para producir obras que se pueden apreciar con ambos sentidos.



Figura 2.2: Obra de Andrew Meyer

### 2.1.3. Manos a la Pared

Proyecto chileno inaugurado en Julio de 2018, ejecutado por la Asociación para la Cultura Inclusiva *Mu.Cho* a través del Museo a Artes Visuales (MAVI) en Lastarria. Consistió en generar e instalar, mediante placas con relieve e inscripciones en braille, representaciones tangibles en un circuito de murales existente en barrio Bellas Artes y barrio Lastarria, de modo de acercar estas obras a quienes no las pueden ver son sus ojos. Las representaciones están hechas de forma similar a *TacTile*, además de contar con una audio descripción a la cual se puede acceder mediante una aplicación móvil dedicada.



Figura 2.3: Representación de obra “La Debutante” en el MAVI

Estas obras en particular ilustran perfectamente, pero en forma estática, lo que se pretende lograr dinámicamente en un futuro con este proyecto. Es por esto que se requirió explorar tecnologías capaces de proporcionar actuación lineal, como se muestra a continuación.

## 2.2. Tipos de Actuador Lineal

Al adentrarnos en el mundo de los actuadores se abre un amplio abanico de opciones, cada una con sus características y usos especiales, con diversos materiales, tamaños y principios de acción, que pueden conllevar ventajas o desventajas según el problema que se pretenda resolver con ellos. A continuación su descripción en detalle.

### 2.2.1. SMA (Shape-Memory Alloy)

Las aleaciones con memoria de forma son un tipo de aleación metálica muy peculiar, cuya estructura microscópica les confiere propiedades termomecánicas únicas que las hacen bastante atractivas en diversos contextos, siendo más ampliamente usado el NiTi (Níquel-Titanio) o nitinol. A estos materiales se les confiere una forma original al momento de ser fabricados, formando una matriz cristalina “madre” rígida llamada *austenita* que se mantiene a altas temperaturas, pero que bajo un umbral  $T_m$  pasa a ser *Martensita*, una estructura mucho más flexible.

Mientras que comúnmente las deformaciones en metales se deben a dislocaciones irreversibles en su estructura, en el nitinol ocurre algo llamado *transformación martensítica*, un tipo de deformación térmicamente reversible en la que pasado un umbral de temperatura  $T_a$ , el material intenta recuperar su estructura de austenita y así su forma original, como se muestra en la figura 2.4.

Esta capacidad de ser deformado en frío y recuperar su forma original al ser calentado, ha hecho que el uso de alambres de nitinol sea explorado en diversas aplicaciones, tanto artísticas[3] como científicas y médicas, a modo de tendón en actuación lineal y demases. Su uso como actuador lineal es de particular interés para este proyecto y ya ha sido probado

en líneas electrónicas de braille[18] (figura 2.5), sin embargo, dada la naturaleza de su funcionamiento, surgen consideraciones importantes a tener en cuenta a la hora de diseñar e implementar.

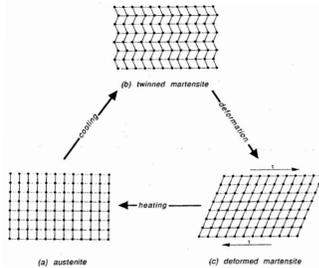


Figura 2.4: Ciclo de Austenita-Martensita

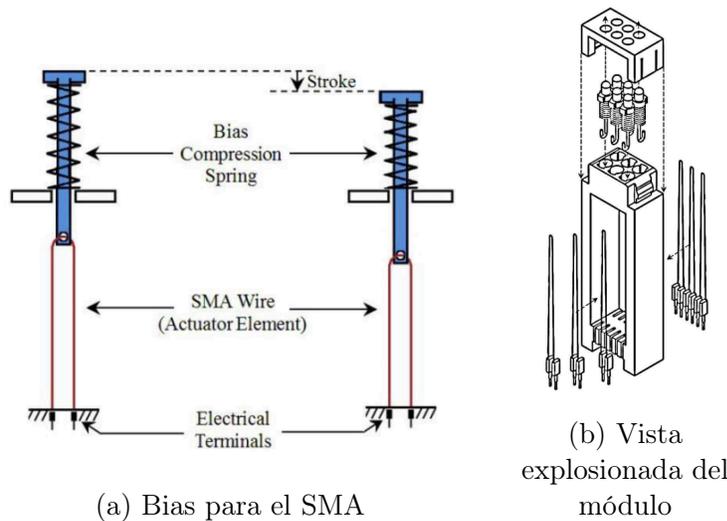


Figura 2.5: Módulo de panel braille implementado con SMA

Para explotar su propiedad de recuperación se necesita un *bias* mecánico que haga regresar el actuador a su posición de reposo, lo cual debido a la histéresis presente en el ciclo no es del todo predecible, generando variaciones en ésta[17], además de significar complejidad extra en la construcción. Por lo tanto, para tener un adecuado control de la posición del actuador y no dañarlo por sobrecalentamiento, se requiere de constante y preciso accionamiento, aspecto importante a considerar en aplicaciones de posición no binaria, donde el uso de PWM se presenta como una buena opción[10][1]. Por otra parte es importante considerar que el rango de movimiento se sitúa en unos pocos milímetros, no siendo idóneo para cualquier aplicación, a pesar de que el uso de alambres en espiral mejora este punto.

Dada la gran cantidad de módulos que pretende incorporar el proyecto, resulta también importante tomar en consideración el gasto energético. Cada alambre de nitinol puede llegar a consumir aproximadamente 6W en activación[20], además de requerir un buen flujo de aire u otra alternativa de refrigeración para retornar al estado de reposo.

### 2.2.2. Tipos comunes de motor

Antes de explicar los próximos dos mecanismos, es conveniente detenerse en los tipos de motor que se utilizan comúnmente para accionarlos en aplicaciones de baja potencia, como lo es este proyecto.

#### •Brushed DC:

El clásico motor de corriente continua, su rotación es generada —en su versión más básica— por un par de imanes permanentes en el estator, los cuales producen un campo magnético en su interior. Al fluir corriente por la bobina del rotor, ésta genera torque y rota para alinear su propio campo con el del estator, en ese momento ocurre la conmutación por medio de escobillas, que al invertir la polaridad de la bobina la impulsan a continuar su rotación.

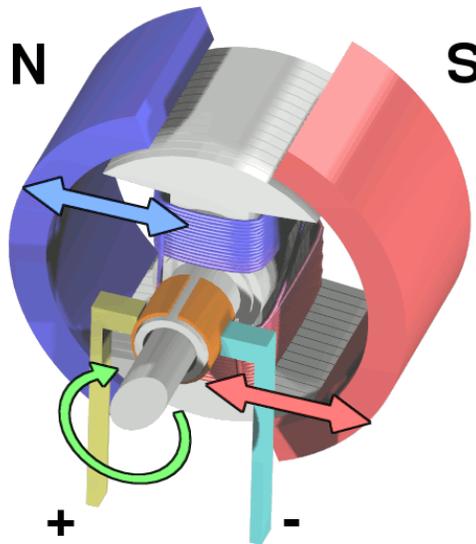


Figura 2.6: Interior de motor DC.

Sin electrónica de por medio, su sentido de giro estará dado por la polaridad de la alimentación. Para control bidireccional y de velocidad se requiere de un puente H. Además si se requiere además control de posición, resulta estrictamente necesario el uso de encoder o potenciómetro.

#### •Stepper:

Los motores paso a paso o *stepper*, son un tipo particular de motor de imán permanente, que realizan movimientos angulares discretos mediante una secuencia definida de impulsos cuidadosamente coordinados para avanzar un paso en una dirección o la otra otra (figura 2.7). Existen de diversos tamaños, potencias y resoluciones.

Un especial atractivo que presentan los motores stepper versus otras alternativas, es la potencial capacidad de prescindir de encoders para su control de posición, abriendo la posibilidad de realizar el control en lazo abierto, aunque esto significa perder la capacidad de recuperarse frente a eventuales pasos perdidos. Cabe notar que la precisa secuencia que se

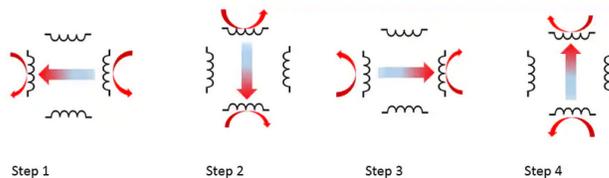


Figura 2.7: Secuencia de accionamiento de un stepper.

necesita para su control requiere de electrónica más compleja que un motor DC, existiendo para esto circuitos integrados y controladoras dedicadas.

### 2.2.3. Transmisión de hilo

Notable por su sencillez y precisión, el par hilo-tuerca es un mecanismo bastante útil para tareas que requieran de traslaciones largas y/o controladas, en las cuales se puede tener hilo fijo con tuerca móvil o viceversa. Aparece de inmediato la necesidad de un motor para efectuar el movimiento, cuyo tipo y montaje dependerán de los requerimientos en términos de carga, precisión y velocidad, trayendo consigo consideraciones de espacio y construcción que deben ser tomadas en cuenta al momento de diseñar.



(a) Plataforma de carga en observatorio Gemini



(b) Stepper usado comunmente en impresoras 3D

Figura 2.8: Ejemplos de sistema hilo-tuerca

La simpleza y precisión de su control hacen que sea ampliamente usado en impresoras 3D mediante motores paso a paso, plataformas de carga (figura 2.8) mediante motores de inducción de alta potencia, o en servomotores lineales mediante motores DC.

### 2.2.4. Transmisión de engrane

Consiste en un motor con un engrane adosado a su eje, el cual en contacto con una guía dentada adecuada al engrane, genera la transmisión directa de la rotación del motor a la traslación de la guía. Una variante de este principio es el que se observa comúnmente en impresoras de inyección de tinta y potenciómetros lineales motorizados (figura 2.9), donde la tracción del cabezal no es con una guía rígida, sino que es llevada a cabo a través de una correa de transmisión.

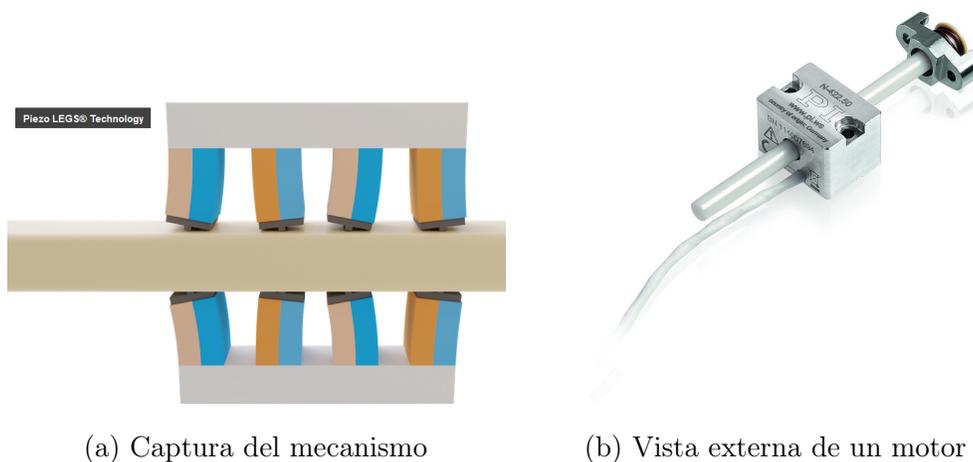


Figura 2.9: Potenciómetro

### 2.2.5. Piezomotor Lineal

Una interesante aplicación de los piezoeléctricos, que los lleva más allá del sensado o la acción microscópica directa, son los denominados *Piezo Motores* (figura 2.10), que emplean estos elementos en un conjunto coordinado, actuando en sincronía para producir la traslación o rotación de un eje según el tipo de motor. Si bien no se caracterizan por su fuerza, poseen en general resolución nanométrica, funcionamiento de bajísimo ruido y alta velocidad de respuesta, además de no ser magnéticos y tener excelente desempeño en vacío. Esto los hace ideales para aplicaciones de alta precisión, entornos de baja presión y donde se requiera movimiento bajo fuertes campos magnéticos.

En la industria se ofrecen en distintos formatos y tamaños, yendo desde los pocos milímetros a varios centímetros, variando enormemente de acuerdo a la aplicación a la que estén enfocados, teniendo como gran punto en común un nivel de costo prohibitivo para el usuario común.



(a) Captura del mecanismo

(b) Vista externa de un motor

Figura 2.10: Piezomotor lineal

### 2.2.6. Telescópicos

Se caracterizan por su forma compacta y largo alcance, ya que su despliegue funciona mediante el ensamblaje progresivo de piezas, entre los cuales se encuentran distintos tipos.

Helical Band (conocido también como *Spiralift*, de Gala Systems) es un sistema en el cual una banda helicoidal continua, compactamente almacenada, gira y emerge a medida que se auto-ensambla en forma de pilar, siendo usado principalmente para elevar plataformas.

Mientras que Helical Band es una banda continua, existen también sistemas que utilizan ensamble tipo cremallera llamados Rigid Chain, en los cuales ambas líneas se encuentran originalmente paralelas al suelo y son tiradas desde el centro, donde emergen ensambladas a 90°. Ambos se pueden observar claramente en la figura 2.11.

Debido a su aplicación principal, sólo existen a grandes escalas, en el orden de las decenas de centímetros y con costos muy elevados.

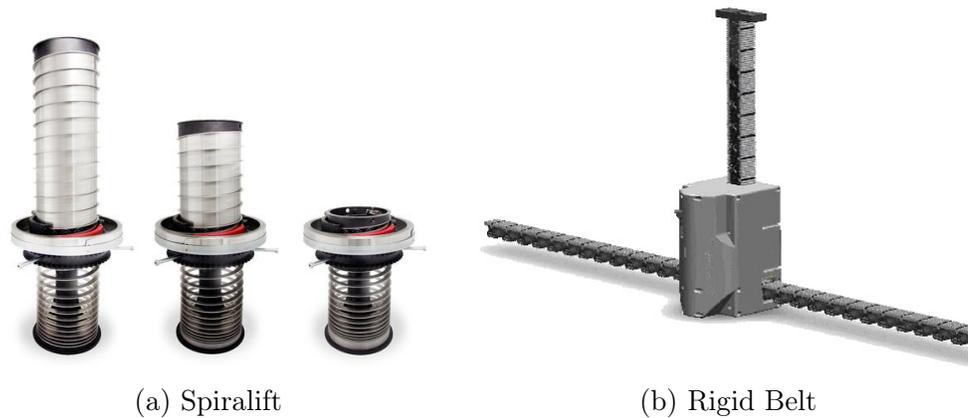


Figura 2.11: Actuadores Telescópicos

### 2.2.7. Hidráulica

Éstos sistemas funcionan con el clásico mecanismo cilindro-pistón (figura 2.12), donde este último es impulsado por un líquido a presión, generalmente proveniente de un compresor, con su flujo controlado por una válvula. Resulta interesante el hecho de poder controlar muchos actuadores con un solo compresor, requiriendo claramente una válvula para cada uno, además su estructura hace posible la existencia de actuadores largos y delgados con largo recorrido. El control de posición mediante el accionamiento controlado de válvula se encuentra bien estudiado [14][2].

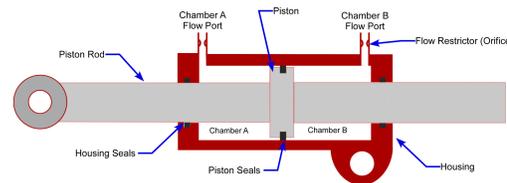


Figura 2.12: Actuador de Cilindro

### 2.2.8. Neumática

Entre los actuadores accionados por aire se pueden encontrar actuadores rígidos y blandos, encontrándose en la primera categoría los tipo cilindro-pistón, similar a los hidráulicos, donde el control también se encuentra bien estudiado [8], aunque dada la naturaleza compresible del aire, resulta menos confiable que otras opciones y se usan normalmente de forma binaria.

En la segunda categoría se encuentran los SPA (*Soft Pneumatic Actuator*) o actuadores neumáticos blandos, que pueden actuar por inflación[4] o por vacío[6][15]. En este caso, el

tipo de actuación que se obtenga depende estrictamente de la estructura interna del dispositivo, pudiendo conseguir movimientos bastante peculiares, como contracción en forma de espiral[16] (figura 2.13) u otros.

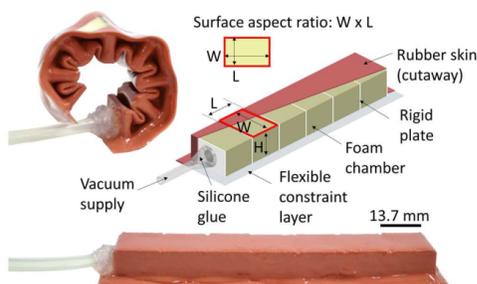


Figura 2.13: V-SPA con movimiento de enrosque

### 2.2.9. EAP (Electroactive Polymer)

Un campo que está siendo últimamente explorado dentro de la ciencia de materiales aplicada a la robótica es el del uso de polímeros electroactivos para construir actuadores livianos y silenciosos. Estos polímeros son materiales que sufren deformación en respuesta a estímulos eléctricos, similar a las fibras musculares. Si bien aún se encuentran en fase de investigación y experimentación, se ha explorado el uso de fibras como actuadores lineales[11], similares a músculos[5] (figura 2.14).

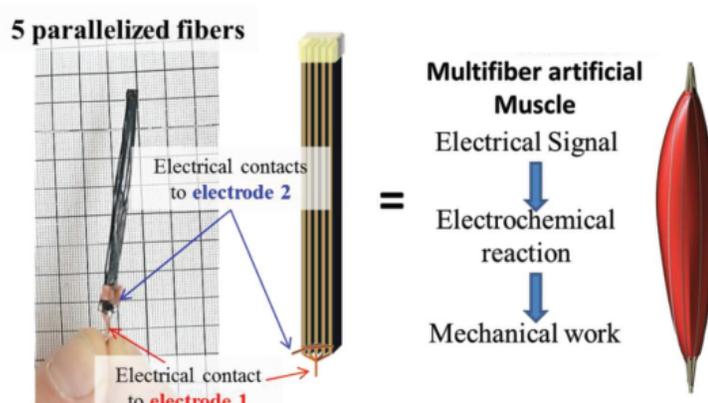


Figura 2.14: Fibra muscular emulada con EAP

## 2.3. Paneles existentes

En el marco de las interfaces humano-computadora (HCI), se han desarrollado diferentes dispositivos de interacción tangible, cada uno con sus particularidades técnicas, enfoques y limitaciones.

### 2.3.1. InForm

En 2013 el MIT Tangible Media Group sacó a la luz un dispositivo de interacción tangible capaz de generar en tiempo real superficies tridimensionales a modo de interfaz de usuario (*shape-changing UIs*)[7], explorando distintas posibilidades que presenta esta nueva dimensión, tanto en la experiencia de usuario como en la interacción con objetos (figura 2.15). Dentro de sus demostraciones se ve la interacción a distancia, la generación de geometrías a partir de inputs de usuario, visualización de funciones 3D, entre otros.

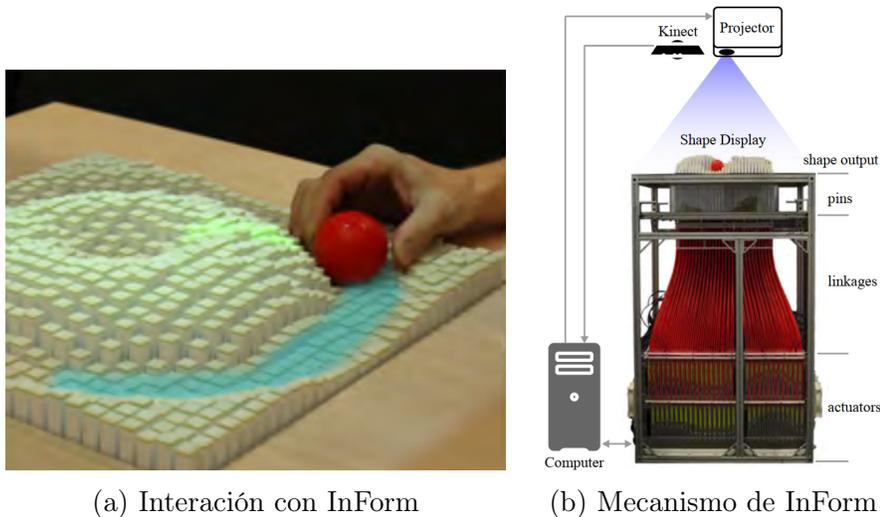


Figura 2.15: InForm

El panel de 30x30 “píxeles” está actuado por 900 potenciómetros lineales motorizados, cada uno unido a un pin de poliestireno a través de una guía de nylon para transmitir el movimiento y lograr una mejor resolución que la que se lograría al conectarse directamente, utilizando finalmente pines de 20x20mm capaces de sobresalir hasta 100mm de la superficie. Su control de posición es realizado a través de un control PID realimentado por la salida de los potenciómetros.

Mientras tanto, la detección de inputs de usuario es realizada a través de una Kinect y los efectos visuales se muestran a través de un proyector que genera imágenes sobre el panel, enriqueciendo así la experiencia.

### 2.3.2. Materiable

Materiable[13] también es un proyecto creado por el MIT Tangible Media Group, de apariencia similar a InForm, pero enfocado en replicar la sensación al tacto de diversos materiales. Esto se lleva a cabo gracias a actuadores con respuesta háptica, capaces de emular los patrones de deformación y firmeza de dichos materiales, en respuesta a la presión ejercida externamente por el usuario (figura 2.16), añadiendo así una dimensión al campo de las *shape-changing UIs*.



Figura 2.16: Interacción de usuarios con Materiable

### 2.3.3. InForce

Este panel fabricado por el MIT Tangible Media Group, es una tercera iteración en torno a los conceptos de shape-changing UIs trabajados en los paneles antes mencionados, donde cada proyecto aborda sólo un aspecto de ellas, con InForm explorando la generación de superficies, y Materiable la respuesta háptica.

InForce[12] integra ambas cualidades en un solo dispositivo, que no cuenta con un gran panel como sus predecesores, pero utiliza actuadores de mejor calidad y un sistema de control más refinado. Éste se encuentra enfocado en emular situaciones reales en las que sea necesario adquirir información o actuar sobre la respuesta sensorial, como por ejemplo, al tomar pulso o practicar RCP (figura 2.17).

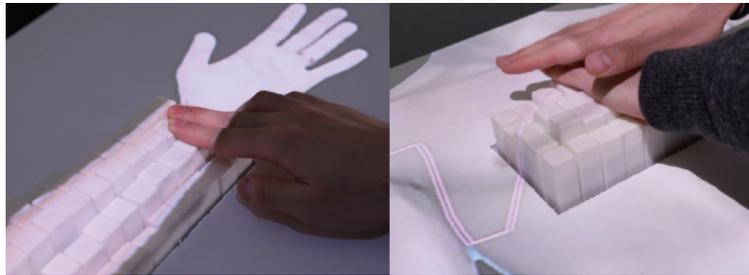


Figura 2.17: InForce. A la izquierda un simulador de pulso, a la derecha un simulador de RCP.

### 2.3.4. shapeShift

El equipo de Shape LAB en la Universidad de Stanford, desarrolló shapeShift[19], una propuesta con principios similares a InForm, pero con foco en ofrecer movilidad y un factor de forma compacto.

Esta vez la exploración de la superficie que se quiere mostrar no se realiza sólo recorriendo el panel de 9x17.5cm con “píxeles” de 4.8x4.8mm (figura 2.18), sino que desplazándolo a través de una mesa de trabajo, en la cual el sistema al identificar la posición espacial del panel, modifica su relieve de acuerdo a los objetos “presentes” como si realmente estuvieran ahí.

El sistema de actuación es similar a InForce, realizado con materiales de bajo costo,

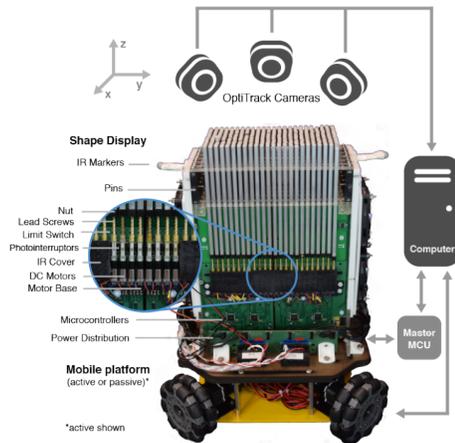


Figura 2.18: Estructura de shapeShift

utilizando también actuación directa, pero de motores DC con sistema de hilo-tuerca e implementando su propio sistema de control ad-hoc.

### 2.3.5. Mediante freno electrostático

En este proyecto, aún sin nombre definido, también proveniente del Shape Lab de Stanford, se presenta una alternativa al uso de motores, con el potencial de mejorar tanto la resolución como el costo en materiales y consumo energético.

En el panel se utilizan pins de latón que se elevan simultáneamente con una plataforma, que luego desciende para dejarlos caer por gravedad. Éstos son detenidos en el camino en la posición deseada por frenos adhesivos electrostáticos[21], recreando así la superficie objetivo. Este método sacrifica el dinamismo con el que cuentan los proyectos mencionados anteriormente, ya que para actualización de la representación es necesario elevar todos los pines nuevamente (figura 2.19).

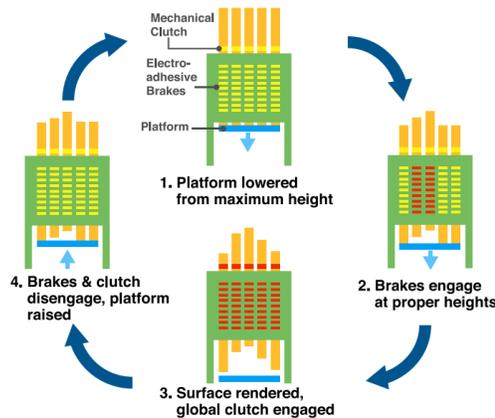


Figura 2.19: Ciclo de trabajo del panel

El ciclo para generar una representación se compone de cuatro acciones: Liberar los frenos, levantar la plataforma, bajarla y activar los frenos a la altura correspondiente para así generar

la superficie deseada.

Los resultados son bastante satisfactorios en términos de figuras obtenidas y consumo energético, aunque aún es una tecnología en desarrollo y hay temas que solucionar en términos de fuerza y escalabilidad.

### 2.3.6. Mediante actuadores blandos de vacío

Este proyecto presenta una propuesta similar a InForm, pero utilizando actuadores blandos, específicamente V-SPA (Actuadores neumáticos blandos de vacío, por sus siglas en inglés). El uso de esta tecnología permite una construcción bastante compacta y modular, por lo que en principio se podría implementar un panel de tamaño arbitrario. Se presenta una buena alternativa para la manipulación de objetos delicados con respecto a sus contrapartes rígidas, mientras que en términos de representación de superficies se queda atrás debido a su restringido rango y precisión vertical como se puede apreciar en la figura 2.20.

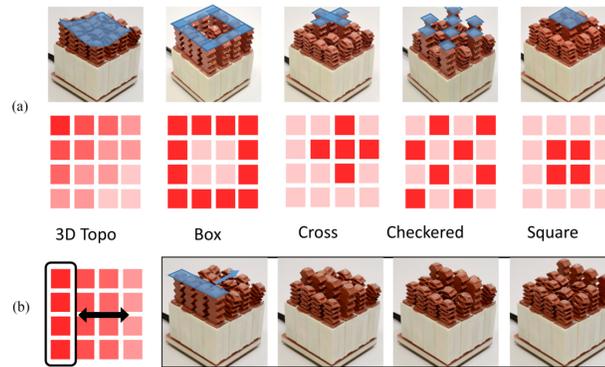


Figura 2.20: Panel en acción

### 2.3.7. Shape Clip

Este proyecto proveniente de la Universidad de Lancaster plantea un propósito completamente diferente a los anteriores paneles[9], pues el foco esta vez no está en la interacción con las superficies en sí, sino en la visualización y en presentar una herramienta de uso sencillo para diseñadores.

Se trata de un diseño altamente modular donde la altura de los actuadores no está controlada por un sistema centralizado, de hecho los módulos mismos no están restringidos a una posición espacial en particular, son todos completamente independientes entre sí y están hechos para reaccionar independientemente y determinar su altura de acuerdo al nivel de brillo detectado bajo ellos. Para esto, cada módulo cuenta con un actuador lineal de tipo hilo-tuerca, un LDR (Foto-resistencia) en su base y un microcontrolador. Gracias a estas características, el diseñador puede situar los módulos donde quiera y generar relieves simplemente ajustando el color y brillo de la imagen en la pantalla (figura 2.21).

Si bien la resolución espacial no permite crear representaciones tan fieles, resulta una prueba de concepto bastante interesante, donde la ausencia de un sistema central se traduce



Figura 2.21: Actuadores de Shape Clip

en portabilidad y sencillez en su montaje. Esto nos lleva al siguiente tema, porque en caso de existir una unidad central para coordinar el movimiento de distintos módulos como se pretende con este proyecto, es necesario comunicarlos de alguna manera.

## 2.4. Interfaces de Comunicación en Microcontroladores

Gracias a que comúnmente requieren de pocas conexiones para funcionar, las interfaces de comunicación serial resultan de particular utilidad para interconectar microcontroladores entre sí o a una unidad coordinadora, ya que dependiendo del integrado en cuestión, puede haber un número bastante limitado de puertos I/O. Es por esto que en muchos casos los microcontroladores incluyen en su interior unidades dedicadas a este tipo de tarea.

Dentro de ellos existen protocolos síncronos, regidos por una señal de reloj común a todos los dispositivos involucrados, y protocolos asíncronos, que no cuentan con dicha señal, cada uno con sus propias ventajas, desventajas y posibles usos. A continuación se presentan los más comunes.

### 2.4.1. UART: Universal Asynchronous Receiver/Transmitter

Es una interfaz de comunicación asíncrona que consta simplemente de tres líneas, dos de transmisión/recepción (una en cada sentido) y tierra. Estas líneas independientes permiten que la comunicación sea full-duplex, es decir, ambas partes pueden enviar o recibir datos simultáneamente.

Como se puede observar en la figura 2.22, el funcionamiento de esta interfaz es a grandes rasgos muy sencillo, estableciendo una conexión directa entre dos dispositivos, mediante la cual se pueden comunicar utilizando el esquema básico de transmisión ahí presente, abriendo paso a la interrogante sobre cómo se realiza la correcta adquisición de esos datos.

Al ser asíncrona, las condiciones de comunicación deben estar pactadas de antemano entre ambos dispositivos, acordando la tasa de transmisión para asegurar una recepción adecuada una vez detectado el inicio de ésta. Esta misma asincronía es la que limita su uso a velocidades bajas, aunque usualmente son suficientes para efectos de comunicación entre

microcontroladores, o entre microcontrolador y computador.

Otra limitación que puede significar una desventaja en diversos contextos, es el hecho de soportar la interconexión de sólo dos dispositivos.

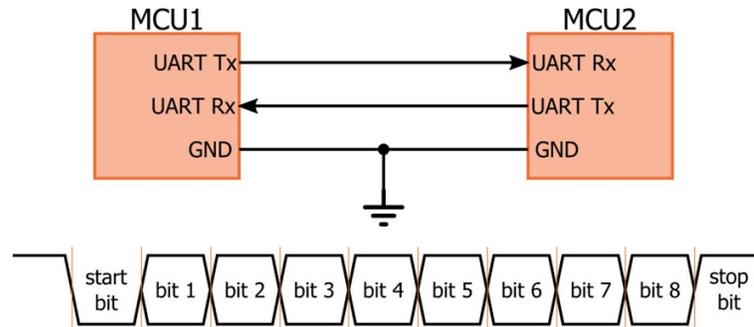
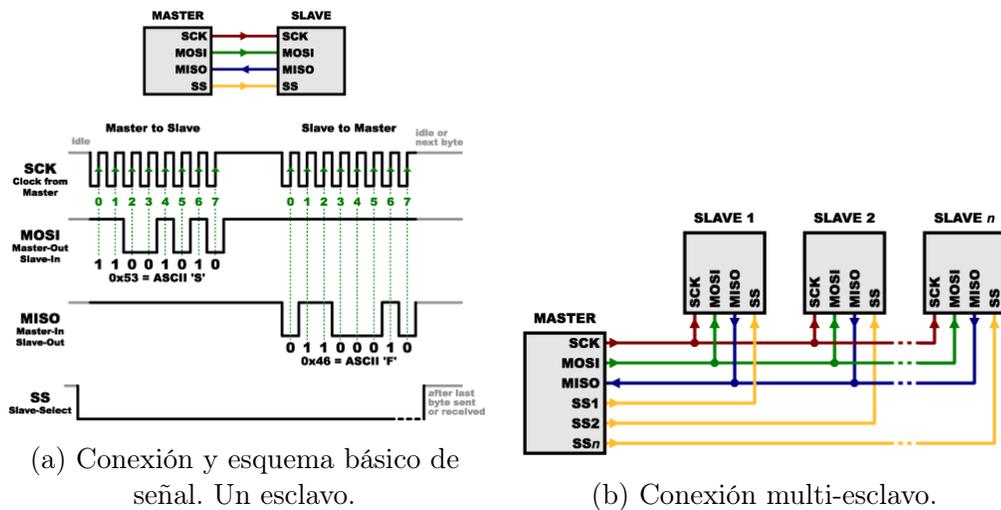


Figura 2.22: Esquema Básico UART

## 2.4.2. SPI: Serial Peripheral Interface

SPI es una interfaz de comunicación serial ampliamente usada en microcontroladores para comunicarse con diversos periféricos. Funciona bajo un esquema maestro-esclavo y al igual que UART, permite comunicación full-duplex a través de las líneas independientes para envío y recepción de datos entre maestro y esclavo(s) (Figura 2.23).

Al ser una interfaz síncrona, requiere una línea dedicada para la señal de reloj, la cual es siempre generada por el maestro, y cuyo uso permite alcanzar altas velocidades, que al ser solamente una especificación de interfaz, varían dependiendo de las especificaciones del dispositivo en cuestión.



(a) Conexión y esquema básico de señal. Un esclavo.

(b) Conexión multi-esclavo.

Figura 2.23: Conexiones SPI

Para llevar a cabo la comunicación, es necesario que la unidad maestra lleve a 0 la línea de Chip Select (o Slave Select) además de proveer la señal de reloj, lo cual abre naturalmente las

puertas al uso de múltiples esclavos a partir de múltiples líneas de selección como se muestra en el diagrama mencionado anteriormente.

Para alternar de esclavo, basta con accionar la línea deseada, siempre una a la vez. Esto resulta conveniente, pero evidencia de inmediato un problema de escalabilidad, ya que cada esclavo extra significa otra línea de control, y cuando la cantidad de puertos es limitada, deja de ser un problema trivial. Frente a ello, las soluciones más ampliamente utilizadas son multiplexores o conversores paralelo-serial, para reducir así la cantidad de líneas necesarias en la unidad maestra, o la conexión tipo Daisy-Chain, que se ilustra a continuación (Figura 2.24).

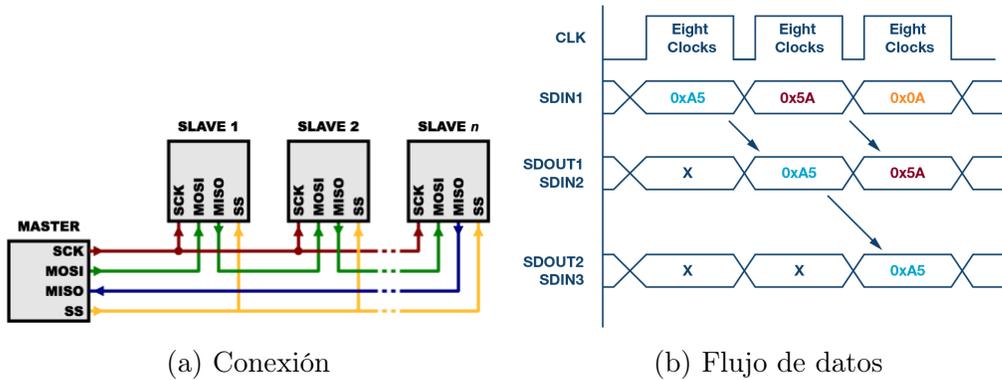


Figura 2.24: Múltiples esclavos en Daisy-Chain

La conexión tipo Daisy-Chain, consiste básicamente en accionar todos los esclavos usando un único chip select, pero coordinando su funcionamiento de manera tal que cada esclavo actúe como relevo en una cadena de transmisión de datos, esto permite ahorrar una enorme cantidad de puertos a cambio de velocidad.

### 2.4.3. I2C: Inter-Integrated-Circuit

Esta interfaz de comunicación síncrona patentada por Philips es simple pero poderosa, está diseñada para comunicar múltiples dispositivos utilizando solamente dos líneas, SCL (clock) y SDA (datos), como se muestra en la figura 2.25. Es ampliamente utilizada en microcontroladores por su gran flexibilidad.

Al contar con sólo una línea para transmitir datos, se trata de una interfaz half-duplex, es decir, permite enviar o recibir datos entre maestro y esclavo, pero sólo una a la vez. A cambio de esto, es posible comunicar múltiples dispositivos sin incrementar la cantidad de puertos necesarios en la unidad maestra.

Su principal particularidad se encuentra en el uso de direcciones internas de 7 bits para identificar cada dispositivo en el bus, esto confiere al sistema gran flexibilidad y expansibilidad, permitiendo interconectar teóricamente hasta 128 dispositivos a cambio de agregar un *overhead* considerable con respecto a otras interfaces al momento de transmitir datos. Normalmente el número efectivo resulta ser un poco menor debido a la existencia de direcciones reservadas.

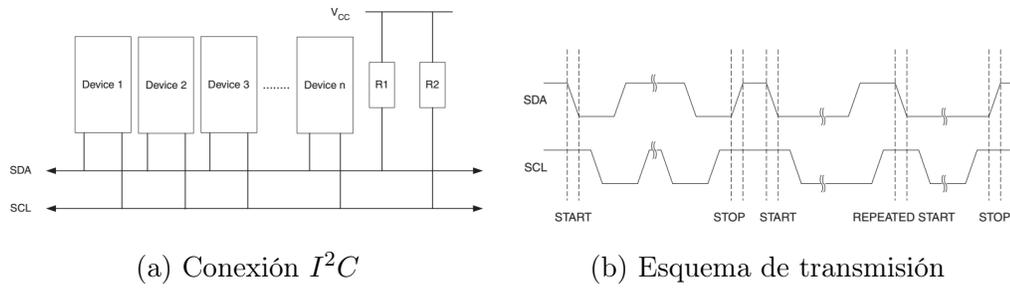


Figura 2.25: Esquemas básicos  $I^2C$

Su velocidad de transmisión y distancia máxima se encuentran limitados tanto por las especificaciones de cada dispositivo como por la capacitancia de línea entre SCL y SDA, por lo cual no se recomienda usar buses de más de 3 metros. Su variante más rápida alcanza velocidades de hasta 5Mbps.

# Capítulo 3

## Metodología

### 3.1. Ruta Crítica

El presente proyecto consta de varias etapas en diseño, adquisición de materiales e implementación, por esto se elabora un plan, que a modo general se puede condensar en actividades/hitos clave expresados en la figura 3.1. Sin embargo, el contexto de confinamiento por la pandemia de COVID-19 puede dificultar la realización de algunas etapas principalmente relacionadas a la implementación final.

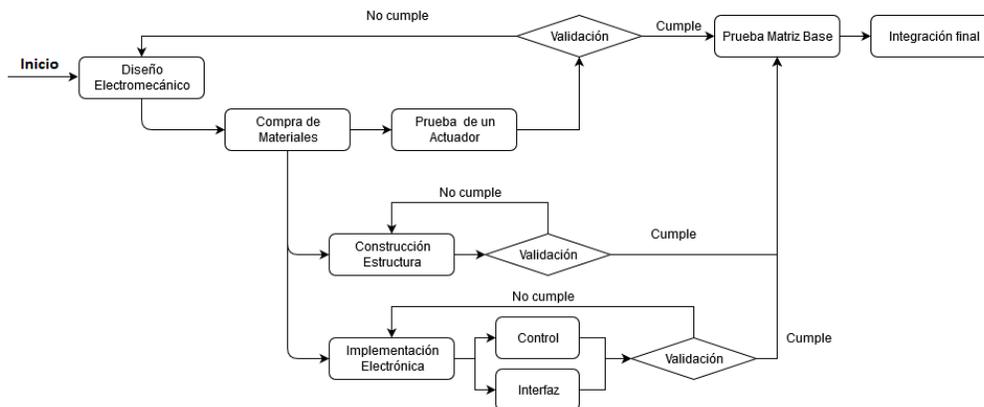


Figura 3.1: Ruta crítica del proyecto. Esquema resumido

Se puede observar que hay etapas codependientes que influyen entre sí, más detalle a continuación.

#### 3.1.1. Diseño electromecánico

Es la primera y más urgente tarea del proyecto, durante esta etapa se deben definir todos los aspectos esenciales, tales como:

- **Tipo de actuador:** Se debe escoger un tipo de actuación que se adecúe a los requerimientos del proyecto en términos de costo, espacio, resolución y complejidad, conside-

rando las limitaciones de tiempo y presupuesto.

- **Método de control para cada actuador:** Nuevamente ateniéndose a las restricciones antes nombradas, se debe diseñar un sistema de medición y control de posición para los actuadores.
- **Decisión de construcción:** Determinar de qué manera se lleva a cabo la integración de múltiples actuadores. ¿Es una gran matriz? ¿Son módulos acoplables y escalables?. Responder estas preguntas resulta vital para el diseño de la electrónica y los soportes estructurales.
- **Método de control y comunicación para integrar varios actuadores:** Una vez definido el método de control individual, es necesario definir de qué manera se coordina la entrega de comandos, definir el nivel de modularidad, determinar los requerimientos de procesamiento y comunicación, tanto de los módulos como de la unidad central. Este paso permite decidir qué tipo de electrónica se debería usar e implementar. Debe ser lo más flexible posible para adaptarse en caso de que ya avanzado el tiempo se requiera cambiar de tipo o modelo de actuador.
- **Interfaz para entregar al dispositivo la información necesaria:** Definir el “idioma” en que se entrega la información necesaria al dispositivo, determinar cómo se iba a comunicar el usuario.
- **Alimentación:** Era parte importante del diseño determinar correctamente los requerimientos energéticos del sistema y explicitar claramente cómo se va a suministrar.
- **Construcción:** No hay integración sin estructura, por lo tanto se debía diseñar cuidadosamente el montaje donde se implementaría el dispositivo, especificando material y método de fabricación.

### 3.1.2. Prueba de un actuador

Este paso está íntimamente ligado a la etapa de diseño y conlleva un ciclo de iteraciones junto a ella, por lo que se efectúa lo antes posible, puesto que la adquisición de los productos puede tomar demasiado tiempo y retrasar todo, resulta imperioso verificar prontamente si el tipo de actuador propuesto cumple realmente con los requerimientos del proyecto. Para esto se debe armar una configuración de prueba, y en caso de resultar exitosa proceder a caracterizar los aspectos de interés, como consumo energético, tiempo de respuesta, resolución, replicabilidad y rango de movimiento.

### 3.1.3. Construcción de estructura

Una vez completa la fase de diseño y prueba individual de actuación, se debe comenzar a construir la estructura donde se monta la integración final. Se utiliza prototipado rápido para probar conceptos.

### 3.1.4. Implementación de la electrónica

En paralelo a la construcción, se implementan los diseños de la electrónica, se deben imprimir las PCB necesarias, montar, soldar, probar, además de programar lo que sea necesario.

### **3.1.5. Prueba de matriz base**

Una vez listas todas las etapas anteriores se procede a montar y hacer pruebas con varios actuadores coordinados.

### **3.1.6. Integración y pruebas finales**

Integrar todos los módulos, realizar pruebas de funcionamiento, probar en terreno y obtener experiencias de usuario, realizar demostraciones, encuestas.

# Capítulo 4

## Desarrollo

Dado que el proyecto se desarrolla durante la pandemia del año 2020, no está exento de problemas y limitaciones tanto logísticas, como de tiempo y presupuesto. Esto influye fuertemente en las decisiones de diseño y elección de componentes, las cuales se detallan a continuación.

Si bien por motivos de orden el presente trabajo se presenta en forma lineal, es importante notar que el proceso es fuertemente iterativo, donde decisiones iniciales son modificadas por procesos posteriores. En algunos casos no es posible aplicar las reformas debido a complicaciones de tiempo, movilización y materiales.

### 4.1. Esquema general

Para llevar a cabo el proyecto, se establece un esquema electromecánico general que es necesario desmenuzar para llegar al detalle específico de su funcionamiento. Como se puede observar en la figura 4.1, el proyecto consiste principalmente de tres grandes componentes:

- La interfaz humano-máquina, rol cumplido por un computador que tiene como rol principal comunicarse con el dispositivo, e indicarle exactamente cómo debe actuar para lograr las representaciones deseadas.
- Los módulos de control y actuación, que se encargan de llevar a cabo dichas acciones sobre el dispositivo.
- La estructura mecánica, encargada de implementar los mecanismos que, mediante la acción de los actuadores, generarán en ella la representación buscada.

### 4.2. Elección de actuadores

Existen muchas tecnologías atractivas para el desarrollo de un proyecto de estas características, especialmente los piezomotores lineales, sin embargo, debido a su elevadísimo costo deben ser descartados de inmediato. También se considera utilizar SMA y EAP, sin embargo, los SMA son muy difíciles de mantener en una posición específica, su costo también es ele-

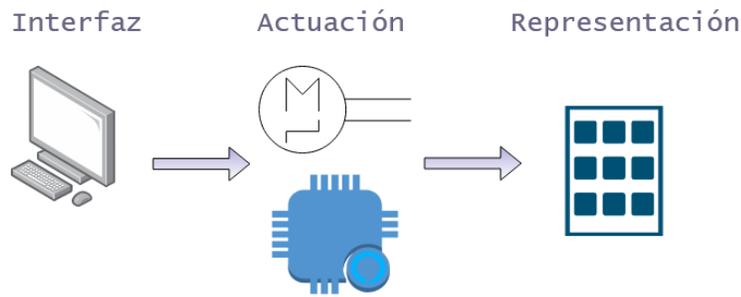


Figura 4.1: Bloques principales de diseño.

vado y los EAP se encuentran en etapa de desarrollo científico aún, por lo que no es posible conseguirlos aún, mucho menos en las cantidades que requiere un proyecto como éste.

Las restricciones antes mencionadas, y la intención inicial de enfocar el trabajo en la representación propuesta en la sección 4.10, llevan a decantar por motores stepper en pequeño formato con transmisión de hilo (figura 4.2), que resultan económicamente viables y son mucho más fáciles de conseguir que las otras opciones.



Figura 4.2: Motor stepper con hilo incorporado

Ya en plena pandemia —lo cual se traduce en imposibilidad para adquirir nuevos materiales— se da un giro importante al proyecto, volcándose a la opción descrita en la sección 4.11. Dicha implementación, para lograr la expansibilidad deseada, puede requerir el uso de motores más potentes, dejando en desuso los mostrados en esta sección.

Gracias al diseño del proyecto, y a que ambas opciones están pensadas para hacer uso de motores stepper, es un cambio que resulta transparente a todo el resto de la implementación, tanto a nivel de hardware como de programación de los micro controladores, donde el único cambio necesario es aumentar el umbral del limitador de corriente incorporado en los drivers.

#### 4.2.1. Características constructivas

Para evitar la espera potencialmente de meses que implica importar motores nuevos, los utilizados en el presente proyecto son obtenidos a partir de lectores de CD, por lo que se

Motor	Modelo	Largo[mm]	Recorrido[mm]	Pasos/Vuelta	I <sub>max</sub> [mA]
1	SM15DD	51.63	39.26	20	400
2	SM15DD	51.63	39.19	20	400
3	SM15DD	51.63	39.26	20	400
4	BX14C9	50.60	38.37	20	-
5	G514510CK	51.48	37.80	20	-
6	PL155-02	50.00	38.05	20	-
7	H24 9480CY	50.95	39.20	20	-

Tabla 4.1: Características Base de Motores

lleva a cabo la caracterización manual de cada uno de ellos para asegurar su funcionamiento. La disponibilidad de tanto motores como de sus respectivos controladores, se ve fuertemente limitada por el contexto de repentino confinamiento por la pandemia de COVID-19, por ello el proyecto se tiene que limitar a un prototipo de módulo de 3x2, al ser la única resolución bidimensional obtenible con los siete motores disponibles.

Debido a su origen, se examinan uno a uno las especificaciones de cada motor, las cuales se detallan en la tabla 4.1. Los motores se enumeran a medida que se extraen de sus respectivos lectores. Al ser de dispositivos similares (o idénticos en caso de los primeros tres), es esperable que todos tengan características prácticamente iguales, pero de todas maneras se comprueba.

Se puede observar que el largo del hilo más corto tiene menos de 2mm de diferencia con el más largo, y el recorrido efectivo que puede realizar cada carro a lo largo del riel en su construcción original de lector, es también prácticamente idéntico para efectos de este proyecto.

## 4.3. Drivers

Dada la elección de actuador, resulta necesario utilizar algún tipo de intermediario entre éstos y el controlador, ya que el común de los microcontroladores no son capaces de suministrar la corriente necesaria para mover los motores directamente desde sus puertos I/O.

### 4.3.1. Opciones

La opción más sencilla y económica parece ser el uso de puentes H como el L293D para controlar los motores directamente mediante señales provenientes del microcontrolador, sin embargo, el elevado costo e innecesaria complicación implicada decanta en la elección de otro tipo de controlador.

El control de los motores stepper requiere de precisa sincronización de los impulsos que se aplican a cada fase, pero en la actualidad existen circuitos integrados que llevan a cabo esa tarea mediante una sencilla interfaz que alivia buena parte del cómputo necesario. En vez de coordinar por software cada pulso específico de cada bobina, éstos traducen automáticamente dos sencillas señales —una para indicar dirección y otra para dar la orden de efectuar el paso— en el movimiento deseado, ofreciendo también microstepping (transición suave entre

pasos), limitación de corriente, protección, entre otros, además de ser capaces de manejar altas corrientes, altos voltajes, y tener un menor costo que la alternativa más rústica.

Entre los más utilizados se encuentran el Allegro **A4988** y el TI **DRV8825**, ambos ofrecidos en convenientes módulos ensamblados por Pololu (Figura 4.3), cuyas características principales se resumen en la tabla 4.2.



Figura 4.3: Módulos ensamblados por Pololu

	<b>A4988</b>	<b>DRV8825</b>
<b>Control I/O</b>	Enable, Reset, Sleep	Enable, Reset, Sleep, Fault
<b>V Logic</b>	5V	5V
<b><math>V_{max}</math> Motor</b>	35V	47V
<b><math>I_{max}</math></b>	2A	2.5A
<b><math>\mu</math>Step</b>	1/16 max.	1/32 max.
<b>Costo Local</b>	\$2.000	\$2.500
<b>Costo Imp.</b>	USD 0.73	USD 0.99

Tabla 4.2: Comparación Drivers

Por sus prestaciones superiores y costo sólo marginalmente mayor, se decide utilizar el DRV8825.

### 4.3.2. Configuración

Utilizando uno de los actuadores disponibles, se estudia la frecuencia y configuración de micro-step adecuada para lograr un funcionamiento suave y preciso, para ello se prueban distintas combinaciones, entre las cuales se escoge la de micro-stepping de 1/16 con frecuencia de 1kHz por su buen balance entre fluidez y velocidad.

## 4.4. Elementos esenciales del control

A nivel de micro controlador, hay tres componentes fundamentales que se necesitan para crear un módulo acabado e independiente, capaz de controlar efectivamente los actuadores.

- **Comando:** Establecer un formato de instrucción para comunicar las acciones a realizar. Se define una estructura muy sencilla que consiste en una lista de parámetros separados por coma en el siguiente orden, “Dirección  $I^2C$ , Pasos para motor 1, Pasos para motor 2, ..., Pasos para motor n”.
- **Parsing:** Extraer la información del comando y destinarla donde corresponde. Para esto se utiliza la librería *separador*, creada por Pablo Sánchez de *Ioticos*, con la cual resulta posible extraer de manera rápida los valores de cada comando para utilizarlos en el control del dispositivo.
- **Movimiento:** Llevar a cabo la acción solicitada. Se debe enviar a los drivers las señales adecuadas para cumplir con lo pedido en los comandos.

## 4.5. Secuencia de funcionamiento

Por motivos estructurales del presente informe, parece ser un proceso totalmente lineal, pero tal como se muestra en la ruta crítica, hay numerosas iteraciones y revisiones entre esta etapa y las anteriores, influyendo mutuamente en lo previamente establecido, debiendo atacar diversos problemas en el transcurso. A medida que se va consolidando el circuito, también lo hace la manera de controlarlo, llegando al diagrama general mostrado en la figura 4.4.

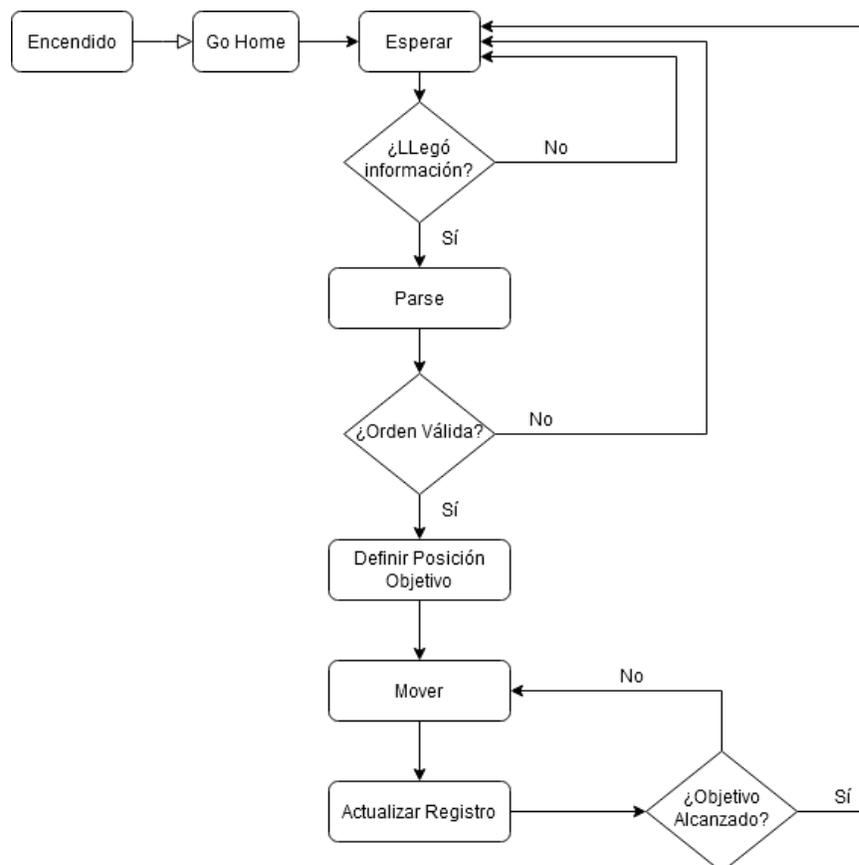


Figura 4.4: Diagrama de bloques simplificado del funcionamiento interno.

Se definen tres divisiones principales de funcionamiento:

- **Go Home:** Se ha indicado a los motores que se dirijan a su posición cero. Siempre se ejecuta al encender dispositivo.
- **Receiving:** Estado natural después de completado Go Home o Moving, a la espera de información de posición para los motores.
- **Moving:** Se ha iniciado la secuencia de movimiento, dura hasta que se completa el movimiento de todos los motores.

La secuencia de encendido establece la comunicación, configuración de puertos y lleva los motores a su posición inicial, mientras que el dispositivo pasa gran parte del tiempo en la segunda fase, esperando recibir la orden de movimiento desde la unidad maestra. Una vez recibido un mensaje, éste es examinado (*Parsing*) para comprobar que el contenido sea un comando válido, de así ser, se establece una posición objetivo para dar paso a la siguiente etapa.

La fase de movimiento se ejecuta un paso a la vez, llevando registro y actualizando cada vez la información de movimiento de cada motor, compuesta por posición actual, posición objetivo, desplazamiento restante y dirección de dicho desplazamiento. Esta fase se repite hasta que todos los motores han alcanzado su posición de destino, con lo cual se regresa nuevamente a la fase de espera.

Cabe destacar que el dispositivo en sí recibe la información de la manera más sencilla y directa posible, en un arreglo con la posición exacta que se quiere dar a cada motor. La traducción de distancia en milímetros a pasos está dada por la construcción de los motores, que recorren **3mm/vuelta**, es decir, **0.6mm/paso**, por lo tanto es necesario realizar el cálculo correspondiente en la unidad central antes de accionar los motores.

## 4.6. Opción de movimiento: Multiplexado

Se explora la posibilidad de usar multiplexión para controlar múltiples motores mediante un solo microcontrolador, usando sólo unos pocos de los limitados puertos I/O. En este caso, la única opción disponible localmente es el módulo multiplexor-demultiplexor de 16 canales-a-1 Nexperia **74HC4067**.

Utilizando un módulo multiplexor para cada señal necesaria, correspondientes a la orden de paso por un lado, y de dirección de giro por otro, es posible conectar hasta 16 motores utilizando sólo 5 pines, por lo cual la cantidad de pines necesarios para los 6 drivers presentes en este proyecto se reduce de 13 a casi un tercio, dejando espacio para otras funciones.

### 4.6.1. Esquema de multiplexión

En la siguiente figura se muestra a grosso modo el esquema de coordinación para el funcionamiento aparentemente paralelo de los motores.

### 4.6.2. Requisitos de tiempo

A continuación se presenta el detalle de los requerimientos temporales, de los drivers (figura 4.6), aspecto a tener en cuenta a la hora de controlar los motores.



Figura 4.5: Esquema de coordinación de multiplexado.

Timing Requirements			MIN	MAX	UNIT
1	$f_{STEP}$	Step frequency		250	kHz
2	$t_{WH}(STEP)$	Pulse duration, STEP high	1.9		$\mu s$
3	$t_{WL}(STEP)$	Pulse duration, STEP low	1.9		$\mu s$
4	$t_{SU}(STEP)$	Setup time, command before STEP rising	650		ns
5	$t_{H}(STEP)$	Hold time, command after STEP rising	650		ns
6	$t_{ENBL}$	Enable time, nENBL active to STEP	650		ns
7	$t_{WAKE}$	Wakeup time, nSLEEP inactive high to STEP input accepted		1.7	ms

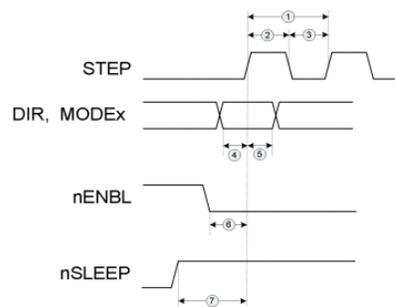


Figura 4.6: Requerimientos de timing del DRV8825. Extraído de su datasheet

Considerando que la velocidad de funcionamiento del microcontrolador es de sólo 16MHz, la cantidad de instrucciones necesarias para ejecutar cada acción entrega suficiente holgura. Los tiempos de propagación del módulo multiplexor son órdenes de magnitud más pequeños (máximo 18ns), por lo que no hace falta atenderlos en detalle.

### 4.6.3. Circuito

Por motivos de visualización (Figura 4.7), se modifica la disposición y cantidad de puertos tanto del micro controlador como de los multiplexores, ocultando los que no son utilizados y posicionando los restantes en el lugar más apropiado para su visualización.

La configuración de micro-step para los drivers se establece mediante tres inputs, M0, M1 y M2, por lo que para modificaciones y pruebas futuras, resulta conveniente conectarlos a un DIP switch para facilitar su selección. Experimentalmente se encuentra que hasta el momento la mejor configuración para operar estos motores es con microstep de 1/16.

Por motivos de disponibilidad de módulos multiplexores, no es posible implementar los fines de carrera (Interruptores de la parte superior del diagrama) en un tercer módulo, sin embargo, la cantidad de motores utilizados en este trabajo permiten conectar cada uno a un puerto I/O.

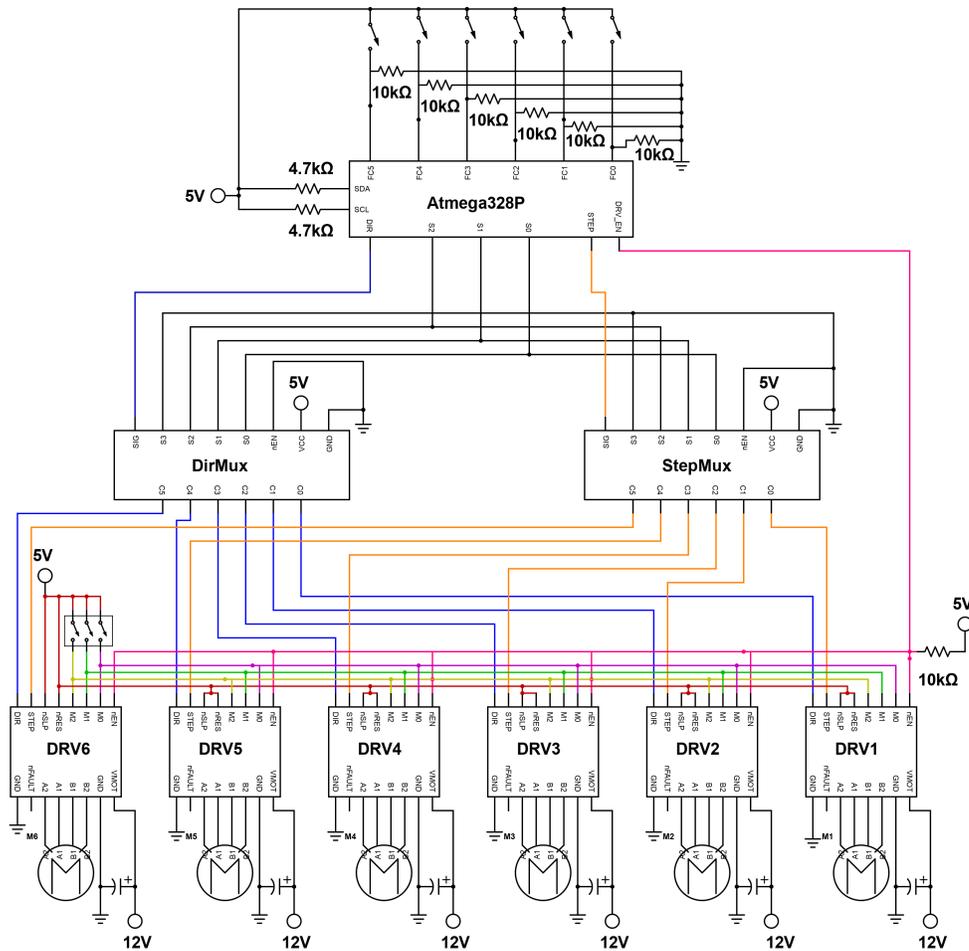


Figura 4.7: Circuito de control multiplexado.

Según la documentación de los drivers, se requiere que el capacitor entre VMOT y GND tenga un valor de  $100\mu F$ , número que por espacio no se incluye en el diagrama.

En vista de que el microcontrolador puede cambiar, y con miras a la implementación modular, se plasma en un diseño de PCB doble capa la parte correspondiente a drivers (figura 4.8), con su respectiva conexión a motores y micro controlador. Se decide dividir en módulos de 5 drivers por placa.

## 4.7. Opción de movimiento: Directo

Se explora también la opción de proporcionar las señales de control a los drivers directamente desde los puertos I/O del microcontrolador, a diferencia del esquema de control multiplexado de los drivers. Esto trae consigo distintas implicaciones que se detallan a continuación.

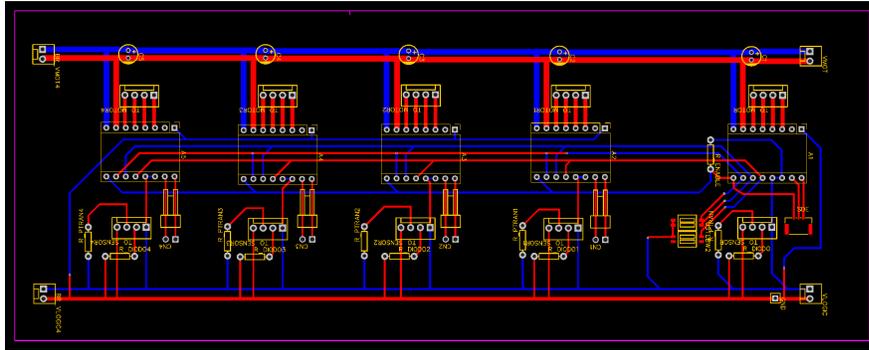


Figura 4.8: PCB para montar y conectar drivers.

### 4.7.1. Pros y Contras versus multiplexado

El control directo puede tener efecto positivo en términos de estabilidad de los drivers, ya que el relevo de las señales en el multiplexor puede generar efectos indeseados. Otra ventaja radica en la gran simplificación de la programación del micro controlador, junto a la operación realmente paralela.

Dichas ventajas no vienen sin sus respectivos *trade-offs*, siendo principalmente evidente la cantidad de motores que es posible manejar con un solo micro controlador, viéndose reducida de 16 a sólo 6. De todos modos el tipo de control que se realice debe ser totalmente transparente a los comandos, ya que lo importante es llevar a cabo el movimiento deseado de la mejor manera posible, que eventualmente en un futuro podría cambiar y debe ser posible implementarla sin cambiar sustancialmente el resto del sistema.

### 4.7.2. Circuito

La implementación de este sistema resulta bastante similar al anterior, con la diferencia de que ahora STEP y DIR de los controladores no pasan por los multiplexores, sino que se encuentran conectados directamente al micro controlador.

## 4.8. Alimentación

Gracias a los voltajes de funcionamiento de todos los dispositivos, con miras a la implementación y ensamblaje de varios módulos, resulta conveniente utilizar para su alimentación una fuente ATX, que proporciona alimentación de 5 y 12V de alta corriente (40A 5V, 36A 12V en una fuente de 600W), ideal para energizar hasta 100 motores sin preocupación.

## 4.9. Comunicación

La naturaleza del proyecto, en el cual se cuenta con un módulo maestro que debe comunicarse al un computador y a otros módulos esclavos (figura 4.9), lleva a determinar dos protocolos de comunicación a utilizar, los cuales se detallan a continuación.

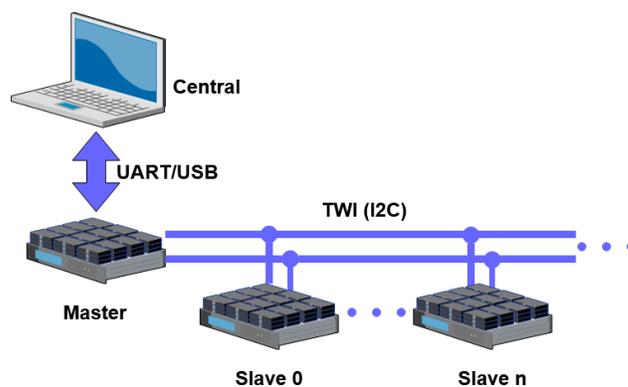


Figura 4.9: Esquema de conexión inter-módulos

### 4.9.1. Hacia Computador

Para comunicar microcontrolador y computador existen diversos protocolos compatibles, pero por su sencillez de implementación se decide por utilizar comunicación UART, la que gracias al conversor serial a USB presente en la placa de Arduino UNO, resulta ser la opción más atractiva.

### 4.9.2. Entre uC

Por su flexibilidad, sencillez y reducido uso de pines, se decide comunicar las unidades esclavas entre sí mediante  $I^2C$ , de manera similar a una topología de red tipo bus.

Debido a temas de licencia, estando  $I^2C$  patentado por Philips, ATMEL denominó la implementación de dicho protocolo en sus microcontroladores como TWI (Two-Wire Interface). Aunque, si bien no son exactamente idénticos, para efectos del proyecto son totalmente compatibles. El Atmega 328P tiene un módulo periférico de TWI en su interior, lo que facilita su uso. Sólo hay que tener en cuenta que utiliza un buffer de 32 bytes, por lo tanto un solo mensaje no puede exceder dicho largo.

### 4.9.3. Pruebas a realizar

Con objetivo de poner a prueba la capacidad del sistema para transmitir comandos desde el computador a la unidad maestra, y desde ésta a las unidades esclavas, se realizan dos tipos de prueba que se muestran a continuación.

- **Básica:** Consiste en enviar un texto sencillo desde el computador hasta una unidad esclava a través de la maestra y recibirlo de vuelta para comprobar su correcta recepción.
- **Ejecución de comando:** Una vez probada la capacidad de enviar texto arbitrario, se procede a comprobar que los comandos sean correctamente recibidos y ejecutados.

Ya con el problema de control parcialmente resuelto, es momento de pasar a definir cómo hacer uso de ese movimiento para lograr el objetivo, puesto que todo el control de motores resultaría en vano si no se ve reflejado en una representación tangible de una superficie, por lo tanto a continuación se presentan las dos implementaciones abordadas.

## 4.10. Mecanismo uno a uno

Una forma de lograr el objetivo es siguiendo la misma tónica de los proyectos ya existentes en el mundo, como InForm o shapeShift, donde cada pin es accionado independientemente por un motor. Dichos proyectos, al estar enfocados a una interacción más dinámica en conjunto con otros sentidos (incluida la vista) requieren de la rápida respuesta que puede proporcionar un sistema de esas características. Sin embargo, esto trae consigo diversas limitaciones constructivas dadas principalmente por la resolución deseada, donde se ve restringido el tamaño de los motores, el tipo de transmisión y el espacio para ubicar encoders, sensores hápticos y otros componentes de control.

En términos de costo y consumo energético también representa un desafío importante, ya que la cantidad de motores necesarios crece en la misma proporción que la cantidad de “píxeles” de la “imagen”, aumentando vertiginosamente incluso a resoluciones pequeñas. Algo aparentemente sencillo como 10x10 ya necesita 100 motores y todo lo que eso conlleva en cuanto a los factores antes mencionados.

La gran ventaja de este tipo de implementación es la rápida respuesta que proporciona el control paralelo de los actuadores sobre sus respectivos pines, además de requerir mecanismos más sencillos, a cambio de sacrificar resolución y eficiencia energética.

## 4.11. Mecanismo de matriz secuencial

Considerando los desafíos y restricciones inherentes a la opción anterior, y tomando en cuenta que el enfoque de este proyecto es diferente al de los existentes, principalmente en términos de público objetivo y experiencia que se le espera entregar, se evalúa si realmente valen la pena los sacrificios que se hacen en pos del dinamismo.

Los dispositivos mostrados anteriormente dedican gran parte de sus esfuerzos a la interacción física y visual con objetos en tiempo real. Por el contrario, este proyecto tiene como foco principal representar arte visual estático por medio del tacto, de manera lo más fidedigna posible, principalmente para no videntes, y por tanto buscando lograr la mayor resolución posible de forma económica, escalable, e idealmente manteniendo un bajo gasto energético.

De este modo, se evalúa otra propuesta que se presenta a continuación, con diferentes restricciones y ventajas.

### 4.11.1. Inspiración

Mientras que la primera opción tiene como fortaleza principal el dinamismo en desmedro de la resolución, lo que se busca en este proyecto va por otro camino, donde la misión es generar obras que se puedan sentir con calma y en detalle.

La propuesta que se explora en esta sección, toma como inspiración el funcionamiento del común de cámaras fotográficas y de vídeo, donde las imágenes no son generadas en todos sus píxeles simultáneamente, sino que línea por línea, mediante el denominado *Rolling Shutter*.

Esto trae consigo grandes beneficios en pos del objetivo, ya que para una “imagen” de  $a \cdot b$

“píxeles”, pasamos de necesitar  $a \cdot b$  motores a necesitar sólo  $a + b$  (figura 4.10), lo cual se traduce en una reducción sustancial en cuanto a costo y energía, además que permite un alto nivel de modularización y miniaturización.

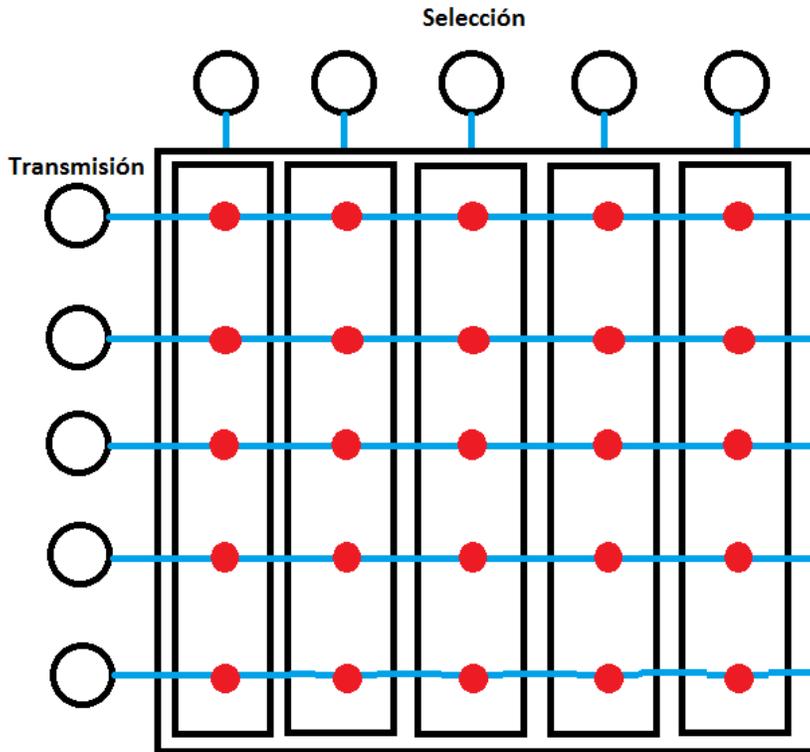


Figura 4.10: Bosquejo general de funcionamiento.

Se calcula que para un número dado  $m$  de motores, las dimensiones óptimas que maximizan la resolución obtenible están dadas por un cuadrado de lado  $\frac{m}{2}$  (en caso de  $m$  par), o por un rectángulo de lados  $\frac{m}{2}$  redondeados hacia arriba y hacia abajo respectivamente. En la figura 4.11 se puede ver un ejemplo de cómo varía la resolución de acuerdo a las dimensiones escogidas en base a un número dado de motores.

Como se puede observar, a diferencia de la opción anterior, con pocos motores se pueden obtener buenas resoluciones, efecto que se acentúa aún más a medida que aumentamos las dimensiones, ya que con  $m$  motores se pueden controlar hasta  $\left(\frac{m}{2}\right)^2$  “píxeles”.

Dichos beneficios no son gratuitos, y en este caso provocan una pérdida inevitable en términos de dinamismo, además de requerir mecanismos más complejos, pero gracias a las tecnologías actuales de fabricación digital, no presentan un obstáculo imposible.

#### 4.11.2. Requisitos de la estructura

La idea principal de este tipo de implementación consiste en utilizar un solo motor para controlar una fila completa de pins, por lo tanto se necesita de algún mecanismo que permita

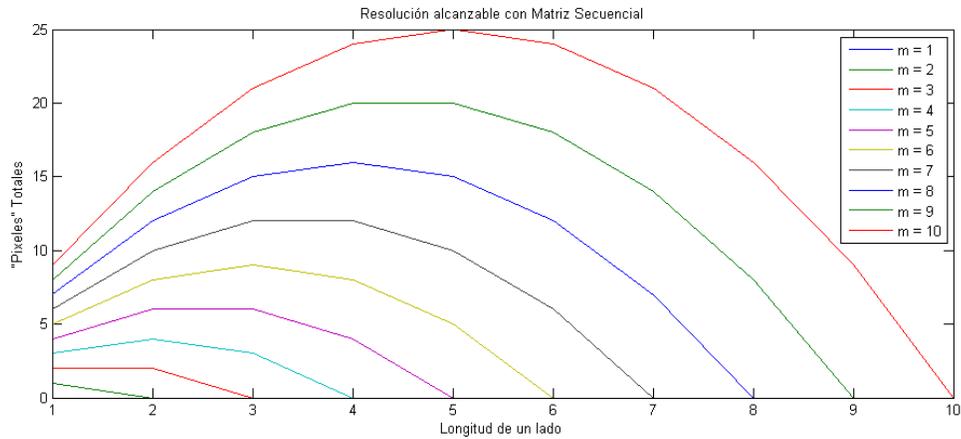


Figura 4.11: Resoluciones posibles para un número dado de motores.

controlar cada uno de ellos por separado, de lo contrario simplemente se generaría una gran línea uniforme, perdiendo todo el sentido.

Para conseguir el funcionamiento deseado, se requieren tres partes fundamentales con su respectivo mecanismo, las cuales se listan a continuación.

- Transmisión: Se debe transmitir de alguna manera el movimiento de los motores a cada pin.
- Modularidad: Las columnas deben poder acoplarse para poder generar filas completas que dependan de un solo motor cada una.
- Acople selectivo: Se debe poder engranar y desengranar cada columna para lograr movimiento independiente en cada pin de la fila ensamblada.
- Bloqueo de posición: Para poder llevar a cabo efectivamente un accionamiento secuencial, es necesario que una vez lograda la posición objetivo de cada pin en una columna, ésta se pueda conservar al desacoplar la transmisión.

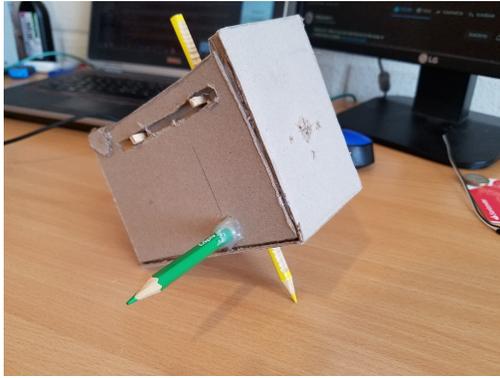
De este modo, se puede dar forma a cada columna de manera secuencial hasta lograr una representación completa en todo el panel.

### 4.11.3. Prototipo de baja resolución

A modo de prueba de concepto, se realiza un prototipo de baja resolución (figura 4.12) con el cual se comprueba de manera empírica y efectiva el funcionamiento de todas las partes necesarias para cumplir el objetivo.

Al ser una maqueta que tiene por objetivo mostrar la viabilidad de la idea, en el modelo se implementa el sistema de bloqueo de posición unidireccional, el sistema de acople selectivo y de transmisión para un solo pin. Sin embargo es fácilmente extensible a la cantidad de pines que se desee. Su funcionamiento se puede observar en <https://youtu.be/UfLRKJbZ780>.

No es necesario contar con un largo engrane desde un comienzo, ni que éste sea de largo fijo, ya que por medio de un acople en su eje, resulta muy sencillo añadir columnas nuevas.



(a) Armado.



(b) Soporte y engrane.

Figura 4.12: Prototipo de baja resolución del mecanismo.



(a) Bloqueo Unidireccional.



(b) Guía de pin.

Figura 4.13: Parte interna del prototipo.

#### 4.11.4. Modelo en CAD

En la figura 4.14 se propone un diseño refinado en base al prototipo de baja resolución, una columna de 1x10 que cumple los requisitos definidos anteriormente.

Para activar el movimiento de los pins, se empuja el marco de freno, el cual a su vez empuja el marco de pins, presionándolos contra sus respectivos ejes engranados (figura 4.15), para que impulsados por motores, puedan ser llevados a la posición deseada.

Una vez alcanzada dicha posición se deja de empujar el marco, y gracias a los resortes en compresión, todos los pins quedan frenados (figura 4.16) y desengranados, permitiendo así operar las siguientes columnas sin problema.

Para ensamblar varias columnas, los ejes engranados tienen protuberancia por un lado y un agujero acorde por el otro, como se observa en la figura 4.17, de este modo se puede manejar una fila completa utilizando sólo un motor.

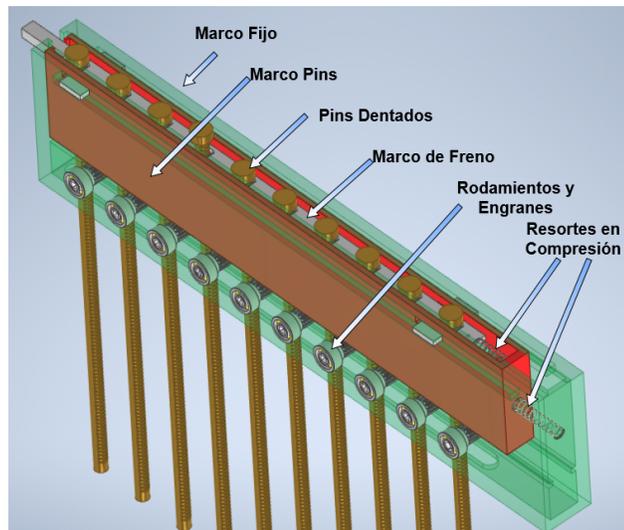
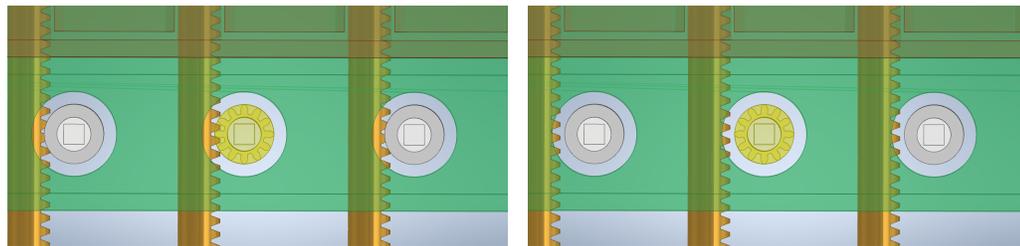


Figura 4.14: Diseño de una columna.



(a) Empujando.

(b) En reposo.

Figura 4.15: Funcionamiento Engranajes.

#### 4.11.5. Comparativa

A continuación se resumen y contrastan las características más importantes de cada implementación.

En vista de la aplicación para la cual está pensado el proyecto, la matriz secuencial resulta ser la opción más atractiva.

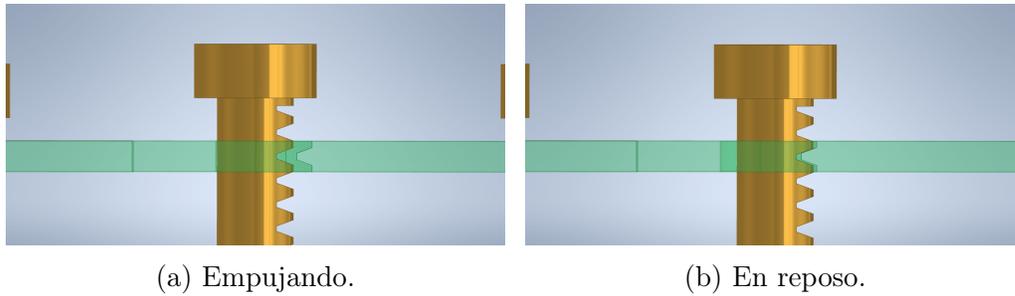


Figura 4.16: Mecanismo de freno.

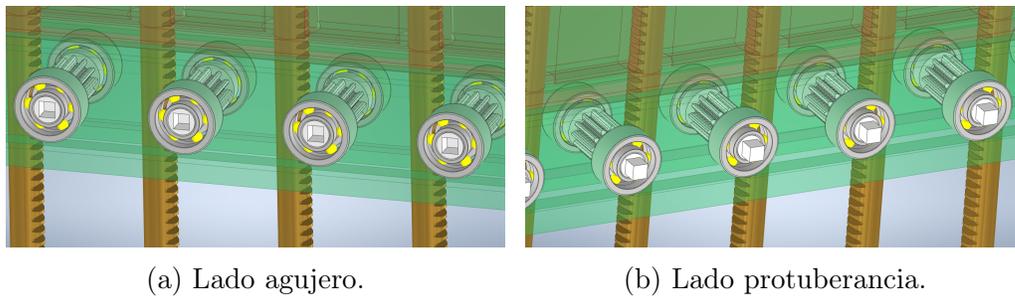


Figura 4.17: Puntos de ensamblaje de módulos.

	<b>Uno a Uno</b>	<b>Matriz Secuencial</b>
<b>Velocidad</b>	Muy dinámico, permite control simultáneo de todos los “píxeles”.	Lento, se controla una columna a la vez.
<b>Gasto Energético</b>	Muy alto, crece a la misma proporción que la resolución.	Eficiente, crece a razón de la raíz de la resolución.
<b>Costo</b>	Muy elevado a las resoluciones que se esperan a futuro.	Reducido, escala muy eficientemente respecto al tamaño.
<b>Mecánica</b>	Transmisión sencilla, difícil de modularizar.	Mecanismos complejos, fácil de modularizar.
<b>Resolución</b>	Limitada por tamaño de motores. Tiene impacto muy fuerte en costo, energía e implementación	Depende principalmente del tamaño y precisión con que se puedan fabricar los mecanismos. Puede aumentar con relativa sencillez.

Tabla 4.3: Comparativa ambos métodos

# Capítulo 5

## Resultados

A continuación se presentan los resultados de las pruebas descritas en la sección anterior, necesarias para asegurar el funcionamiento del dispositivo una vez se lleve a cabo la integración completa de las componentes electrónicas y mecánicas.

### 5.1. Movimiento

Se explora el funcionamiento de las dos opciones de control propuestas para mover los actuadores, cada una con sus propias particularidades, ventajas y desventajas. La interpretación de comandos funciona correctamente.

#### 5.1.1. Con Multiplexión

En cuanto al funcionamiento esperado, se logra controlar efectivamente en un comienzo los seis motores utilizando un solo microcontrolador, pero ocurren dos problemas que no estaban presentes en las pruebas realizadas con un solo actuador.

Al controlar varios motores a la vez se pierden consistentemente pasos, cosa que no ocurre al controlar uno solo, por lo que hay que realizar un ajuste en el factor de traducción de pasos a distancia, fijándolo en  $128\mu\text{steps}/\text{mm}$  vs el factor original de  $106\mu\text{steps}/\text{mm}$ . Además se sufre la falla repentina del driver 6 al momento de grabar el funcionamiento del dispositivo.

Otro problema que hasta el momento no se soluciona, está probablemente relacionado a la forma en que se compilan las instrucciones y puede requerir depuración del código ensamblado. Al implementar el esquema original de coordinación de la multiplexión, efectivamente se mueven todos los motores de forma simultánea, pero los seis se dirigen a la posición de destino del tercer motor, algo bastante peculiar sin ninguna razón evidente. A pesar de examinar una y otra vez que las variables y procesos estén tomando los valores correctos, las señales de salida no concuerdan con la depuración. Por esto es necesario cambiar a movimiento secuencial, con el cual sí se alcanzan las posiciones correctas, pero perdiendo por completo la simultaneidad que se tiene por objetivo con el esquema de coordinación.

El dispositivo puede observarse en acción en el siguiente link:

<https://youtu.be/35YGJKRLTV4>

### 5.1.2. Con Conexión directa

Mediante conexión directa se logra un control mucho más estable y consistente de los motores, además de operarlos simultáneamente sin la necesidad del esquema de coordinación que se debe utilizar con el sistema multiplexado, y sin la necesidad de modificar el factor de traducción. A cambio de esto, la cantidad de motores que es posible controlar desde un solo micro controlador se ve drásticamente reducida, aunque la sencillez de la interconexión entre módulos y su bajo costo, hacen de esto un *trade-off* más que razonable.

El dispositivo puede observarse funcionando en el siguiente link:

[https://youtu.be/6630Tvq\\_0Uk](https://youtu.be/6630Tvq_0Uk)

## 5.2. Interfaz y Demo

Para probar el módulo y su funcionamiento, se escribe un pequeño demo (Figura 5.1) en Python para comparar el comportamiento esperado versus el real.



Figura 5.1: Interfaz gráfica del demo.

La comunicación resulta esencial para que los micro controladores sepan qué deben hacer, por lo que fue es a prueba junto al demo para asegurar su confiabilidad.

### 5.2.1. Comunicación: UART

La comunicación entre computador y micro controlador principal resulta ser muy confiable y sencilla. Basta con un cliente de comunicación serial para enviar y recibir información, por lo que no hay mayores problemas para enviar y ejecutar comandos desde el computador.

### 5.2.2. Comunicación: TWI (I2C)

Se realizan ambos niveles de prueba (texto sencillo y comandos) para la comunicación inter-módulos, resultando ambas exitosas sin mayores problemas, lo cual se traduce en la posibilidad de ampliar con facilidad las dimensiones del dispositivo.

## 5.3. Representación

Como se pudo observar en la evaluación de cualidades, el concepto de matriz secuencial demuestra ser mucho más atractivo y apropiado al proyecto que el sistema uno a uno, por lo tanto todos los esfuerzos se enfocaron en materializar dicha idea dentro de lo permitido por el contexto.

### 5.3.1. Modelo CAD

En base a esta idea, se refina la prueba de concepto en un modelo CAD formado por 10 de las columnas presentadas en el capítulo anterior, las cuales en teoría pueden ser acopladas indefinidamente, siendo su número limitado en la práctica por la fuerza de sus actuadores y la resistencia mecánica de los ejes.

A modo de demostración de su funcionamiento, se representa la superficie mostrada en la figura 5.2 mediante un ensamble de 10 columnas con 10 pins cada una. Se muestra a continuación en la figura 5.3 el estado inicial y final de dicha simulación, mientras que su animación se puede observar en [https://youtu.be/y\\_G7oBEygKs](https://youtu.be/y_G7oBEygKs).

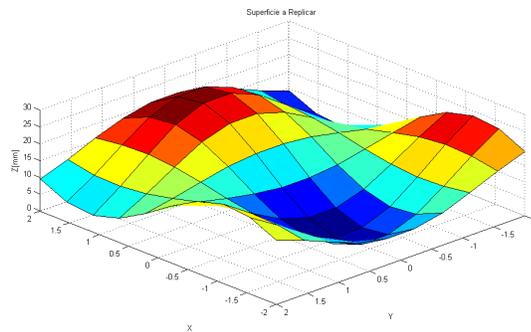
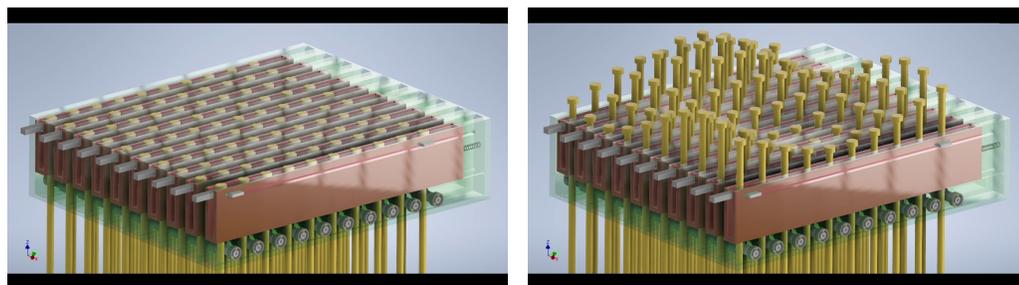


Figura 5.2: Superficie a replicar.



(a) Estado inicial.

(b) Estado final.

Figura 5.3: Estado Final.

Las características más potentes de esta forma de abordar el problema están en su alto grado de modularidad, potencial de miniaturización, y gran eficiencia energética, puesto que gracias a su diseño, el dispositivo en reposo mantiene los pins fijos en su posición, requiriendo energía sólo para cambiar la superficie representada.

# Capítulo 6

## Conclusión

Durante el proyecto se vieron tres etapas fuertemente marcadas, cada una correspondiente a uno de los bloques fundamentales del diseño general, entre los cuales se encuentra el desarrollo de la interfaz humano-máquina, el de los módulos de control y actuación, y el de la estructura mecánica.

En la primera etapa se logró diseñar e implementar exitosamente la comunicación entre computador y microcontroladores, enlazándose directamente con la segunda etapa, la cual permitió utilizar dicha comunicación para controlar a voluntad los actuadores.

Se pusieron a prueba dos métodos de control para esta última, el multiplexado y el directo, frente a lo cual aparecieron más complicaciones de lo esperado, y se obtuvieron resultados distintos a los pensados en un comienzo, llevando a inclinarse por la segunda opción a pesar de las limitaciones, ya que demostró ser más estable y confiable.

La tercera etapa, si bien incompleta, después de pasar por muchas iteraciones y ver la idea inicial completamente descartada, en su modo reformado, de la mano de un prototipo de baja resolución y modelo 3D, la simulación en base a éste demostró a todas luces la viabilidad del proyecto, y que construir un dispositivo con las características deseadas está más cerca de lo que imaginaba.

En nuestro país existen iniciativas que abordan un concepto similar, pero lo hacen desde disciplinas distintas a la ingeniería, utilizando recursos completamente diferentes, como es el caso de *Manos a la pared* en el barrio Bellas Artes. Éste sería uno de los primeros pasos a implementar localmente un proyecto de estas características, que de todas maneras se distingue de otros similares en el mundo en cuanto a visión y objetivo. Si bien quedan aristas por abordar, este trabajo presenta un paso hacia el objetivo mayor, que es mejorar la accesibilidad al arte y la cultura, acercarlo con mayor facilidad a quienes experimentan el mundo de manera distinta al común de la gente.

## 6.1. Trabajo Futuro

Dadas las circunstancias y el tipo de proyecto, quedan varios elementos que abordar para hacer realidad este dispositivo de la mejor manera posible, y se detallan a continuación.

- Hacer una revisión y mejora de la programación para implementar aspectos de automatización que resultarían convenientes para el proyecto.
- Implementar capa de preprocesamiento para generar automáticamente, a partir de una imagen, las instrucciones necesarias para recrearla.
- Llevar a cabo la implementación mecánica, haciendo uso de herramientas de fabricación digital.
- Construir, validar y probar en terreno, cosa que debido a la contingencia no fue posible realizar.

# Bibliografía

- [1] Suman Muralikrishnan Adhepalli, Pulkit Sapra, Saurabh Agrawal, Piyush Chanana, M. Balakrishnan, and P.V.M. Rao. FPGA-based controllers for compact low power refreshable braille display. In *2018 IEEE Computer Society Annual Symposium on VLSI (ISVLSI)*. IEEE, July 2018.
- [2] Mabroka F. Bader. Position control system of hydraulic cylinderbased on microcontroller. 2008.
- [3] Kyung Yun Choi, Darle Shinsato, Shane Zhang, Ken Nakagaki, and Hiroshi Ishii. reMi: Translating ambient sounds of moment into tangible and shareable memories through animated paper. In *The 31st Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology Adjunct Proceedings - UIST '18 Adjunct*. ACM Press, 2018.
- [4] Zhicong Deng, Martin Stommel, and Weiliang Xu. A novel soft machine table for manipulation of delicate objects inspired by caterpillar locomotion. volume 21, pages 1702–1710. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), June 2016.
- [5] Adelyne Fannir, Rauno Temmer, Giao T. M. Nguyen, Laurent Cadiergues, Elisabeth Laurent, John D. W. Madden, Frederic Vidal, and Cedric Plesse. Linear artificial muscle based on ionic electroactive polymer: A rational design for open-air and vacuum actuation. page 1800519. Wiley, December 2018.
- [6] W. Felt, M. A. Robertson, and J. Paik. Modeling vacuum bellows soft pneumatic actuators with optimal mechanical performance. In *2018 IEEE International Conference on Soft Robotics (RoboSoft)*, pages 534–540, April 2018.
- [7] Sean Follmer, Daniel Leithinger, Alex Olwal, Akimitsu Hogge, and Hiroshi Ishii. inFORM. In *Proceedings of the 26th annual ACM symposium on User interface software and technology - UIST '13*. ACM Press, 2013.
- [8] Pavel Greshniakov, Heikki Handroos, and Victor Sverbilov. Position control of pneumatic cylinder actuated by low-cost on/off valves pulse number modulation. In *2018 Global Fluid Power Society PhD Symposium (GFPS)*. IEEE, July 2018.
- [9] John Hardy, Christian Weichel, Faisal Taher, John Vidler, and Jason Alexander. ShapeClip. In *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems - CHI '15*. ACM Press, 2015.

- [10] N Ma and G Song. Control of shape memory alloy actuator using pulse width modulation. volume 12, pages 712–719. IOP Publishing, sep 2003.
- [11] Ali Maziz, Alexandre Khaldi, Nils-Krister Persson, and Edwin W. H. Jager. Soft linear electroactive polymer actuators based on polypyrrole. In Yoseph Bar-Cohen, editor, *Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD) 2015*. SPIE, April 2015.
- [12] Ken Nakagaki, Daniel Fitzgerald, Zhiyao (John) Ma, Luke Vink, Daniel Levine, and Hiroshi Ishii. inFORCE. In *Proceedings of the Thirteenth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction - TEI '19*. ACM Press, 2019.
- [13] Ken Nakagaki, Luke Vink, Jared Counts, Daniel Windham, Daniel Leithinger, Sean Follmer, and Hiroshi Ishii. Materiabile. In *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems - CHI '16*. ACM Press, 2016.
- [14] Michael B. Rannow and Perry Y. Li. On/off valve based position control of a hydraulic cylinder. 2007.
- [15] Matthew A. Robertson, Masato Murakami, Wyatt Felt, and Jamie Paik. A compact modular soft surface with reconfigurable shape and stiffness. volume 24, pages 16–24. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), February 2019.
- [16] Matthew A. Robertson and Jamie Kyujin Paik. Low-inertia vacuum-powered soft pneumatic actuator coil characterization and design methodology. pages 431–436, 2018.
- [17] Pulkit Sapra, Ankit Kumar Parsurampurua, Dhruv Gupta, S. Muralikrishnan, M. Joseph Malvin Raj, Akash Anand, Vinit Darda, Rohan Paul, Mahesh Balakrishnan, and P. V. Madhusudan Rao. Detc 2015-47468 a compliant mechanism design for refreshable braille display using shape memory alloy. 2015.
- [18] Anshul Singhal, Pranay Jain, Piyush Chanana, Dhruv Jain, Rohan Paul, M. Balakrishnan, and P. V. M. Rao. Application of shape memory alloy (SMA) based actuation for refreshable display of braille. In *Volume 4: 18th Design for Manufacturing and the Life Cycle Conference, 2013 ASME/IEEE International Conference on Mechatronic and Embedded Systems and Applications*. American Society of Mechanical Engineers, August 2013.
- [19] Alexa F. Siu, Eric J. Gonzalez, Shenli Yuan, Jason B. Ginsberg, and Sean Follmer. shapeShift. In *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems - CHI '18*. ACM Press, 2018.
- [20] Akio Yamano, Atsuhiko Shintani, Tomohiro Ito, and Chihiro Nakagawa. Reducing the power consumption of a shape memory alloy wire actuator drive by numerical analysis and experiment. volume 23, pages 1854–1865. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), August 2018.
- [21] Kai Zhang, Eric J. Gonzalez, Jianglong Guo, and Sean Follmer. Design and analysis of high-resolution electrostatic adhesive brakes towards static refreshable 2.5d tactile shape display. *IEEE Transactions on Haptics*, 12:470–482, October 2019.

# Anexo

## Códigos

Por extensión y formato, no resulta viable incluir en este documento los códigos utilizados, por lo tanto se adjuntan en forma separada.