

Identificación de las condiciones requeridas por un sistema que facilite el reconocimiento de imágenes por medio del sentido del tacto



**JUAN MANUEL CALVACHE ZAPATA
JOHN EDISON FERNÁNDEZ ORDÓÑEZ**

**FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES
UNIVERSIDAD DEL CAUCA
POPAYÁN
2020**

Identificación de las condiciones requeridas por un sistema que facilite el reconocimiento de imágenes por medio del sentido del tacto



Trabajo de grado presentado a la Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad del Cauca para la obtención del Título de Ingeniero en: Electrónica y Telecomunicaciones

**JUAN MANUEL CALVACHE ZAPATA
JOHN EDISON FERNÁNDEZ ORDOÑEZ**

Director:

MARÍA MANUELA SILVA ZAMBRANO

Co-director:

PABLO EMILIO JOJOA GÓMEZ

Popayán

2020

Tabla de Contenido

| | |
|--|------|
| LISTA DE FIGURAS | V |
| LISTA DE TABLAS..... | VII |
| LISTA DE ACRÓNIMOS | VIII |
| INTRODUCCIÓN | 1 |
| CAPÍTULO 1 PRELIMINARES..... | 3 |
| 1.1 Discapacidad visual..... | 3 |
| 1.1.1 Deterioro de la visión | 6 |
| 1.1.2 Clasificación de la Deficiencia Visual..... | 7 |
| 1.2 Necesidades de las personas con discapacidad visual..... | 10 |
| 1.3 Sensación somática | 11 |
| 1.3.1 Receptores de la Piel..... | 11 |
| 1.3.2 Adaptación Sensorial..... | 12 |
| 1.3.3 Resolución Espacial..... | 13 |
| 1.3.4 Resolución Temporal..... | 13 |
| 1.3.5 Rango de Fuerzas | 13 |
| 1.4 Sistemas de ayuda..... | 14 |
| CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO..... | 17 |
| 2.1 Matriz de taxeles | 17 |
| 2.1.1 Definición de taxel..... | 17 |
| 2.1.2 ¿Qué es una matriz de taxeles? | 17 |
| 2.1.3 Procesamiento de imágenes para una matriz de taxeles | 18 |
| 2.2 Matemáticas | 20 |
| 2.2.1 Introducción | 20 |

| | |
|---|----|
| 2.2.2 Dificultades y retos para los estudiantes con discapacidad visual | 20 |
| 2.2.3 Matrices de taxeles como apoyo a la enseñanza de las matemáticas..... | 23 |
| 2.3 Elementos hardware y software | 23 |
| 2.3.1 Motores DC..... | 23 |
| 2.3.2 Motores paso a paso..... | 24 |
| 2.3.3 Transistor Darlington e integrado ULN2803..... | 25 |
| 2.3.4 DIP <i>switch</i> | 27 |
| 2.3.5 Puente H e integrado L293 | 27 |
| 2.3.6 Solid Edge..... | 28 |
| 2.3.7 Integrado L297 | 29 |
| 2.3.8 Mini motor vibrador | 30 |
| 2.3.9 Arduino..... | 30 |
| 2.3.10 Raspberry Pi | 31 |
| 2.3.11 Tarjeta de desarrollo ESP32 | 32 |
| 2.3.12 Electroimanes | 34 |
| 2.3.13 Alambre de Nitinol..... | 34 |
| | |
| CAPÍTULO 3 DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE PROTOTIPOS..... | 37 |
| 3.1 Definición de prototipo..... | 37 |
| 3.2 Modelo de prototipos | 38 |
| 3.3 Aplicación del modelo de prototipos | 40 |
| 3.3.1 Recopilación y análisis de requisitos..... | 40 |
| 3.3.2 Diseño rápido..... | 44 |
| 3.3.3 Construcción de los prototipos..... | 45 |
| | |
| CAPÍTULO 4 PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS..... | 57 |
| 4.1 Evaluación de los prototipos por parte del usuario..... | 57 |
| 4.1.1 Puntuación de opinión media..... | 57 |
| 4.1.2 Plan de pruebas | 58 |
| 4.2 Resultados..... | 59 |
| 4.2.1 Motores DC como actuadores lineales | 59 |

| | |
|---|----|
| 4.2.2 Mini motores DC como vibradores..... | 61 |
| 4.2.3 Matriz de puntos | 62 |
| 4.3 Análisis comparativo de los parámetros para la evaluación de los prototipos..... | 63 |
| 4.3.1 Facilidad de identificar las figuras..... | 63 |
| 4.3.2 Afectación de estimulaciones externas..... | 64 |
| 4.3.3 Precisión | 65 |
| 4.3.4 Tiempo de respuesta | 65 |
| 4.3.5 Elección del mejor y peor prototipo..... | 66 |
| 4.4 Selección de las características más adecuadas para el sistema..... | 67 |
| CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS | 69 |
| 5.1 Conclusiones..... | 69 |
| 5.2 Trabajos futuros | 70 |
| REFERENCIAS..... | 71 |
| APÉNDICES..... | 1 |
| Apéndice A Consentimientos informados..... | 1 |
| Apéndice B Modelo para las entrevistas en profundidad | 4 |
| Apéndice C Diagramas de flujo de los prototipos funcionales..... | 5 |
| Apéndice D Códigos Arduino | 9 |
| D.1 Código para el prototipo matriz de puntos..... | 9 |
| D.2 Código para controlar el prototipo matriz con motores DC como actuadores lineales..... | 18 |
| Apéndice E Diseño de piezas 3D para el prototipo vibración mini motores DC | 19 |
| Apéndice F Modelo de la encuesta | 21 |

Lista de Figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1.1. Esquema general del campo visual del ser humano | 8 |
| Figura 1.2. Esquema detallado del campo visual del ser humano | 9 |
| Figura 2.1 Parámetros de la matriz de taxeles. | 18 |
| Figura 2.3. Representación del abecedario en código Braille | 21 |
| Figura 2.4. Representación de los números del 1 al 0 en Braille | 21 |
| Figura 2.5. Sentido de giro de un motor DC..... | 24 |
| Figura 2.6. Modelo de los controladores para el prototipo de motores paso a paso unipolares..... | 25 |
| Figura 2.7. Arreglo Darlington. | 26 |
| Figura 2.8. Diagrama lógico del integrado ULN2803..... | 26 |
| Figura 2.9. DIP <i>Switch</i> de diversos tamaños..... | 27 |
| Figura 2.10. Puente H implementado con Transistores y diodos | 28 |
| Figura 2.11. Diagrama integrado L293..... | 28 |
| Figura 2.12. Entorno básico de Solid Edge v16. | 29 |
| Figura 2.13. Integrado L297-..... | 30 |
| Figura 2.14. Entorno IDE de Arduino. | 31 |
| Figura 2.15. Raspberry pi. | 32 |
| Figura 2.16. Tarjeta de desarrollo ESP32. | 33 |
| Figura 2.17. Entorno ESP-IDF con Eclipse. | 33 |
| Figura 2.18. Esquema general de un electroimán..... | 34 |
| Figura 2.19. Alambre de Nitinol en sus dos estados | 35 |
| Figura 3.1. Fases del modelo de prototipos. | 39 |
| Figura 3.2. Prototipo de baja fidelidad..... | 41 |
| Figura 3.3. Red de conceptos. | 42 |
| Figura 3.4. Plataforma matricial..... | 44 |
| Figura 3.5. Modelo para el sistema basado en una matriz de taxeles..... | 45 |
| Figura 3.6. Mini motor DC. | 46 |
| Figura 3.7. Prototipo de mini motores DC. | 47 |
| Figura 3.8. Modelo del prototipo de mini motores DC. | 47 |
| Figura 3.9. Motor vibrador. | 48 |
| Figura 3.10. Modelo del prototipo motores vibradores. | 48 |
| Figura 3.11. Prototipo motores vibradores. | 49 |

| | |
|---|----|
| Figura 3.12. Cabezal de la impresora de matriz de puntos. | 49 |
| Figura 3.13. Modelo esquemático del prototipo de matriz de puntos. | 50 |
| Figura 3.14. Prototipo matriz de puntos..... | 51 |
| Figura 3.15. Tornillo ensamblado en el mini motor DC..... | 52 |
| Figura 3.16. Modelo del prototipo matriz con motores DC como actuadores lineales | 53 |
| Figura 3.17. Prototipo Matriz con motores DC como actuadores lineales. | 53 |
| Figura 4.1. Facilidad al identificar figuras con el prototipo motores DC como actuadores lineales..... | 60 |
| Figura 4.2. Afectación de estimulaciones externas al prototipo motores DC como actuadores lineales..... | 60 |
| Figura 4.3. Facilidad al identificar figuras con el prototipo mini motores DC como vibradores..... | 61 |
| Figura 4.4. Afectación de estimulaciones externas al prototipo mini motores DC como vibradores. | 61 |
| Figura 4.5. Facilidad al identificar figuras con el prototipo matriz de puntos. | 62 |
| Figura 4.6. Afectación de estimulaciones externas al prototipo matriz de puntos. | 63 |
| Figura 4.7. Porcentaje de la facilidad al identificar figuras en los prototipos. | 64 |
| Figura 4.8. Porcentaje del efecto en los participantes de la estimulación externa generada por los prototipos. | 64 |
| Figura 4.9. Porcentaje de precisión al identificar las figuras..... | 65 |
| Figura 4.10. Tiempo promedio por prototipo para identificar las figuras. | 66 |
| Figura 4.11. Porcentaje de elección del mejor prototipo..... | 66 |
| Figura B.1. Diagrama de flujo de mini motores DC. | 5 |
| Figura B.2. Diagrama de flujo de motores vibradores. | 6 |
| Figura B.3. Diagrama de flujo de matriz con motores DC como actuadores lineales. . | 6 |
| Figura B.4. Diagrama de flujo de la matriz de puntos..... | 7 |
| Figura B.5. Diagrama de flujo para el diseño del electroimán. | 8 |
| Figura A.1. Matriz impresa en 3D. | 19 |
| Figura A.2. Pieza geométrica con taxel. | 20 |
| Figura A.3. Taxel cuando se encuentra activo e inactivo en la matriz. | 20 |

Lista de Tablas

| | |
|---|----|
| Tabla 3.1. Selección de las características más adecuadas para el sistema. | 43 |
| Tabla 3.2. Datos prototipos funcionales. | 55 |

Lista de Acrónimos

| | |
|----------------|---|
| 2D | <i>Two Dimensions</i> , Dos Dimensiones. |
| 3D | <i>Three Dimensions</i> , Tres Dimensiones. |
| AV | Agudeza Visual. |
| CAD | <i>Computer Aided Design</i> , Diseño Asistido por Computadora. |
| CV | Campo Visual. |
| DIP | <i>Dual In line Package</i> , Paquete Dual en Línea |
| ESP-IDF | <i>Espressif IoT Development Framework</i> |
| HCI | <i>Human Computer Interaction</i> , Interacción Humano-Computadora. |
| IDE | <i>Integrated Development Environment</i> , Entorno de Desarrollo Integrado |
| IoT | <i>Internet of Things</i> , Internet de las Cosas. |
| MOS | <i>Mean Opinion Score</i> , Puntuación de Opinión Media. |
| NOOBS | <i>New Out Of Box Software</i> |
| ONCE | Organización Nacional de Ciegos Españoles. |
| ONU | Organización de las Naciones Unidas. |
| PERCIBV | Personas Ciegas y de Baja Visión. |
| PWM | <i>pulse width modulation</i> , Modulación por Ancho de Pulso. |
| RA | <i>Rapidly Adapting</i> , Adaptación Rápida. |
| RGB | <i>Red Green Blue</i> , Rojo Verde Azul. |
| RLCPD | Registro de Localización y Caracterización de Personas con Discapacidad. |
| SA | <i>Slowly Adapting</i> , Adaptación Lenta. |
| SBC | <i>Single Board Computer</i> |
| SADV | Sistema de Ayuda Para Discapacitados Visuales. |
| SMA | <i>Shape Memory Alloy</i> , Aleación con Memoria de Forma. |
| TIC | Tecnologías de la Información y la Comunicación. |



Introducción

En los últimos años, la tecnología ha ido creciendo exponencialmente, generando cada día una mayor cantidad de aportes a la ciencia y a las diferentes disciplinas existentes. Una parte de estos aportes tecnológicos se ha centrado en la construcción de una sociedad más abierta a la inclusión de personas con discapacidad; entre otras cosas, la competencia entre diferentes empresas de tecnología por llegar a un número cada vez mayor de usuarios ha provocado que se innove en la accesibilidad, enfocándose principalmente en personas con discapacidad sensorial y permitiendo que éstas mejoren su calidad de vida.

Debido a la importancia de los sentidos en la anatomía humana, cuando uno de éstos falla otro tiende a compensar su pérdida, potenciando sus funcionalidades; en el caso particular de la discapacidad visual, generalmente se desarrolla una mayor sensibilidad en la sensación somática, puesto que permite adquirir información que se escapa a los sentidos del olfato y el oído.

Este tipo de discapacidad sensorial representa un gran obstáculo para las personas que desean tener una mejor calidad de vida, debido a que conlleva limitaciones para acceder a servicios como la educación, la salud y el entretenimiento; así como genera menos posibilidades en el competitivo campo laboral. Es por esta razón que para las personas con discapacidad visual se proponen sistemas que al estimular la sensación somática ayuden a este tipo de personas a adquirir información que normalmente está representada de forma visual.

Según el Registro de Localización y Caracterización de Personas con Discapacidad (RLCPD), la discapacidad visual es la segunda mayor discapacidad sensorial en Colombia. En un periodo comprendido entre 2009 y 2014, se evidenció que el número de personas con discapacidad visual permanente aumentó de 285.056 a 406.193 [3].

El presente documento, se estructura de la siguiente forma:

- Capítulo 1, “Preliminares”, se plantean antecedentes sobre la discapacidad visual y se definen conceptos importantes sobre este tema.



Identificación de las condiciones requeridas por un sistema que facilite el reconocimiento de imágenes por medio del sentido del tacto

Juan Manuel Calvache Zapata – John Edison Fernández Ordóñez

- Capítulo 2, “Marco Teórico”, contiene una explicación de los conceptos más importantes que serán utilizados a lo largo del desarrollo del documento, así como una exploración sobre los elementos *hardware* y *software* a utilizar para la construcción de los prototipos.
- Capítulo 3, “Diseño e implementación de los prototipos”, presenta todo el proceso de diseño y construcción de los prototipos, así como la metodología de desarrollo escogida para completar dicho proceso.
- Capítulo 4, “Pruebas y análisis de Resultados”, hace referencia a la metodología de evaluación escogida para realizar las pruebas con los prototipos.
- Capítulo 5, “Conclusiones y trabajos futuros”, presenta las conclusiones y logros obtenidos de acuerdo a una síntesis de los resultados del trabajo y los trabajos futuros que pueden surgir a partir de la elaboración de este trabajo.



Capítulo 1

Preliminares

1.1 Discapacidad visual

El ser humano tiene la capacidad de percibir lo que ocurre en el ambiente que lo rodea a través de los sentidos, los cuales se utilizan para distinguir, conocer y relacionar todo lo que se encuentra en su entorno. El sistema sensorial está compuesto como mínimo por seis sentidos [2]:

- **La vista**, se encarga de enfocar apropiadamente la luz e interpretarla; su órgano sensorial son los ojos.
- **El olfato**, es estimulado por los olores y captura esos estímulos mediante la membrana celular olfativa; su órgano sensorial es la nariz.
- **El gusto**, es el encargado de detectar los diferentes sabores: ácido, dulce, salado, amargo y umami; mediante las papilas gustativas que se encuentran en la lengua, la cual es su órgano sensorial.
- **El oído**, es el encargado de la audición; pero, además se encarga del equilibrio. El estímulo auditivo se codifica mediante la recepción de vibraciones que posteriormente transforma en impulsos nerviosos. Su órgano sensorial es el oído.
- **El vestibular**, es el encargado del equilibrio y la ubicación en el espacio cada que se realicen desplazamientos, giros o aceleraciones.
- **La sensación somática** o somestesia, es una combinación de por lo menos las sensaciones del tacto, temperatura y posición corporal; permite a las personas percibir la forma, textura y temperatura de un objeto; su órgano sensorial es la piel; sin embargo, las manos son el miembro comúnmente más utilizado para realizar procesos de percepción táctil, ya que se pueden reconocer superficies a través del movimiento de las mismas [3].

El Ministerio de Salud Colombiano sobre las personas con discapacidad dice que “Son aquellas personas que presentan deficiencias físicas, mentales, intelectuales o sensoriales a largo plazo que, al interactuar con el entorno, encuentran diversas



barreras, que pueden impedir su participación plena y efectiva en la sociedad, en igualdad de condiciones con los demás ciudadanos” [4].

Para lograr entender de una mejor manera las dificultades que viven a diario las personas con discapacidad visual, es importante empezar con un breve recorrido histórico de cómo eran tratadas las personas con dicha discapacidad en diferentes partes del mundo.

En la antigua Grecia, a las personas se les asignaban diferentes funciones dependiendo de su edad o momento de vida, entre las más destacadas se encontraban el ser militar, pertenecer al consejo o recibir educación por parte de los grandes filósofos de la época; para cierto tipo de personas, consideradas anormales, (presentaban algún defecto o alteración como la discapacidad visual) no era posible posicionarse en este tipo de funciones, ya que se les consideraba incapacitados para realizar tareas cotidianas, éstos lograban sobrevivir gracias a la caridad de los ciudadanos. En el caso particular de los invidentes, en la Grecia antigua eran considerados profetas, ya que se creía que tenían la capacidad de ver el alma de las personas y así predecir algunos eventos futuros; otra de las ocupaciones más comunes en las personas invidentes de la época era la de narrador de mitos y leyendas, donde sus protagonistas eran dioses y hombres con cualidades o características de héroes [5].

En el caso de la India, el trato a las personas con discapacidad visual era mucho más inhumano, pues respaldados por el “*Código Manu*”, era válido asesinar o abandonar a los niños ciegos, puesto que se consideraban impuros y no merecedores de participar en sus ceremonias sagradas [5].

La antigua Roma es ampliamente reconocida por su despliegue militar, para formar sus ejércitos se tenía establecido que todo individuo útil como soldado (sin importar cualquier tipo de discapacidad) era enviado a la guerra para que de esta manera obtuviera una muerte digna, todo aquel que lograba sobrevivir recibía manutención de la caridad [5].

En la edad media, el cuidado que recibían las personas ciegas en Asia era de carácter sagrado, pues contaban con espacios para vivir tranquilamente como conventos o



monasterios, donde tenían trabajos de artesanos. En Europa, en la época del feudalismo, las personas con discapacidad visual podían realizar varias actividades, sin embargo, no eran considerados ciudadanos dada su discapacidad y no contaban con los mismos derechos que las demás personas. Con la llegada del cristianismo a Europa, se genera un cambio significativo para las personas con discapacidad visual, debido a que el evangelio concibe la ceguera como una forma de llegar al cielo.

En la actualidad, existe la convención sobre los derechos de las personas con discapacidad, la cual es un tratado internacional en el que se establecen los derechos de las personas con discapacidad, así como las obligaciones de los estados partes de promover, proteger y asegurar esos derechos. Dicho tratado está conformado por dos mecanismos: el comité sobre los derechos de las personas con discapacidad y la conferencia de los estados partes. El primer mecanismo, tiene como finalidad supervisar la aplicación de la convención, mientras que el segundo mecanismo se encarga de examinar cuestiones relacionadas con la aplicación de la convención [6].

La convención fue aprobada por la asamblea general de las Naciones Unidas el 13 de diciembre de 2006, y se abrió a la firma el 30 de marzo de 2007. Los estados que ratifiquen la convención estarán jurídicamente vinculados a respetar las disposiciones que en ella se recogen. Para los demás estados, la convención constituye una norma internacional que deben esforzarse por respetar [6].

Según lo establecido en la convención, todas las personas que integran la sociedad, tienen los mismos derechos humanos, que incluyen derechos civiles, culturales, económicos, políticos y sociales.

Existen otros instrumentos internacionales que reconocen los derechos de las personas con discapacidad, y que han sido aprobados por la Organización de Naciones Unidas (ONU), para proteger y promover los derechos de las personas con discapacidad [6]. Entre los más importantes se destacan:

- La declaración de los derechos de las personas con discapacidad (1995).
- El programa de acción mundial para las personas con discapacidad (1981).



- Los principios para la protección de los enfermos mentales y para el mejoramiento de la atención de la salud mental (1991).
- Las normas uniformes sobre la igualdad de oportunidades para las personas con discapacidad (1993).

1.1.1 Deterioro de la visión

A continuación, se hace una descripción de la ceguera y la deficiencia visual, para de esta manera poder establecer cuando una persona es completamente ciega o sufre de algún tipo de deficiencia visual.

Los defectos de la función visual y la ausencia de dicha función, están condicionados por diversas anomalías anatómicas que se pueden presentar tanto en el ojo, como en la vía óptica del sistema visual [7].

El ser humano nace con una visión subnormal, la cual está en constante desarrollo en sus primeras semanas de vida. Mediante conexiones intercelulares se conectan la retina, la vía óptica y la corteza cerebral, por lo que se hace necesario que haya una apropiada estimulación de los diversos elementos sensibles para poder lograr que el desarrollo se realice de manera normal; sin embargo, aun cuando un adulto haya desarrollado de manera adecuada toda su función visual, ésta puede verse afectada por diversas enfermedades oculares que forman parte de la patología ocular. Factores como un mal desarrollo de la función visual a temprana edad y las patologías que afectan al sistema ocular, son los causantes de la pérdida de la función visual, que pueden ocasionar ceguera o deficiencia visual [7].

Desde el punto de vista oftalmológico, se considera como ceguera a la ausencia total del sentido de la vista, por lo que no existe reacción a estímulos visuales aun cuando éstos sean fuentes luminosas intensas. Por otra parte, están las personas con deficiencia visual y son aquellas que han sufrido deterioro de la función visual pero que conservan un mínimo de visión que está por encima de lo que se define como “ceguera legal”, esta condición limita la realización de tareas cotidianas que son sencillas para las personas con visión normal [7].



1.1.2 Clasificación de la Deficiencia Visual

La función visual es independiente en cada ojo y contiene diferentes aspectos, los cuales son: la Agudeza Visual (AV), el Campo Visual (CV), la visión cromática y el sentido luminoso. La conjunción de la visión de los dos ojos se conoce como visión binocular.

Los aspectos más importantes son la AV y el CV, ya que de su respectivo análisis se deduce el estado de funcionamiento de la visión. Los demás aspectos (visión cromática, sentido luminoso y visión binocular) tendrán relevancia funcional en algunas circunstancias, pero no son comunes en las exploraciones clínicas rutinarias de la función visual.

Para que un ojo sea considerado con AV normal, éste debe cumplir con las siguientes condiciones:

1. El estado de refracción ocular debe ser de emetropía o en el caso de que exista un defecto de refracción (ametropía) estará bien corregido por cualquiera de los métodos posibles.
2. Las estructuras oculares que son atravesadas por la luz deben mantener la transparencia.
3. La mácula (retina central) y la vía óptica que le corresponde, así como el área 17 del córtex tienen que estar en condiciones de normalidad anatomofisiológica.

Por otro lado, un CV normal exige las siguientes condiciones:

1. La transparencia de córnea, cristalino y vítreo.
2. La retina debe mantener su integridad tanto en la zona macular (que se corresponderá con el campo visual central¹) como en la zona periférica que determinará la extensión total del campo (campo visual periférico²).
3. El ojo que se explora tiene que estar en óptimas condiciones refractivas, puesto que el campo visual central se influye por una buena agudeza visual, circunstancia que no ocurre con el campo visual periférico, que puede

¹ El campo visual central es aquel donde el ojo humano sano tiene la máxima resolución y nitidez de la imagen hacia donde se observa.

² El campo visual periférico es aquel donde el ojo humano sano observa con poca nitidez, pero se pueden percibir los movimientos, luces y siluetas.

mantenerse normal con bajas agudezas visuales. En la Figura 1.1, se observa un esquema general del campo visual del ser humano.

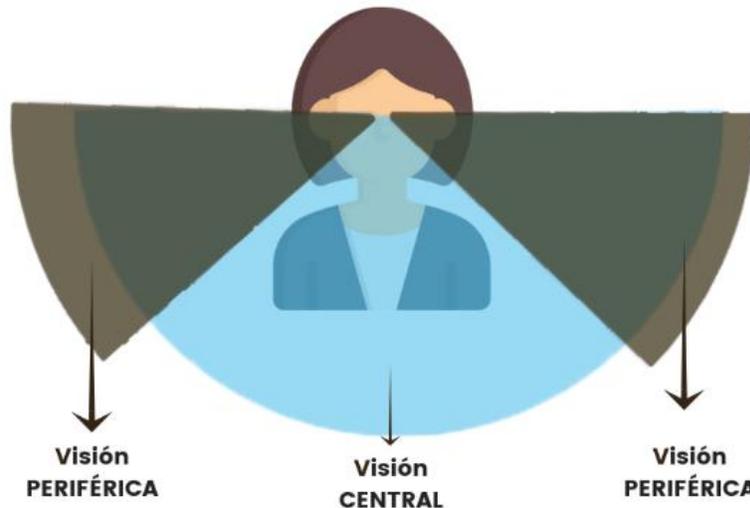


Figura 1.1. Esquema general del campo visual del ser humano.

Tomado de [8].

Los niveles de deterioro de la función visual son establecidos tras la medición de la AV y del CV en cada uno de los ojos por separado. Las fundaciones encargadas de ayudar a las personas con discapacidad visual tienen sus normativas basadas en el deterioro de la función visual de cada una de las personas; por ejemplo, la Organización Nacional de Ciegos Españoles (ONCE) ha establecido unos límites en la normativa para poder ser afiliados a esta fundación y obtener sus beneficios. Lo primero a tener en cuenta es que la normativa estipula que el mejor de sus ojos (el ojo que posea mejor visión) debe tener una AV igual o menor a 0.1 en la escala de *Wecker*³ y un CV reducido en su periferia a los 10° centrales o inferior, determinado con el test de mayor tamaño y más luminoso del perímetro de *Goldmann*⁴; por lo tanto, si una persona tiene en su ojo derecho una AV de 0.1 y un CV de 40° y en su ojo izquierdo tiene una AV de 0.2° y un CV de 10°, esta persona no podrá ser afiliada a dicha fundación. En la Figura 1.2 se muestra un esquema más detallado del campo visual del ser humano [7].

³ Escala Wecker: Criterio médico que establece unos porcentajes equivalentes a la pérdida de la visión de una persona.

⁴ Perímetro de Goldmann: técnica manual utilizada para determinar el Campo Visual de una persona haciéndolo ver un punto fijo central y utilizando estímulos en su periferia.

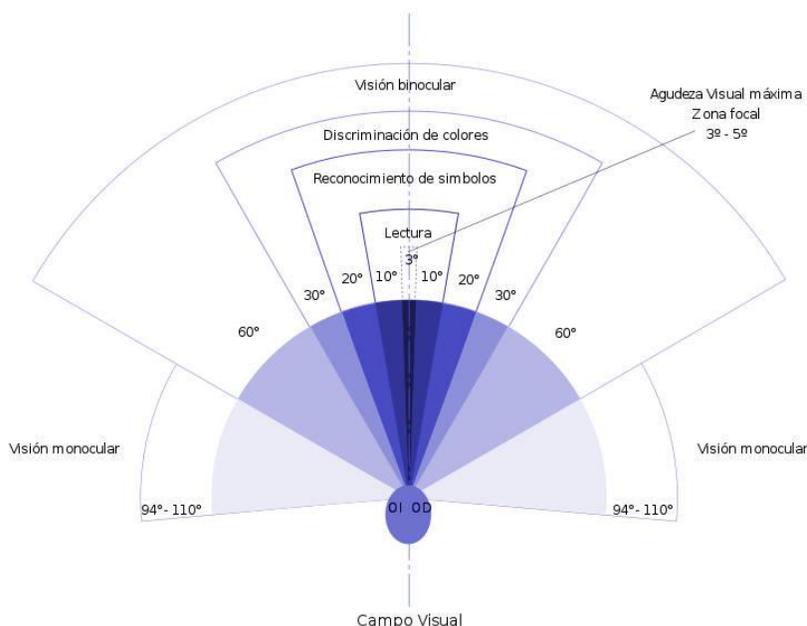


Figura 1.2. Esquema detallado del campo visual del ser humano.
Tomado de [9].

Al hacer un estudio de los campos AV y CV pertenecientes a la función visual, es posible establecer una clasificación:

- **visión normal:** AV del mejor de los ojos es superior o igual a 0.8, siendo normal el CV.
- **visión casi normal:** AV del mejor ojo está comprendida entre 0.7 y 0.5, siendo normal el CV.
- **visión subnormal:** la AV está comprendida entre 0.4 y 0.3 o el CV está limitado a 40°.
- **baja visión:** AV comprendida entre 0.25 y 0.12 o el CV está disminuido hasta los 20°.
- **ceguera legal:** si la AV es igual o inferior a 0.1 o el CV está reducido a 10° o menos. Conviene aclarar que la simple reducción del campo visual a 10°, sin importar que se conserve una agudeza visual de 1.0, permite la consideración de ceguera legal.

Dentro de las personas consideradas con ceguera legal hay un rango de diferentes grados de afectación que se pueden considerar [7], los cuales son:



- **Deterioro visual profundo:** AV entre 0.1 y 0.02 o el CV está entre 10° y 5°.
- **Deterioro visual casi total:** AV inferior a 0.02, ver los movimientos de la mano o de objetos a una proximidad de 1 m o menos, localizar una fuente de luz en ese espacio próximo o tener un CV inferior a 5°.
- **Deterioro visual total o amaurosis:** ausencia de percepción de luz.

1.2 Necesidades de las personas con discapacidad visual

Las personas que sufren de algún tipo de discapacidad visual han tenido siempre limitaciones para acceder a recursos educacionales, oportunidades laborales y a actividades de entretenimiento y ocio. Gracias al desarrollo creciente de las Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC) se ha logrado avanzar en gran medida en la inclusión de estas personas, con el fin de suplir algunas de sus necesidades.

- **Comunicación:** La comunicación oral es una de las formas más utilizadas por las personas con discapacidad visual; sin embargo, la comunicación entre dos o más personas no siempre está limitada a lo oral, por lo general las palabras están acompañadas de ciertos indicadores visuales como: los gestos, la expresión corporal y las miradas. Estos indicadores pueden ser importantes para complementar la comunicación oral [7].
- **Desplazamiento:** Una de las necesidades más importantes de las personas con discapacidad visual es lograr desplazarse de manera autónoma y segura en cualquier espacio. Si una persona con discapacidad visual desconoce el lugar en el que se desplaza, le cuesta más trabajo de lo normal moverse con facilidad. Para ésto existen herramientas como los mapas con relieve, los cuales facilitan el reconocimiento de zonas de desplazamiento en lugares cerrados, o también las guías auditivas, que al igual que los mapas con relieve sirven como guía para moverse adecuadamente y evitar posibles colisiones [7].



- **Educación:** Las TIC han sido un gran apoyo en el ámbito educativo, ya que han facilitado en gran medida el acceso a información, conocimientos y diversos servicios que han permitido expandir los procesos educativos; no obstante, dado que la información visual es tan abundante y variada, se necesitan herramientas adaptables que permitan a las personas con discapacidad visual acceder a dicha información [7].
- **Oportunidades laborales:** Para las personas con discapacidad visual es importante poder acceder a un empleo remunerado, para poder satisfacer sus diversas necesidades. Es por esta razón que los desarrollos tecnológicos en el ámbito laboral deben fortalecerse para poder ser inclusivos con las personas con discapacidad, implementando puestos de trabajo acondicionados adecuadamente para que las personas con discapacidad, particularmente la visual, puedan realizar las labores correctamente y aportar al crecimiento de las organizaciones [7].

1.3 Sensación somática

Para tener un mejor entendimiento acerca de la importancia de la sensación somática en la interacción con los dispositivos hápticos, se hace necesario adquirir un mayor conocimiento acerca de las características que posee dicho sentido, por lo tanto, a continuación, se hace una descripción a fondo de su funcionamiento.

1.3.1 Receptores de la Piel

Los tipos de receptores que se pueden encontrar en la piel sin vello situada en la palma de la mano y las yemas de los dedos son los siguientes:

- **Corpúsculos de Meissner:** Se encuentran justo debajo de la epidermis y se desplazan con las crestas de la dermis y por esta razón detectan el movimiento en la piel mejor que cualquier otro receptor; Responden a estímulos de baja frecuencia, es decir como los roces suaves [10].
- **Discos de Merkel:** Se componen de una fibra nerviosa y como su nombre lo dice poseen una forma de disco. Se clasifican como mecanoreceptores [10].



- **Corpúsculos de Pacini:** Se encuentran en lo más profundo de la dermis y son los receptores de mayor tamaño. Funcionan como detectores de aceleración. Detectan cambios de presión y vibración, son especialmente sensitivos a 250 Hz aproximadamente [10].
- **Corpúsculos de Ruffini:** Se sitúan en la mitad de la dermis, detectan de gran manera el estiramiento y el torque [10].

1.3.2 Adaptación Sensorial

Hay dos tipos de adaptaciones para los receptores, la primera es la Adaptación Lenta (SA, *Slowly Adapting*) la cual es para los receptores que presentan una disminución de descarga muy lenta a lo largo del tiempo; la segunda es la Adaptación Rápida (RA, *Rapidly Adapting*) la cual es para los receptores que poseen una disminución de impulsos tan grande que en muy poco tiempo el estímulo se convierte en imperceptible, como por ejemplo la adaptación que se produce en las personas acostumbradas a usar guantes o gafas [10].

A continuación, se clasifican los receptores de la piel en función de su periodo de adaptación:

- **Corpúsculos de Meissner** o RA tipo I. La mayor parte de las veces se descarga en cuanto aparece el estímulo, es por este motivo que responde bien a la velocidad [10].
- **Discos de Merkel** o SA tipo I. Posee un periodo de descarga largo pero irregular en respuesta a fuerzas aplicadas a la piel [10].
- **Corpúsculos de Pacinian** o RA tipo II. Producen una única descarga por estímulo, por esta razón no son sensibles a una presión constante sobre la piel, pero funcionan muy bien como detectores de aceleración o vibración [10].
- **Corpúsculos de Ruffini** o SA tipo II. Poseen un periodo regular de descarga con un estímulo constante [10].



1.3.3 Resolución Espacial

Los receptores presentes en la piel también se pueden caracterizar de acuerdo al tamaño de su campo de recepción, es decir, el área en la que un estímulo de intensidad dada es capaz de excitar al receptor. Esta superficie puede variar desde 1 o 2 mm² hasta 45 mm², dependiendo de la parte del cuerpo y el tipo de receptor involucrado.

Determinar el campo de recepción de un solo receptor es prácticamente imposible, sin embargo, se puede afirmar que los receptores SA II y RA II tienen campos de recepción grandes y por lo tanto baja resolución espacial; por el contrario, los receptores SA I y RA I poseen campos de recepción mucho más pequeños y por lo tanto permiten una mejor localización espacial del estímulo [10].

1.3.4 Resolución Temporal

Cuando dos sucesos se presentan en la piel con una separación de tiempo muy pequeña, el sujeto solo es capaz de percibir un único estímulo. El tiempo límite mínimo de distinción entre dos sucesos para los receptores es de aproximadamente 5 ms, pero en el caso que se desee reconocer el orden en el cual se produjeron los estímulos, el tiempo límite mínimo aumenta a 20 ms.

En cuanto al tiempo de respuesta táctil a un estímulo dado, se tiene que es de aproximadamente 0.12 s; si en la percepción debe intervenir de manera decisiva el cerebro como lo sería el caso del reconocimiento del código Braille, el tiempo de respuesta queda establecido aproximadamente entre 0.87 y 1.56 s [10].

1.3.5 Rango de Fuerzas

La fuerza mínima que es capaz de reconocer un usuario varía aproximadamente entre 0.005 N y 0.01 N. Este dato es de gran importancia para establecer la resolución en fuerza que debería darse en los actuadores de los dispositivos hápticos.

Otros datos importantes son los valores máximos de fuerza que puede desarrollar el hombre en diferentes operaciones; al apretar la mano el hombre puede alcanzar los 400 N mientras que la mujer logra alcanzar los 228 N; de igual manera con los dedos el hombre alcanza los 65 N y la mujer los 45 N; por otra parte, con el dedo índice extendido el hombre y la mujer alcanzan 50 N y 40 N respectivamente.



Respecto al valor de fuerza máxima continua tolerable, es decir, que no produce dolor físico ni fatiga en una sesión que se prolongue durante varias horas, se establece como aproximadamente el 15% de la máxima que se puede ejercer. En el caso del dedo índice sería de 7.5 N y 6 N para hombres y mujeres respectivamente [10].

1.4 Sistemas de ayuda

Se entiende como Interacción Humano-Computadora (HCI, *Human Computer Interaction*) a todo lo relacionado con las interacciones que se pueden dar entre el humano, los computadores y todos los procesos que involucran a ambos, teniendo en cuenta cómo se realizan dichos procesos mediante sistemas *software* y/o *hardware* [11].

Sin embargo, el desarrollo de estas interfaces, las cuales se han desplegado en diversos tipos de dispositivos, tanto móviles como de escritorio, se centra en la comunicación visual. Hay una gran oferta en el mercado de aplicaciones para diversas plataformas que principalmente orientan sus desarrollos a la diversión y al ocio, pero no tienen en cuenta factores importantes como la accesibilidad y la usabilidad para cierto porcentaje de la sociedad que presenta algún tipo de discapacidad sensorial, y en concreto personas con discapacidad visual.

De acuerdo a lo dicho anteriormente, se observa la necesidad de contribuir con esta línea de investigación, con el fin de definir las diversas pautas y parámetros a tener en cuenta al momento de realizar desarrollos accesibles, tanto en *software* como en *hardware* y lograr de esta manera establecer una base para diversos sistemas que pretendan enfocarse a usuarios con discapacidad visual. A este tipo de sistemas, en este trabajo, se les denominará como Sistema de Ayuda para Discapacitados Visuales (SADV).

Las personas con discapacidad visual afrontan diversos problemas, tales como la movilidad en espacios abiertos, la colisión con obstáculos, la correcta ubicación espacial, el reconocimiento de imágenes, entre otros. El desarrollo e implementación de los SADV ha sido de gran importancia debido a que van enfocados a mejorar la calidad de vida de personas con algún grado de discapacidad visual, ya sea moderada



o grave. En el presente trabajo de grado, el SADV propuesto tiene como finalidad brindar una solución al problema de reconocimiento de imágenes mediante la estimulación de la sensación somática. Sin embargo, este tipo de sistemas no limita su aplicación únicamente a personas con discapacidad visual, ya que pueden aumentar el desarrollo de las capacidades de la sensación somática de todas las personas, en vista de que aumentan la estimulación recibida. Entre los beneficios más importantes que se pueden obtener, debido a la estimulación de la sensación somática en personas videntes, se encuentra la posible mejora de las experiencias de realidad virtual, ya que al incrementar la sensibilidad existe una mejor respuesta a estímulos y, por ende, se logra que la experiencia sea mucho más completa y satisfactoria por parte del usuario [3].

Los SADV para el reconocimiento de imágenes se basan en 2 etapas principales. La primera etapa es el procesamiento de la imagen a representar y su objetivo principal es extraer las características más importantes de dicha imagen, con el fin de generar una representación modificada de la imagen original. Para ello se debe tener mucho cuidado de no saturar la imagen con gran cantidad de rasgos de tal forma que no se pueda identificar, pero también es de suma importancia no dejar de lado rasgos indispensables de la imagen, ya que se puede llevar a la confusión con imágenes similares. Posteriormente, en la segunda etapa, se realiza una representación táctil de la imagen, mediante el uso del concepto de *taxeles*⁵, en esta etapa es importante definir la forma y el tamaño del *taxel* y la separación entre los mismos, de tal manera que no se deforme la imagen y se genere la mejor representación posible enfocada a la correcta estimulación o de la sensación somática.

⁵ *Taxel*: Pixel táctil.



Identificación de las condiciones requeridas por un sistema que facilite el reconocimiento de imágenes por medio del sentido del tacto

Juan Manuel Calvache Zapata – John Edison Fernández Ordóñez



Capítulo 2

Marco teórico

2.1 Matriz de taxeles

2.1.1 Definición de taxel

Una imagen está compuesta por una gran cantidad de píxeles agrupados que son captados por medio del sentido de la vista. Cuando se busca que la imagen sea captada por medio de la sensación somática se hace uso del taxel; es decir, un pixel táctil [12].

2.1.2 ¿Qué es una matriz de taxeles?

Una matriz se define como un conjunto de elementos agrupados de manera cuadrada o rectangular, en donde cada elemento representa información o datos. Los elementos se organizan de manera ordenada en filas y columnas, donde una fila se representa por las líneas horizontales de la matriz, mientras que la columna se representa por las líneas verticales. Una matriz de m filas y n columnas se denomina matriz de orden $m \times n$, lo cual también indica su tamaño [13]. De acuerdo a lo anterior, se entiende a una matriz de taxeles, como la agrupación de $m \times n$ taxeles, los cuales representan de forma táctil la información de una imagen.

La matriz de taxeles puede variar su tamaño dependiendo del uso y la portabilidad que se le desee dar, entre mayor sea el tamaño de la matriz, mayor es la cantidad de imágenes que se pueden representar en ésta. Adicionalmente, es posible cambiar el tamaño y/o la forma de los taxeles, al igual que la separación entre éstos; lo cual repercute en el tamaño de la matriz. En la Figura 2.1, se representan los parámetros de tamaño de los taxeles y separación entre taxeles como “ tt ” y “ dt ”, respectivamente.

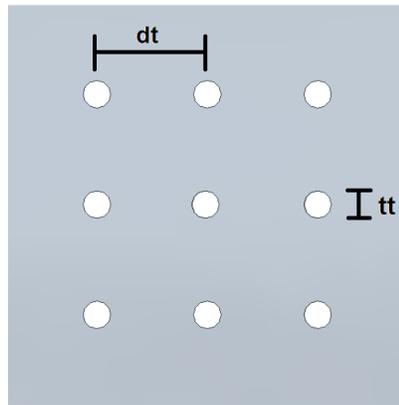


Figura 2.1 Parámetros de la matriz de taxeles.

Se escoge la matriz de taxeles para la creación de un SADV, debido a que con ésta es posible obtener un dimensionamiento que permita la comodidad de uso y la portabilidad por parte del usuario; además, se espera que sea una tecnología asequible, dado que se han implementado soluciones con otras tecnologías, como por ejemplo los sensores hápticos, que son muy costosas para los usuarios finales.

2.1.3 Procesamiento de imágenes para una matriz de taxeles

Una imagen digital está compuesta por una matriz de elementos denominados pixeles, término derivado de las palabras en inglés *picture element*. Los tonos representados en una imagen dependen de dos factores, el número de matrices que componen la imagen y el número de bits destinado a representar cada uno de los tonos. Si una imagen es a blanco y negro, entonces está compuesta únicamente por una matriz; mientras que las imágenes a color están compuestas típicamente por 3 matrices, que comúnmente se destinan para la representación de tonos en Rojo, Verde y Azul (RGB, *Red Green Blue*). Por otra parte, el número de bits asignado para representar cada uno de los tonos, determina el número de valores posibles; usualmente se utilizan 8 bits para representar los elementos de cada matriz, lo cual es el equivalente a valores entre 0 y 255 [14].

Uno de los principales problemas en el procesamiento de imágenes es la masiva cantidad de información que éstas contienen [14], la cual debe reducirse para su representación de forma táctil. Lo primero a considerar es la representación de la imagen en escala de grises, ya que únicamente se requiere una matriz para



representar la imagen. Los algoritmos para la conversión de una imagen a color a escala de grises consisten, típicamente, en una combinación lineal de los valores de cada uno de los tonos de color RGB. Uno de los métodos más comunes, consiste en realizar una mezcla de los tonos RGB para obtener uno solo en gris, tomando los siguientes porcentajes: Rojo 30%, Verde 59%, Azul 11%, que, de acuerdo a expertos en la materia, es lo más parecido a como nuestros ojos captan la intensidad de luz dependiendo del color de ésta. Este fenómeno, se puede expresar mediante la Ecuación 2.1, conocida como ecuación de luminancia, en donde los factores de ponderación de cada componente de color, indican la sensibilidad del ojo humano a las frecuencias del espectro cercanas al rojo, verde y azul [15].

$$Y = R * 0.3 + G * 0.59 + B * 0.11 \quad (2.1)$$

Otras formas para reducir la cantidad de información contenida en una imagen son el muestreo y la cuantificación. Con el muestreo se reducen las dimensiones de la imagen, aprovechando la correlación espacial existente entre pixeles contiguos para mantener la forma de la imagen original. El método más simple para realizar este proceso es dividir la imagen en bloques y tomar un valor de cada bloque, como se observa en la Figura 2.2. La cuantificación, por su parte, reduce el número de valores con los que se pueden representar los tonos de una imagen, siendo la cuantificación binaria el número mínimo de valores requerido (blanco y negro) [16].

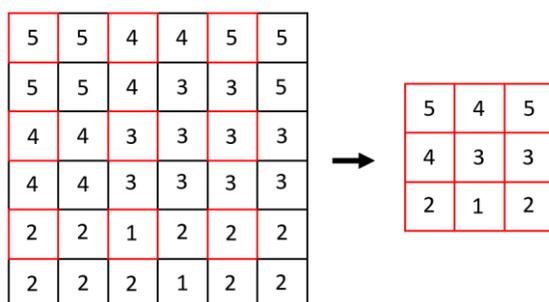


Figura 2.2 División de una imagen en bloques.

Los valores definidos por la cuantificación de la imagen determinan los niveles de intensidad que deben representar los taxeles, es decir, entre mayor sea la intensidad del estímulo del taxel, más cerca está el tono de la imagen del color negro y lo contrario equivale al color blanco. La intensidad del taxel se puede generar estimulando la sensación somática por medio de la elevación del mismo o por su vibración.



Finalmente, dentro del procesamiento digital de imágenes se han definido diferentes algoritmos para la detección de los bordes de una imagen, con lo cual es posible extraer la información mínima e indispensable para describir una imagen.

2.2 Matemáticas

2.2.1 Introducción

La información existente donde se documentan principios, prácticas y diversos materiales educativos y herramientas didácticas, utilizados para la enseñanza de algunas materias a estudiantes con ciertos tipos de discapacidades o necesidades especiales son bastante escasos. En ciertos casos, algunas escuelas especializadas han desarrollado este material para su uso interno y en otros casos el conocimiento ha sido transmitido de docente a docente como parte de una transición en un ambiente laboral [17].

Uno de los primeros problemas que se encuentran al momento de enseñar matemáticas o geometría a un estudiante con discapacidad visual se encuentra en los libros guía, los cuales no siempre se encuentran disponibles en código Braille, generando un reto para el docente, sobre todo cuando debe enseñar a personas con y sin discapacidad visual al tiempo [18].

2.2.2 Dificultades y retos para los estudiantes con discapacidad visual

2.2.2.1 Escritura braille

Existen máquinas para escribir en código Braille mediante las cuales los estudiantes con discapacidad visual pueden tomar sus apuntes sin inconvenientes, el problema de este proceso es que la representación de código Braille requiere de mucho espacio, por esta razón, para una sola lección la cantidad de papel necesaria para las notas tomadas es demasiado extensa, dificultando el proceso de estudio [18]. Para la escritura de cada letra o signo es necesario utilizar un cajetín, el cual está compuesto por 6 puntos en relieve, como se observa en la Figura 2.3.

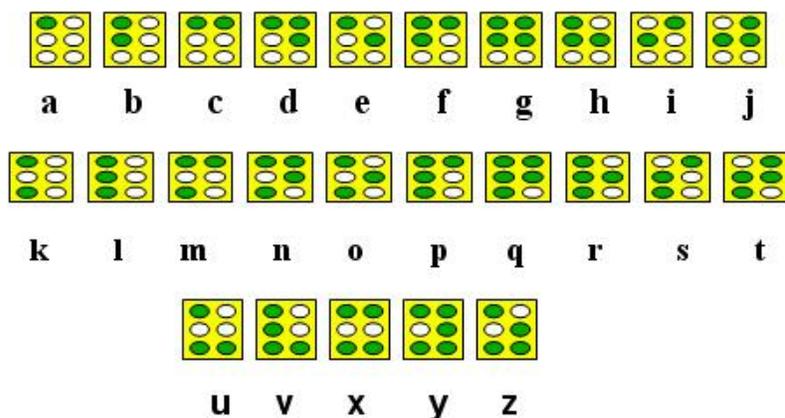


Figura 2.3. Representación del abecedario en código Braille.

Tomado de [19].

2.2.2.2 Cálculos numéricos

Los cálculos numéricos representan un gran reto para los estudiantes con discapacidad visual. Mientras que un estudiante vidente tiene la capacidad de aplicar diversos algoritmos para resolver cada operación y además apoyarse en diseños gráficos para resolverlas, gran parte de los estudiantes con discapacidad visual no han desarrollado sus habilidades gráficas, ya que requieren mucha práctica resolviendo ejercicios, necesitan una buena memoria y la habilidad de utilizar herramientas como las máquinas de escribir [17]. En escritura braille, se tiene que para representar los números del 1 al 0, se utiliza el código Braille de las letras “a” hasta la “j”, anteponiendo el código de número en un cajetín adicional, como se observa en la Figura 2.4.

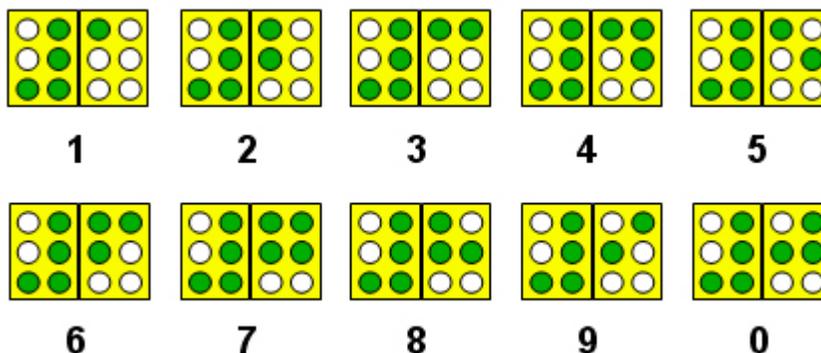


Figura 2.4. Representación de los números del 1 al 0 en Braille.

Tomado de [19].



2.2.2.3 Dibujos

Los Dibujos son un complemento importante de las matemáticas, por ejemplo, en la geometría se utiliza mucho la representación gráfica, llegando incluso a ser indispensable en la solución de algunos problemas [17].

La matemática tiene áreas en las que se trabaja con más de dos dimensiones, la misma geometría aborda figuras en tres dimensiones. Es posible representar dibujos de 3D por medio de la perspectiva, no obstante, éstos son difíciles de interpretar incluso para las personas videntes. Esta es una de las razones por las que la enseñanza de las matemáticas, en particular la geometría, representa un gran reto para los alumnos con discapacidad visual y para sus docentes. Lo anterior puede ocasionar deserción por parte de los estudiantes o que los profesores abandonen sus esfuerzos por brindarle estos conocimientos a sus estudiantes con discapacidad visual [18].

A continuación, se presentan los testimonios de profesores que han abordado el reto de enseñar a personas con discapacidad visual:

A veces subestimé las capacidades de Jessie. Dudaba que un estudiante ciego pudiera entender completamente un tema visual como la geometría. Sí, la geometría es un tema visual, pero la visualización no depende únicamente de los ojos. Jessie podía ver la belleza de este tema con sus manos. Pequeños bultos en el papel se convirtieron en imágenes en la mente de Jessie. Los pinchazos de chincheta se convirtieron en un trabajo de cero para la resolución de problemas. Los rectángulos girando se convirtieron en cilindros en las palmas de Jessie. En esencia, Jessie vio las matemáticas a través de su "ojo mental" [18].

Comprender la geometría no depende de ver objetos e imágenes con los ojos. Los problemas se pueden representar "visualmente" de muchas maneras; se pueden hablar, leer, dibujar y sentir. Todos los alumnos pueden aprender; Sin embargo, todos aprenden de manera diferente [18].



2.2.2.4 Tiempo

Se debe considerar el tiempo como un factor de importancia cuando se trabaja con las personas con discapacidad visual. Los estudiantes ciegos necesitan explicaciones extra, la repetición de los dictados para corroborar lo escrito, el uso de material didáctico especial, entre otras acciones; que consumen una gran cantidad de tiempo. Por otra parte, si un estudiante ciego no domina la escritura de braille matemático, necesitará una cantidad de tiempo mayor que otros estudiantes y posiblemente tendrá algunos errores numéricos, que ocasionarán que éste se retrase con respecto a los demás alumnos y en el peor de los casos termine dándose por vencido con las materias. Así mismo, en el caso de presentar exámenes, los estudiantes ciegos pueden encontrarse en una situación donde no puedan terminarlos en el tiempo estipulado [17].

2.2.3 Matrices de taxeles como apoyo a la enseñanza de las matemáticas

De acuerdo a lo mencionado en la sección anterior, los sistemas basados en matrices de taxeles sirven para la representación de figuras de forma táctil. Para la enseñanza de las matemáticas se requiere de la representación de figuras geométricas, funciones en un plano cartesiano, entre otras. Teniendo en cuenta que, las figuras más básicas relacionadas con las matemáticas (2D) se pueden representar con líneas o bordes, se necesitan únicamente dos valores, por lo tanto, los taxeles de la matriz se conmutan entre activos e inactivos.

2.3 Elementos hardware y software

A continuación, se presenta la descripción de los componentes hardware y software necesarios para el diseño e implementación de una matriz de taxeles.

2.3.1 Motores DC

Un motor, puede definirse como un sistema que tiene la capacidad de transformar energía en algún tipo de movimiento. Por esta razón, son utilizados ampliamente en diversas aplicaciones que requieran implementar algún tipo de movimiento. Uno de los motores más populares e importantes en la industria es el motor DC.

Los motores DC son motores eléctricos, cuya función principal consiste en transformar la energía eléctrica en energía mecánica o viceversa. Dicho funcionamiento se basa

en dos leyes del electromagnetismo, la ley de Faraday y la ley de Laplace. La ley de Faraday indica que la fuerza electromotriz inducida en un circuito es igual a la variación respecto del tiempo del flujo magnético que lo atraviesa cambiado de signo. Por otra parte, La ley de Laplace dice que sobre un conductor por el que circula una corriente eléctrica y que está sometido a un campo magnético aparece sobre él una fuerza que lo mueve [20].

En los motores eléctricos, la energía mecánica generada, se presenta en forma de movimiento rotativo respecto al eje central. Sin embargo, existen aplicaciones con motores eléctricos que no producen movimiento rotatorio y que, en cambio, desplazan un eje longitudinalmente una determinada distancia.

El sentido de giro del movimiento rotatorio del motor DC, está relacionado la polaridad de la fuente de alimentación. Por esta razón, se puede controlar este movimiento de giro mediante la conmutación del sentido de la corriente inducida que genera la fuente de alimentación, como se observa en la Figura 2.5.

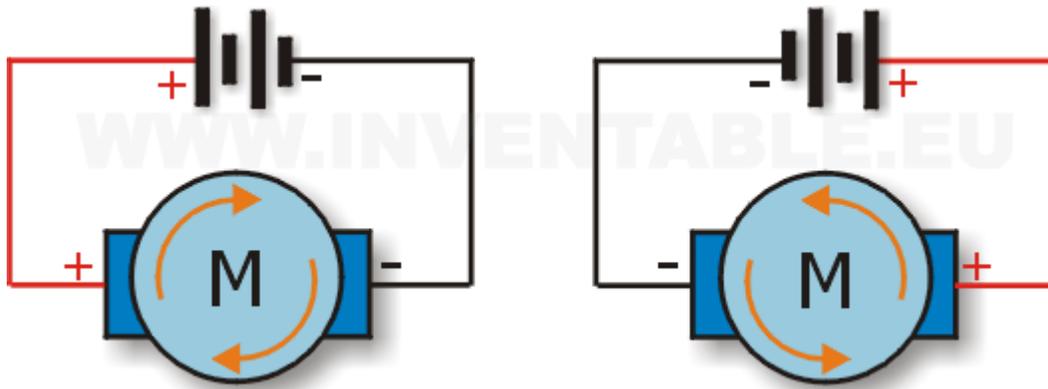


Figura 2.5. Sentido de giro de un motor DC.

Tomado de [21].

2.3.2 Motores paso a paso

Los motores paso a paso son dispositivos electromecánicos que permiten convertir una serie de impulsos eléctricos en desplazamientos angulares discretos, logrando girar una cantidad de grados que dependen de sus entradas de control.

La característica principal de los motores paso a paso es el hecho de que se tiene un mayor control sobre su movimiento, puesto que es posible mover el motor un paso a

la vez por cada pulso que se le envíe, estos movimientos o giros pueden ir desde 1.8° hasta 90° [22].

De acuerdo a lo mencionado previamente, el crecimiento de la tecnología de control ha permitido usar este motor en numerosas aplicaciones de control de movimiento, específicamente en la industria de la robótica, en control de sistemas, y máquinas de ensamblado automático, en donde se desea controlar variables como el torque, la dirección y la velocidad [23]. En la figura 2.6, se observa un esquema del circuito de control.

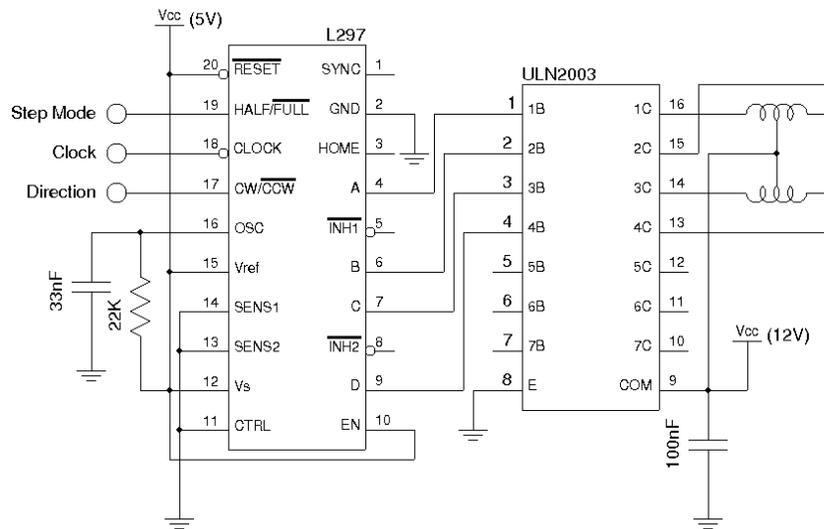


Figura 2.6. Modelo de los controladores para el prototipo de motores paso a paso unipolares.

Tomado de [24].

2.3.3 Transistor Darlington e integrado ULN2803

Una conexión *Darlington* está compuesta por la conexión de dos transistores en cascada, como se observa en la Figura 2.7. De acuerdo a esto, se tiene que la ganancia de corriente total será igual al producto de las ganancias de corriente individuales, lo cual genera una amplificación de corriente bastante considerable [25].

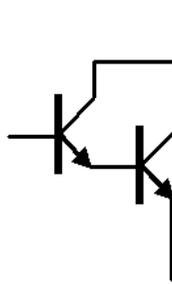


Figura 2.7. Arreglo Darlington.

Tomado de [26].

Usualmente, los fabricantes de transistores, insertan dos transistores dentro de un solo encapsulado, creando un elemento con tres terminales más conocido como transistor Darlington, el cual funciona como si fuese un solo transistor con una ganancia de corriente extremadamente alta, como es el caso del TIP101, el cual tiene una ganancia mínima de 1000 y una ganancia máxima de 20000 [25].

Por otra parte, se tiene el integrado ULN2803, el cual es un arreglo de ocho pares de transistores Darlington NPN, con la capacidad de manejar 0.5A y 50V. Con diodos de protección de voltaje inverso para manejar cargas inductivas [27]. En la Figura 2.8, se puede observar el diagrama lógico del integrado ULN2803.

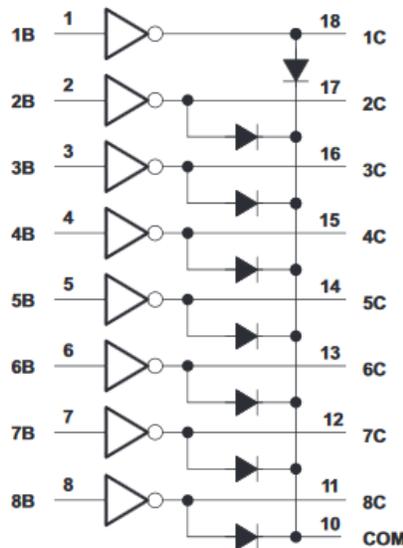


Figura 2.8. Diagrama lógico del integrado ULN2803.

Tomado de [27].



2.3.4 DIP switch

Un *DIP switch*, es un elemento eléctrico que está compuesto por un conjunto de micro-interruptores, agrupados en lo que se denomina Paquete Dual en Línea (DIP, *Dual In line Package*) [28]. Existe una amplia variedad de *DIP switch* que pueden contener 2, 4, 5, 6, 8 hasta 9 micro-interruptores, como se observa en la Figura 2.9.

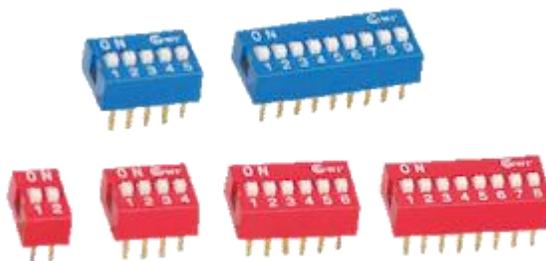


Figura 2.9. *DIP Switch* de diversos tamaños.
Tomado de [28].

Estos elementos, tienen la capacidad de funcionar como puente para interconectar, de manera temporal, un par de terminales. Es utilizado comúnmente para controlar el comportamiento de otros dispositivos electrónicos en ciertas situaciones específicas donde es necesario tener un control manual del flujo de alimentación.

2.3.5 Puente H e integrado L293

Como se observa en la Figura 2.10, los circuitos puente “H” no presentan complejidad en su implementación ya que, mediante el uso de componentes discretos como transistores y diodos, se construyen en poco tiempo [29]. Sin embargo, para lograr realizar una implementación más práctica y organizada, se utiliza el integrado L293, el cual posee internamente dos puentes “H” con capacidad de controlar dos micro motores DC, como se aprecia en la Figura 2.11.

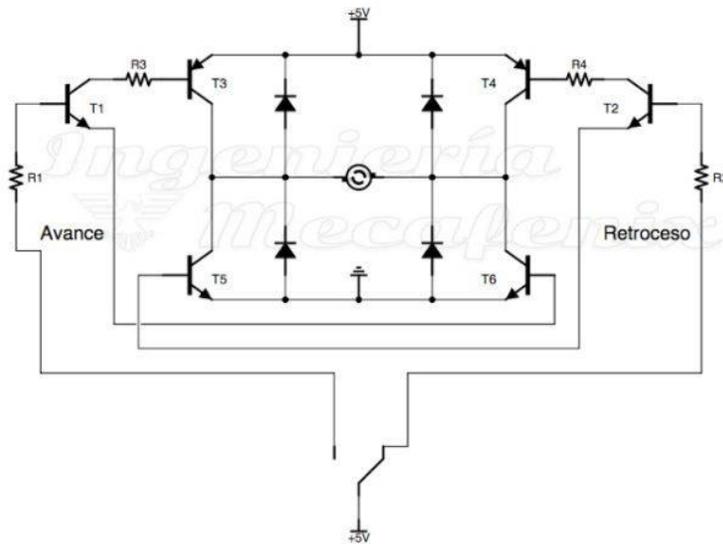


Figura 2.10. Puente H implementado con Transistores y diodos.
Tomado de [30].

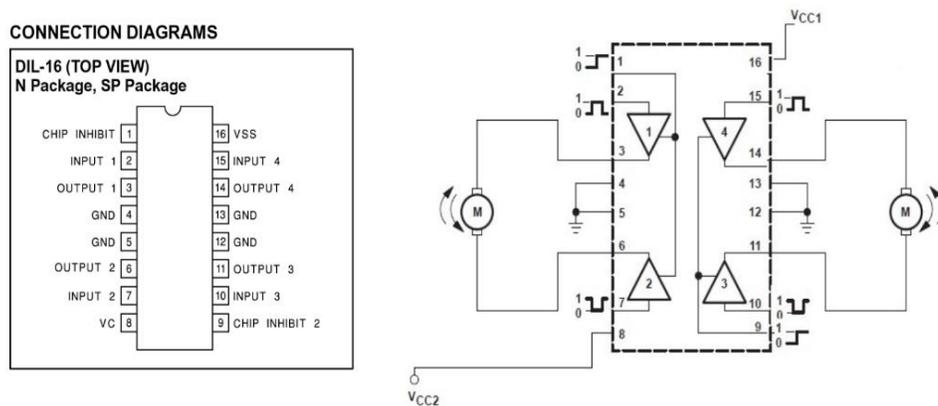


Figura 2.11. Diagrama integrado L293.
Tomado de [31].

2.3.6 Solid Edge

Solid Edge, es un programa parametrizado de Diseño Asistido por Computadora (CAD, *Computer-aided design*) de piezas 3D. Dependiendo del tipo de trabajo que se requiera realizar, se debe iniciar uno u otro entorno. Solid Edge, permite trabajar sobre estos entornos: Pieza, Conjunto, Chapa, Soldadura y Plano [32].



Con Solid Edge, el usuario tiene la capacidad de realizar diseños de dos maneras, mediante el modelado tradicional o con la tecnología síncrona, la cual consiste en poder diseñar y modificar con total libertad (Sin árbol de operaciones) y sin limitaciones y, además, con la ventaja de poder tomar decisiones más rápidas que en modelado basado en historial [32].

Por otra parte, la creación de prototipos virtuales en 3D funcionales, permite optimizar los diseños antes de la producción, lo cual disminuye la complejidad del diseño. En la Figura 2.12, se observa el entorno básico de Solid Edge en su versión 16.

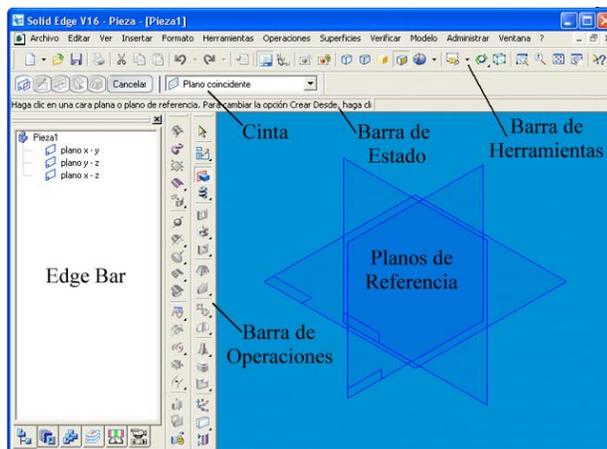


Figura 2.12. Entorno básico de Solid Edge v16.

Tomado de [32].

2.3.7 Integrado L297

Este integrado está diseñado especialmente para el control de motores paso a paso, tanto bipolares como unipolares, ya que genera la secuencia de pulsos necesaria para hacer girar el motor. Además, incluye un circuito de control de corriente mediante Modulación por Ancho de Pulso (PWM, *pulse width modulation*), encargado de mejorar el rendimiento del motor [33].

En la Figura 2.13, se puede observar el diagrama de pines del integrado L297.

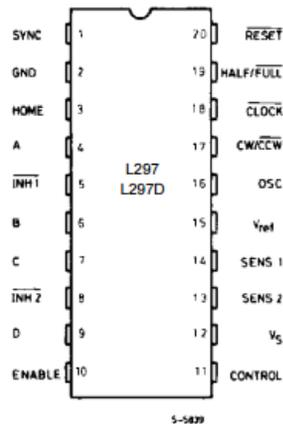


Figura 2.13. Integrado L297-
Tomado de [34].

2.3.8 Mini motor vibrador

Este tipo de motor es ampliamente conocido gracias a su uso en controles de videojuegos y en los celulares. Su función principal, es generar pequeñas vibraciones que no son muy ruidosas, ni molestas para las personas, y que tienen como finalidad dar un pequeño aviso o alerta para diversas situaciones [35].

A continuación, se presentan las características de estos motores:

- Diámetro de 6 milímetros.
- Longitud total de 17 milímetros.
- Tensión nominal de 3 Vdc.
- Corriente nominal de 70 mA.
- Tensión de arranque de 1.7 Vdc.
- Voltaje de funcionamiento entre 2.2 a 3.6 Vdc.

2.3.9 Arduino

Arduino es una plataforma de código abierto utilizada para desarrollar proyectos electrónicos por medio de una placa de desarrollo basada en microcontroladores. Estas placas se denominan módulos arduino, también está compuesto por un Entorno de Desarrollo Integrado (IDE, *Integrated Development Environment*), utilizado para escribir y cargar el código de la computadora al módulo Arduino [36].

El IDE utiliza lenguaje de programación C, lo cual permite que aprender a programar



en este tipo de placas sea mucho más sencillo, además, se tiene acceso a la biblioteca Arduino que crece constantemente gracias a la comunidad de código abierto.

En la Figura 2.14, se puede observar el entorno IDE de Arduino.

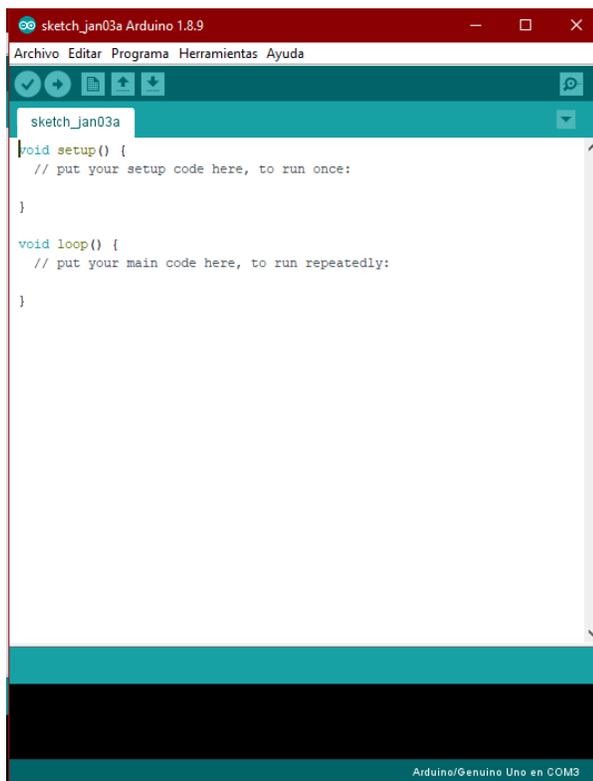


Figura 2.14. Entorno IDE de Arduino.

2.3.10 Raspberry Pi

Raspberry Pi, es un Computador de Placa Reducida (SBC, *Single Board Computer*), lo cual indica que son placas que contienen gran parte de los componentes de un computador. Son desarrolladas en Reino Unido por la Fundación Raspberry Pi, con el objetivo de buscar hardware económico y libre para enseñar computación en los colegios de primaria [37]. En la Figura 2.15, se observa una Raspberry Pi y algunos de sus componentes.

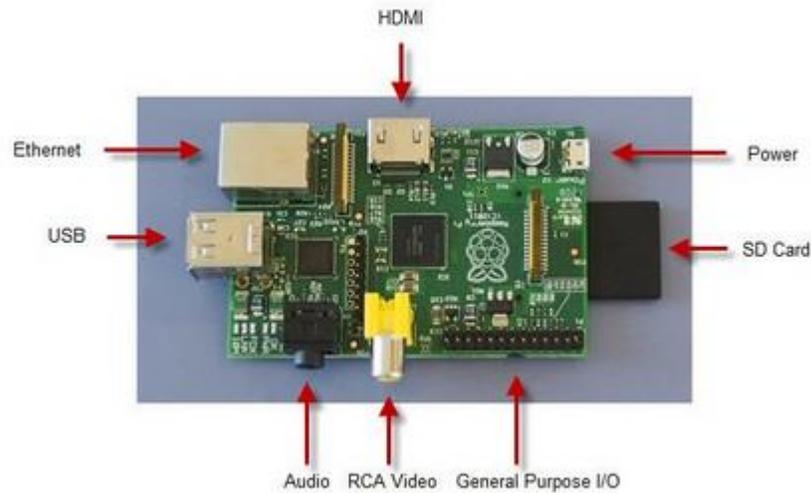


Figura 2.15. Raspberry pi.
Tomado de [38]

El sistema Noobs (*New Out Of Box Software*) es una aplicación disponible para Raspberry Pi que se instala en la tarjeta de memoria, en lugar de instalar un sistema operativo. Por otra parte, Raspberry Pi usa comúnmente sistemas operativos GNU/Linux Raspbian, una distribución que se deriva de Debian, que está optimizada para el hardware de Raspberry Pi, y es la distribución más recomendada para iniciarse [37].

2.3.11 Tarjeta de desarrollo ESP32

Es un microcontrolador que integra tecnologías WiFi y Bluetooth de modo dual, que le proporcionan conectividad con internet u otros dispositivos. Es un módulo de bajo costo que, junto al doble procesador y al modo de bajo consumo, lo convierten en un competidor fuerte en el mercado de los módulos de desarrollo orientados al Internet de las Cosas (IoT, *Internet of Things*). La tarjeta de desarrollo suele integrar elementos como pines adaptados, conexión USB, pulsadores y componentes para la interfaz serie/USB [39].

En la Figura 2.16, se observa una tarjeta ESP32 y la descripción de sus pines.

2.3.12 Electroimanes

Los electroimanes son un tipo de imanes que producen un campo magnético cuando se les aplica una corriente eléctrica. Sin embargo, al quitar dicha corriente, el campo magnético en los electroimanes desaparece. En la Figura 2.18, se puede apreciar el esquema general del electroimán.

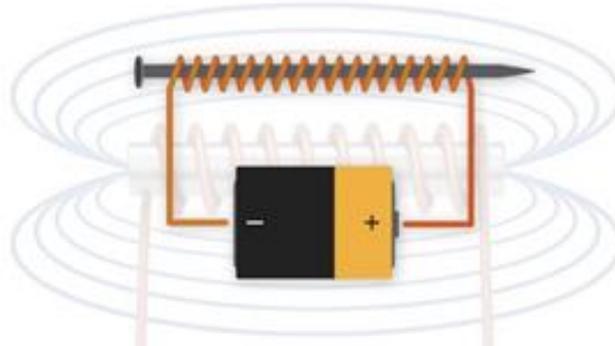


Figura 2.18. Esquema general de un electroimán.
Tomado de [41].

Para la realización del diseño del electroimán se deben tener en cuenta características como el diámetro $-d-$ y la longitud $-l-$ del alambre, el número de vueltas $-N-$, la intensidad de corriente aplicada $-I-$ y el tipo de material al interior de la bobina; puesto que éste se caracteriza por medio de su permeabilidad $-\mu-$ [42]. La Ecuación 2.2 muestra la expresión para realizar el cálculo aproximado del campo magnético $-B-$, que se genera al interior de la bobina.

$$B = \frac{\mu NI}{l} \quad [Wb/m^2] \quad (2.2)$$

Cuando el núcleo de la bobina es el aire, se usa la permeabilidad del vacío $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} [H/m]$. En la Ecuación 2.3 se muestra la forma de calcular la permeabilidad de un material $-\mu-$ a partir de su permeabilidad relativa $-\mu_r-$ y de μ_0 .

$$\mu = \mu_r \mu_0 \quad [H/m] \quad (2.3)$$

2.3.13 Alambre de Nitinol

El Nitinol es una aleación de Níquel y Titanio, es uno de los ejemplos más conocidos de la Aleación con Memoria de Forma (SMA, *Shape memory Alloy*). Este tipo de aleación permite deformar el material a una baja temperatura, pero al calentarse por



encima de una temperatura determinada, éste recupera su forma original como se observa en la Figura 2.19. El Nitinol, recibe su nombre de la combinación de las siglas de Níquel, Titanio y *Naval Ordnance Laboratory*, este último es el laboratorio donde se realizaron los primeros experimentos con este material, perteneciente a la marina de los Estados Unidos [43].

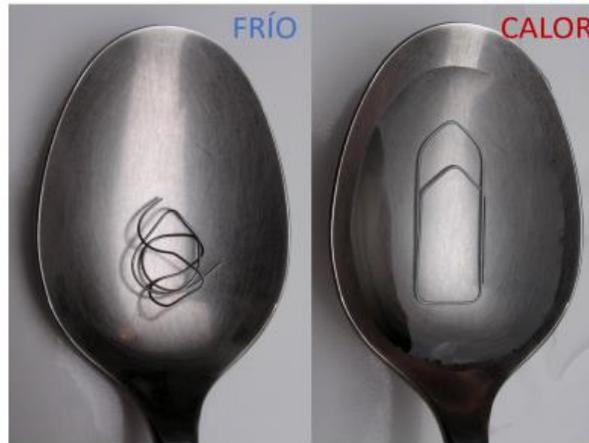


Figura 2.19. Alambre de Nitinol en sus dos estados.
Tomado de [43].



Identificación de las condiciones requeridas por un sistema que facilite el reconocimiento de imágenes por medio del sentido del tacto

Juan Manuel Calvache Zapata – John Edison Fernández Ordóñez



Capítulo 3

Diseño e implementación de prototipos

3.1 Definición de prototipo

Un prototipo es una versión inicial de un producto, la cual permite a los desarrolladores realizar pruebas con sus ideas y, además, mostrarle al usuario características o conceptos de diseño en general, con el fin de evaluar su viabilidad y de esta manera ahorrar tiempo y dinero. Por otra parte, algunos son desarrollados para tener una percepción del producto final y demostrar sus funcionalidades [44].

Dentro de los diversos tipos se destacan los siguientes [45]:

- **Prototipos de baja fidelidad:** Tienen como finalidad desarrollar aspectos generales del sistema sin entrar en detalles. Dentro de sus diversas características, se resaltan la economía, la rapidez de construcción y reparación y el hecho de no requerir técnicos expertos. Usualmente, se implementan con elementos distintos a los del producto final, como lápiz y papel, y tienen como función principal, obtener información por parte del usuario.
- **Prototipos de fidelidad media:** Tienen características similares a los prototipos de baja fidelidad, ya que generalmente los materiales o elementos usados, no son los mismos del producto final. Sin embargo, algunas de sus funcionalidades pueden representarse mediante el uso de simulaciones en pantallas empleando maquetas.
- **Prototipos de alta fidelidad:** A diferencia de los modelos anteriores, este tipo de prototipo es más costoso, ya que su implementación se realiza de manera detallada y precisa, con una parte del total de funcionalidades del producto final. Además, utilizan herramientas como java y HTML, que también son empleadas en el desarrollo del producto y que requieren de expertos que las manejen. Otro aspecto importante de estos prototipos, es que se emplea un mayor tiempo en su creación.



- **Prototipos horizontales:** Estos tipos de prototipos son utilizados para evaluar el alcance del sistema, pero no su uso real, debido a que cubren un amplio número de funciones y características de manera general, que en gran parte no son operativas.
- **Prototipos verticales:** A diferencia de los prototipos horizontales, estos prototipos evalúan el uso real de una parte del sistema final, ya que, aunque desarrollan solo algunas características del sistema, estas son totalmente funcionales.

Para este trabajo de grado, se desarrolló un prototipo de baja fidelidad, que sirvió de punto de partida para la recopilación de algunos requerimientos generales del sistema, y un prototipo vertical, en el cual se implementaron algunas funcionalidades del sistema, que posteriormente, fueron evaluadas en un escenario de pruebas.

3.2 Modelo de prototipos

La finalidad del modelo de prototipos busca definir, de manera general, los objetivos de un sistema y posteriormente hacer una recopilación de requisitos. Es comúnmente utilizado cuando no se tiene información detallada de los requisitos al inicio, o también, cuando se trata de un sistema complejo en donde no es posible obtener los requerimientos mediante un proceso manual. Este modelo, se basa en el ensayo y error, por lo tanto, cuando el usuario no está satisfecho con alguna parte del prototipo, se deben realizar los cambios y modificaciones necesarios hasta que el usuario este de acuerdo con los resultados [46].

Por otra parte, la construcción del prototipo debe realizarse en un corto tiempo y sin utilizar mucho dinero, ya que a partir de que este sea aprobado, se puede iniciar la construcción de sistema final.

Las fases de este modelo se pueden observar en la Figura 3.1 y posteriormente se describen de manera breve [47].

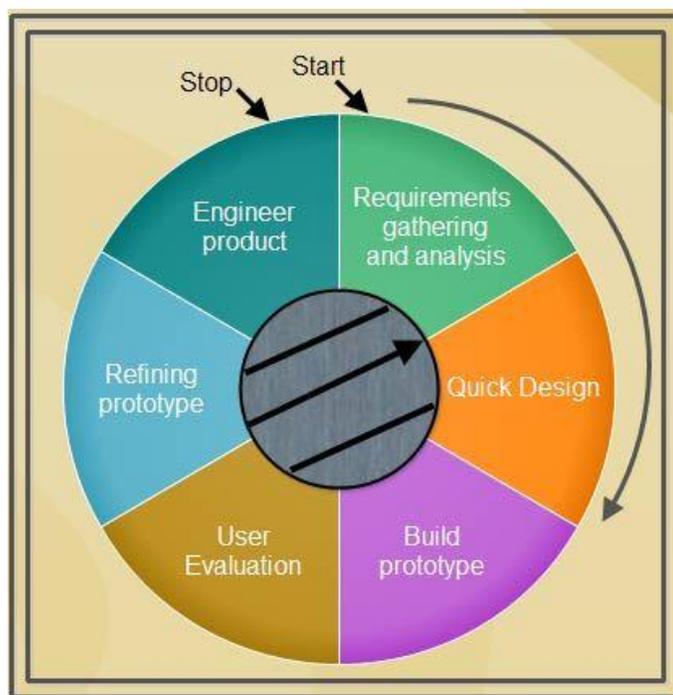


Figura 3.1. Fases del modelo de prototipos.
Tomado de [48].

Fase 1: Recopilación y análisis de requisitos (*Requirements gathering and analysis*). Se establecen y definen los requisitos que debe cumplir el sistema.

Fase 2: Diseño rápido (*Quick Design*). Se realiza un diseño rápido y sencillo, que muestra al usuario una idea del sistema.

Fase 3: Construcción del prototipo (*Build Prototype*). Se construye un diseño real del prototipo de acuerdo a la fase 2, que representa un modelo funcional del sistema.

Fase 4: Evaluación del prototipo por el usuario (*User Evaluation*): Se presenta al usuario el prototipo diseñado, para evaluar sus debilidades y fortalezas

Fase 5: Refinamiento del prototipo (*Refining Prototype*): si al evaluar el prototipo el usuario no se encuentra satisfecho, se refina el prototipo para cumplir con sus requerimientos.

Fase 6: Producto de ingeniería (*Engineer Product*): Cuando se cumplen todos los requisitos y el usuario acepta el prototipo final, el sistema final es evaluado a profundidad y se lleva a producción.



3.3 Aplicación del modelo de prototipos

Para el desarrollo de este trabajo de grado, se utilizó el modelo de prototipos. A continuación, se describen sus fases.

3.3.1 Recopilación y análisis de requisitos

Con el fin de determinar el conjunto de requerimientos funcionales y no funcionales para la matriz de taxeles, que permita obtener un prototipo utilizable por la comunidad con discapacidad visual, se llevó a cabo la ejecución de las entrevistas en profundidad⁶, donde se formularon preguntas de manera espontánea, generando un espacio abierto y de confianza, dentro del método de investigación cualitativo [49].

3.3.1.1 Ejecución de entrevistas

Inicialmente, se realizó una entrevista donde los participantes fueron personas videntes, con amplia experiencia trabajando con personas con discapacidad visual (una oftalmóloga de la clínica de sordos y ciegos de la ciudad de Cali, la coordinadora de la fundación PERCIBV y dos fonoaudiólogas de la Universidad del Cauca), que aportaron un panorama inicial para la recopilación de requerimientos básicos. Posteriormente, se realizó una segunda entrevista con una muestra de tres personas de la población invidente, en la cual se presentó el prototipo de baja fidelidad, según lo planteado en la Fase 2 del modelo de prototipos. En la Figura 3.2 se muestra el prototipo desarrollado mediante el uso de materiales comunes como un tablero de corcho y chinchas de diferentes formas (triangular, cuadrado y circular), con el fin de obtener una retroalimentación acerca de la forma más adecuada que debe tener el taxel para representar información y además de ello, poder definir requerimientos complementarios para el desarrollo de los prototipos.

⁶ Entrevistas en profundidad: Son reuniones desarrolladas un ambiente de expresión libre, donde a través de preguntas se puede explorar sobre la información más relevante como perspectivas, experiencias o situaciones vivenciales, con el fin de obtener información pertinente para los intereses de la investigación.

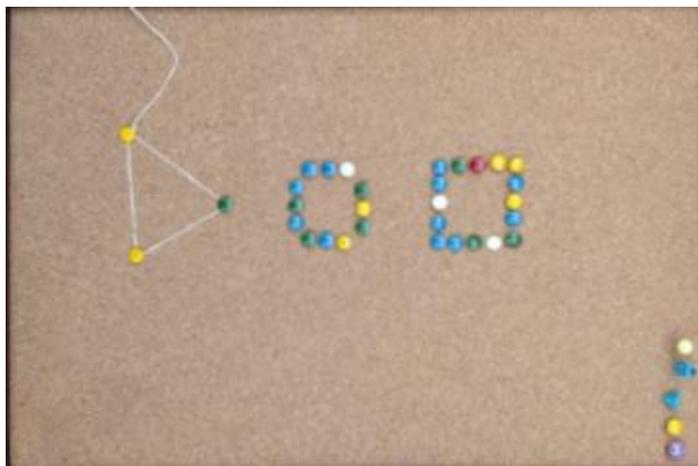


Figura 3.2. Prototipo de baja fidelidad.

Las entrevistas en profundidad fueron realizadas de manera individual y grupal, explicando a cada uno de los participantes el objetivo de la investigación y aceptando su participación por medio del consentimiento informado, que se encuentra en el Apéndice A. Se registraron las entrevistas mediante una grabación en un formato de audio, para ser utilizado como método de análisis de datos de investigación.

3.3.1.2 Análisis de las entrevistas

De acuerdo a información recolectada en la ejecución de las entrevistas en profundidad, se procede a realizar el análisis de datos en investigación cualitativa mediante métodos de visualización como diagramas y matrices que facilitan la presentación y explicación de la información más relevante hallada por los investigadores [50].

Conforme al análisis cualitativo realizado en esta fase del trabajo, fue soportado mediante redes de conceptos, que sintetizan la información, permiten relacionar ideas y además, unificar una variedad de conceptos recopilados mediante el modelo de entrevistas consignado en el Apéndice B.

A continuación, en la Figura 3.3 se muestra la red de conceptos que sintetiza la información obtenida en las entrevistas, en donde se resaltan en color azul aguamarina, los conceptos con mayor énfasis y relevancia.

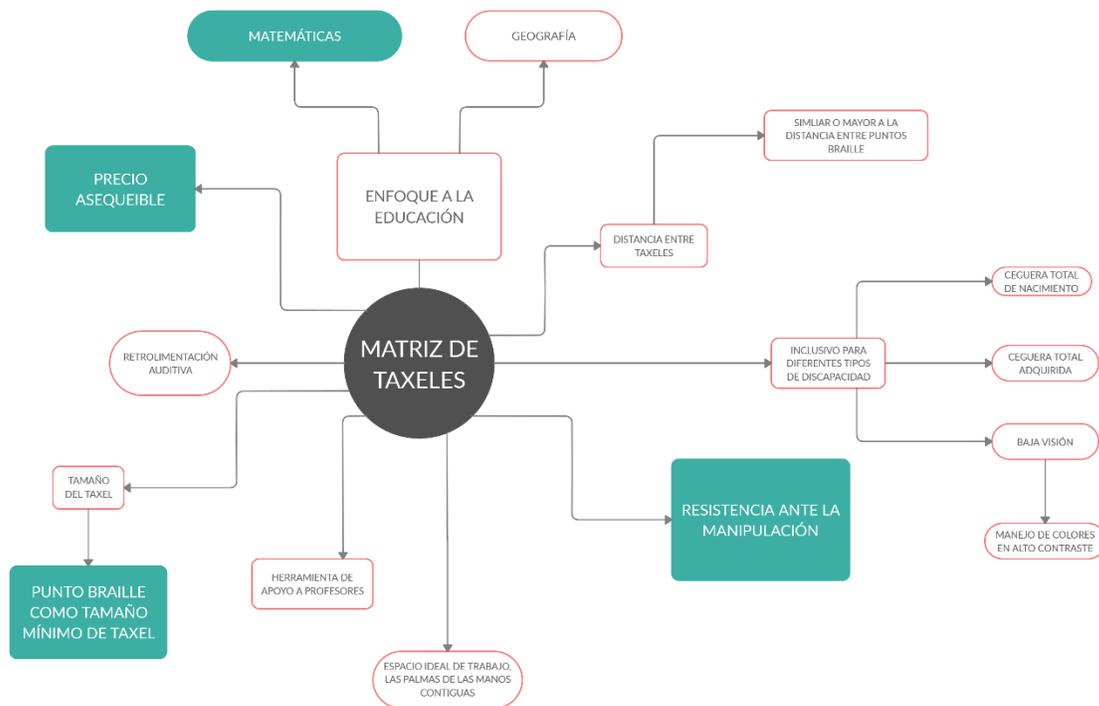


Figura 3.3. Red de conceptos.

Dentro de la red de conceptos mostrada (Figura 3.3), se resaltan comentarios que avalan la pertinencia de una herramienta que permita representar de forma táctil la información visual que complementa la enseñanza, particularmente de las matemáticas, ya que de acuerdo a [17] y [18], son varias las dificultades que afrontan los estudiantes con discapacidad visual. Por otra parte, este enfoque simplifica el proceso de construcción de los prototipos, ya que el funcionamiento de los taxeles, se limita a representar los estados activo e inactivo en la matriz.

También se observan parámetros importantes para la construcción los prototipos, como el tamaño de los taxeles y la distancia entre ellos. Cuando el tamaño y distancia entre taxeles en un prototipo son considerablemente más grandes en comparación a los tamaños del código Braille (macrotipos), sus características se consideran adecuadas para niños y personas novatas que están iniciando en la interacción con el lenguaje Braille, mientras que los prototipos con tamaños y distancias cercanos al Braille, se consideran adecuados para realizar el proceso de transición al Braille, ya que funcionan como prototipos pre-Braille.



En el caso de desarrollar ayudas tecnológicas su asequibilidad es muy importante, puesto que existen dispositivos que podrían ser de mucha utilidad en la vida diaria de una persona con discapacidad visual, pero que se encuentran en el orden de los 25 millones de pesos colombianos, por lo que muy pocas personas pueden acceder a éstos.

Por otra parte, se descarta la forma del taxel como parámetro a tener en cuenta en el diseño del prototipo, debido a que si se toma un taxel de un tamaño tan pequeño es indiferente la forma que éste posea.

La Tabla 3.1 resume las condiciones más adecuadas para el sistema propuesto, de acuerdo a la recolección cualitativa de datos a través de las entrevistas en profundidad.

Tabla 3.1. Selección de las características más adecuadas para el sistema.

| Problema | Consecuencia | Necesidad |
|---|--|--|
| Interacción del dispositivo por parte de diversos tipos de usuarios. | Posibles daños debido a la constante manipulación | Un dispositivo resistente y estable ante la manipulación. |
| Dificultad para transportar el dispositivo debido a su peso. | Los usuarios no pueden utilizar el dispositivo en escenarios externos. | Un dispositivo ligero y portable. |
| Los dispositivos o herramientas de un solo uso. | Para cada representación, se requiere un nuevo dispositivo o herramienta. | Adaptabilidad por parte del dispositivo. |
| Falta de experiencia en el uso de dispositivos táctiles por parte de niños o novatos. | Inconvenientes al momento de adaptarse al uso de un dispositivo con características de tamaño y distancia entre taxeles cercanos al Braille. | Uso de macro prototipos para desarrollar el sentido del tacto y continuando una transición hacia dispositivos pre-Braille. |
| Costo elevado de los dispositivos. | Los elevados costos de las herramientas existentes, ocasiona que sean inasequibles para las personas que los necesitan. | El desarrollo de dispositivos con costos asequibles, mediante el uso de materiales y elementos económicos. |

| | | |
|--|---|---|
| <p>Dificultades para el aprendizaje de las matemáticas en estudiantes con discapacidad visual.</p> | <p>Problemas para los estudiantes con discapacidad visual para imaginar figuras o graficas en planos cartesianos.</p> | <p>Enfoque del dispositivo hacia el aprendizaje de las matemáticas.</p> |
|--|---|---|

3.3.1.3 Requerimientos

De acuerdo a los resultados obtenidos en el análisis de las entrevistas, se resaltan comentarios para organizar y priorizar la información, que permiten la identificación de ideas relacionadas y así, visualizar los conceptos primordiales para establecer la definición de los siguientes requerimientos:

- Requerimientos funcionales
 - ✓ Resistencia ante la manipulación.
 - ✓ Reducido tamaño del taxel.
 - ✓ Adaptabilidad.
 - ✓ Ligero y portable.

- Requerimientos no funcionales
 - ✓ Enfoque a las matemáticas.
 - ✓ Precio asequible.

3.3.2 Diseño rápido

El prototipo está compuesto por cuatro partes: la plataforma matricial, los taxeles, el sistema de activación y el sistema de control. La plataforma matricial, que se observa en la Figura 3.4, es el componente donde se ensamblan los taxeles y en donde se soporta el sistema de activación y en general todo el prototipo. En esta parte, se debe tener en cuenta el parámetro de distancia entre taxeles (dt).

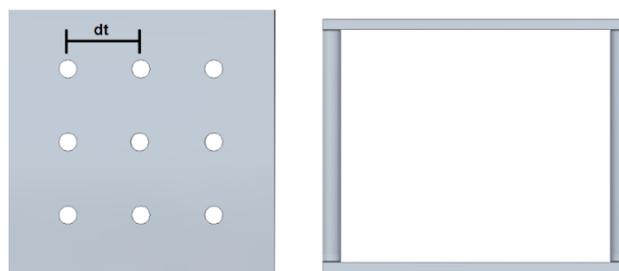


Figura 3.4. Plataforma matricial.

Los taxeles, son el elemento principal del prototipo, ya que su función consiste en representar diversas figuras, mediante su activación. De acuerdo al tipo de estimulación, la percepción del taxel será mediante elevación del taxel o por estimulación con el taxel estático. El sistema de activación, se compone de elementos hardware que generan una estimulación que activa o desactiva los taxeles en la plataforma matricial.

Finalmente, se encuentra el sistema de control, el cual controla el funcionamiento del sistema de activación, mediante el uso de herramientas hardware y software. A continuación, se muestra el modelo para el sistema en la Figura 3.5.

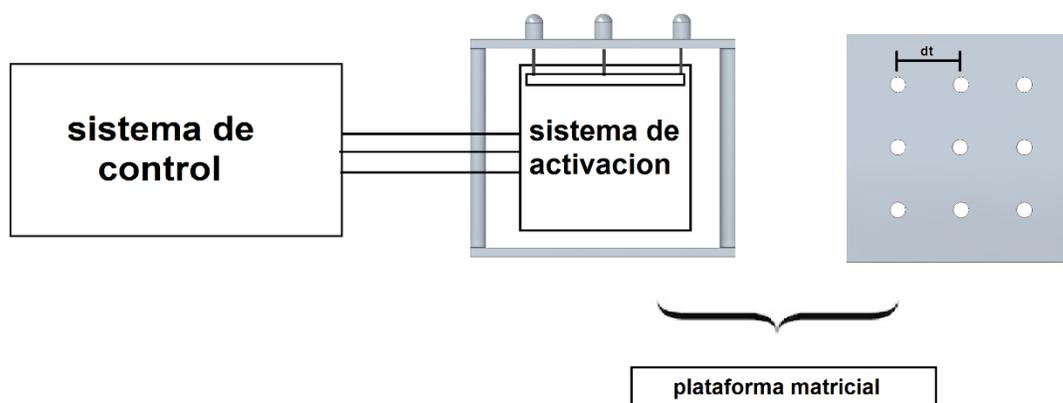


Figura 3.5. Modelo para el sistema basado en una matriz de taxeles.

3.3.3 Construcción de los prototipos.

De acuerdo a la forma en que los prototipos generan la estimulación somática, esta parte del documento se divide en dos secciones: los prototipos en los que la estimulación se realiza con el taxel estático y los prototipos en los que la estimulación se realiza por la elevación del taxel. La implementación de los prototipos se hizo de forma iterativa, por lo que en el Apéndice C se muestran los diagramas de flujo utilizados para la creación de la versión final de los prototipos mostrados en esta sección. Para la implementación del sistema de control descrito en la sección 3.3.2, se utiliza una tarjeta de desarrollo Arduino UNO, ya que se contaba con la disponibilidad de este elemento en el equipo de trabajo.



3.3.3.1 Percepción de estimulación con el taxel estático

- **Vibración Mini Motor DC**

Se hace uso de Mini motores DC como el que se observa en la Figura 3.6, debido a que su tamaño y peso facilitan el diseño de un montaje más adecuado para cumplir los requerimientos del sistema, y, además, permite que la separación entre motores sea pequeña, por consiguiente, es posible obtener un prototipo final con dimensiones adecuadas y de un peso aceptable.

Por otra parte, los Mini motores DC se pueden encontrar en el mercado desde un valor aproximado individual de \$1000 pesos colombianos, permitiendo la implementación de un prototipo de bajo costo, el cual es uno de los requerimientos definidos en la sección 3.6.



Figura 3.6. Mini motor DC.

En la Figura 3.7 se observa el montaje realizado, donde cada uno de los motores representa un taxel de la matriz y su funcionamiento consiste en alimentar ciertos motores para dar forma a la figura o símbolo que se desee representar. El movimiento que genera el motor al ser alimentado produce una estimulación al sentido del tacto; por lo que, al ser manipulado con la yema de los dedos, la sensación es similar a una vibración. El sistema final de este prototipo, está compuesto por un *Dip Switch*, el cual tiene la función de controlar la activación de los motores para seleccionar el tipo de figura a desplegar y un integrado ULN2803, el cual es un arreglo Darlington utilizado para amplificar corriente y que garantiza la potencia necesaria para que el movimiento de los motores genere un estímulo.

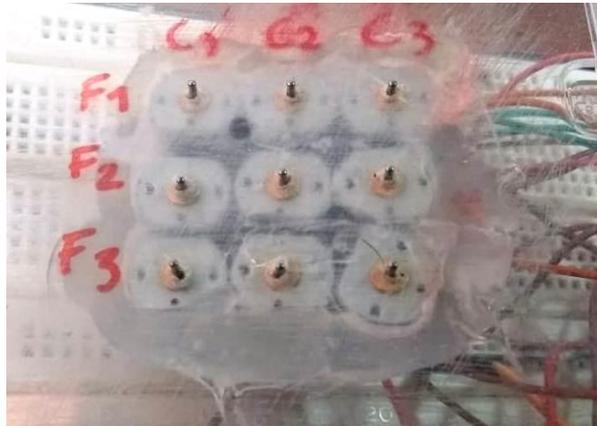


Figura 3.7. Prototipo de mini motores DC.

En la Figura 3.8 se muestra el modelo del prototipo constituido por mini motores DC.

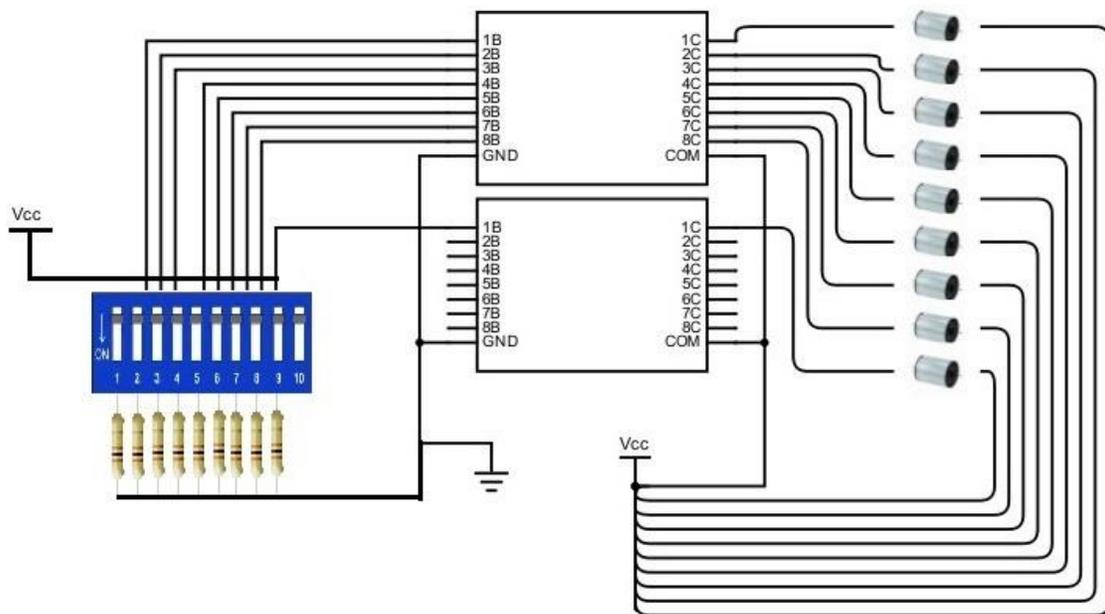


Figura 3.8. Modelo del prototipo de mini motores DC.

- **Motores Vibradores**

Para el desarrollo del siguiente prototipo, se utilizan los motores vibradores como el que se puede ver en la Figura 3.9, los cuales tienen un costo aproximado de \$1500 pesos colombianos. Su tamaño y peso facilitan el diseño de un montaje más adecuado para cumplir los requerimientos del sistema y además permite que la



separación entre motores sea más pequeña en comparación al prototipo mostrado anteriormente y por consiguiente se puede desarrollar un prototipo final que sea cómodo y de un peso aceptable.

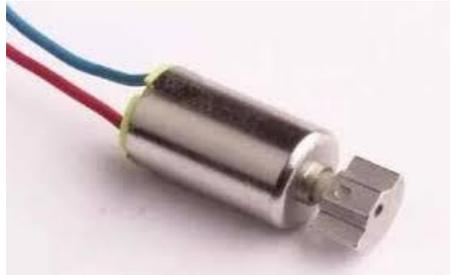


Figura 3.9. Motor vibrador.

En este prototipo también se debe tener en cuenta el uso del integrado ULN2803, conocido como arreglo Darlington encargado de amplificar la corriente y permitir que se obtenga la potencia necesaria para generar un estímulo adecuado. El modelo del prototipo se especifica en la Figuras 3.10.

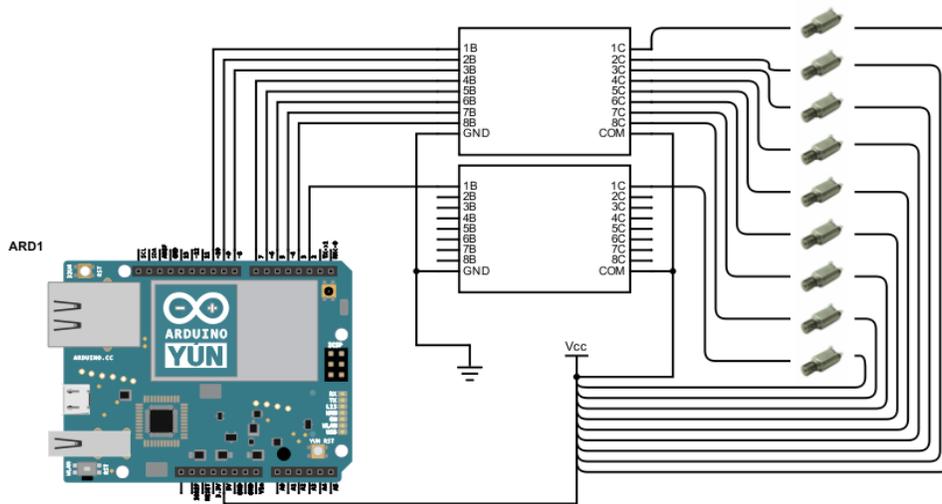


Figura 3.10. Modelo del prototipo motores vibradores.

Finalmente, se diseña una plataforma para soportar los motores en una matriz de 3x3, donde se maneja una separación entre taxeles de 7mm como se observa en la Figura 3.11.

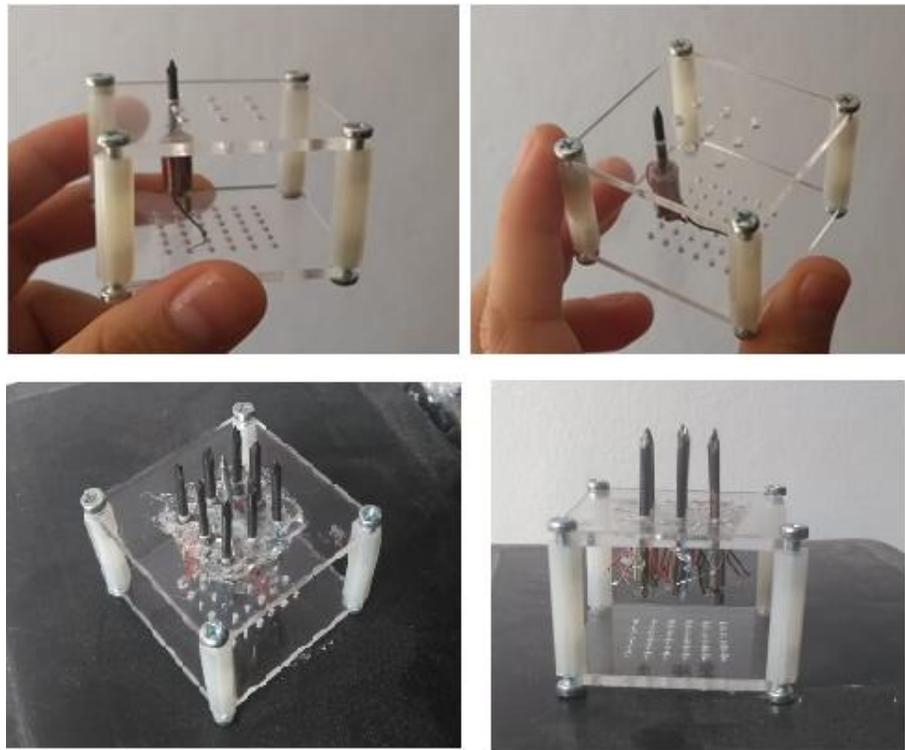


Figura 3.11. Prototipo motores vibradores.

- **Matriz de puntos**

Para este prototipo, se toma el cabezal de una impresora de matriz de puntos, el cual está compuesto por una serie de taxeles que son accionados por pequeños electroimanes, los cuales tienen un costo individual de aproximadamente \$3.300 pesos colombianos. En la Figura 3.12 se puede observar dicho cabezal.

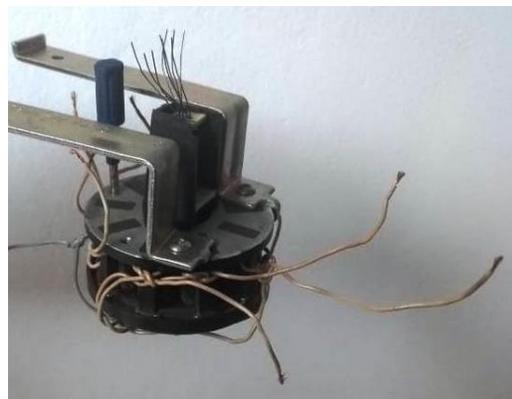


Figura 3.12. Cabezal de la impresora de matriz de puntos.

Cada taxel tiene asociados dos cables y su funcionamiento consiste en conectar uno de los cables de cada taxel a un cable común, que posteriormente se conecta a tierra, mientras que el cable restante de cada taxel tendrá la función de ser el activador del taxel, por lo tanto, cada vez que se le envíe una señal de 5V al cable activado, el taxel genera un movimiento.

Para crear un estímulo que sea fácilmente perceptible se genera un código en Arduino el cual simula un tren de pulsos para que el taxel se mueva constantemente (Los códigos de Arduino se encuentran detallados en el Apéndice D), creando de esta manera una sensación similar a un pequeño impulso de corriente. Debido a la sensación que se experimenta se decidió incluir este prototipo dentro de la primera categoría, aunque técnicamente los taxeles se encuentran en movimiento. La Figura 3.13 muestra el modelo esquemático del prototipo.

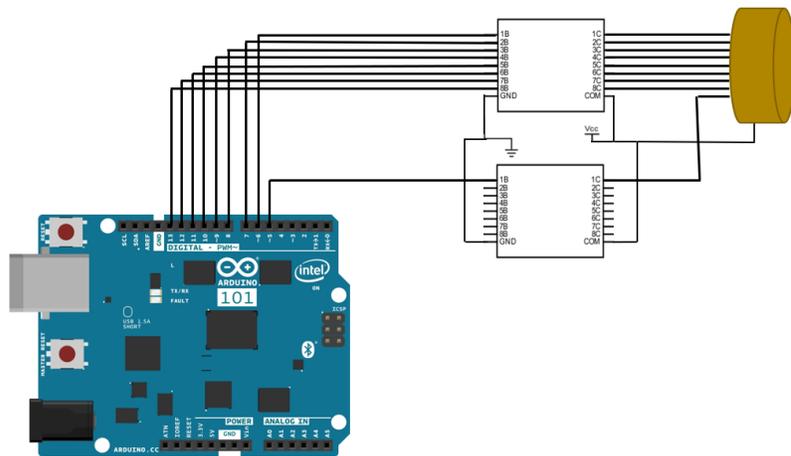


Figura 3.13. Modelo esquemático del prototipo de matriz de puntos.

La implementación de este prototipo permitió obtener una separación entre taxeles de 5mm, la cual es la más pequeña entre todos los prototipos desarrollados. Para mantener fijas las posiciones de los taxeles, se diseña una plataforma matricial de 3x3 con separación de 5 mm entre cada taxel, como se puede apreciar en la Figura 3.14.

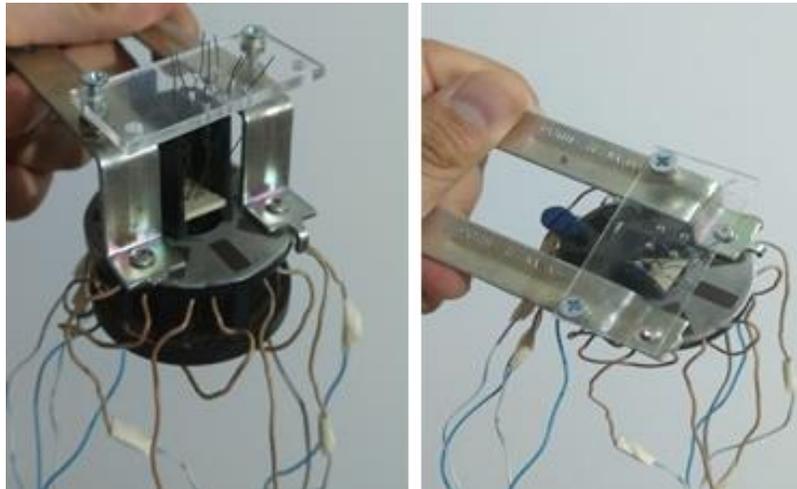


Figura 3.14. Prototipo matriz de puntos.

3.3.3.2 Percepción de elevación del taxel

- **Matriz con Motores DC como actuadores lineales**

Un actuador es un dispositivo inherentemente mecánico cuya función es proporcionar fuerza para mover o “actuar” otro dispositivo mecánico. La fuerza que provoca el actuador proviene de tres fuentes posibles: Presión neumática, presión hidráulica, y fuerza motriz eléctrica (motor eléctrico o solenoide). Dependiendo del origen de la fuerza, el actuador se denomina “neumático”, “hidráulico” o “eléctrico”.

Para este prototipo, se realizará el diseño de un actuador lineal, compuesto por el ensamblaje de un mini motor DC, un tornillo y una tuerca, que posteriormente se ensambla con una pieza geométrica, como se observa en la parte (a) de la Figura 3.15.

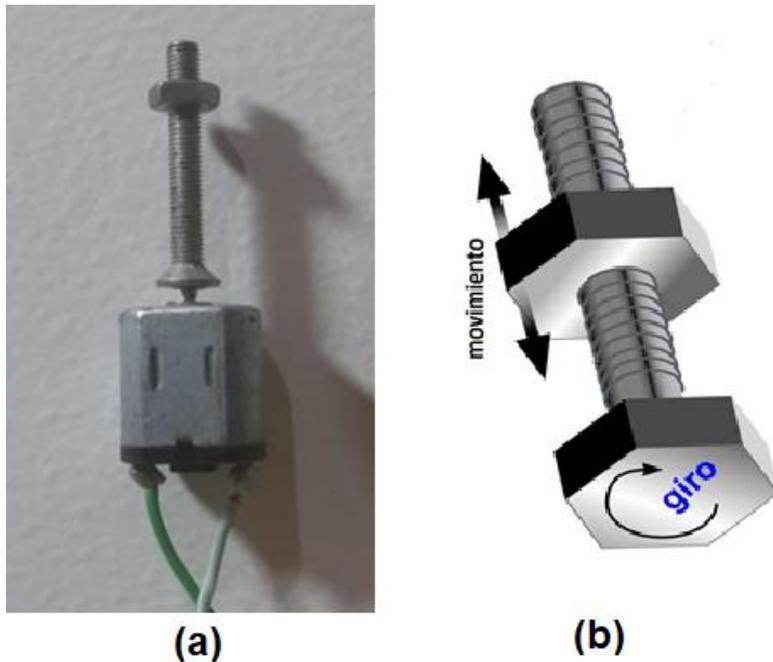


Figura 3.15. Tornillo ensamblado en el mini motor DC.

El funcionamiento del actuador se basa en los dos tipos de giro que realiza el motor, en el sentido de las manecillas del reloj y en contra de las manecillas del reloj. Cuando el motor se activa en el sentido de las manecillas del reloj, la tuerca gira y se aleja del motor, mientras que cuando se activa en sentido contrario a las manecillas del reloj, la tuerca gira y se acerca al motor. En la parte (b) de la Figura 3.15 se muestra el movimiento que realiza la tuerca en el tornillo.

Por otra parte, es necesario implementar un circuito puente “H” mediante el uso del integrado L293, cuya función principal consiste en controlar el sentido de circulación de la corriente del mini motor DC, logrando de esta forma generar los dos tipos de movimiento descritos previamente.

El modelo del prototipo construido utilizando motores DC como actuadores lineales se muestra en la Figura 3.16.

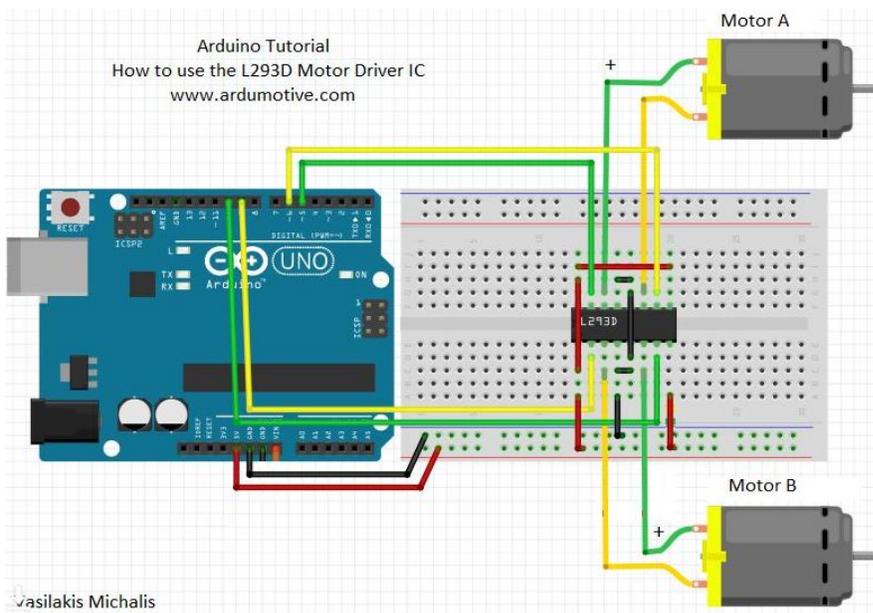


Figura 3.16. Modelo del prototipo matriz con motores DC como actuadores lineales.
Tomado de [52].

Para la implementación funcional del modelo mostrado en la Figura 3.16 fue necesario diseñar una serie de piezas para ser imprimidas en 3D. En el Apéndice E se encuentra detallado el diseño de las piezas y en la Figura 3.17 se muestra el prototipo funcional con los motores y las piezas diseñadas.

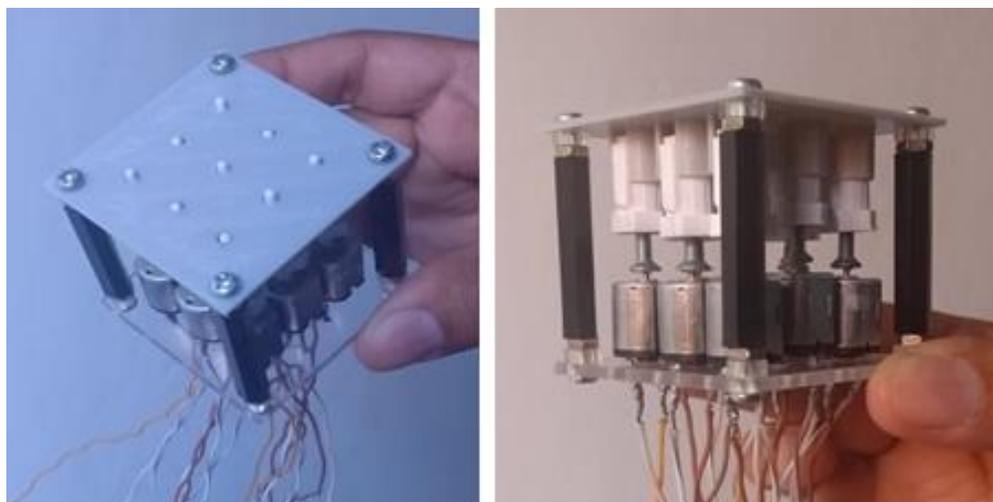


Figura 3.17. Prototipo Matriz con motores DC como actuadores lineales.

- **Motores paso a paso unipolares**

Para este prototipo se utilizan motores paso a paso unipolares de 6 cables y para controlar el tipo de movimiento que se desea realizar, se hace uso del integrado L297, encargado de generar las señales de pasos necesarias para el motor. Como complemento se hace uso de un arreglo Darlington, utilizado para amplificar la corriente y de esta manera permitir que el movimiento de los motores tenga la potencia necesaria para que el sistema funcione correctamente.

En la Figura 3.18 se muestra el modelo del prototipo que utiliza motores paso a paso unipolares.

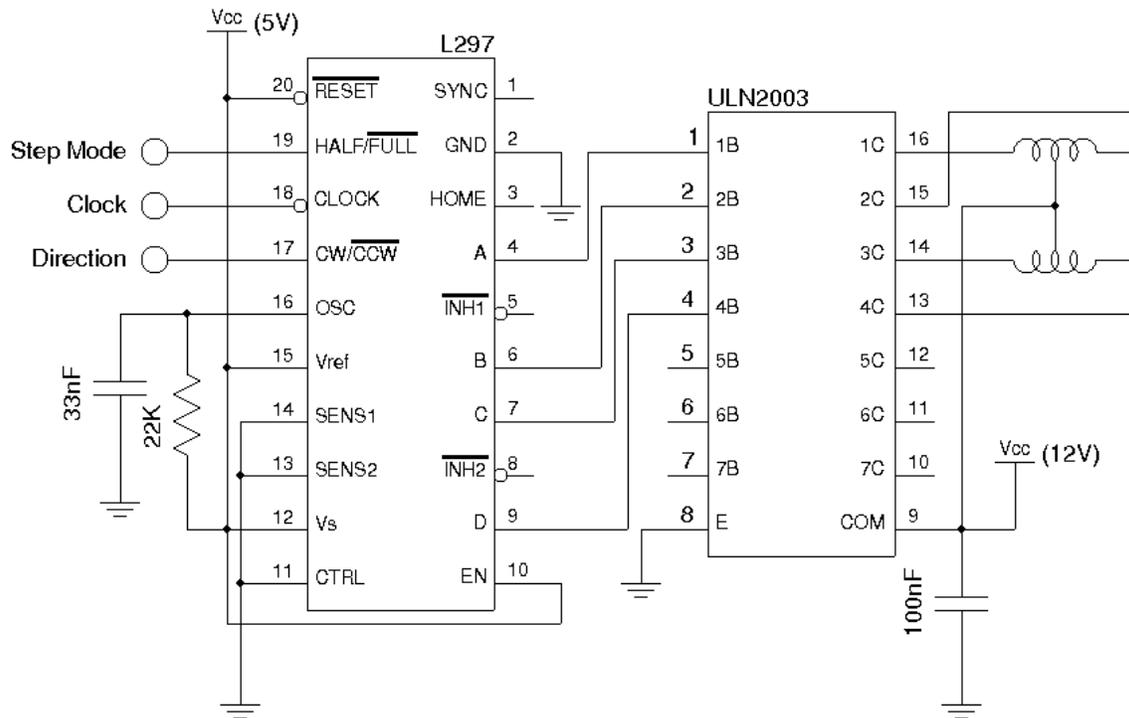


Figura 3.18. Modelo de los controladores para el prototipo de motores paso a paso unipolares. Tomado de [24].

En la Figura 3.19 se observa el montaje final del prototipo, el cual consta de 3 motores unipolares paso a paso ubicados en una sola fila.



Figura 3.19. Prototipo de motores paso a paso unipolares

3.3.3.3 Resumen de prototipos funcionales

La Tabla 3.2 sintetiza la información de cada uno de los prototipos desarrollados, con los cuales se realizaron pruebas, tanto con personas con discapacidad visual, como con personas videntes.

Tabla 3.2. Datos prototipos funcionales.

| Prototipo | Separación entre taxeles | Dimensión prototipo | Dimensión matriz final | Número de taxeles matriz final | Costo final (pesos) |
|--|--------------------------|---------------------|------------------------|--------------------------------|---------------------|
| Motores paso a paso unipolares | 3 cm | 1x3 | 9x5 | 45 | 405.000 |
| Vibración mini motores DC | 1.1 cm | 3x3 | 25 x 14 | 350 | 350.000 |
| Matriz de puntos | 0.5 cm | 3x3 | 56x 32 | 1792 | 5'913.600 |
| Matriz con motores DC como actuadores lineales | 1.2 cm | 3x3 | 23 x 13 | 299 | 299.000 |
| Motores vibradores | 0.7 cm | 3x3 | 40 x 22 | 880 | 1'320.000 |



En la segunda columna de la Tabla 3.2 se muestran los diferentes valores de separación entre taxeles que se obtuvieron para cada prototipo funcional. Sin embargo, para los prototipos “vibración mini motores DC” y “matriz con motores DC como actuadores lineales”, dicho valor de separación fue el mínimo permitido por el tamaño de los elementos utilizados, mientras que en los demás prototipos se tiene mayor libertad al momento de definir la distancia que separa los taxeles.

Para los datos obtenidos de la matriz final y que se plasman en la tercera y cuarta columna de la Tabla 3.2, se toma como referencia el espacio de trabajo ideal definido en la sección de requerimientos, en donde las personas entrevistadas de la fundación PERCIBV expresaron que dicho espacio de trabajo se asimilaba al área resultante que generan las dos palmas de sus manos juntas; no obstante, en la revisión de la literatura no se encuentra información o estandarización sobre este particular.

De acuerdo a lo mencionado previamente, se tomaron medidas aproximadas de esta área a 10 personas de diferentes estaturas y edades, obteniendo un promedio de 28 cm de ancho por 16 cm de alto y con los datos de la separación entre taxeles de cada prototipo, se estableció la cantidad de taxeles totales que requiere cada prototipo final dentro del área de trabajo ideal obtenida, donde los prototipos con mayor espaciamiento entre taxeles tendrán una menor cantidad de taxeles en la matriz final.



Capítulo 4

Pruebas y análisis de Resultados

Siguiendo con el modelo de prototipos, la fase de evaluación por parte del usuario se describe en este capítulo.

4.1 Evaluación de los prototipos por parte del usuario.

Los parámetros que se evaluaron en esta fase fueron: la facilidad de identificación de figuras, la afectación de estimulaciones externas, el tiempo de respuesta y la precisión de identificación.

4.1.1 Puntuación de opinión media.

El puntaje de opinión está definido como el "valor en una escala predefinida que un sujeto asigna a su opinión sobre el rendimiento de un sistema", es por esto que la Puntuación de Opinión Media (MOS, *Mean Opinion Score*) es el resultado obtenido del promedio de los puntajes dados por estos sujetos [53].

MOS ha tenido una gran acogida en el dominio de la calidad del habla, por esta razón, se ha hecho uso de sus características en otro tipo de modalidades como lo son el audio, imágenes, video y contenido audiovisual.

Si bien la escala de puntuación utilizada para determinar el MOS puede variar, la escala MOS de 5 puntos es comúnmente la más utilizada. A continuación, se puede observar el valor de cada uno de sus puntos:

1. Mala
2. Pobre
3. Justa
4. Buena
5. Excelente

El MOS genera un claro beneficio para los usuarios finales, debido a que se establece un indicador de referencia de la calidad percibida y su aceptación generalizada.



4.1.2 Plan de pruebas

La fase pruebas se ejecutó a una muestra de 30 personas, 28 videntes y 2 invidentes de la fundación PERCIBV. Aunque el número de personas invidentes fue pequeño, se considera que la población vidente es adecuada para caracterizar los resultados obtenidos, ya que éstos son equivalentes a los obtenidos por niños invidentes o personas adultas que están iniciando en la adquisición de información por medio del sentido del tacto. Las personas invidentes, al tener más experiencia en interacción con sistemas táctiles, requieren de menos tiempo y tienen una capacidad de adaptación mayor frente a los sistemas de estimulación táctil, lo cual les da una ventaja al momento de la interacción.

Inicialmente, se les presentan a los participantes los diferentes prototipos desarrollados, con el fin de que conozcan e interactúen de manera rápida con las características de los taxeles que propone cada uno de ellos. Como resultado de este primer acercamiento, se descartan los prototipos de motores vibradores y el de motores paso a paso unipolares, debido a que sus características no eran las más adecuadas.

Posteriormente, se realizan pruebas con los tres prototipos restantes, los motores DC como actuadores lineales, los mini motores DC como vibradores y la matriz de puntos. Para esta parte, se procede a activar cada prototipo, desplegando algunas figuras geométricas o símbolos, dentro de un tiempo máximo determinado; sin embargo, se cronometra el tiempo invertido en cada proceso con el objeto de analizar, posteriormente, los datos obtenidos. Con el fin de corroborar que se detectaron correctamente los taxeles activos, se les pide a los participantes que los indiquen de manera verbal, o que lo dibujen si lo consideran necesario, los resultados obtenidos también se utilizan para evaluar los prototipos.

Una vez terminadas las pruebas con todos los prototipos se les pide llenar la encuesta que se consigna en el Apéndice F, la cual se usa para la evaluación del MOS sobre los prototipos diseñados y, así, realizar un análisis gráfico de los resultados obtenidos.



4.2 Resultados

A continuación, se muestran de manera detallada los resultados obtenidos en la fase de pruebas, teniendo en cuenta los parámetros a evaluar en cada uno de los prototipos funcionales.

En el Apéndice F se encuentra la encuesta realizada a los 30 participantes, la cual consta de dos preguntas por cada prototipo. Con la primera, se desea evaluar la facilidad con la cual los participantes identifican las figuras, y, con la segunda, se evalúa como afectan las estimulaciones externas presentes en cada uno de los prototipos. Para ello se hace uso del MOS, es decir, cada persona debe dar un puntaje de 1 a 5 (donde 5 es el mejor puntaje y 1 el peor) en cada pregunta, según su propia experiencia obtenida por medio de las pruebas realizadas con cada uno de los prototipos.

Específicamente, en los resultados del MOS relacionados con la facilidad al identificar las figuras, la puntuación de 5 representa que es muy fácil identificarla, mientras que la puntuación de 1 se refiere a que es muy difícil su identificación o que no se logró identificar. Por otro lado, los resultados concernientes a la afectación por las estimulaciones externas, se interpretan de la siguiente manera: la puntuación de 5 representa que no se vio afectado en lo absoluto, mientras que la puntuación de 1 quiere decir que se vio muy afectado por las estimulaciones externas que presenta el prototipo.

4.2.1 Motores DC como actuadores lineales

En la Figura 4.1, se observa que los 30 participantes no tuvieron problemas al identificar las figuras planteadas en el prototipo, ya que el 69,6 % evaluó este parámetro con el puntaje más alto (5).

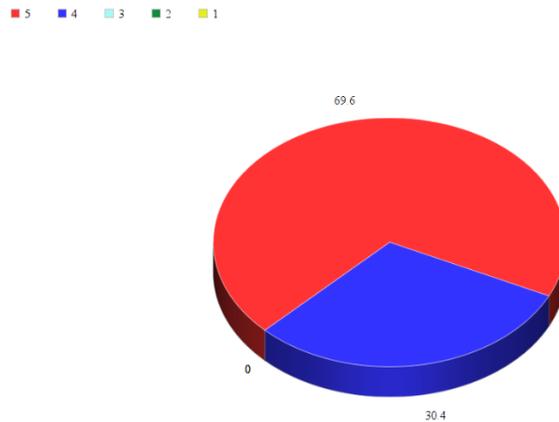


Figura 4.1. Facilidad al identificar figuras con el prototipo motores DC como actuadores lineales.

En la Figura 4.2 se muestra que ninguno de los participantes se vio afectado por estimulaciones externas al prototipo motores DC como actuadores lineales, debido a que éstas son muy leves.

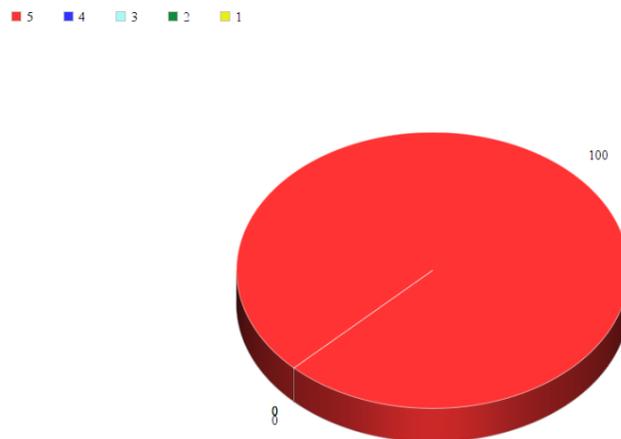


Figura 4.2. Afectación de estimulaciones externas al prototipo motores DC como actuadores lineales.

El tiempo promedio requerido por los participantes para reconocer la figura propuesta en este prototipo fue de 14.5 segundos, mientras que la precisión fue del 100%. Estos resultados se condicen con los obtenidos en la aplicación del MOS.



4.2.2 Mini motores DC como vibradores

En la Figura 4.3, se observa que, para este prototipo, el 13% de los participantes tuvo algunos problemas al momento de identificar las figuras propuestas; sin embargo, el 87 % restante, identificó las figuras sin inconvenientes.

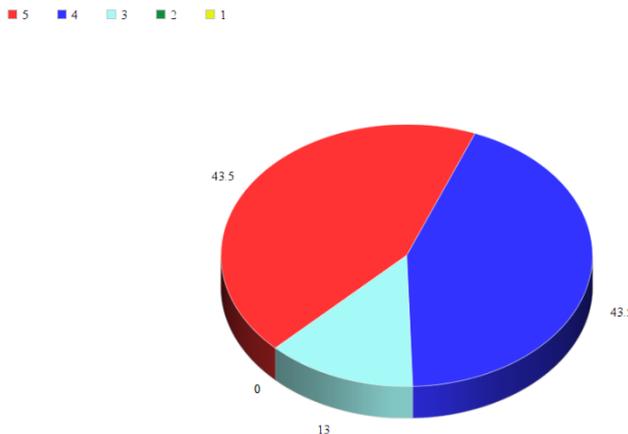


Figura 4.3. Facilidad al identificar figuras con el prototipo mini motores DC como vibradores.

En la Figura 4.4 se observa que, a pesar de que este prototipo genera estimulaciones externas, el 13% de los participantes no se vio afectado por dichas estimulaciones, mientras que la mayoría no considera dichas estimulaciones como un factor relevante al momento de identificar las figuras propuestas.

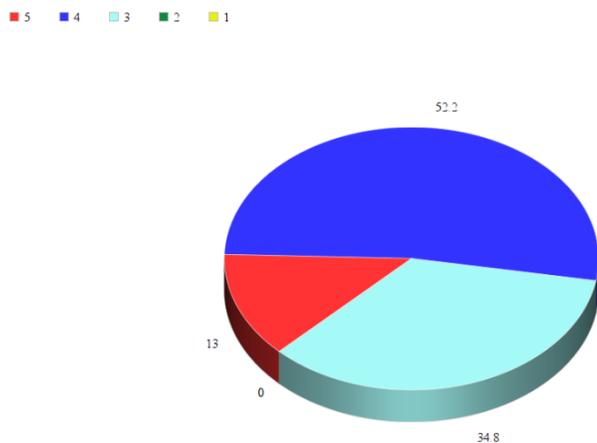


Figura 4.4. Afectación de estimulaciones externas al prototipo mini motores DC como vibradores.



Para este prototipo, el tiempo promedio requerido por los participantes para identificar las figuras propuestas fue de 28.6 segundos, mientras que el 93.3% de ellos logró identificar correctamente la figura propuesta.

4.2.3 Matriz de puntos

De acuerdo a lo observado en la Figura 4.5, la matriz de puntos es el prototipo en el cual los participantes tuvieron más inconvenientes al identificar las figuras propuestas, ya que solo el 17,4 % puntuó la facilidad en 4, mientras que el restante 82.6 %, se dividió en puntuaciones de 2 y 3.

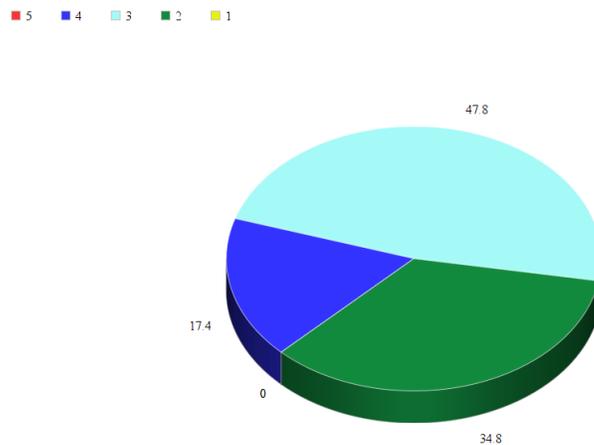


Figura 4.5. Facilidad al identificar figuras con el prototipo matriz de puntos.

En la Figura 4.6 se observa que el 100% de los participantes se vio afectado por las estimaciones externas de este prototipo, tanto así, que el 43,5 % de los participantes consignó el peor puntaje posible (1), dando a entender que las estimaciones externas generaron una gran distracción al instante de reconocer las figuras propuestas. Estos resultados se coinciden con la dificultad mostrada por los participantes, al momento de reconocer las figuras planteadas.

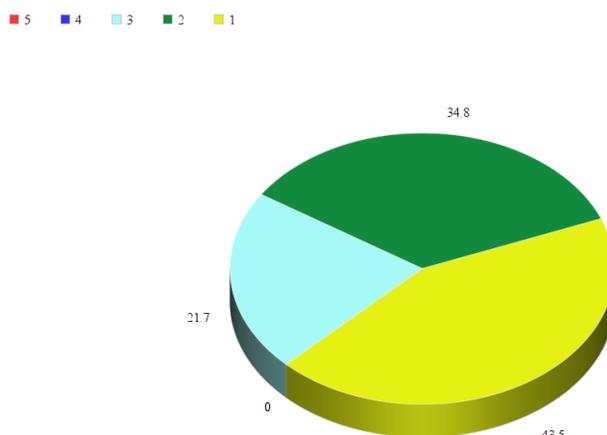


Figura 4.6. Afectación de estimulaciones externas al prototipo matriz de puntos.

Finalmente, el tiempo promedio requerido para la identificación de figuras propuestas fue de 36.8 segundos, mientras que el 76.7% de ellos logró realizar una correcta identificación.

4.3 Análisis comparativo de los parámetros para la evaluación de los prototipos

De acuerdo a los datos obtenidos con los diagramas anteriores, se representan por medio de gráficos comparativos, los porcentajes finales obtenidos en cuanto a la facilidad con la cual los participantes identificaron las figuras en cada uno de los prototipos, y el efecto que tuvieron las estimulaciones externas de los prototipos sobre los participantes. También, se hace un análisis en cuanto al tiempo de respuesta y la precisión al identificar figuras o símbolos propuestos en las pruebas realizadas.

4.3.1 Facilidad de identificar las figuras

En la Figura 4.7 se compara la puntuación del MOS dada por los participantes con relación a la facilidad en la identificación de las figuras propuestas, donde 100 equivale a que todos los participantes puntuaron este factor con 5. El prototipo de motores DC como actuadores lineales fue el que tuvo menos inconvenientes en cuanto a la identificación las figuras propuestas, arrojando un porcentaje de 93,9 %; mientras que el prototipo matriz de puntos, con un porcentaje de 56,2 %, fue el prototipo con más problemas en la identificación de figuras.



Identificación de las condiciones requeridas por un sistema que facilite el reconocimiento de imágenes por medio del sentido del tacto

Juan Manuel Calvache Zapata – John Edison Fernández Ordóñez

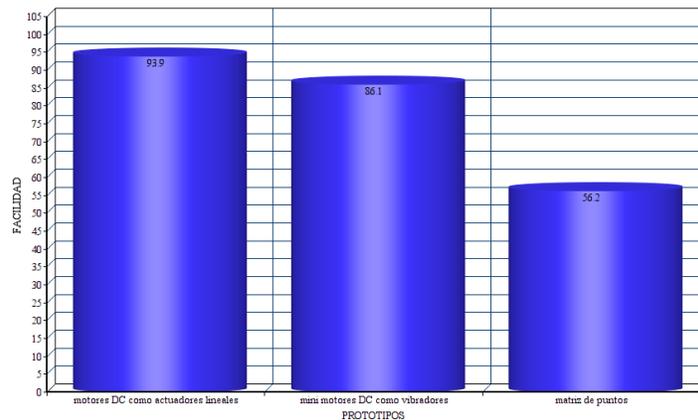


Figura 4.7. Porcentaje de la facilidad al identificar figuras en los prototipos.

4.3.2 Afectación de estimulaciones externas.

En la Figura 4.8, se compara la puntuación del MOS dada por los participantes con relación a la afectación en la identificación de las estimulaciones externas, donde 100 equivale a que todos los participantes puntuaron este factor con 5, y que a su vez indica una menor afectación. Por lo tanto, el prototipo motor DC como actuadores lineales, con un porcentaje del 100%, no generó ningún efecto distractor sobre los participantes, mientras que la matriz de puntos, con un 35,7%, fue el prototipo con el cual las estimulaciones externas, afectaron en gran parte la identificación de figuras propuestas.

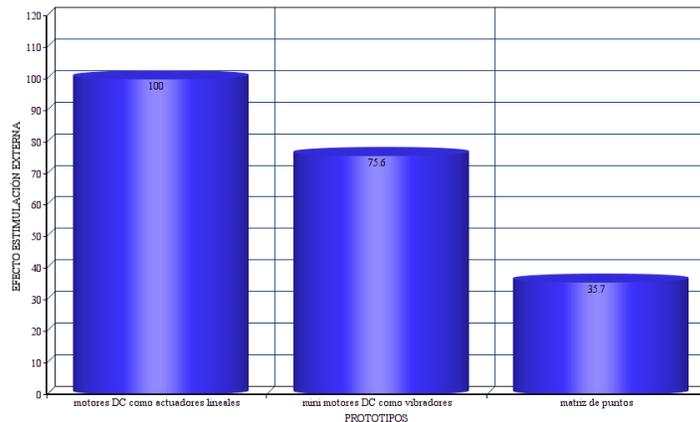


Figura 4.8. Porcentaje del efecto en los participantes de la estimulación externa generada por los prototipos.

4.3.3 Precisión

Para la evaluación de este parámetro, se registró si los participantes acertaron correctamente los taxeles que se encontraban activos en los prototipos, por lo tanto, un valor de 100 equivale a una precisión del 100%. Como se puede observar en la Figura 4.9, el prototipo motores DC como actuadores lineales tiene un valor de 100, lo cual indica que ningún participante se equivocó al identificar las figuras propuestas en este prototipo. Por otra parte, la matriz de puntos fue el prototipo con el menor porcentaje de precisión, que con un 76.7%, equivale a que 7 de los 30 participantes no lograron identificar al menos una de las figuras plasmadas en el prototipo, mientras que en el prototipo mini motores DC como vibradores, la precisión fue del 93.3%, lo que indica que solo 2 personas erraron al identificar al menos una de las figuras propuestas en el prototipo.

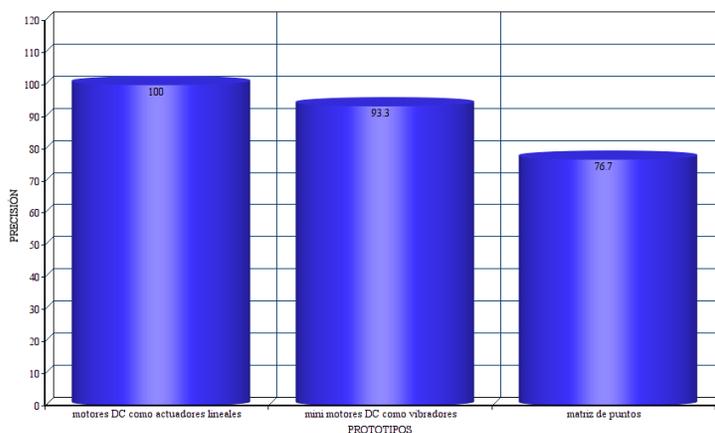


Figura 4.9. Porcentaje de precisión al identificar las figuras.

4.3.4 Tiempo de respuesta

Para analizar este parámetro, se cronometró el tiempo en segundos que necesitaron los participantes para identificar las figuras propuestas, que posteriormente se promedió para ser graficado. Por otra parte, solo se tiene en cuenta el tiempo de las personas que identificaron correctamente las figuras propuestas.

En la Figura 4.10, se observa que en el prototipo de motores DC como actuadores lineales, el tiempo requerido para identificar figuras propuestas fue el menor, mientras que la matriz de puntos, fue el prototipo en el cual se requería una mayor cantidad de tiempo para descifrar la figura propuesta.



Identificación de las condiciones requeridas por un sistema que facilite el reconocimiento de imágenes por medio del sentido del tacto

Juan Manuel Calvache Zapata – John Edison Fernández Ordóñez

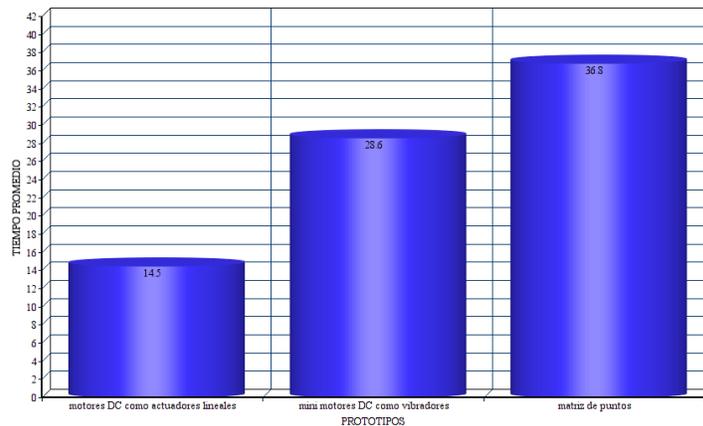


Figura 4.10. Tiempo promedio por prototipo para identificar las figuras.

4.3.5 Elección del mejor y peor prototipo.

Finalmente, los participantes escogieron cual fue el mejor y el peor prototipo con el cual trabajaron, según la experiencia obtenida a través de las pruebas realizadas.

Como se observa en la Figura 4.11, el 80% de los participantes eligió al prototipo motores DC como actuadores lineales como el mejor prototipo, mientras que ninguno de los participantes escogió al prototipo matriz de puntos como el mejor. En cuanto a la elección del peor prototipo, la decisión fue unánime, y el 100% de los participantes eligió a la matriz de puntos como el peor prototipo.

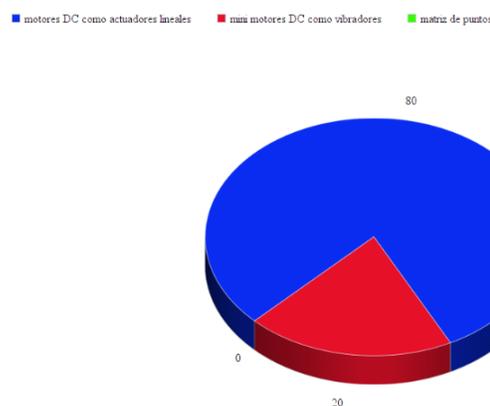


Figura 4.11. Porcentaje de elección del mejor prototipo.



4.4 Selección de las características más adecuadas para el sistema

De acuerdo a los resultados obtenidos mediante la ejecución del plan de pruebas y su posterior análisis, se determina que el prototipo de motores DC como actuadores lineales es el que permite obtener los mejores resultados, por lo tanto se utiliza como guía para la selección de las características más adecuadas del sistema:

- Separación entre taxeles: Se considera una distancia máxima de 1.2 cm.
- Estimulaciones externas: Teniendo en cuenta el efecto negativo de las estimulaciones externas, la solución más adecuada debe ser la estimulación por elevación del taxel, garantizando la correcta discriminación entre taxeles activos e inactivos.
- Estabilidad del sistema: La implementación de una plataforma de soporte, que asegure que el estado de los taxeles no se altere ante la manipulación.

Siguiendo con el desarrollo del modelo de prototipos, las fases de Refinamiento del prototipo y Producto de ingeniería, se dejan como trabajos futuros.



Identificación de las condiciones requeridas por un sistema que facilite el reconocimiento de imágenes por medio del sentido del tacto

Juan Manuel Calvache Zapata – John Edison Fernández Ordóñez



Capítulo 5

Conclusiones y trabajos futuros

5.1 Conclusiones

- Las entrevistas y reuniones realizadas fueron un factor clave para el diseño e implementación de los prototipos, pues cada grupo, desde sus experiencias, aportaron información y perspectivas que únicamente desde la perspectiva de la ingeniería no se habría tenido en cuenta. Las personas con discapacidad visual, debido a las situaciones y sucesos que afrontan a lo largo de su vida cotidiana, aportaron información con respecto a la percepción sensorial ante diferentes estímulos, tipos de materiales y dimensionamiento de objetos. Las fonoaudiólogas, que cuentan con una larga trayectoria ayudando y enseñando a personas con este tipo de discapacidad, ayudaron a esclarecer el propósito y pertinencia del proyecto.
- De acuerdo con el análisis del estado del arte, se observó que muchos proyectos enfocan sus esfuerzos en lograr una matriz de taxeles con dimensiones cercanas al código Braille y no escatiman en gastos al momento de utilizar cierto tipo de materiales o tecnologías. Sin embargo, cuando se concluyen los proyectos y se patentan, para ser comercializados, los precios suelen ser bastante elevados, lo que ocasiona que sean inasequibles para la población a la cual están dirigidos. Por esta razón, es importante tener en cuenta el factor económico en el desarrollo del proyecto, para que a futuro puedan ser adquiridos por la población que los necesita y así aportar al mejoramiento de su calidad de vida.
- Una persona con discapacidad visual, tiene la capacidad de adaptarse a las características del dispositivo, por lo que no es indispensable que la distancia entre taxeles sea similar a la definida en el sistema Braille. Por otro lado, factores como las interferencias externas, que provocan estimulaciones sensoriales adicionales, sí son relevantes y deben reducirse puesto que dificultan el proceso de reconocimiento.



- El manejo e interacción de diversos prototipos, empezando con los macro-prototipos y finalizando con los prototipos pre Braille, puede facilitar el aprendizaje del lenguaje Braille mediante un proceso de transición a través de las diferentes distancias entre taxeles.
- De acuerdo a los datos recopilados mediante la aplicación y análisis del MOS para evaluar los prototipos, se concluye que, para personas videntes o invidentes que están iniciando en el proceso de identificación de figuras o formas mediante la estimulación táctil, es recomendable trabajar sin ningún tipo de sensación externa o adicional, como ruidos de algunos elementos o vibraciones no deseadas, ya que pueden generar distracciones y dificultar la identificación de figuras o formas.

5.2 Trabajos futuros

Dentro de los trabajos futuros para darle continuidad al este trabajo de grado, se plantean los siguientes:

- Desarrollar las fases de refinamiento del prototipo y producto de ingeniería para el prototipo de motores DC como actuadores lineales.
- Implementar una retroalimentación auditiva como complemento a los prototipos diseñados.
- Desarrollar *software* que facilite la identificación de imágenes externas y permita representarlas en los prototipos propuestos.
- Investigar métodos para minimizar el ruido emitido por algunos prototipos.
- Estudiar nuevas tecnologías *hardware* para el diseño de prototipos con el fin de disminuir costos del sistema, como la representación de figuras mediante la modulación de ultrasonido.



Referencias

- [1] Ministerio de Salud y Protección Social. Análisis de Situación de Salud Visual en Colombia. Convenio 519 Del 2015, pp. 49–56, 2016. Recuperado de <https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/VS/PP/ENT/asis-salud-visual-colombia-2016.pdf>.
- [2] C. J. D. Pomfrett, “Special senses. Anaesthesia and Intensive Care Medicine”, 18(4), pp. 202–204, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.mpaic.2017.01.002>.
- [3] R. Espinosa Castañeda, H. I. Medellín Castillo, “Análisis y evaluación de la generación de iconos mentales en personas invidentes a partir de la percepción virtual táctil utilizando realidad virtual y sistemas hápticos”, *Icono14*, 12(2), pp. 295–317, 2014. <https://doi.org/10.7195/ri14.v12i2.695>.
- [4] Ministerio de Salud y Protección Social. Promoción Social. Discapacidad. Recuperado de <https://www.minsalud.gov.co/proteccionsocial/promocion-social/Discapacidad/Paginas/discapacidad.aspx>
- [5] A. González Saucedo, F. García Heredia and R. Ramírez Martínez, "Discapacidad visual.", *CULCyT: Cultura Científica y Tecnológica*, Vol. 10, no. 51, 2, pp. 193-205, 2013.
- [6] Organización de Naciones Unidas, “Convención sobre los Derechos de las Personas con Discapacidad”. Serie de Capacitación Profesional N° 15, 2008. Recuperado de: https://www.ohchr.org/Documents/Publications/AdvocacyTool_sp.pdf.
- [7] F. J. Checa, M. Robles, P. M. Andrade, M. A. Núñez, A. Vallés, “ASPECTOS EVOLUTIVOS Y EDUCATIVOS DE LA DEFICIENCIA VISUAL”, ONCE Dirección de Educación. Vol. 1, Primera edición, 1999. Segunda impresión, 2000.
- [8] “Inteligencia Artificial imitando nuestra visión periférica”, Recuperado de <https://www.computeckni.com/2019/06/inteligencia-artificial-imitando.html>
- [9] “Oculares para telescopios | Todo lo que debes saber”, Recuperado de <https://dontelescopio.com/oculares-para-telescopios/>
- [10] J. Gil, “Control de dispositivos físicos de gran espacio de trabajo para la interacción táctil con entornos virtuales”, Universidad de Navarra, San Sebastián, 2003.
- [11] G. Martínez de la Teja, “Ergonomía e interfaces de interacción humano-computadora” in IX Congreso Internacional de Ergonomía, México D.F., pp. 1–8, 2007.



- [12] K. Kyung, J. M. Lim, Y. Lim, S. Park, S. K. Park, I. Hwang, D. Kwon, "TAXEL: Initial Progress Toward Self-Morphing Visio-Haptic Interface", pp. 37–42, 2011.
- [13] B. Acevedo, "ÁLGEBRA LINEAL", Departamento de Matemáticas, Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales, 2014.
- [14] S. W. Smith, Ph.D., "The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing", California Technical Publishing, USA, 1997.
- [15] J. Flores, "Síntesis digital de dolor digitalizando tonos de gris", Universidad Autónoma de san Luis potosí, 2009.
- [16] A. C. Bovik, "Introduction to Digital Image and Video Processing". Handbook of Image and Video Processing, pp. 3-1, 2005. doi:10.1016/b978-012119792-6/50065-6
- [17] "Teaching the Blind. Mathematics", Inclusion in Europe through Knowledge and Technology, Erasmus+ Programme of the European Union, 2015.
- [18] C. K. Pritchard, J. H. Lamb, "Teaching Geometry to Visually Impaired Students", NCTM: National Council of Teachers of Mathematics, vol. 106, no. 1, pp. 1-6, 2012.
- [19] "Educación Inclusiva", *Riate.org*, 2019. [Online]. Disponible en: http://www.riate.org/version/v1/materiales_en_prueba/e_inclusiva_discapacidad/unidad_5/m5_estructura_sistema.htm?fbclid=IwAR1Ppqjc-6t16i84mQ06rLUC_Rr3rNhdKKKc0aiDETdybN9buVGA2xF6M24.
- [20] E. Vásquez, "Contribución en el ámbito de la tecnología *sensorless* para la detección de velocidad y posición en motores dc monitorizando únicamente la corriente: mejora en la precisión, minimización del coste computacional y aplicabilidad a motores de alta potencia", Universidad de Valladolid.
- [21] "Cómo funciona un puente para motores de corriente continua". Recuperado de <https://www.inventable.eu/2017/05/26/funciona-puente-motores-corriente-continua/>
- [22] A. Pérez París, "Motores paso a paso, introducción a su funcionamiento y control en lazo abierto", Revista de Comunicación Vivat Academia, no. 15, pp. 13 - 27, 2000. <http://dx.doi.org/10.15178/va.2000.15.13-27>
- [23] P. Carrillo, "Implementación de módulo de movimiento de motores paso a paso con controlador integrado", Universidad politécnica de Madrid, 2018.
- [24] "A Unipolar Stepper Motor Driver", recuperado de: <http://www.kerrywong.com/2011/09/18/a-unipolar-stepper-motor-driver/>.
- [25] A. Malvino, Principios de Electrónica, 5th ed. Madrid: McGRAW-HILL/INTERAMERICANA DE ESPAÑA, S.A., 1994, pp. 411-412.



- [26] “Transistor Darlington”, Recuperado de: <http://www.electronicasi.com/enseanzas/electronica-avanzada/electronica-universitaria/transistor-darlington/>
- [27] “ULN2803A Darlington Transistor Arrays”, Texas Instruments, disponible en <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/uln2803a.pdf>
- [28] [3]“DIP Switch (Micro-Interruptores tipo DIP)”, *Blog Electronica Radical*, 2015.
- [29] N. Muñoz Galeano, J. B. Cano Quintero, J. M. López Lezama, “Enseñando el Funcionamiento de los Inversores Puente H: Análisis del Intercambio de Potencia entre Bobinas y Condensadores”, Formación Universitaria, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Antioquia, Medellín, vol. 9, no. 1, pp. 117–124, 2016.
- [30] “Puente h con transistores”, Recuperado de: <https://www.ingmecafenix.com/electronica/puente-h-transistores/>
- [31] “MOTOR DC+L293D”, Recuperado de: <http://arduino123.blogspot.com/p/motores-dc.html>
- [32] R. Gutiérrez, J. Lambas, E. Pascual, T. Vásquez, “Solid Edge v.16. Guía de Referencia”, Universidad Politécnica de Madrid, 2006.
- [33] S. P. Ferreyra, J. I. Morales, G. A. Cravero, L. G. Gilberto, “Diseño de Plataforma Rotativa para Medición de Dispositivos Acústicos,” in *Mecanica Computacional*, Vol XXXV, pp. 27-37, 2017.
- [34] “Reguladores del motor de pasos del microprocesador del circuito integrado L297”, Recuperado de: <http://m.spanish.circuitboardchips.com/sale-8794928d-l297-integrated-circuit-chip-stepper-motor-controllers.html>
- [35] L. I. Villalba, "Implementación de una red RFID para orientar en edificios a personas con discapacidades visuales", Trabajo de grado, Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Universidad tecnológica equinoccial, Quito, 2015.
- [36] L. J. Castillo, “Aprendizaje de conceptos básicos de programación Arduino a partir del software s4a mediante la metodología sole”, Tesis de Magister, Universidad de la Sabana, Chía, 2019.
- [37] C. Sánchez, "Raspberry Pi & Arduino, los artesanos del siglo XXI y el movimiento maker.", 2018.
- [38] “RASPBerry PI”, Recuperado de: <https://histinf.blogs.upv.es/2013/12/18/raspberry-pi/>
- [39] A. B. Herranz, “Desarrollo de aplicaciones para IoT con el módulo ESP32”. Universidad de Alcalá, 2019.



- [40] “ESP-WROOM-32 (ESP-32S) WiFi & Bluetooth Module with ESP32 and PCB antenna”, Recuperado de: <https://99tech.com.au/product/esp-32s/>
- [41] “Cómo hacer un electroimán”, recuperado de <https://www.100cia.site/index.php/fisica/item/8598-como-hacer-un-electroiman>.
- [42] R. Vargas Alba, P. Juárez Molina, “Diseño y Construcción de un Electroimán Tipo Solenoide,” *Conciencia Tecnológica*, No. 46, pp. 48-51, 2013.
- [43] M. Prieto Núñez-Polo, "Nitinol: un material mágico hecho de ciencia", Blog de divulgación del Instituto de Síntesis Química y Catálisis Homogénea, 2016.
- [44] “Prototyping”, Usability.gov, 2019. Disponible en: <https://www.usability.gov/how-to-and-tools/methods/prototyping.html>
- [45] T. Granollers. " Modelo de Proceso de la Ingeniería de la Usabilidad y de la Accesibilidad". *Universidad de Lleida*, 2019
- [46] A. Campos, "Metodología Prototipos". *Universidad Pontificia de Salamanca.*, 2019.
- [47] F. García, “Tema 3: Modelos de proceso.”. Ingeniería de software I, Universidad de Salamanca, 2018.
- [48] “Prototyping Model in Software Engineering”, disponible en: <http://ecomputernotes.com/software-engineering/explain-prototyping-model>
- [49] N. Mack, C. Woodsong, K. Macqueen, G. Guest, E. Namey. “Qualitative Research Methods: A Data Collector’s Field Guide”, 2005.
- [50] M. Miles, A. Huberman and J. Saldana, *Qualitative Data Analysis: A Methods Sourcebook*, 3rd ed. Sage, pp. 108-119, 2013.
- [51] “Electroimán Levantador Eléctrico 12v DC Resistente (25n)”, recuperado de https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-469115373-electroiman-levantador-electrico-12v-dc-resistente-25n-_JM?quantity=1.
- [52] “How to Use the L293D Motor Driver - Arduino Tutorial”, recuperado de: <https://www.instructables.com/id/How-to-use-the-L293D-Motor-Driver-Arduino-Tutorial/>.
- [53] R. C. Streijl, S. Winkler, and D. S. Hands, “Mean opinion score (MOS) revisited: methods and applications, limitations and alternatives,” *Multimed. Syst.*, vol. 22, no. 2, pp. 213–227, 2016.



Apéndices

Apéndice A Consentimientos informados

FORMATO DE CONSENTIMIENTO INFORMADO PARA UN PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

Título del estudio: “Identificación de las condiciones requeridas por un sistema que facilite el reconocimiento de imágenes por medio del sentido del tacto”

Responsable: Universidad del Cauca – Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones– Departamento de Telecomunicaciones – Programa de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones

Supervisor de Investigación: Ing. María Manuela Silva Zambrano, Departamento de Telecomunicaciones.

Participantes: Personas con discapacidad visual.

Propósito de la investigación: Conocer las necesidades y dificultades en el proceso de aprendizaje en el área de matemáticas por parte de las personas con discapacidad visual, con el objetivo de definir los requerimientos funcionales para un dispositivo para la representación táctil de imágenes. Además de explorar los conocimientos y usos de las tecnologías que buscan aportar en soluciones educativas para las personas con discapacidad visual.

Tipo de intervención de la investigación: Participará en la realización de una entrevista en profundidad para conocer su opinión sobre las alternativas propuestas.

Selección de las participantes: Usted está cordialmente invitado a formar parte de este proyecto de investigación por pertenecer a la comunidad con discapacidad visual.

Participación voluntaria: Usted puede elegir si quiere ser parte del proyecto de investigación. Si no quiere ser parte del estudio su trabajo continuará y nada cambiará. Aún si usted acepta ser parte del estudio ahora, usted se puede arrepentir luego y dejar de participar.

Procedimientos: Si Usted acepta participar en el estudio: se le realizara: una entrevista en profundidad de manera individual para conocer su opinión al respecto de los prototipos desarrollados. Es importante aclarar que no habrá respuestas correctas ni incorrectas, solamente queremos conocer sus experiencias y opiniones acerca de



este tema. La entrevista tendrá una duración máxima de veinte (20) minutos. Se grabará la entrevista en profundidad, con la única finalidad de tener registrada toda la información y poder analizarla.

Es posible que le pidamos permiso de tomar fotos durante la realización de la entrevista en profundidad. Las fotos serán usadas para socializar los resultados y para tener un registro evidente de la actividad del proyecto de investigación. No serán ni tomadas ni usadas sin su consentimiento.

Riesgos y molestias: Usted debe colaborar con su asistencia en la entrevista en profundidad. Esta será realizada por un estudiante del programa de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad del Cauca.

Beneficios: Luego de finalizar el proyecto de investigación, los hallazgos pueden ayudar para el desarrollo de distintas herramientas usando tecnologías emergentes para ayudar a la comunidad con discapacidad visual.

Incentivos: Usted no recibirá ningún incentivo de índole económico (no se le dará dinero) por participar en el estudio.

Confidencialidad: La información derivada de la investigación será manejada de manera exclusiva por nuestro grupo de investigación. La información será guardada de manera segura por parte del equipo. Nadie fuera de nuestro equipo de investigación verá la información sobre usted.

Cuando se almacene su información dentro de nuestra computadora, en lugar de usar su nombre, se asignará un código único a cada participante. Sólo el equipo de investigación sabrá cuál es su código. Cuando expliquemos la investigación a otras personas, no usaremos su nombre o nada que permita que otras personas conozcan su identidad. La información será guardada, cumpliendo los criterios de confidencialidad y respeto. Cabe resaltar que todos los datos personales utilizados en este proyecto no serán utilizados en otras investigaciones. Se construirá una base de datos, a la cual solo tendrá acceso el grupo de investigación supervisado por la Ing. María Manuela Silva Zambrano, C.C. 1.061'767.739, de la Facultad de Ingeniería Electrónica de la Universidad del Cauca, Campus de Tulcán. Celular: 316 495 8150.

Divulgación de resultados: Una vez toda la información haya sido analizada, escribiremos sobre nuestros resultados sin mencionar los datos de los entrevistados, de modo que otras personas alrededor del mundo puedan aprender de esta investigación. Estos resultados pueden ser útiles para mejorar la comunicación entre las comunidades oyente y no oyente.



Derecho a rehusar o a retirarse: Como se dijo anteriormente, su participación es voluntaria. Usted puede retirarse del estudio en cualquier momento si así lo desea. En ese caso, su información será eliminada. Esta investigación contiene los elementos éticos que la ley y la doctrina exigen (código Helsinki-código Nuremberg resolución 008430 de 1993) que rigen la ética en la investigación científica en Colombia. Se garantiza total confidencialidad con los datos recolectados.

Información de Contacto: Si tiene preguntas, las puede hacer ahora o posteriormente. Se le dará una copia escrita de este consentimiento. Si tiene preguntas adicionales, por favor contáctenos a través de la Ing. María Manuela Silva Zambrano. Celular: 316 495 8150. O con alguno de los entrevistadores Juan Manuel Calvache Zapata. Celular 312 844 3169. John Edison Fernandez. Celular 313 735 7904.

Certificado de consentimiento

Entiendo que se me va a realizar una entrevista y grupo focal. Entiendo que no existe ningún riesgo. Sé que no recibiré dinero, sino el beneficio que los resultados de investigación ayuden a facilitar la comunicación entre las comunidades oyente y no oyente. Se me ha dado el nombre y dirección de un investigador que puede ser contactado fácilmente.

He leído o me ha sido leída la información precedente. He tenido la oportunidad de hacer preguntas. Estoy satisfecho/a con las respuestas a todas mis preguntas. Doy consentimiento voluntario para hacer parte en este estudio. También puedo retirarme en cualquier momento.

Nombre legible del participante _____ Código _____

Fecha _____ día/mes/año

He leído exactamente o he sido testigo de la lectura correcta del consentimiento al participante potencial, y éste ha tenido la posibilidad de hacer preguntas. Confirmando que el/la participante ha dado consentimiento libremente.

Nombre legible del investigador _____

Firma del investigador _____

Fecha _____ día/mes/año

Se da una copia de este consentimiento informado cada participante

_____ (Iniciales del investigador).



Apéndice B

Modelo para las entrevistas en profundidad

Preguntas:

1. ¿En qué casos es útil la representación táctil de imágenes?
2. ¿Es necesario que el taxel tenga las mismas dimensiones que el punto Braille?
3. ¿Qué funcionalidades considera necesarias en el prototipo?



Apéndice C

Diagramas de flujo de los prototipos funcionales.

La Figura B.1 se muestra el diagrama de flujo que llevó a la versión final del prototipo creado utilizando mini motores DC.

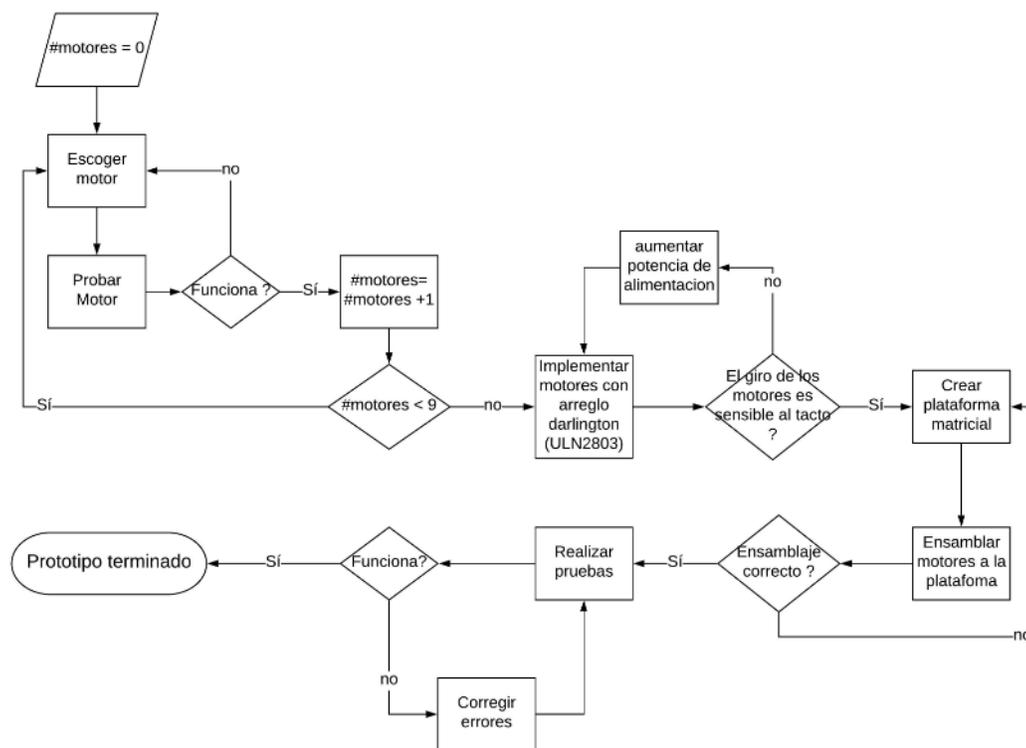


Figura B.1. Diagrama de flujo de mini motores DC.

La Figura B.2 muestra el diagrama de flujo que llevó a la versión final del prototipo creado utilizando motores vibradores, como los que se encuentran al interior de los celulares.



Identificación de las condiciones requeridas por un sistema que facilite el reconocimiento de imágenes por medio del sentido del tacto

Juan Manuel Calvache Zapata – John Edison Fernández Ordóñez

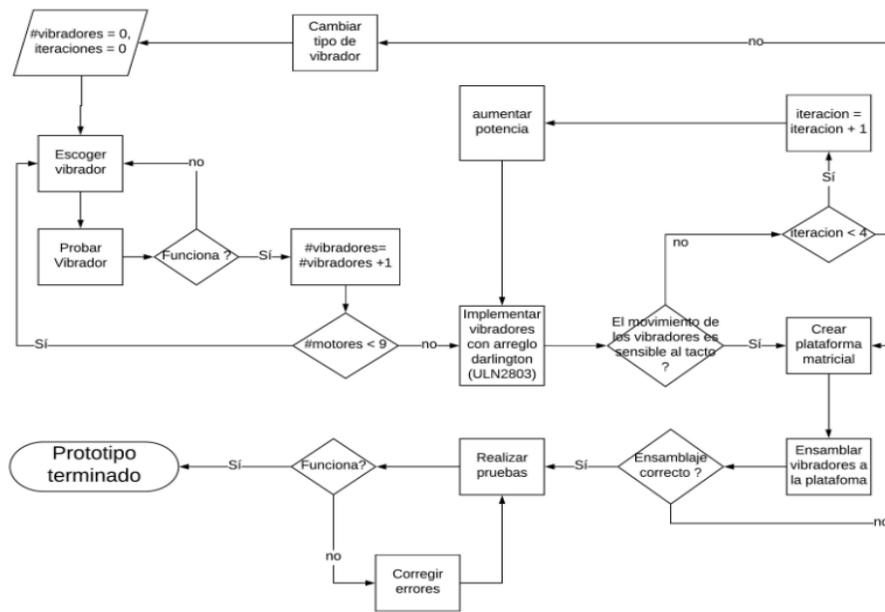


Figura B.2. Diagrama de flujo de motores vibradores.

La Figura B.3 muestra el diagrama de flujo empleado como guía en el proceso de construcción del prototipo que utiliza motores DC como actuadores lineales.

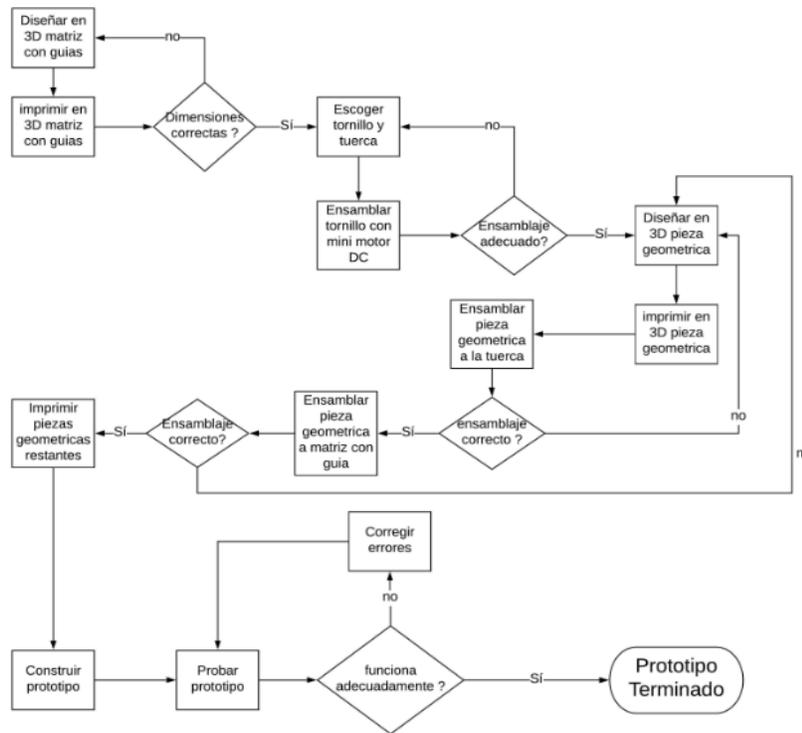


Figura B.3. Diagrama de flujo de matriz con motores DC como actuadores lineales.



La Figura B.4 muestra el diagrama de flujo empleado como guía en el proceso de construcción del prototipo que utiliza una matriz de puntos.

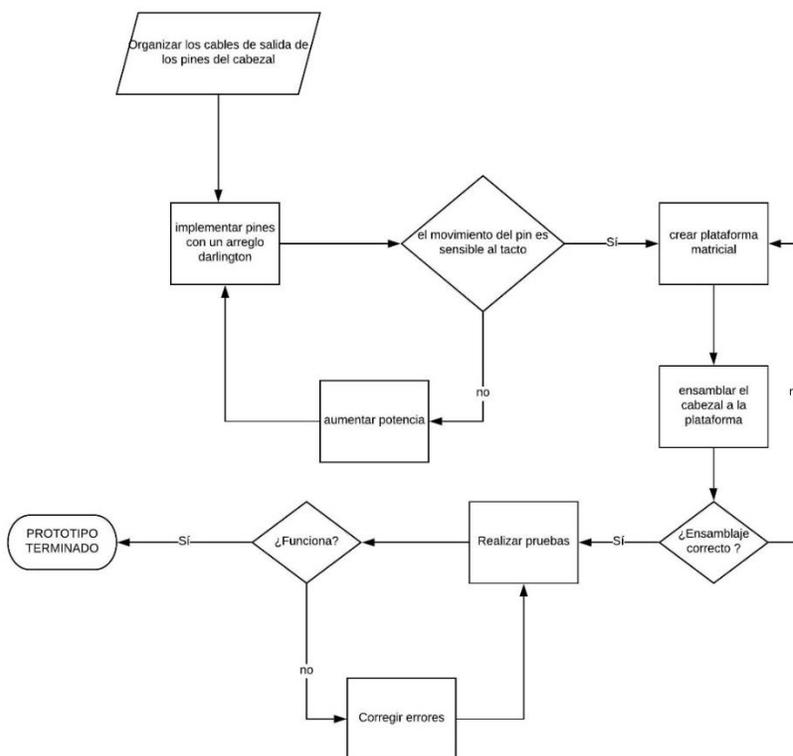


Figura B.4. Diagrama de flujo de la matriz de puntos.

La Figura B.5 muestra el diagrama de flujo empleado como guía en el proceso de construcción del prototipo que utiliza motores DC como actuadores lineales.



Identificación de las condiciones requeridas por un sistema que facilite el reconocimiento de imágenes por medio del sentido del tacto

Juan Manuel Calvache Zapata – John Edison Fernández Ordóñez

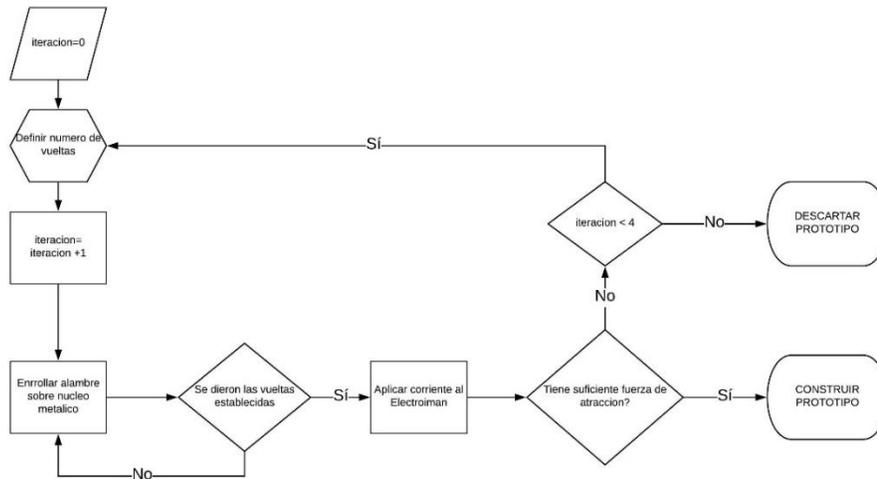


Figura B.5. Diagrama de flujo para el diseño del electroimán.



Apéndice D

Códigos Arduino

D.1 Código para el prototipo matriz de puntos

D.1.1 Cruz

// Se definen los pines del Arduino que se van a utilizar para el prototipo, el cual se implementó en una matriz de 3x3, en donde el pin P1 corresponde a la coordenada (1,1) de la matriz, P2 = (1,2) ... P9 = (3,3)

```
const int P1 = 2;  
const int P2 = 3;  
const int P3 = 4;  
const int P4 = 5;  
const int P5 = 6;  
const int P6 = 7;  
const int P7 = 8;  
const int P8 = 9;  
const int P9 = 11;
```

```
void setup()
```

```
{
```

```
// Se configuran los pines como salidas del Arduino.
```

```
pinMode(P1,OUTPUT);  
pinMode(P2,OUTPUT);  
pinMode(P3,OUTPUT);  
pinMode(P4,OUTPUT);  
pinMode(P5,OUTPUT);  
pinMode(P6,OUTPUT);  
pinMode(P7,OUTPUT);  
pinMode(P8,OUTPUT);  
pinMode(P9,OUTPUT);  
}
```

```
void loop() // En esta parte solo se utilizan los pines requeridos para formar una cruz en la matriz de 3x3. Posteriormente, se hace una conmutación rápida y continua de los estados HIGH y LOW mediante un delay de 50 ms, lo cual funciona como un estímulo táctil
```

```
{
```

```
digitalWrite(P2,HIGH);  
digitalWrite(P4,HIGH);  
digitalWrite(P5,HIGH);  
digitalWrite(P6,HIGH);  
digitalWrite(P8,HIGH);  
delay(50);
```



```
digitalWrite(P2,LOW);  
digitalWrite(P4,LOW);  
digitalWrite(P5,LOW);  
digitalWrite(P6,LOW);  
digitalWrite(P8,LOW);  
delay(50);  
}
```

D.1.2 Triángulo

// Se definen los pines del Arduino que se van a utilizar para el prototipo, el cual se implementó en una matriz de 3x3, en donde el pin P1 corresponde a la coordenada (1,1) de la matriz, P2 = (1,2) ... P9 = (3,3)

```
const int P1 = 2;  
const int P2 = 3;  
const int P3 = 4;  
const int P4 = 5;  
const int P5 = 6;  
const int P6 = 7;  
const int P7 = 8;  
const int P8 = 9;  
const int P9 = 11;
```

void setup() // Se configuran los pines como salidas del Arduino.

```
{  
pinMode(P1,OUTPUT);  
pinMode(P2,OUTPUT);  
pinMode(P3,OUTPUT);  
pinMode(P4,OUTPUT);  
pinMode(P5,OUTPUT);  
pinMode(P6,OUTPUT);  
pinMode(P7,OUTPUT);  
pinMode(P8,OUTPUT);  
pinMode(P9,OUTPUT);  
}
```

void loop() // En esta parte solo se utilizan los pines requeridos para formar un triángulo en la matriz de 3x3. Posteriormente, se hace una conmutación rápida y continua de los estados HIGH y LOW mediante un *delay* de 50 ms, lo cual funciona como un estímulo táctil

```
{  
digitalWrite(P1,HIGH);  
digitalWrite(P2,HIGH);  
digitalWrite(P3,HIGH);  
digitalWrite(P4,HIGH);  
digitalWrite(P5,HIGH);
```



```
digitalWrite(P7,HIGH);
delay(50);
digitalWrite(P1,LOW);
digitalWrite(P2,LOW);
digitalWrite(P3,LOW);
digitalWrite(P4,LOW);
digitalWrite(P5,LOW);
digitalWrite(P7,LOW);
delay(50);
}
```

D.1.3 Cuadrado

// Se definen los pines del Arduino que se van a utilizar para el prototipo, el cual se implementó en una matriz de 3x3, en donde el pin P1 corresponde a la coordenada (1,1) de la matriz, P2 = (1,2) ... P9 = (3,3)

```
const int P1 = 2;
const int P2 = 3;
const int P3 = 4;
const int P4 = 5;
const int P5 = 6;
const int P6 = 7;
const int P7 = 8;
const int P8 = 9;
const int P9 = 11;
```

void setup() // Se configuran los pines como salidas del Arduino.

```
{
pinMode(P1,OUTPUT);
pinMode(P2,OUTPUT);
pinMode(P3,OUTPUT);
pinMode(P4,OUTPUT);
pinMode(P5,OUTPUT);
pinMode(P6,OUTPUT);
pinMode(P7,OUTPUT);
pinMode(P8,OUTPUT);
pinMode(P9,OUTPUT);
}
```

void loop() //En esta parte solo se utilizan los pines requeridos para formar un cuadrado en la matriz de 3x3. Posteriormente, se hace una conmutación rápida y continua de los estados HIGH y LOW mediante un *delay* de 50 ms, lo cual funciona como un estímulo táctil.

```
{
digitalWrite(P1,HIGH);
digitalWrite(P2,HIGH);
```



```
digitalWrite(P3,HIGH);
digitalWrite(P4,HIGH);
digitalWrite(P6,HIGH);
digitalWrite(P7,HIGH);
digitalWrite(P8,HIGH);
digitalWrite(P9,HIGH);
delay(50);
digitalWrite(P1,LOW);
digitalWrite(P2,LOW);
digitalWrite(P3,LOW);
digitalWrite(P4,LOW);
digitalWrite(P6,LOW);
digitalWrite(P7,LOW);
digitalWrite(P8,LOW);
digitalWrite(P9,LOW);
delay(50);
}
```

D.1.4 Letra H

Se definen los pines del Arduino que se van a utilizar para el prototipo, el cual se implementó en una matriz de 3x3, en donde el pin P1 corresponde a la coordenada (1,1) de la matriz, P2 = (1,2) ... P9 = (3,3)

```
const int P1 = 2;
const int P2 = 3;
const int P3 = 4;
const int P4 = 5;
const int P5 = 6;
const int P6 = 7;
const int P7 = 8;
const int P8 = 9;
const int P9 = 11;
```

void setup() // Se configuran los pines como salidas del Arduino.

```
{
pinMode(P1,OUTPUT);
pinMode(P2,OUTPUT);
pinMode(P3,OUTPUT);
pinMode(P4,OUTPUT);
pinMode(P5,OUTPUT);
pinMode(P6,OUTPUT);
pinMode(P7,OUTPUT);
pinMode(P8,OUTPUT);
pinMode(P9,OUTPUT);
}
```



void loop() //En esta parte solo se utilizan los pines requeridos para formar la letra H en la matriz de 3x3. Posteriormente, se hace una conmutación rápida y continua de los estados HIGH y LOW mediante un *delay* de 50 ms, lo cual funciona como un estímulo táctil.

```
{
digitalWrite(P1,HIGH);
digitalWrite(P3,HIGH);
digitalWrite(P4,HIGH);
digitalWrite(P5,HIGH);
digitalWrite(P6,HIGH);
digitalWrite(P7,HIGH);
digitalWrite(P9,HIGH);
delay(50);
digitalWrite(P1,LOW);
digitalWrite(P3,LOW);
digitalWrite(P4,LOW);
digitalWrite(P5,LOW);
digitalWrite(P6,LOW);
digitalWrite(P7,LOW);
digitalWrite(P9,LOW);
delay(50);
}
```

D.1.5 Letra L

Se definen los pines del Arduino que se van a utilizar para el prototipo, el cual se implementó en una matriz de 3x3, en donde el pin P1 corresponde a la coordenada (1,1) de la matriz, P2 = (1,2) ... P9 = (3,3)

```
const int P1 = 2;
const int P2 = 3;
const int P3 = 4;
const int P4 = 5;
const int P5 = 6;
const int P6 = 7;
const int P7 = 8;
const int P8 = 9;
const int P9 = 11;
```

void setup() // Se configuran los pines como salidas del Arduino.

```
{
pinMode(P1,OUTPUT);
pinMode(P2,OUTPUT);
pinMode(P3,OUTPUT);
pinMode(P4,OUTPUT);
pinMode(P5,OUTPUT);
```



```
pinMode(P6,OUTPUT);
pinMode(P7,OUTPUT);
pinMode(P8,OUTPUT);
pinMode(P9,OUTPUT);
}
void loop() //En esta parte solo se utilizan los pines requeridos para formar la letra L en
la matriz de 3x3. Posteriormente, se hace una conmutación rápida y continua de los
estados HIGH y LOW mediante un delay de 50 ms, lo cual funciona como un estímulo
táctil.
{
digitalWrite(P1,HIGH);
digitalWrite(P4,HIGH);
digitalWrite(P7,HIGH);
digitalWrite(P8,HIGH);
digitalWrite(P9,HIGH);
delay(50);
digitalWrite(P1,LOW);
digitalWrite(P4,LOW);
digitalWrite(P7,LOW);
digitalWrite(P8,LOW);
digitalWrite(P9,LOW);
delay(50);
}
```

D.1.6 Rombo

Se definen los pines del Arduino que se van a utilizar para el prototipo, el cual se implementó en una matriz de 3x3, en donde el pin P1 corresponde a la coordenada (1,1) de la matriz, P2 = (1,2) ... P9 = (3,3)

```
const int P1 = 2;
const int P2 = 3;
const int P3 = 4;
const int P4 = 5;
const int P5 = 6;
const int P6 = 7;
const int P7 = 8;
const int P8 = 9;
const int P9 = 11;
```

```
void setup() // Se configuran los pines como salidas del Arduino.
{
pinMode(P1,OUTPUT);
pinMode(P2,OUTPUT);
pinMode(P3,OUTPUT);
pinMode(P4,OUTPUT);
```



```
pinMode(P5,OUTPUT);
pinMode(P6,OUTPUT);
pinMode(P7,OUTPUT);
pinMode(P8,OUTPUT);
pinMode(P9,OUTPUT);
}
void loop() //En esta parte solo se utilizan los pines requeridos para formar un rombo
en la matriz de 3x3. Posteriormente, se hace una conmutación rápida y continua de
los estados HIGH y LOW mediante un delay de 50 ms, lo cual funciona como un
estímulo táctil.
{
digitalWrite(P2,HIGH);
digitalWrite(P4,HIGH);
digitalWrite(P6,HIGH);
digitalWrite(P8,HIGH);
delay(50);
digitalWrite(P2,LOW);
digitalWrite(P4,LOW);
digitalWrite(P6,LOW);
digitalWrite(P8,LOW);
delay(50);
}
```

D.1.7 Numero Dos en Braille

Se definen los pines del Arduino que se van a utilizar para el prototipo, el cual se implementó en una matriz de 3x3, en donde el pin P1 corresponde a la coordenada (1,1) de la matriz, P2 = (1,2) ... P9 = (3,3)

```
const int P1 = 2;
const int P2 = 3;
const int P3 = 4;
const int P4 = 5;
const int P5 = 6;
const int P6 = 7;
const int P7 = 8;
const int P8 = 9;
const int P9 = 11;
```

```
void setup() // Se configuran los pines como salidas del Arduino.
{
pinMode(P1,OUTPUT);
pinMode(P2,OUTPUT);
pinMode(P3,OUTPUT);
pinMode(P4,OUTPUT);
```



```
pinMode(P5,OUTPUT);  
pinMode(P6,OUTPUT);  
pinMode(P7,OUTPUT);  
pinMode(P8,OUTPUT);  
pinMode(P9,OUTPUT);  
}
```

void loop() //En esta parte solo se utilizan los pines requeridos para formar el número dos en Braille en la matriz de 3x3. Posteriormente, se hace una conmutación rápida y continua de los estados HIGH y LOW mediante un *delay* de 50 ms, lo cual funciona como un estímulo táctil.

```
{  
digitalWrite(P1,HIGH);  
digitalWrite(P4,HIGH);  
delay(50);  
digitalWrite(P1,LOW);  
digitalWrite(P4,LOW);  
delay(50);  
}
```

D.1.8 Número Siete en Braille

Se definen los pines del Arduino que se van a utilizar para el prototipo, el cual se implementó en una matriz de 3x3, en donde el pin P1 corresponde a la coordenada (1,1) de la matriz, P2 = (1,2) ... P9 = (3,3)

```
const int P1 = 2;  
const int P2 = 3;  
const int P3 = 4;  
const int P4 = 5;  
const int P5 = 6;  
const int P6 = 7;  
const int P7 = 8;  
const int P8 = 9;  
const int P9 = 11;
```

void setup() // Se configuran los pines como salidas del Arduino.

```
{  
pinMode(P1,OUTPUT);  
pinMode(P2,OUTPUT);  
pinMode(P3,OUTPUT);  
pinMode(P4,OUTPUT);  
pinMode(P5,OUTPUT);  
pinMode(P6,OUTPUT);  
pinMode(P7,OUTPUT);  
pinMode(P8,OUTPUT);  
}
```



```
pinMode(P9,OUTPUT);
}
void loop() //En esta parte solo se utilizan los pines requeridos para formar el número
siete en Braille en la matriz de 3x3. Posteriormente, se hace una conmutación rápida
y continua de los estados HIGH y LOW mediante un delay de 50 ms, lo cual funciona
como un estímulo táctil.
{
digitalWrite(P1,HIGH);
digitalWrite(P2,HIGH);
digitalWrite(P4,HIGH);
digitalWrite(P5,HIGH);
delay(50);
digitalWrite(P1,LOW);
digitalWrite(P2,LOW);
digitalWrite(P4,LOW);
digitalWrite(P5,LOW);
delay(50);
}
```

D.1.9 Operador Suma en Braille

Se definen los pines del Arduino que se van a utilizar para el prototipo, el cual se implementó en una matriz de 3x3, en donde el pin P1 corresponde a la coordenada (1,1) de la matriz, P2 = (1,2) ... P9 = (3,3)

```
const int P1 = 2;
const int P2 = 3;
const int P3 = 4;
const int P4 = 5;
const int P5 = 6;
const int P6 = 7;
const int P7 = 8;
const int P8 = 9;
const int P9 = 11;
```

```
void setup() // Se configuran los pines como salidas del Arduino.
{
pinMode(P1,OUTPUT);
pinMode(P2,OUTPUT);
pinMode(P3,OUTPUT);
pinMode(P4,OUTPUT);
pinMode(P5,OUTPUT);
pinMode(P6,OUTPUT);
pinMode(P7,OUTPUT);
pinMode(P8,OUTPUT);
```



```
pinMode(P9,OUTPUT);
}
void loop() //En esta parte solo se utilizan los pines requeridos para formar el operador
sume en Braille en la matriz de 3x3. Posteriormente, se hace una conmutación rápida
y continua de los estados HIGH y LOW mediante un delay de 50 ms, lo cual funciona
como un estímulo táctil.
{
digitalWrite(P4,HIGH);
digitalWrite(P5,HIGH);
digitalWrite(P7,HIGH);
delay(50);
digitalWrite(P4,LOW);
digitalWrite(P5,LOW);
digitalWrite(P7,LOW);
delay(50);
}
```

D.2 Código para controlar el prototipo matriz con motores DC como actuadores lineales

```
void setup()
{
  pinMode(7, INPUT); //Se define el pin 7 como una entrada al Arduino y se conecta a
un push button.

  pinMode(2, OUTPUT); //Se define el pin 2 como una salida del arduino
}
void loop() {
  int boton = digitalRead(7); // se lee el estado del push button (pin 7).
  if(boton == HIGH) // si el push button esta presionado (HIGH), el Arduino envia una
señal de salida de 5V al pin 2 durante 30ms
  {
    digitalWrite(2, HIGH);
    delay(30);
    digitalWrite(2, LOW);
    delay(1000);
  }
}
```

Apéndice E

Diseño de piezas 3D para el prototipo vibración mini motores DC

Como complemento al prototipo Matriz con Motores DC como actuadores lineales se diseñaron dos tipos de piezas, que posteriormente se imprimieron en una impresora 3D.

La primera pieza es la matriz de 3x3, la cual está conformada por agujeros y guías, como se observa en la Figura A.1.



Figura A.1. Matriz impresa en 3D.

La segunda pieza, es un diseño geométrico, el cual tendrá incorporado el taxel de este prototipo, como se observa en la Figura A.2.

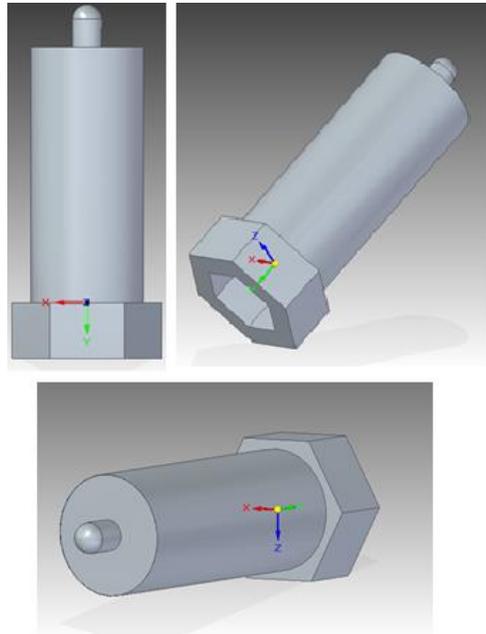


Figura A.2. Pieza geométrica con taxel.

Finalmente, se realiza el ensamblaje de la pieza geométrica y la tuerca que posteriormente se enrosca en el tornillo, para formar el sistema que activa y desactiva el taxel en la matriz, mediante el movimiento vertical ascendente y vertical descendente, los cuales están determinados por los dos tipos de giro del mini motor DC. En la parte izquierda de la Figura A.3, se puede observar cuando el taxel está activo, mientras que en la parte derecha de la Figura A.3, se puede observar cuando el taxel está inactivo.

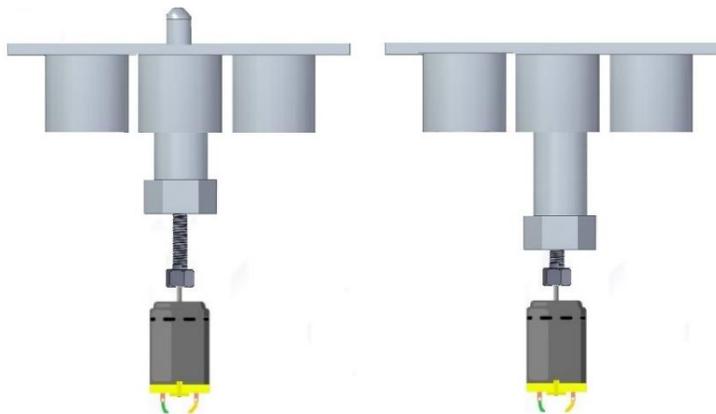


Figura A.3. Taxel cuando se encuentra activo e inactivo en la matriz.



Apéndice F

Modelo de la encuesta

Identificación de las condiciones requeridas para un sistema que facilite el reconocimiento de imágenes por medio del sentido del tacto

Es necesario investigar sobre formas que permitan mejorar la calidad de vida de personas con discapacidad. Este trabajo de grado se enfoca en personas con discapacidad visual y en la búsqueda de una forma adecuada para representar imágenes relacionadas con las matemáticas, con el fin de proponer una herramienta de apoyo para su proceso de aprendizaje.

Usted no recibirá ninguna compensación económica por su participación y podrá retirarse en cualquier momento. Su información personal sólo será conocida por las personas que realizan el trabajo, sus resultados serán identificados por medio de un número.

Se le pedirá que identifique diferentes “imágenes” (los taxeles activos) con cada uno de los prototipos propuestos. En total son 6 imágenes, 2 por cada uno de los 3 prototipos.

Se utilizará como método de Evaluación la Puntuación de Opinión Media (MOS), la cual consiste en responder cada una de las preguntas realizadas con una puntuación que va de 1 a 5, siendo 1 el peor resultado y 5 el mejor.

Prototipo de Motores DC como actuadores lineales

¿Qué tan fácil considera usted que fue identificar las imágenes propuestas con este prototipo?

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| | | | | |

¿Qué tan distractoras fueron las estimulaciones externas del prototipo (ruido o vibración)?

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| | | | | |

¿Qué tan adecuada considera usted que fue la distancia entre taxeles del prototipo?



Identificación de las condiciones requeridas por un sistema que facilite el reconocimiento de imágenes por medio del sentido del tacto

Juan Manuel Calvache Zapata – John Edison Fernández Ordóñez

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| | | | | |

Prototipo de Mini Motores DC como vibradores

¿Qué tan fácil considera usted que fue identificar las imágenes propuestas con este prototipo?

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| | | | | |

¿Qué tan distractoras fueron las estimulaciones externas del prototipo (ruido o vibración)?

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| | | | | |

¿Qué tan adecuada considera usted que fue la distancia entre taxeles del prototipo?

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| | | | | |

Prototipo de Matriz de puntos

¿Qué tan fácil considera usted que fue identificar las imágenes propuestas con este prototipo?

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| | | | | |

¿Qué tan distractoras fueron las estimulaciones externas del prototipo (ruido o vibración)?

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| | | | | |

¿Qué tan adecuada considera usted que fue la distancia entre taxeles del prototipo?

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| | | | | |



Identificación de las condiciones requeridas por un sistema que facilite el reconocimiento de imágenes por medio del sentido del tacto

Juan Manuel Calvache Zapata – John Edison Fernández Ordóñez

Preguntas Finales

¿Cuál de los prototipos presentados, considera usted que fue el mejor?

¿Cuál de los prototipos presentados, considera usted que fue el peor?

Nombre: _____