

Magda Piqué Bosch

**EQUIP AUTOMATITZAT I CONNECTAT SENSE FILS PER LA  
FLEXIÓ DE DISPOSITIUS IMPRESOS EN SUBSTRATS  
FLEXIBLES**

**TREBALL DE FI DE GRAU**

dirigit pel Dr. José Luis Ramírez Falo i

Dr. Eduard Llobet Valero

Grau d'Enginyeria de Sistemes i Serveis de Telecomunicacions



UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI

**Tarragona**

**2024**



## **Agraïments**

M'agradaria expressar el meu més sincer agraïment a tots els que m'han acompanyat en la realització d'aquest treball.

Vull agrair especialment als meus tutors, el Dr. José Luis Ramírez Falo i al Dr. Eduard Llobet Valero, i al professor associat Xavier Blanch Martínez, per la seva guia, pel suport constant i pels consells al llarg de tot el desenvolupament del projecte.

Finalment, vull agrair de tot cor el suport de la meva família i de la meva parella.

A tots vosaltres, moltes gràcies.

## **Resum**

Aquest Treball de Fi de Grau es basa en el desenvolupament d'un dispositiu capaç de flexionar sensors sobre substrats flexibles. L'objectiu principal ha estat demostrar l'eficiència i precisió del dispositiu en diferents condicions de flexió, incloent distàncies específiques, velocitats determinades i un nombre concret de repeticions. A més, s'ha desenvolupat una aplicació mòbil per facilitar el control del dispositiu i la monitorització en temps real, assegurant una interfície fàcil i intuïtiva per a l'usuari.

Aquest dispositiu ha estat dissenyat específicament per cobrir una necessitat del grup de recerca MINOS, permetent posar a prova els sensors desenvolupats per aquest grup.

## **Resumen**

Este Trabajo de Fin de Grado se basa en el desarrollo de un dispositivo capaz de flexionar sensores sobre sustratos flexibles. El objetivo principal ha sido demostrar la eficiencia y precisión del dispositivo en distintas condiciones de flexión, incluyendo distancias específicas, velocidades determinadas y un número concreto de repeticiones. Además, se ha desarrollado una aplicación móvil para facilitar el control del dispositivo y monitorización en tiempo real, asegurando una interfaz fácil e intuitiva para el usuario.

Este dispositivo ha sido diseñado específicamente para cubrir una necesidad del grupo de investigación MINOS, permitiendo poner a prueba los sensores desarrollados por este grupo.

## **Abstract**

This Final Degree Project is based on the development of a device designed to flex sensors on flexible substrates. The main objective has been to demonstrate the efficiency and accuracy of the device under different bending conditions, including specific distances, determined speeds, and a specific number of repetitions. Additionally, a mobile application has been developed to facilitate device control and real-time monitoring, ensuring an easy and intuitive interface for the user.

This device has been specifically designed to meet a need of the MINOS research group, allowing the testing of sensors developed by this group.

# Índex

<b>1. Introducció .....</b>	<b>8</b>
1.1. Context i antecedents.....	8
1.2. Objectius.....	8
1.3. Limitacions .....	9
1.4. Estructura del document.....	9
<b>2. Marc teòric .....</b>	<b>11</b>
2.1. Introducció al grup de recerca MINOS.....	11
2.2. Sensors de gas flexibles.....	12
2.3. Dispositius comercialitzats per sotmetre sensors a proves de flexió .....	14
<b>3. Desenvolupament del dispositiu .....</b>	<b>17</b>
3.1. Idea principal i disseny del dispositiu per a la deformació de sensors en substrats flexibles.....	17
3.2. Mòduls utilitzats .....	18
3.2.1. <i>ESP32 WROOM-32</i> .....	18
3.2.2. <i>Motor Pas a Pas Nema 17 Model: 17HS4401</i> .....	18
3.2.3. <i>Driver A4988</i> .....	19
3.2.4. <i>Convertidor tipus buck</i> .....	25
3.3. Materials utilitzats per al muntatge del dispositiu .....	27
3.3.1. <i>Perfils d'alumini</i> .....	27
3.3.2. <i>Suport del motor Nema 17</i> .....	28
3.3.3. <i>Caragol sense fi</i> .....	29
3.3.4. <i>Suports pel caragol</i> .....	29
3.3.5. <i>Pinces</i> .....	30
3.3.6. <i>Suport pinça superior</i> .....	30
3.3.7. <i>Font d'alimentació 12 V 2 A</i> .....	31
3.4. Muntatge del dispositiu .....	31
<b>4. Tecnologia Bluetooth.....</b>	<b>35</b>
4.1. Tecnologia Bluetooth: Història i Definició .....	35
4.2. Diferències entre Bluetooth Low Energy i Bluetooth Classic.....	35
<b>5. Processat de dades amb ESP32 i connectivitat .....</b>	<b>37</b>
5.1. Introducció a ESP32.....	37

5.1.1.	<i>Descripció del hardware</i> .....	37
5.1.2.	<i>Programació</i> .....	39
5.1.	<b>Comparativa entre ESP32 i Arduino Nano 33 BLE</b> .....	39
5.2.	<b>Desenvolupament del codi en IDE Arduino</b> .....	40
5.2.1.	<i>Llibreries</i> .....	40
5.2.2.	<i>Definicions i inicialitzacions</i> .....	40
5.2.3.	<i>Setup</i> .....	42
5.2.4.	<i>Loop</i> .....	42
6.1.	<b>Introducció a App inventor</b> .....	47
6.2.	<b>Consideracions prèvies</b> .....	47
6.3.	<b>Desenvolupament de l'Aplicació Mòbil</b> .....	48
6.3.1.	<i>Estructura de l'Aplicació</i> .....	48
6.3.2.	<i>Part visual</i> .....	48
6.3.3.	<i>Programació per blocs</i> .....	49
7.	<b>Proves i resultats</b> .....	52
8.	<b>Pressupost</b> .....	55
9.	<b>Conclusions i línies futures del projecte</b> .....	56
10.	<b>Referències i webgrafia</b> .....	57
11.	<b>Annexos</b> .....	58
11.1.	<b>Codi</b> .....	58
11.2.	<b>Mòduls utilitzats al dispositiu realitzats amb impressora 3D</b> .....	62
11.2.1.	<i>Suport pinça superior</i> .....	62
11.2.2.	<i>Pinces</i> .....	62

## **Llistat d'acrònims**

<b>BLE</b>	Bluetooth Low Energy
<b>DC</b>	Direct Current
<b>GND</b>	Ground
<b>GPIO</b>	General Purpose Input/Output
<b>IBM</b>	International Business Machines
<b>IDE</b>	Integrated Development Environment
<b>IOS</b>	Internetwork Operating System
<b>I2C</b>	Inter-Integrated Circuit
<b>ISM</b>	Industrial, Scientific, and Medical
<b>MINOS</b>	Microsystems Nanotechnologies for Chemical Analysis
<b>RPM</b>	Revolutions Per Minute
<b>RPS</b>	Revolutions Per Second
<b>RS</b>	Resistor Sense
<b>SIG</b>	Special Interest Group
<b>SOC</b>	System On a Chip
<b>UART</b>	Universal Asynchronous Receiver-Transmitter
<b>UHF</b>	Ultra High Frequency
<b>URV</b>	Universitat Rovira i Virgili
<b>USB</b>	Universal Serial Bus
<b>VDD</b>	Voltage Drain Drain

# Llistat de figures

<b>Figura 2.1.</b> AGS-X 10 kN Shimadzu.[3] .....	12
<b>Figura 2.2.</b> Representació esquemàtica dels paràmetres principals (esquerra) relació radi curvatura i deflexió (dreta). [2].....	13
<b>Figura 2.3.</b> a) Esquema del sensor en diferents condicions de flexió. Imatges del sensor sota b) deformació de tracció i c) deformació de compressió. [2] .....	14
<b>Figura 2.4.</b> Diferents dispositius per l'aplicació de desplaçaments i mesura de forces, de l'empresa Shimadzu. [4].....	14
<b>Figura 2.5.</b> Màquines universals per a la flexió de sensors de l'empresa d'Instron. [5] ....	15
<b>Figura 3.1.</b> Dispositiu final. Bending Machine. ....	17
<b>Figura 3.2.</b> ESP32 WROOM-32.....	18
<b>Figura 3.3.</b> Nema 17 Model 17HS4401. [6].....	18
<b>Figura 3.4.</b> Bobines – Datasheet Nema 17 Model 17HS4401. [6].....	19
<b>Figura 3.5.</b> Driver A4988. [7].....	19
<b>Figura 3.6.</b> Pins driver A4988. [7].....	20
<b>Figura 3.7.</b> Esquema connexió Microcontrolador - Driver A4988 – Motor Nema 17. [9] 22	
<b>Figura 3.8.</b> Datasheet Nema 17 Model: 17HS4401. [6].....	23
<b>Figura 3.9.</b> Driver A4988 utilitzat en el dispositiu. ....	24
<b>Figura 3.10.</b> Ajustament de la tensió de referència del driver. ....	24
<b>Figura 3.11.</b> Esquema connexió per tal d'ajustar la tensió de referència necessària.....	25
<b>Figura 3.12.</b> Esquema bàsic d'un convertidor buck. ....	25
<b>Figura 3.13.</b> Convertidor tipus buck LM2596 DC-DC. ....	26
<b>Figura 3.14.</b> Ajust del potenciòmetre del convertidor buck. ....	27
<b>Figura 3.15.</b> Vista general i mesura dels perfils per al suport del dispositiu (mm).....	28
<b>Figura 3.16.</b> Muntatge complet dels perfils per al suport del dispositiu. ....	28
<b>Figura 3.17.</b> Suport del motor Nema 17. ....	29
<b>Figura 3.18.</b> Caragol sense fi TORT840. ....	29

<b>Figura 3.19.</b> Suport superior del caragol. ....	29
<b>Figura 3.20.</b> Suport inferior del caragol. ....	30
<b>Figura 3.21.</b> Pinces realitzades amb impressora 3D. ....	30
<b>Figura 3.22.</b> Suport pinça superior realitzat amb impressora 3D. ....	31
<b>Figura 3.23.</b> Font d'alimentació 12 V 2 A. ....	31
<b>Figura 3.24.</b> Suport del motor Nema 17 i adaptador superior del caragol implementat al dispositiu. ....	31
<b>Figura 3.25.</b> Implementació del caragol sense fi i dels suports del caragol al dispositiu. ...	32
<b>Figura 3.26.</b> Suport pinça superior amb la pinça superior implementada. ....	32
<b>Figura 3.27.</b> Pinça inferior implementada. ....	33
<b>Figura 3.28.</b> Connexions entre el microcontrolador ESP32 i driver A4988. ....	33
<b>Figura 3.29.</b> Electrònica del dispositiu. ....	33
<b>Figura 3.30.</b> Dispositiu final (Bending Machine).....	34
<b>Figura 5.1.</b> Diagrama dels pins del ESP32 DEV KIT V1. [13]. ....	38
<b>Figura 5.2.</b> Diagrama del muntatge del ESP32 connectat al driver A4988. ....	39
<b>Figura 5.3.</b> Diagrama de flux loop. ....	43
<b>Figura 5.4.</b> Distància corresponent a ½ volta. ....	44
<b>Figura 5.5.</b> Logotip de l'App. ....	48
<b>Figura 5.6.</b> Pantalles de l'aplicació. ....	48
<b>Figura 5.7.</b> Bloc per carregar els dispositius Bluetooth. ....	49
<b>Figura 5.8.</b> Bloc per connectar-se al dispositiu Bluetooth seleccionat. ....	49
<b>Figura 5.9.</b> Bloc per desconnectar-se del dispositiu Bluetooth. ....	50
<b>Figura 5.10.</b> Bloc quan es fa clic al botó "PUJA". ....	50
<b>Figura 5.11.</b> Bloc quan es fa clic al botó "BAIXA". ....	50
<b>Figura 5.12.</b> Bloc quan es fa clic al botó "GO". ....	51
<b>Figura 5.13.</b> Bloc quan es fa clic al botó "STOP". ....	51
<b>Figura 5.14.</b> Blocs per als botons TEST 1, 2 i 3. ....	51

<b>Figura 7.1.</b> Diferents graus de curvatura del substrat flexible sotmès a una deformació de tracció. ....	52
<b>Figura 7.2.</b> Diferents graus de curvatura del substrat flexible sotmès a una deformació de compressió. ....	52
<b>Figura 7.3.</b> Corrent màxim del dispositiu. ....	53
<b>Figura 7.4.</b> Resistència base 4,2 MΩ.....	53
<b>Figura 7.5.</b> Resistència (3,5 MΩ) quan el sensor és sotmès a un esforç de compressió. ...	54
<b>Figura 7.6.</b> Resistència final (4,3 MΩ.) després de 10 repeticions d'1 mm de distància. ..	54
<b>Figura 11.1.</b> Visió amb 3D del suport de la pinça superior. ....	62
<b>Figura 11.2.</b> Visió amb 3D del disseny de les pinces. ....	62

## **Llistat de taules**

<b>Taula 3.1.</b> Modes de Microstepping (L = LOW; H = HIGH) [8].....	20
<b>Taula 3.2.</b> Característiques tècniques del convertidor tipus buck LM2596 DC-DC. ....	26
<b>Taula 4.1.</b> Comparativa entre Bluetooth Low Energy i Bluetooth Classic. [12].....	36
<b>Taula 5.1.</b> Característiques tècniques de ESP32-DEV KIT V1.....	37
<b>Taula 5.2.</b> Comparativa del ESP32 i Arduino Nano 33 BLE. ....	40
<b>Taula 5.3.</b> Comparativa del App inventor i l'Android Studio. ....	47
<b>Taula 8.1.</b> Pressupost del prototip.....	55
<b>Taula 11.1.</b> Mesures del suport de la pinça superior. ....	62
<b>Taula 11.2.</b> Mesures de les pinces. ....	62

## 1. Introducció

### 1.1. Context i antecedents

En diverses àrees de la tecnologia, especialment en l'evolució dels dispositius portàtils comunament coneguts com a “wearables”, s'ha observat un increment en la demanda de sensors aplicats a substrats flexibles. Aquests sensors són essencials per al monitoratge de la salut, la detecció de gasos i moltes altres aplicacions.

Malgrat la seva importància, sovint es passa per alt la necessitat d'avaluar la seva resistència a la deformació. La capacitat dels sensors per mantenir la seva funcionalitat després de ser sotmesos a flexió i deformació és crucial per a la seva aplicació pràctica. Sense una avaluació adequada d'aquesta propietat, els usuaris poden trobar-se amb sensors que no compleixin les seves expectatives en la seva aplicació final.

El grup de recerca MINOS del Departament d'Enginyeria Electrònica, Elèctrica i Automàtica de la Universitat Rovira i Virgili ha identificat la necessitat de sotmetre els sensors que utilitzen a proves de flexió automatitzades mitjançant un equip especialitzat que permeti controlar i repetir amb precisió una deformació aplicada. Els dispositius actualment disponibles al mercat per mesurar l'elasticitat dels sensors sovint tenen un cost elevat a causa de la complexitat de la construcció mecànica, els materials emprats, la mida dels dispositius i el rang de funcionament, especialment si es fan servir per a assajos mecànics de resistència de materials.

És per això, que l'objectiu principal d'aquest projecte és desenvolupar un dispositiu per a la deformació de sensors en substrats flexibles de baix cost, sotmetent-los a proves d'estrès amb una elevada repetibilitat de flexió. Això permetrà garantir la seva funcionalitat sense la necessitat d'invertir en equips costosos.

Mitjançant aquest dispositiu, es podrà dur a terme una avaluació precisa abans i després de sotmetre els sensors a deformacions. Per controlar el procés de deformació dels sensors, es farà servir un microcontrolador ESP32 ja que aquest inclou connectivitat Bluetooth per tal de que la comunicació sigui ràpida, amb baixa latència i amb un consum baix d'energia.

Això possibilitarà un control del motor pas a pas, responsable de provocar la deformació del sensor.

### 1.2. Objectius

L'objectiu d'aquest projecte és dissenyar i implementar un sistema automatitzat que utilitza un microcontrolador ESP32 connectat a un motor pas a pas per controlar i realitzar deformacions en substrats que continguin sensors. L'objectiu principal d'aquest sistema no és observar els resultats de les deformacions o la resistència dels sensors, sinó dur a terme el procés d'aplicació de les deformacions requerides als substrats mitjançant la realització d'un equip.

Aquest tipus d'equip podrà tenir aplicacions en la investigació o el desenvolupament de tecnologies que requereixin substrats flexibles amb deformacions controlades, com ara en l'àmbit dels tèxtils electrònics, la fabricació de dispositius portàtils o la biotecnologia.

Per dur a terme aquesta tasca s'abordaran els següents aspectes:

- Introducció sobre el grup de recerca MINOS.
- Estudi de la bibliografia dels sensors de gas en substrats flexibles i conèixer les proves mecàniques a la que es sotmeten per tal de deformar-los.
- Disseny i implementació d'un dispositiu fent ús d'un microcontrolador ESP32 i un motor pas a pas, incloent-hi el desenvolupament del codi de control i la interfície amb els sensors.
- Disseny d'una aplicació mòbil com a interfície per controlar la distància, les repeticions i la velocitat de les deformacions a les que se sotmetrà el sensor.

### 1.3. Limitacions

Durant la realització d'aquest treball, no s'ha trobat cap limitació significativa que afectés el desenvolupament o els resultats finals del projecte.

Gràcies a l'accés als recursos necessaris i al suport continu dels meus tutors, i col·laboradors, s'han pogut dur a terme tots els objectius previstos sense obstacles.

### 1.4. Estructura del document

L'estructura consta dels següents apartats:

1. **Introducció.** Es descriu un breu context i antecedents, quins son els objectius principals del projecte i quines tasques s'abordaran per dur a terme el treball.
2. **Marc teòric.** S'exposa informació detallada sobre la recerca del grup MINOS, abordant conceptes sobre la importància dels sensors en substrats flexibles i la necessitat de sotmetre'ls a proves d'elasticitat per assegurar la seva integritat en les aplicacions d'ús. A més, s'introdueixen algunes màquines comercialitzades que duen a terme aquestes proves.
3. **Desenvolupament del dispositiu.** Es descriu exhaustivament el procés de la creació i muntatge del dispositiu. S'explica el funcionament principal i els mòduls i materials emprats.
4. **Tecnologia Bluetooth.** S'explora els fonaments, principis i aplicacions de la tecnologia de comunicació sense fils Bluetooth. En aquest apartat, s'aborden aspectes

com la història i definició del Bluetooth, els principis físics de comunicació, protocols i estàndards, i les diferències entre Bluetooth Low Energy i Bluetooth Classic.

- 5. Processat de dades amb ESP32 i connectivitat.** En aquest apartat, es presenta la placa de desenvolupament ESP32, que serveix com a nucli per al processament de dades i la gestió de la connectivitat. Es detallen les seves característiques tècniques, el microcontrolador que utilitza, les connexions disponibles i els pins d'entrada/sortida. A més, es realitza una comparació entre l'ESP32 i la placa Arduino Nano 33 BLE per a contextualitzar les opcions de desenvolupament disponibles.

El desenvolupament del codi implementat per a l'ESP32 es descriu amb detall, utilitzant l'entorn de l'Arduino IDE com a plataforma de desenvolupament. Això inclou l'ús de llibreries, definicions i inicialitzacions essencials per configurar l'entorn i els recursos del microcontrolador. S'expliquen els processos clau, com ara la configuració de la comunicació Bluetooth, el control dels motors pas a pas i el flux de treball en les funcions de *setup* i *loop*.

- 6. Aplicació mòbil per a gestionar i visualitzar les dades.** S'exposa el procés de la realització de l'aplicació mòbil utilitzant App Inventor per tal d'obtenir i visualitzar les dades.
- 7. Proves i resultats.** Per avaluar el rendiment del dispositiu, s'han realitzat diverses proves experimentals. S'adjunten diferents imatges que il·lustren el procés de prova, on s'ha flexionat un sensor sobre un substrat flexible. Aquestes proves han implicat flexionar el sensor a distàncies específiques, a velocitats determinades i amb un nombre concret de repeticions. També s'ha avaluat la resistència una vegada s'ha sotmès un sensor a compressió.
- 8. Pressupost.** Es detalla el pressupost total del dispositiu.
- 9. Conclusions i línies futures del projecte.** Es presenten les conclusions principals extretes dels resultats obtinguts i es proposen possibles línies de treball futures per ampliar o millorar el projecte.
- 10. Bibliografia i Webgrafia.** Es proporciona una llista de les fonts d'informació utilitzades per elaborar el projecte.
- 11. Annexos.** S'adjunten els codis utilitzats al projecte i imatges detallades dels mòduls utilitzats per al dispositiu realitzats amb impressora 3D.

## 2. Marc teòric

En aquest apartat s'exposarà la importància dels sensors de gas flexibles. A més a més, s'exposaran alguns dels dispositius comercialitzats per tal de dur a terme les proves de flexió i la seva aplicació.

### 2.1. Introducció al grup de recerca MINOS

El grup de recerca MINOS (Microsystems Nanotechnologies for Chemical Analysis) fundat l'any 1994 pertany al Departament d'Enginyeria Electrònica, Elèctrica i Automàtica de la Universitat Rovira i Virgili. Actualment, el grup de recerca està format per 12 investigadors, professors titulars i associats, estudiants de doctorat i investigadors postdoctorals. [1]

El grup rep finançament de la Comissió Europea, així com d'agències de recerca espanyoles i catalanes, a més de col·laborar amb empreses privades. MINOS té una sòlida reputació a Europa i és considerat un dels grups més destacats de la Universitat Rovira i Virgili. [1]

La seva investigació se centra en el disseny, producció i caracterització de micro sistemes químics, especialment en sensors de gas, microconcentradors i microreactors.

Una tesi doctoral realitzada al grup de recerca per l'autora Miriam Alvarado Pérez, titulada "*Development of flexible gas sensors based on additive fabrication processes*", va centrar-se en l'estudi de sensors de gas flexibles. Aquests sensors van ser sotmesos a proves de flexió per avaluar el seu funcionament i observar com es veien afectats per aquestes deformacions. Les proves de flexió es van fer utilitzant les instal·lacions i equipaments del Departament d'Enginyeria Mecànica de la URV.

L'article titulat "*Performance of Flexible Chemoresistive Gas Sensors after Having Undergone Automated Bending Tests*" publicat per Míriam Alvarado, Silvia De La Flor, Eduard Llobet, Alfonso Romero i José Luís Ramírez l'any 2019 va demostrar que no tots els sensors que s'implementen sobre un substrat flexible són realment flexibles. [2] Aquesta conclusió va ser demostrada mitjançant l'ús d'una màquina de flexibilitat AGS-X 10 kN del fabricant Shimadzu, que va permetre aplicar estrès cíclic als sensors per avaluar la seva durabilitat i funcionalitat després d'aplicar-los-hi forces de tracció i compressió de forma repetitiva. Es van realitzar diferents assajos amb aquests esforços per simular les condicions a les quals els sensors podrien estar sotmesos en aplicacions pràctiques.

Els sensors de gas flexibles estudiats en l'article tenen com a objectiu detectar gasos específics mitjançant canvis en la seva resistència elèctrica quan s'exposen a aquests gasos. Aquests sensors estan fabricats amb nanofils d'òxid de tungstè ( $WO_3$ ), mentre que els substrats de Kapton<sup>1</sup> es van utilitzar per fabricar els sensors flexibles. Les pistes metàl·liques tenen un paper crucial en la flexibilitat del sistema. Van observar que els elèctrodes de plata mostraven una resiliència superior en comparació amb altres materials.

---

<sup>1</sup> El Kapton és un polímer que és resistent a la calor i molt flexible, el que el fa adequat per a aplicacions on es requereix durabilitat i flexibilitat.

L'estudi va destacar la necessitat d'establir un procediment estàndard per avaluar la flexibilitat dels sensors.

## 2.2. Sensors de gas flexibles

Els dispositius més desenvolupats per a les aplicacions de dispositius electrònics flexibles són els sensors. Ens ofereixen informació sobre aspectes com l'activitat física, la freqüència cardíaca i altres paràmetres, per tal d'obtenir un monitoratge precís sobre el benestar i rendiment físic. A més d'aquestes aplicacions, el grup de recerca MINOS considera molt convenient la utilització de sensors de gas portàtils per tal d'aconseguir un monitoratge ambiental. Aquesta tecnologia permetria detectar de manera eficient diversos contaminants, substàncies nocives en l'entorn i l'impacte que comporta aquestes substàncies en la salut.

El grup de recerca utilitza diferents sensors de gas segons el principi de detecció. Un exemple són els quimioresistius, es basen en materials que experimenten un canvi en la seva conductivitat elèctrica en resposta a la presència o concentració de determinades substàncies químiques a l'entorn. Aquests materials requereixen altes temperatures de síntesi i de funcionament, i la majoria dels substrats flexibles, com ara plàstics, paper o tèxtils, no suporten aquestes altes temperatures. És per això que la implementació d'aquests sensors de gas en substrats flexibles és un repte. [2]

Aquests sensors haurien de ser flexibles a causa de la seva necessitat d'adaptar-se a diverses superfícies, entorns i forces variables. Tot i que molts sensors es desenvolupen sobre substrats flexibles, el grup de recerca va demostrar que, això no garanteix necessàriament que siguin prou resistents per ser doblegats repetidament sense perdre la seva funcionalitat o precisió.[2] Els sensors flexibles han de fer front a tensions mecàniques repetides durant el seu procés d'aplicació per tal de no mostrar discrepàncies en el procés de detecció.

Avui dia, no hi ha cap procediment estàndard definit sobre quines proves de flexió s'han d'implementar per avaluar la flexibilitat dels sensors de gas. [2] Al grup MINOS, estan utilitzant la màquina electromecànica AGS-X 10 kN del fabricant Shimadzu per tal de dur a terme les proves de flexió als sensors amb substrats flexibles.

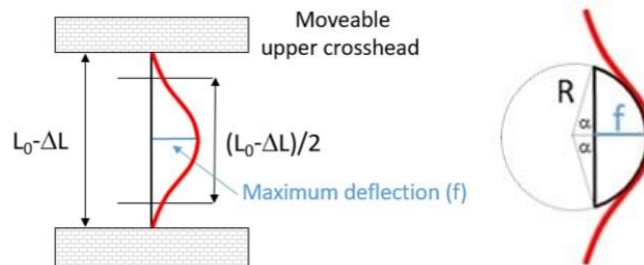


**Figura 2.1.** AGS-X 10 kN Shimadzu.[3]

Aquesta màquina aplica una força de compressió al llarg del seu eix longitudinal produint una flexió fora del pla. En conseqüència, el sensor es deforma en una corba, anomenada corba de deflexió. El sensor flexible s'agafa pels extrems i s'imposa cíclicament un desplaçament vertical. Depenent de la distància inicial entre les pinces ( $L_0$ ) i la distància de desplaçament ( $\Delta L$ ), es pot calcular la màxima deflexió ( $f$ ) i el radi de curvatura. [2]

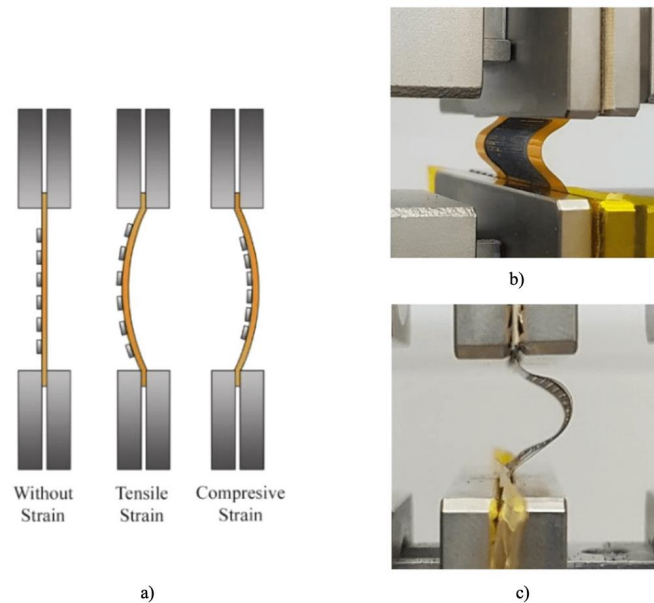
Observant la figura 2.2, l'equació (1) ens mostra la deducció de la relació entre la distància de desplaçament de les pinces, la màxima deflexió i el radi de curvatura. [2]

$$\frac{8 |f| \sqrt{(L_0 - \Delta L)^4 + 64 f^2 (L_0 - \Delta L)^2} + \sinh^{-1} \left( \frac{8 |f|}{(L_0 - \Delta L)} \right) l^3}{64 |f| (L_0 - \Delta L)} = \frac{L_0}{4} \quad (1)$$



**Figura 2.2.** Representació esquemàtica dels paràmetres principals (esquerra) relació radi curvatura i deflexió (dreta). [2]

Els sensors poden experimentar dues formes de flexió, cap endins o cap enfora. En la flexió cap endins, els components del sensor es troben en la part còncava de la corba formada observada anteriorment. En contraposició, durant la flexió cap enfora, els components se situen en la part convexa. És important destacar que la flexió cap endins pot ser referida com a flexió per compressió o deformació compressiva, mentre que la flexió cap enfora es coneix com a flexió per tracció o deformació de tracció. [2]



**Figura 2.3.** a) Esquema del sensor en diferents condicions de flexió. Imatges del sensor sota b) deformació de tracció i c) deformació de compressió. [2]

### 2.3. Dispositius comercialitzats per sotmetre sensors a proves de flexió

A més de la màquina AGS-X 10 kN de Shimadzu, existeixen altres dispositius.

De la mateixa empresa, **Shimadzu**, hi ha una gran varietat de tipus de màquines disponibles per a aquest propòsit. Shimadzu ofereix equips de proves de materials que van des de màquines de prova universals fins a testers específics per a aplicacions concretes, com ara la flexió. Això inclou testers de tracció, compressió i flexió en diverses capacitats i configuracions, permetent als investigadors seleccionar el dispositiu més adequat per a les seves necessitats específiques de prova.



**Figura 2.4.** Diferents dispositius per l'aplicació de desplaçaments i mesura de forces, de l'empresa Shimadzu. [4]

Un exemple són els dispositius d'**Instron**, líder en assajos de materials i control de qualitat. Les màquines d'Instron, utilitzades en indústries com l'aeroespacial, automotriu, construcció, electrònica i mèdica, permeten realitzar proves de tracció, compressió, flexió, pelat, esquinçament i fricció. Estan dissenyades per a la flexió controlada dels sensors mentre s'avalua la seva resposta i rendiment. [5]

Inclouen la capacitat de controlar factors com la velocitat de flexió, l'angle de flexió i la freqüència de les proves, per adaptar-se a les condicions reals d'ús dels sensors en l'aplicació final.



**Figura 2.5.** Màquines universals per a la flexió de sensors de l'empresa d'Instron. [5]

Altres empreses com **Metrotec**, **Ibertest**, **Galdabini**, **EashDur**, **Servosis**, també ofereixen màquines universals d'assajos per tal d'avaluar els materials en condicions controlades.

Les màquines universals d'assaig utilitzen diversos mecanismes per exercir força sobre els materials que s'hi sotmeten. Entre aquests, destaquen les plaques de compressió i les mordasses.

Les plaques de compressió són superfícies planes que es col·loquen a la part superior i inferior del material a analitzar, permetent aplicar-hi una força uniforme. Per altra banda, les mordasses són dispositius que subjecten els extrems de la mostra i apliquen la força de manera més localitzada, principalment en assajos de tracció. Aquestes mordasses es presenten en diverses formes i mides per adaptar-se als diferents materials.

Cal tenir present que aquestes màquines tenen un preu elevat. Per exemple, la màquina més bàsica que hem vist, l'AGS-X 10 kN de Shimadzu, té un preu aproximat de **14.000 €**, la qual cosa pot ser un obstacle per a moltes empreses o institucions, especialment aquelles amb pressupostos limitats. En aquest sentit, per a proves específiques com l'anàlisi de la

resistivitat dels sensors de gas en substrats flexibles, podria no ser necessari invertir en una màquina universal d'assaig.

A més, és important assenyalar que les màquines esmentades anteriorment estan dissenyades per aplicar i mesurar una força molt elevada, adequada per a assajos de materials d'alta resistència i components estructurals. No obstant això, en el cas d'assajos més específics, com l'anàlisi de sensors de gas en substrats flexibles, altres opcions més especialitzades i menys costoses podrien proporcionar resultats igualment vàlids sense la necessitat d'invertir en màquines de gran capacitat.

És per això que en aquest projecte es realitzarà un dispositiu de baix cost per tal de poder deformar els sensors de gas o altres sensors que s'utilitzin al grup de recerca MINOS, permetent així una avaluació de la seva funcionalitat sense la necessitat d'invertir en màquines de gran capacitat. Aquest enfocament no només permetrà un estalvi econòmic significatiu, sinó que també proporcionarà una solució adaptada a les necessitats específiques de l'aplicació.

### 3. Desenvolupament del dispositiu

En aquest capítol, es presenta amb detall el procés complet de la realització del dispositiu. S'exposa quin és el funcionament principal del dispositiu, i es detallen els materials i mòduls utilitzats, destacant les seves funcions i integracions. Finalment, ens centrarem en el procés de muntatge, il·lustrant pas a pas com s'ha construït el prototip final.

#### 3.1. Idea principal i disseny del dispositiu per a la deformació de sensors en substrats flexibles

L'objectiu principal del dispositiu és poder deformar un sensor una distància precisa i que aquesta deformació es pugui realitzar repetides vegades. Per tant, s'ha definit que el funcionament del dispositiu serà el següent:

El dispositiu consta d'una pinça fixa i una altra pinça que es mou verticalment amb l'ajuda d'un caragol sense fi, que és accionat per un motor pas a pas situat a la part superior del dispositiu. La pinça mòbil agafa el sensor a deformar en el seu centre i es mou cap amunt i cap avall de manera controlada gràcies al moviment generat pel caragol sense fi. Aquest funcionament permet realitzar deformacions repetides i ajustables amb una distància precisa. Els sensors poden tenir longituds variables, així que les dimensions del dispositiu s'han dissenyat específicament per adaptar-se a aquesta variabilitat. Més endavant es detallaran les dimensions.

El motor pas a pas està connectat a un *driver*, que s'encarregarà de controlar el moviment del motor. El *driver* també està connectat a un microcontrolador. Aquest microcontrolador coordina les operacions del motor permetent un control precís dels passos i la seva direcció de gir.

Mitjançant la connectivitat Bluetooth, el microcontrolador es connectarà amb un dispositiu mòbil. S'ha desenvolupat una aplicació mòbil específica que permet als usuaris controlar el motor i introduir les instruccions desitjades, com ara la distància de deformació, el nombre de repeticions i la velocitat del motor (mm/segon).



Figura 3.1. Dispositiu final. Bending Machine.

En els següents apartats, s'explica amb més detall els mòduls, materials i aplicacions utilitzats.

### 3.2. Mòduls utilitzats

#### 3.2.1. *ESP32 WROOM-32*

S'ha escollit el mòdul ESP32 per controlar el dispositiu mitjançant Bluetooth. Aquesta elecció es deu a la seva connectivitat integrada, la potència de processament, la flexibilitat de desenvolupament i el baix consum d'energia. L'ESP32 ofereix una solució robusta i versàtil per a les necessitats de control i comunicació a través de Bluetooth.

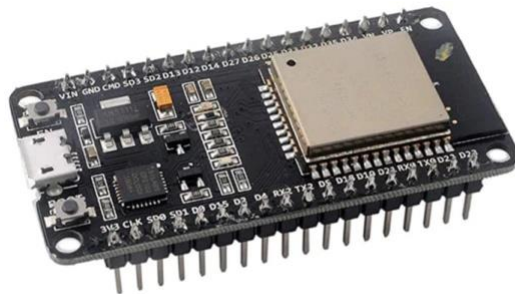


Figura 3.2. ESP32 WROOM-32.

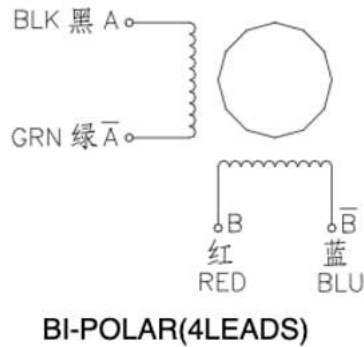
#### 3.2.2. *Motor Pas a Pas Nema 17 Model: 17HS4401*

El motor pas a pas Nema 17 Model 17HS4401 és un dels motors pas a pas més comuns i utilitzats en una àmplia gamma d'aplicacions. Aquest motor destaca per la seva fiabilitat, precisió i rendiment en diverses tasques de control de moviment. Serà l'utilitzat en aquest projecte.



Figura 3.3. Nema 17 Model 17HS4401. [6]

És un motor bipolar, conté dues bobines en el seu interior. El terme "bipolar" fa referència al fet que el corrent circula en ambdues direccions a través de cada bobina del motor. Això permet canviar la polaritat del camp magnètic generat per les bobines i per tant la direcció del gir.



**Figura 3.4.** Bobines – Datasheet Nema 17 Model 17HS4401. [6]

El tipus Nema 17, presenta un pas d'1,8° per pas, el que significa que per completar una revolució completa, el motor ha de girar 200 passos. Això proporciona un alt grau de precisió en el posicionament i control del moviment.

$$1,8^\circ * 200 = 360^\circ = 1 \text{ volta} \quad (2)$$

### 3.2.3. Driver A4988

Per tal de poder interconnectar el microcontrolador amb el motor pas a pas explicat anteriorment, és necessari l'ús d'un *driver*. En aquest cas s'ha utilitzat el *driver* A4988 cobert per un dissipador de calor i fabricat per *AZDelivery*.



**Figura 3.5.** Driver A4988. [7]



Figura 3.6. Pins driver A4988. [7]

Si observem la figura superior, els terminals dels pins es distribueixen en dues funcionalitats, els pins de control o connexió (els de l'esquerra) i els pins d'alimentació i del motor pas a pas (part dreta del mòdul). [7]

A continuació, es descriuen breument els pins un a un amb les funcions específiques.

El **pin ENABLE** (habilitació) és un pin que s'utilitza per habilitar o deshabilitar el mòdul. Per activar el mòdul, aquest pin s'ha de mantenir a nivell baix (LOW), ja que la línia a la part superior indica que la funció està activa en baix.

Els pins **MS1**, **MS2** i **MS3** són els pins que configuren el mode de *microstepping* del *driver*. Es configuren combinant-los de diferents maneres per seleccionar el mode de pas complet, 1/2 pas, 1/4 pas, 1/8 pas o 1/16 pas. Segons el *datasheet* del mòdul, es configuren de la següent manera:

MS1	MS2	MS3	Resolució de Microstepping
L	L	L	Pas complet
H	L	L	Mig Pas
L	H	L	1/4 de pas
H	H	L	1/8 de pas
H	H	H	1/16 de pas

Taula 3.1. Modes de Microstepping (L = LOW; H = HIGH) [8]

Activarem en HIGH els tres pins del *driver* per tal de poder seleccionar la resolució de pas d'1/16, que ofereix el microstepping més precís. Amb aquesta configuració, el motor passarà a través de 16 passos per cada pas complet, permetent un control més detallat i una millora de la resolució en el moviment del motor.

Per tant, si un pas són  $1,8^\circ$ , 1/16 pas són  $0,1125^\circ$ .

$$1,8^\circ * \frac{1}{16} = 0,1125^\circ \quad (3)$$

Finalment, una volta seran 3200 passos.

$$\frac{360^\circ}{0,1125^\circ} = 3200 \text{ pasos} \quad (4)$$

El **pin RESET** permet reiniciar el controlador a la seva configuració predeterminada.

El **pin SLEEP** és un pin d'entrada que es fa servir per posar el *driver* en mode de baix consum quan no s'està utilitzant.

El **pin STEP** (pas) és el pin d'entrada que es fa servir per generar els impulsos que fan que el motor realitzi un pas.

El **pin DIR** (direcció) s'utilitza per controlar la direcció del motor. Enviant un senyal alt (HIGH) o baix (LOW) a aquest pin es determina si el motor gira en sentit horari o antihorari.

Els pins d'alimentació i del motor pas a pas es configuren de la següent manera:

Els **pins Vmotor i GND** permeten subministrar l'alimentació al motor, compresa entre 8 i 35 V segons les especificacions del Nema 17 Model 17HS4401. En aquest cas, es subministrarà una tensió de 12 V per l'entrada de Vmotor a través d'una font de tensió externa.

Els **pins 2B i 2A** són els terminals per connectar la bobina 2 del motor.

El **pin 1B i 1A** són els terminals per connectar la bobina 1 del motor.

El **pin VDD** és l'alimentació per a la part lògica del circuit integrat A4988. Aquesta alimentació pot variar entre 3 i 5,5 volts de corrent continu (V<sub>CC</sub>).

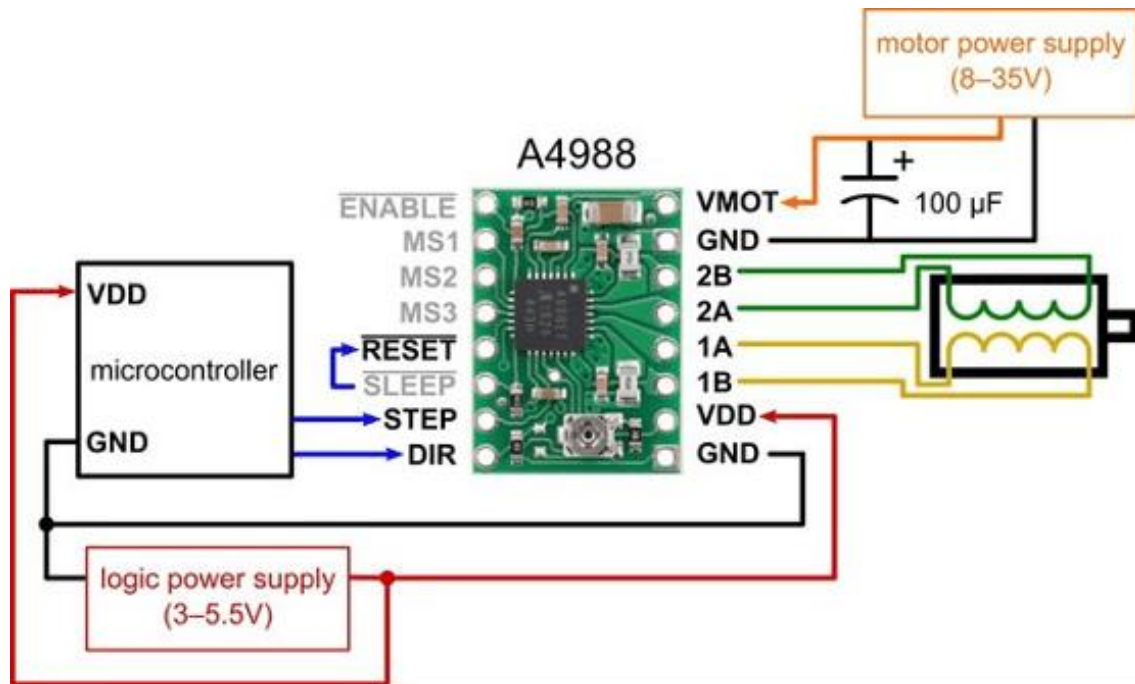


Figura 3.7. Esquema connexió Microcontrolador - Driver A4988 – Motor Nema 17. [9]

Un aspecte crític en el funcionament del *driver* A4988 és la seva capacitat de gestionar el corrent màxim del motor pas a pas. Aquest paràmetre determina la quantitat màxima de corrent elèctric que el *driver* pot proporcionar al motor sense comprometre el seu funcionament. Mitjançant una configuració adequada, és possible ajustar aquest corrent segons les especificacions del motor utilitzat, garantint un rendiment òptim i evitant situacions de sobrecàrrega. El voltatge de referència del *driver* A4988 és un paràmetre clau per controlar el corrent del motor pas a pas. Aquest voltatge de referència es pot ajustar mitjançant un potenciòmetre a la placa del *driver*. Ajustant aquest voltatge de referència, es pot controlar el corrent que passa pel motor pas a pas, permetent una adaptació precisa a les necessitats específiques del motor i optimitzant el seu rendiment.

El fabricant proporciona una fórmula per trobar la tensió de referència, un paràmetre essencial per controlar el corrent del motor pas a pas a través del *driver* A4988. Aquesta fórmula utilitza la resistència seleccionada ( $RS$ ) i el valor de corrent màxim desitjat per al motor ( $I_{max}$ ).

$$V_{REF} = I_{max} * (8 * RS) \quad (5)$$

On:

$V_{REF}$  és la tensió de referència és el voltatge que es configura al *driver* A4988 per controlar el corrent que passa pel motor pas a pas.

$I_{max}$  és el corrent màxim que el motor pot suportar sense arribar a situacions crítiques com el sobreescalfament.

$RS$  Resistor Sense és una de les dues resistències en derivació o resistències de detecció, una per a cada fase o bobina del motor pas a pas. Es coneixen com a S1 i

S2 (Sense 1 i Sense 2). Els seus valors poden variar entre 0,01 i 0,2  $\Omega$ . Aquestes resistències són crucials per al control precís del corrent del motor i es troben al circuit del *driver* A4988.

En el *datasheet* del motor pas a pas (*figura 3.8*), ens indica el corrent màxim a la qual pot treballar sense sobreescalfar-se.

Per tant,  $I_{max} = 1,7 A$ .

Tot i que el corrent màxim és de 1,7 A, per no treballar al límit utilitzarem 1,5 A. [7]

Finalment,  $I_{max} = 1,5 A$ .

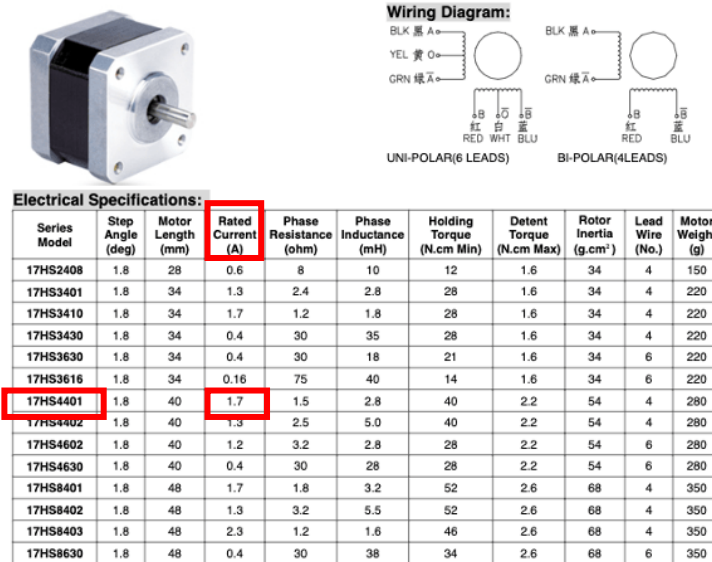


Figura 3.8. Datasheet Nema 17 Model: 17HS4401. [6]

El valor del *Resistor Sense*, com s'ha dit anteriorment, es pot observar en el mòdul, tal com es mostra a la figura següent.

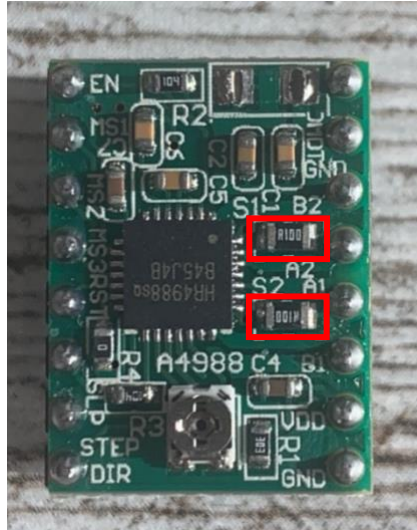


Figura 3.9. Driver A4988 utilitzat en el dispositiu.

El valor de  $R_S$  és R100, segons el codi de Dispositius de Muntatge Superficial, SMD (Surface Mount Device) es canvia la R per un punt decimal, de manera que  $R_S = 0,1 \Omega$  [7].

Finalment, mitjançant l'ús de la fórmula (6) i els valors obtinguts de  $R_S$  i  $I_{max}$ , podem calcular la tensió de referència necessària per controlar el corrent del motor pas a pas.

$$V_{REF} = I_{max} * (8 * R_S) \quad (6)$$

$$V_{REF} = 1,5 A * (8 * 0,1 \Omega) \quad (7)$$

$$V_{REF} = 1,2 V \quad (8)$$

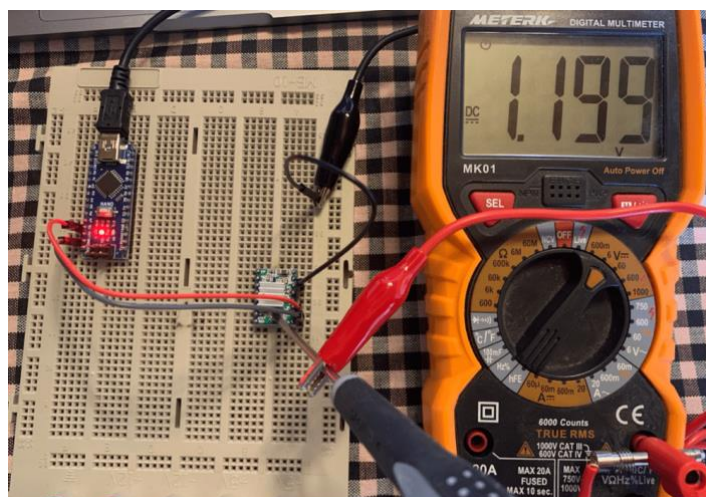
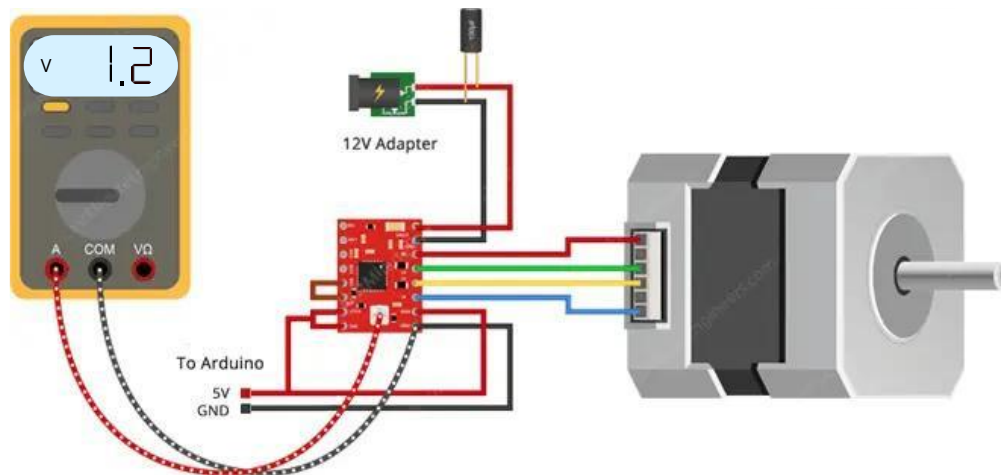


Figura 3.10. Ajustament de la tensió de referència del driver.

Per realitzar l'ajust del voltatge equivalent al corrent màxim que subministrarà el *driver*, amb l'ajuda d'un cable "cocodril" connectat al multímetre realitzem l'ajust fent girs amb el tornavís fins que la tensió marcada sigui la desitjada. Al mateix temps, mantenim el cable negre (negatiu) connectat a qualsevol punt de terra (GND). L'ajust el realitzem d'aquesta manera, ja que el potenciòmetre que incorpora el *driver* porta el caragol d'ajust metàl·lic (fent contacte amb els pins) i ens permet mesurar la caiguda de tensió al pin de sortida. Finalment, un cop hem fet els girs per l'ajust oportuns observem la lectura de tensió en el multímetre que marca el valor desitjat d'1,2 V, tal com s'ha trobat en la fórmula.

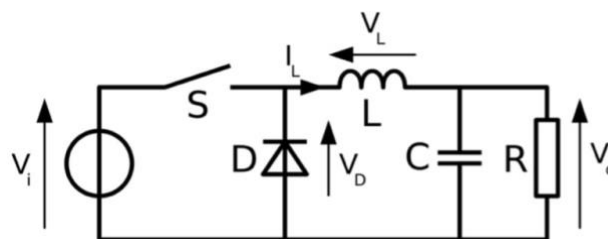


**Figura 3.11.** Esquema connexió per tal d'ajustar la tensió de referència necessària.

D'aquesta manera, sense importar els micropassos que utilitzem, el controlador A4988 no proporcionarà una intensitat de corrent superior a 1,5 A; si per algun motiu el motor pas a pas exigeix un corrent major, el *driver* A4988 retirarà l'alimentació de les bobines del motor, protegint-les d'un possible dany.

### 3.2.4. Convertidor tipus buck

El convertidor Buck (o reductor) és un convertidor de potència que obté a la seva sortida un voltatge continu menor que a la seva entrada.



**Figura 3.12.** Esquema bàsic d'un convertidor buck.

El convertidor utilitzat és el model **LM2596 DC-DC**.



**Figura 3.13.** Convertidor tipus buck LM2596 DC-DC.

<b>Característiques tècniques del <i>Convertidor tipus buck LM2596 DC-DC</i></b>	
Convertidor DC-DC Buck	LM2596
Voltatge d'entrada	4,5 V – 35 V DC
Voltatge de sortida	1,25 V – 30 V DC
Corrent de sortida màxim	3 A
Freqüència de treball	150 MHz
Ripple a la sortida <sup>2</sup>	30mV com a màxim
Eficiència de conversió <sup>3</sup>	92 %
Temperatura de funcionament	-40° a +85°
Mesures	48mm x 23mm x 14mm

**Taula 3.2.** Característiques tècniques del convertidor tipus buck LM2596 DC-DC.

<sup>2</sup> És la fluctuació de voltatge que se superposa a la sortida de corrent continu (DC). Idealment, una font d'alimentació hauria de proporcionar un voltatge constant, però a la pràctica, sempre hi ha una petita variació o "ripple".

<sup>3</sup> És la relació entre la potència de sortida útil i la potència d'entrada total, expressada en percentatge. Això significa que del 100% de l'energia subministrada al dispositiu, el 92% es converteix en energia utilitzable a la sortida.

El convertidor tipus Buck s'utilitza per convertir els 12 V d'entrada a 5 V a la sortida. Els 12 V s'utilitzen per alimentar el motor pas a pas i els 5 V per alimentar el mòdul ESP32.

Per ajustar el voltatge de sortida a 5 V, s'han seguit els passos següents utilitzant el potenciòmetre del convertidor, que permet variar la resistència en el circuit i ajustar el punt de funcionament del convertidor Buck.

Primer, s'ha connectat l'entrada del convertidor Buck a una font de voltatge de 12 V. A continuació, s'ha connectat un multímetre als terminals de sortida del convertidor per mesurar el voltatge de sortida. Després, es comença a girar el potenciòmetre lentament mentre s'observa la lectura al multímetre. S'ha continuat girant el potenciòmetre fins que el multímetre indiqués 5 V a la sortida.

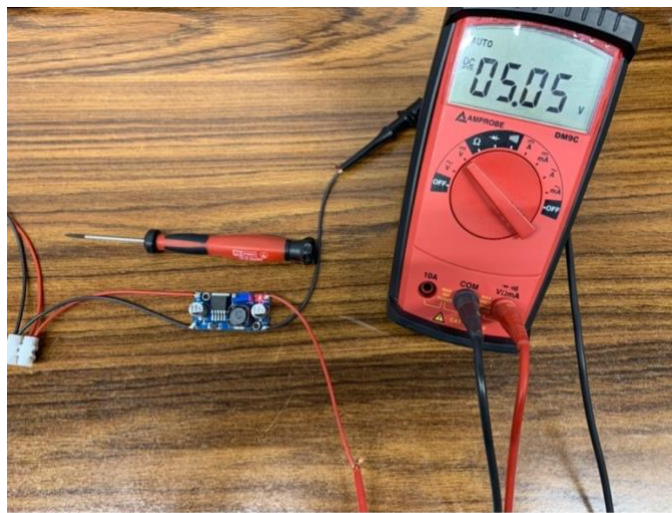


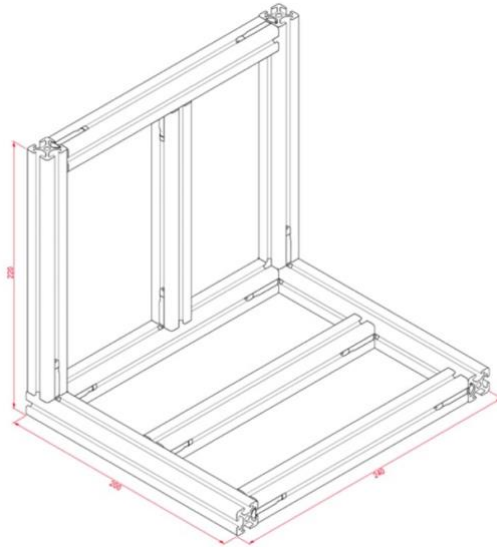
Figura 3.14. Ajust del potenciòmetre del convertidor buck.

### 3.3. Materials utilitzats per al muntatge del dispositiu

Els materials utilitzats per al muntatge del dispositiu són els següents.

#### 3.3.1. Perfils d'alumini

Per tal d'obtenir un suport estructural per al dispositiu, s'han adquirit uns perfils d'alumini fabricats per l'empresa catalana, **Sinerges**. Aquests perfils proporcionen una base robusta i estable per a la construcció del dispositiu, assegurant una plataforma resistent per al desenvolupament del projecte. En les figures següents es mostren les dimensions del suport en mil·límetres (mm), així com una fotografia dels perfils sense cap altre component afegit.



**Figura 3.15.** Vista general i mesura dels perfils per al suport del dispositiu (mm).



**Figura 3.16.** Muntatge complet dels perfils per al suport del dispositiu.

### 3.3.2. Suport del motor Nema 17

Aquest suport per al motor Nema 17, representat a la figura següent, és dissenyat específicament per a encaixar perfectament als perfils d'alumini dels carrils disponibles. Aquesta solució proporciona una fixació robusta i estable, assegurant que el suport i el dispositiu s'ajustin perfectament al perfil i es mantinguin en posició durant el moviment del motor. Amb aquest disseny, s'evita el moviment indesitjat del suport durant el funcionament.



**Figura 3.17.** Suport del motor Nema 17.

### 3.3.3. Caragol sense fi

El caragol utilitzat és el caragol sense fi TORT840 amb rosca trapezoidal.

Segons les especificacions del caragol, el seu diàmetre és de 8 mm i el pas del caragol és de 2 mm.



**Figura 3.18.** Caragol sense fi TORT840.

### 3.3.4. Suports pel caragol

Les següents figures mostren els suports del caragol per tal de poder fixar el caragol per dalt al motor i per baix al perfil d'alumini.



**Figura 3.19.** Suport superior del caragol.



**Figura 3.20.** Suport inferior del caragol.

### 3.3.5. Pinces

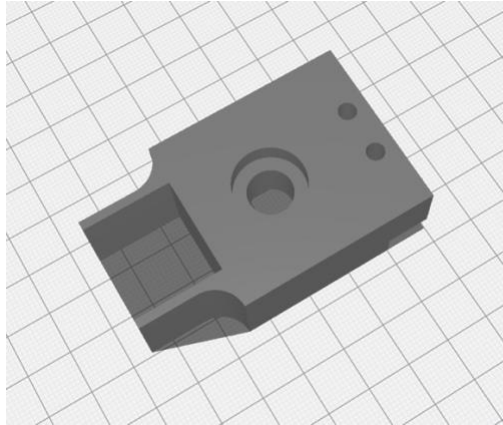
Per tal de poder aguantar el sensor a deformar, s'han dissenyat unes pinces manuals que permeten obrir i tancar per subjectar el sensor de manera segura. S'ha afegit una capa de goma eva per protegir millor el sensor i evitar possibles danys. A *l'annex 2.1* s'afegeix una vista més detallada i les mesures concretes de les pinces.



**Figura 3.21.** Pinces realitzades amb impressora 3D.

### 3.3.6. Suport pinça superior

Per al suport de la pinça superior, l'objectiu és permetre que la pinça es mogui al llarg del caragol. Per aconseguir-ho, s'ha implementat un suport que possibilita el moviment ascendent i descendent de la pinça. A *l'annex 2.2* s'afegeix una vista més detallada i les mesures concretes del suport.



**Figura 3.22.** Suport pinça superior realitzat amb impressora 3D.

### 3.3.7. Font d'alimentació 12 V 2 A

Una font d'alimentació de 12 V i 2 A és un dispositiu electrònic que proporciona un voltatge constant de 12 V amb una capacitat màxima de corrent de 2 A.

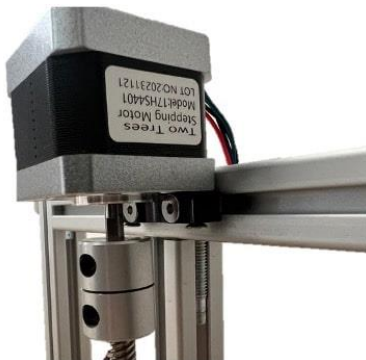
S'utilitza per tal d'alimentar el dispositiu.



**Figura 3.23.** Font d'alimentació 12 V 2 A.

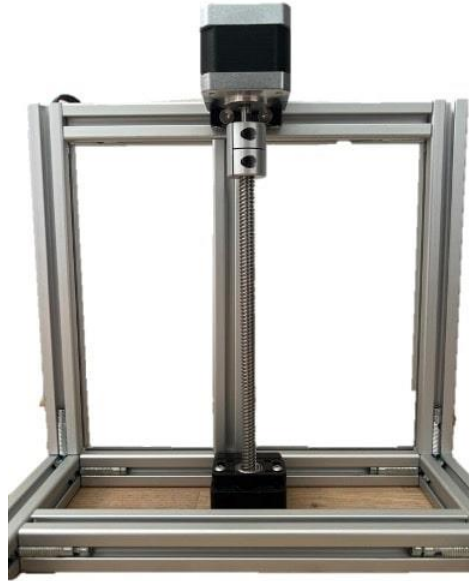
## 3.4. Muntatge del dispositiu

En la següent figura podem observar el muntatge del suport del motor i el del suport superior del caragol.



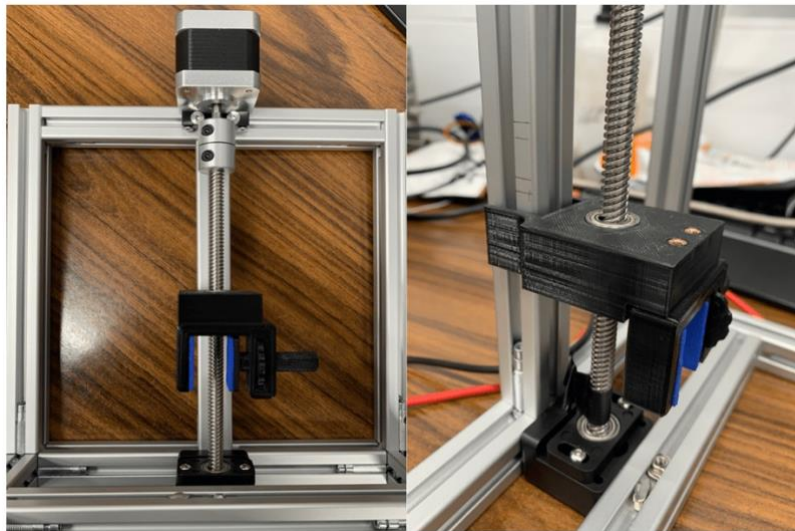
**Figura 3.24.** Suport del motor Nema 17 i adaptador superior del caragol implementat al dispositiu.

A continuació s'introdueix el caragol, que té una mesura de 18 cm.



**Figura 3.25.** Implementació del caragol sense fi i dels suports del caragol al dispositiu.

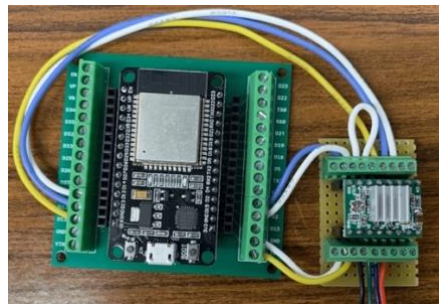
Seguidament, es pot observar com s'ha realitzat el muntatge de les dues pinces juntament amb el suport per tal de sostenir la pinça superior.



**Figura 3.26.** Suport pinça superior amb la pinça superior implementada.

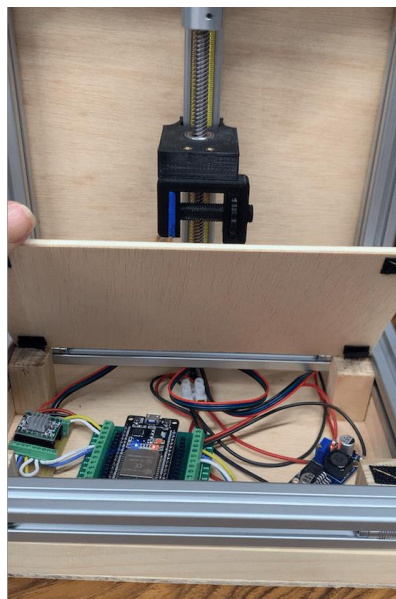


**Figura 3.27.** Pinça inferior implementada.



**Figura 3.28.** Connexions entre el microcontrolador ESP32 i driver A4988.

Finalment, s'ha dissenyat i fabricat una carcassa per al dispositiu, que permet emmagatzemar tota l'electrònica, millorant-ne tant l'estètica com la protecció.



**Figura 3.29.** Electrònica del dispositiu.



**Figura 3.30.** Dispositiu final (Bending Machine)

## 4. Tecnologia Bluetooth

### 4.1. Tecnologia Bluetooth: Història i Definició

El Bluetooth és una tecnologia de comunicació sense fils a curta distància i de baix consum que permet la transmissió de dades entre diferents dispositius electrònics. Per tal de substituir les tecnologies de connexió tradicionals de cables amb alternatives sense fils, va sorgir als anys noranta un consorci format per les empreses Ericsson, IBM, Intel, Nokia i Toshiba i van fundar el **Bluetooth Special Interest Group (SIG)** amb l'objectiu de desenvolupar una solució tecnològica pròpia. El Bluetooth no és propietat de cap empresa i actualment està desenvolupat i mantingut pel SIG, on actualment hi participen fins a 33.000 empreses que col·laboren en la definició dels estàndards. [10]

La tecnologia Bluetooth opera a la banda freqüencial UHF (Ultra High Frequency), que oscil·la entre els 2,402 GHz i els 2,480 GHz. Aquesta banda es divideix en diversos canals per permetre als dispositius Bluetooth optimitzar la comunicació. La comunicació es basa en el sistema FHSS (Frequency-Hopping Spread Spectrum), que utilitza salts de freqüència per evitar interferències i es produeixen a una taxa de 1600 salts per segon a través dels 79 canals disponibles, cada un amb un ample de banda d'1 MHz. [11]

Aquesta banda de freqüència forma part de la banda ISM (Industrial, Scientific and Medical), que és utilitzada per una àmplia gamma d'aplicacions sense fils. [11]

L'any 2010 neix el Bluetooth de baixa energia o BLE, de l'angès *Bluetooth Low Energy*, enfocat a dispositius que necessiten tenir un consum energètic molt baix.

### 4.2. Diferències entre Bluetooth Low Energy i Bluetooth Classic

	<b>Bluetooth Low Energy (BLE)</b>	<b>Bluetooth Classic</b>
Banda de freqüència	2,4GHz Banda ISM	2,4GHz Banda ISM
Canals	40 canals amb un espaiat de 2 MHz	79 canals amb un espaiat d'1 MHz
Consum d'energia	Més baix	Baix
Velocitat de dades	1 Mbps	1-3 Mbps
Rang	50 metres	< 30 metres
Topologies de comunicació	De punt a punt Estrella	De punt a punt

	Transmissió Malla	
Aplicacions	Dispositius de seguiment de la salut, Automatització del llar, Monitoratge mèdic ...	Dispositius perifèrics (teclats, ratolins, auriculars), Aplicacions amb <i>streaming</i> de dades.

**Taula 4.1.** Comparativa entre Bluetooth Low Energy i Bluetooth Classic. [12]

En el següent capítol, veurem com la tecnologia Bluetooth del mòdul ESP32 s'utilitza per comunicar-se entre el dispositiu mòbil i el dispositiu (*Bending Machine*). Aquesta tecnologia possibilita una interacció fluida entre ambdós dispositius, facilitant la comunicació bidireccional i la transferència d'informació.

## 5. Processat de dades amb ESP32 i connectivitat

### 5.1. Introducció a ESP32

Avui en dia, disposem d'una àmplia gamma de plaques de desenvolupament. Per aquest projecte, s'ha optat per utilitzar la placa *DEV KIT V1* que integra el xip *ESP32*.

El *ESP32* és un xip de la família SoC<sup>4</sup>, desenvolupat per l'empresa xinesa Espressif Systems i és el successor del xip *ESP8266*.

#### 5.1.1. Descripció del hardware

Les característiques tècniques més rellevants de la placa de desenvolupament *ESP32-DEV KIT V1* es detallen a continuació.

Característiques tècniques del <i>ESP32-DEV KIT V1</i>	
Microcontrolador	ESP32 (Dual-core Xtensa LX6, 240 MHz)
Connectivitat	Wi-Fi i Bluetooth (BLE)
Pins d'entrada/sortida (GPIO)	38 pins GPIO (entrada/sortida)
Ports analògics	18 ports ADC (12 bits)
Ports de comunicació USB	1x micro USB per a alimentació i programació
Tensió d'alimentació	3.3 V (potencialment amb la capacitat d'acceptar 5 V)
Interfícies de comunicació	UART, SPI, I2C, I2S, CAN, Ethernet

Taula 5.1. Característiques tècniques de *ESP32-DEV KIT V1*.

Seguidament podem observar detalladament les sortides i entrades de la placa *ESP32 DEV KIT V1*.

<sup>4</sup> "SoC" significa "System on a Chip" en anglès, o "Sistema en un xip" en català. Es refereix a un tipus de dispositiu electrònic integrat que combina múltiples components d'un sistema informàtic en un únic xip, com ara processadors, unitats de processament gràfic, controladors de memòria, controladors d'entrada/sortida, entre altres.

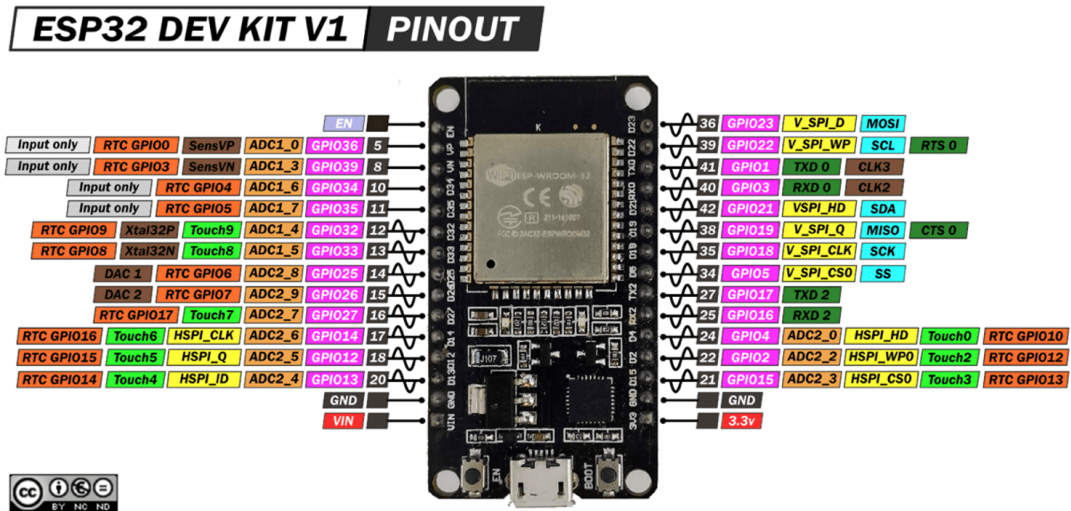


Figura 5.1. Diagrama dels pins del ESP32 DEV KIT V1. [13]

A continuació, es descriuen els pins utilitzats de la placa.

El **pin 3.3 V** proporciona una alimentació de 3,3 V. És utilitzat per alimentar components externs que requereixen aquesta tensió.

El **pin GND** és el terra (Ground) del sistema. Es connecta a la referència de terra per completar els circuits.

El **pin D2** és un dels pins GPIO (General Purpose Input/Output). Pot ser utilitzat com a entrada o sortida digital per connectar-se i controlar perifèrics externs.

El **pin D4** és també un dels pins GPIO i pot ser utilitzat de la mateixa manera que el pin D2, com a entrada o sortida digital.

Els **D14, D12 i D13** són pins GPIO, i com els anteriors, poden utilitzar-se com a entrada o sortida digital.

Els pins es van assignar segons les necessitats del projecte, com es detalla a la figura XX (pàgina 14).

- El pin **D2** està connectat al pin del *driver* A4988 de pas (**STEP**), utilitzat per controlar el pas del motor en la direcció especificada.
- El pin **D4** està connectat al pin del *driver* A4988 de direcció (**DIR**), utilitzat per controlar la direcció del moviment del motor.
- Els pins **D14, D12 i D13** de la placa estan connectats a les entrades **MS1, MS2 i MS3** del *driver*. Aquests pins s'utilitzen per controlar la microstepping (pas microscòpic) del motor connectat al *driver*. Els pins MS1, MS2 i MS3 es poden utilitzar per canviar la resolució de pas del motor, permetent ajustar la precisió del moviment.



Microcontrolador	Nordic Semiconductor nRF52840	ESP32 (Dual-core Xtensa LX6, 240 MHz)
Nuclis	1	2
Connectivitat Wifi	No	Sí
Connectivitat Bluetooth	Sí, BLE ( <i>Bluetooth Low Energy</i> )	Sí, Bluetooth
Interfícies de comunicació	USB, SPI, I2C, UART, GPIO	USB, SPI, I2C, UART
Tensió d'alimentació	3,3 V	5 V

Taula 5.2. Comparativa del ESP32 i Arduino Nano 33 BLE.

## 5.2. Desenvolupament del codi en IDE *Arduino*

Les llibreries, definicions i inicialitzacions, el *setup* i el *loop* són elements clau en la programació amb *Arduino*.

### 5.2.1. Llibreries

Les llibreries són conjunts de codi definit que contenen funcions i classes que faciliten la programació d'*Arduino*. En el codi s'utilitzen dues llibreries:

- **BluetoothSerial.h:** Aquesta llibreria permet la comunicació Bluetooth amb dispositius externs, com un telèfon o un ordinador.
- **Stepper.h:** Aquesta llibreria facilita el control de motors pas a pas. Proporciona funcions que simplifiquen la configuració i el control dels motors.

### 5.2.2. Definicions i inicialitzacions

Es defineixen diferents paràmetres i s'inicialitzen variables utilitzades en el codi.

S'inicialitza el nom del dispositiu Bluetooth, **DEVICE\_NAME**, com a "*ESP32\_motor\_control*". Aquest nom es fa servir per identificar el dispositiu.

```
#define DEVICE_NAME "ESP32_motor_control"
```

Es defineixen els pins utilitzats per controlar el motor pas a pas. El pin **MOTOR\_STEP\_PIN** és utilitzat per enviar senyals de pas al motor, mentre que el pin **MOTOR\_DIR\_PIN** controla la direcció del moviment.

```
#define MOTOR_STEP_PIN 2
#define MOTOR_DIR_PIN 4
```

Seguidament es defineixen els paràmetres del motor, com ja s'ha explicat abans.

- **MOTOR\_STEPS** indica el nombre de passos per revolució del motor. És a dir, aquest terme indica el nombre de passos que un motor pas a pas necessita per completar una volta completa de 360 graus. Com ja hem calculat anteriorment, amb un microstepping de 1/16, el total de passos per volta són 3200.
- **RPM** estableix la velocitat inicial del motor en revolucions per minut.
- **MS1**, **MS2** i **MS3** són pins que poden ser utilitzats per controlar la microstepping del motor, permetent ajustar la precisió del moviment.

```
#define MOTOR_STEPS 3200
#define RPM 10
#define MS1 13
#define MS2 12
#define MS3 14
```

Amb els paràmetres definits es crea un objecte de la classe **Stepper**, que es fa servir per controlar el motor pas a pas amb els paràmetres anteriors.

```
Stepper myStepper(MOTOR_STEPS, MOTOR_STEP_PIN, MOTOR_DIR_PIN);
```

A continuació, es crea un objecte de la classe **BluetoothSerial** que facilita la comunicació bidireccional a través de Bluetooth entre l'Arduino i altres dispositius, i ofereix un conjunt de funcions per gestionar i controlar el flux de dades de manera eficient i fiable.

```
BluetoothSerial SerialBT;
```

Finalment, s'inicialitzen diferents variables que seran utilitzades per diferents funcionalitats.

- **repeticions** s'utilitza per emmagatzemar el nombre de repeticions que s'han de realitzar en una seqüència de moviment del motor. Quan es rep un comandament a través de la comunicació Bluetooth per iniciar una seqüència de moviment, la variable repeticions emmagatzema aquest valor per determinar quantes vegades s'ha de repetir la seqüència de moviment.

- **distancia** representa la distància de desplaçament que ha de realitzar el motor en cada iteració de la seqüència de moviment. Quan es rep un comandament per iniciar una seqüència de moviment, la variable *distancia* emmagatzema aquesta distància per determinar quants passos ha de moure el motor en cada direcció.
- **velocity** emmagatzema la velocitat a la qual ha de funcionar el motor durant la seqüència de moviment. Quan es rep un comandament per iniciar una seqüència de moviment, la variable *velocity* emmagatzema aquesta velocitat per determinar la velocitat amb què s'han de realitzar els passos del motor.

```
int repeticions = 0;
int distancia = 0;
int velocity = 0;
```

### 5.2.3. Setup

La funció *setup* és una funció definida en *Arduino* que s'executa una sola vegada al començament del programa. És utilitzada per configurar l'entorn i els recursos del microcontrolador abans de l'inici del *loop* principal.

En el codi que es troba a l'annex (1) es pot observar com dins de la funció de *setup* s'inicialitza la comunicació sèrie, es configura la comunicació Bluetooth, s'ajusta un valor per defecte de la velocitat del motor pas a pas i s'inicialitzen els pins de sortida per controlar els *microsteps* del motor.

### 5.2.4. Loop

La funció *loop* és una altra funció definida en *Arduino* que s'executa de manera repetida després de la funció de *setup*. És aquí on resideix la major part de la lògica del programa. El codi dins de la funció de *loop* es repeteix indefinidament, permetent que el microcontrolador continuï processant les dades. El codi complert es troba en l'annex (1).

Primerament es comprova si hi ha dades disponibles per llegir a través de la comunicació Bluetooth. Si hi ha dades disponibles, s'inicia el processament d'aquestes.

A continuació, es descriu com es processen les comandes rebudes a través de la comunicació Bluetooth i com es controla el moviment del motor en funció d'aquestes comandes. Per fer-ho més visual, podem observar el següent diagrama de flux (*Figura 5.3.*).

La variable **val** actua com a punt d'entrada per a les comandes rebudes. A través d'una sèrie d'estructures condicionals **if** i **else if**, el programa avalua el valor de **val** per determinar quina acció ha de realitzar segons el tipus de comanda rebuda.

Després d'avaluar el valor de **val**, es realitzen diverses accions com configurar la velocitat del motor, llegir la distància de desplaçament o realitzar una seqüència de moviment repetitiva.

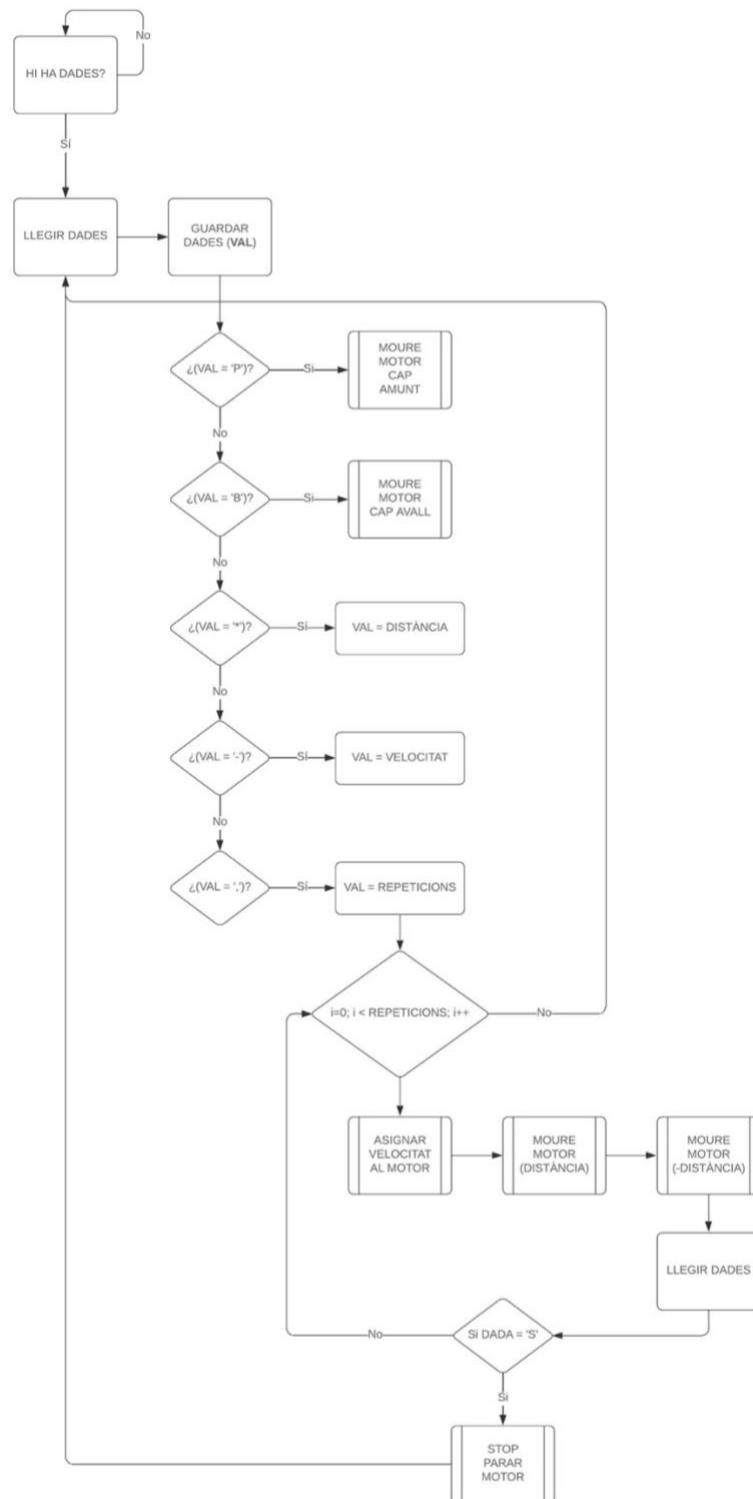
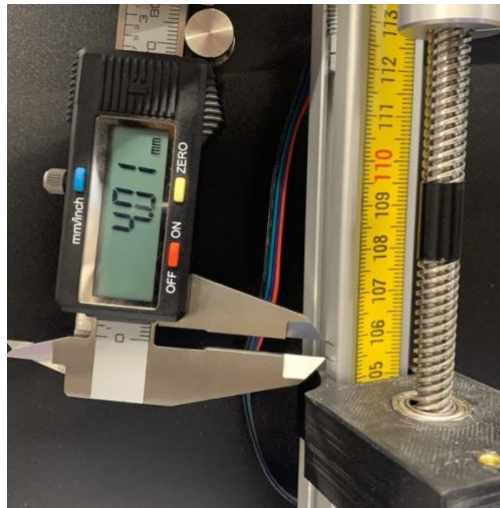


Figura 5.3. Diagrama de flux loop.

La **distància** de desplaçament introduïda per l'usuari es mesura en mil·límetres (mm). Per establir una calibració precisa entre el desplaçament de la pinça i el caragol, s'ha realitzat la següent calibració.

Per ajustar el nombre de passos amb la distància que es mou el dispositiu, s'ha mesurat quants mil·límetres es desplacen en 1600 passos, que corresponen a mitja volta del caragol.



**Figura 5.4.** Distància corresponent a ½ volta.

$$n^{\circ} \text{ de passos/mm} = \frac{1600}{4} = 400 \text{ passos} \quad (9)$$

Per tant, 1 mm equival a 400 passos.

Atès que el motor realitza les repeticions cap amunt i cap avall, la distància introduïda per l'usuari es multiplica per 800 passos per cobrir un cicle complet de moviment.

S'ha implementat una funció que es crida dins del bucle “*void loop()*” per convertir la distància introduïda per l'usuari en passos:

```
int convertirdistancia(int distancia_a) {
    int dist = (distancia_a * 800);
    return dist;
}
```

Aquesta funció assegura que la distància introduïda per l'usuari es tradueixi correctament en el nombre de passos necessaris per al moviment precís del dispositiu.

Com s'ha especificat abans (*apartat 3.3.3*) el diàmetre del caragol és de 8 mm.

Per poder obtenir la **velocitat** en (mil·límetres /segon de desplaçament vertical) sabem que:

$$RPS = \frac{RPM}{60} \quad (10)$$

On:

*RPS: Revolucions per segon*

*RPM: Revolucions per minut*

Per tant, per obtenir la velocitat en (mil·límetres/segon de desplaçament vertical) a partir de RPS, tenim el següent:

$$v \left( \frac{mm}{s} \right) = 2 * \pi * r * N(RPS) \quad (11)$$

On:

*v: velocitat*

*r: radi del caragol = 4 mm*

*N: N° de revolucions per segon*

Finalment, si volguéssim passar de velocitat en (mil·límetres/segon de desplaçament vertical) a RPM:

$$N (RPM) = \frac{v(mm/s)}{2 * \pi * r} * 60 \quad (12)$$

S'ha implementat una funció al codi, **convertirvelocitat**, per tal de poder passar les dades de velocitat (s/mm) introduïdes per l'usuari a RPM. S'han afegit uns límits de velocitat, aquesta no pot ser inferior a 30 RPM ni superior a 260 RPM.

```
float convertirvelocitat(float velocidad_s_mm) {
    float rps = (velocidad_s_mm / (2 * 3.14 * 4));
    float rpm = rps * 60;

    if (rpm > 260) {
        rpm = 260;
    }
    if (rpm < 30) {
        rpm = 30;
    }
    return rpm;
}
```

```
}
```

Com a afegit, s'han introduït uns estàndards (tests 1, test 2 i test 3) per tal que en un futur el propi usuari pugui establir uns estàndards segons les seves necessitats. Aquests tests serveixen per avaluar el comportament del sensor davant diferents condicions de moviment, augmentant les repeticions i la velocitat per tal de mesurar la resistivitat del sensor amb precisió. S'ha implementat la funció següent.

```
void tests(int repeticions, int passos) {
    for (int i = 0; i < repeticions; i++) {
        myStepper.step(-passos); // Moure en una direcció
        myStepper.step(passos); // Moure en la direcció oposada
    }
}
```

L'objectiu dels tests és proporcionar un conjunt de procediments estandarditzats per mesurar la resistivitat del sensor sota diferents condicions. En augmentar progressivament les repeticions i la velocitat, es pot avaluar com es comporta el sensor en termes de precisió i durabilitat, permetent ajustos futurs.

```
else if (val == '1') { // TEST 1: 6 repeticions
    myStepper.setSpeed(80);
    repetirMoviments(3, 4000); // 3 repeticions de 5mm
    repetirMoviments(3, 8000); // 3 repeticions de 10mm
}

else if (val == '2') { // TEST 2: 20 repeticions
    myStepper.setSpeed(120);
    repetirMoviments(10, 4000); // 10 repeticions de 5mm
    repetirMoviments(10, 8000); // 10 repeticions de 10mm
}

else if (val == '3') { // TEST 3: 60 repeticions
    myStepper.setSpeed(210);
    repetirMoviments(30, 4000); // 30 repeticions de 5mm
    repetirMoviments(30, 8000); // 30 repeticions de 10mm
}
```

En el capítol següent es presenta l'aplicació mòbil desenvolupada per controlar i monitoritzar el dispositiu.

## 6. Aplicació mòbil implementada

### 6.1. Introducció a App inventor

L'App Inventor ha estat la plataforma de desenvolupament d'aplicacions mòbils escollida per tal de crear l'aplicació i poder controlar el dispositiu.

Gràcies a la seva interfície gràfica molt intuïtiva, s'ha pogut realitzar una aplicació mitjançant blocs de construcció visuals cosa que ha facilitat molt el temps d'implementació.

### 6.2. Consideracions prèvies

Abans de començar el desenvolupament de l'aplicació, s'han tingut en compte diverses consideracions.

La idea principal d'aquesta aplicació és oferir als usuaris la capacitat de controlar el dispositiu de manera remota. Els usuaris podran deformar el sensor manualment, movent-lo amunt i avall, així com configurar automàticament un procés de repeticions amb una distància i una velocitat específiques. A més, s'ha afegit la funcionalitat d'executar tests predefinits per facilitar la configuració i l'avaluació del sensor en diferents condicions.

A més, tenint en compte la necessitat de connectivitat amb l'ESP32 a través de Bluetooth, s'ha integrat aquesta funcionalitat a l'aplicació. Això permet als usuaris connectar-se al dispositiu i interactuar mitjançant l'aplicació.

A continuació es realitza una comparació entre *l'App inventor* i *l'Android Studio*, una altra plataforma de desenvolupament d'aplicacions.

Característiques	App inventor	Android Studio
Interfície de desenvolupament	Gràfica, basada en blocs de construcció visuals	Basada en codi, Java i Kotlin
Programació	C/C++	C/C++, MicroPython i Java Script
Flexibilitat	Limitada, adequada per a aplicacions senzilles	Alta, permet el desenvolupament d'aplicacions complexes
Sistema Operatiu	Android	Android, iOS

Taula 5.3. Comparativa del App inventor i l'Android Studio.

### 6.3. Desenvolupament de l'Aplicació Mòbil

#### 6.3.1. Estructura de l'Aplicació

L'aplicació s'estructura en 6 pantalles. Quan s'encén l'aplicació, apareix la pantalla inicial (*splash screen*) amb el logotip de l'aplicació i el de la universitat. A continuació, es mostra la pantalla del menú d'opcions, que inclou diferents botons per a diverses funcions. El primer botó permet connectar el Bluetooth, el segon accedeix al manual, el tercer activa el mode automàtic i l'últim permet dur a terme tests.

En clicar al botó de Bluetooth, apareix una pantalla amb botons per connectar, desconnectar i tornar al menú principal (home). Si se selecciona el botó de manual, s'accedeix a una pantalla on hi ha una fletxa cap amunt i una cap avall, que permeten moure el motor un pas amunt o un pas avall.

El botó automàtic dirigeix a una pantalla on s'efectua una operació cíclica, movent el motor una certa distància amb unes repeticions determinades i a una velocitat específica. Finalment, la pantalla de tests permet dur a terme el test 1, el test 2 o el test 3, proporcionant opcions per a diverses proves del sistema.

#### 6.3.2. Part visual



Figura 5.5. Logotip de l'App.

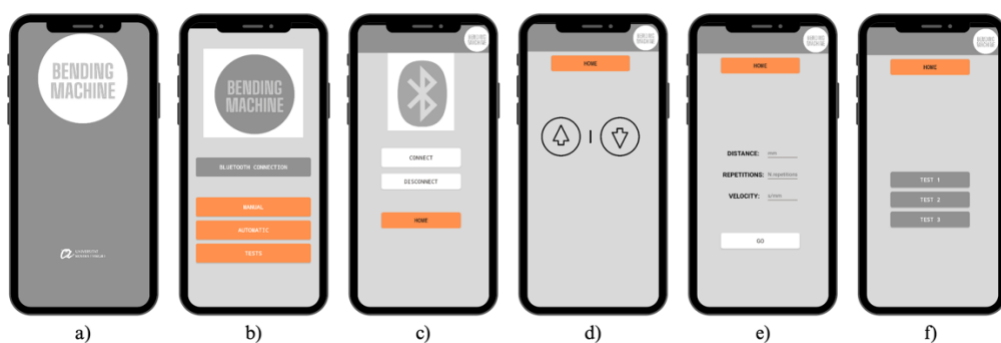


Figura 5.6. Pantalles de l'aplicació.

- a) *Splash Screen*; b) Menú d'opcions (HOME); c) Pantalla Bluetooth;  
d) Pantalla Manual; e) Pantalla Automàtic; f) Pantalla Tests;

Per tal d'entendre el funcionament de l'aplicació en el següent apartat es detalla cada un dels blocs implementats.

### 6.3.3. Programació per blocs

A la pantalla **Bluetooth**, hi ha tres botons: "CONNECT", "DISCONNECT" i "HOME".

Si el Bluetooth està disponible, abans de seleccionar un dispositiu de la llista, es carreguen els noms i adreces dels dispositius Bluetooth disponibles al selector.

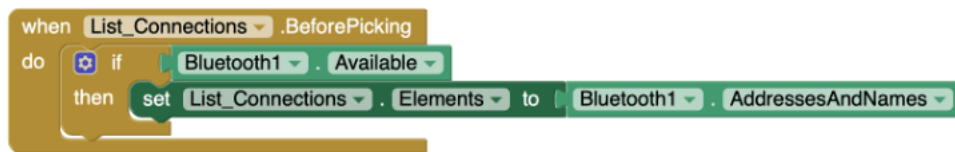


Figura 5.7. Bloc per carregar els dispositius Bluetooth.

El següent bloc es dispara després de seleccionar un element de la llista, s'intenta connectar al dispositiu seleccionat. Si la connexió és exitosa el color de fons de *List\_Connections* (botó "CONNECT") es canvia a verd i el text es posa a "ONLINE". Si la connexió no és exitosa, el color de fons es canvia a vermell i el text es posa a "NOT connection".

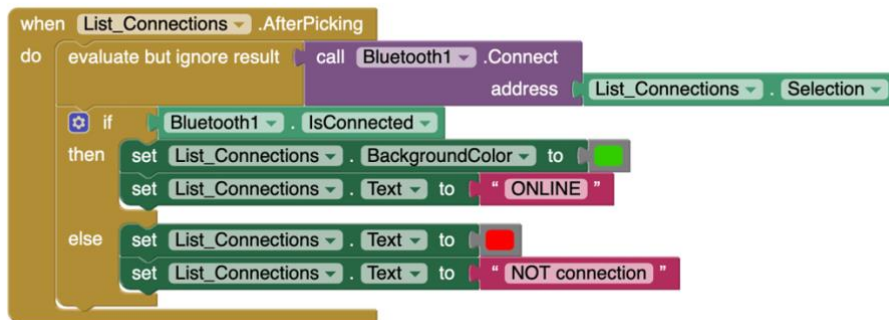


Figura 5.8. Bloc per connectar-se al dispositiu Bluetooth seleccionat.

Quan es fa clic al botó "DISCONNECT", es desconnecta del dispositiu Bluetooth. El color de fons de *List\_Connections* es canvia a blanc i el text es posa de nou a "CONNECT".

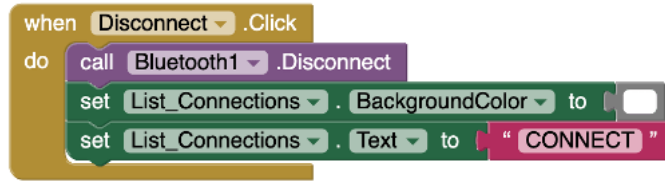


Figura 5.9. Bloc per desconnectar-se del dispositiu Bluetooth.

A la pantalla **Manual**, hi ha tres botons: "PUJA", "BAIXA" i "HOME".

El següent bloc es dispara quan es fa clic al botó "PUJA", fletxa cap a dalt. S'envia el text "P" al dispositiu Bluetooth (Bluetooth1.SendText("P")).

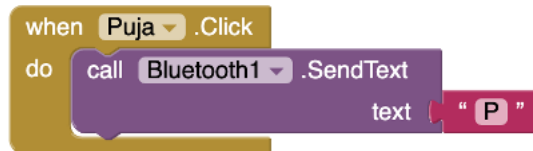


Figura 5.10. Bloc quan es fa clic al botó "PUJA".

El següent bloc es dispara quan es fa clic al botó "BAIXA", fletxa cap a baix. S'envia el text "b" al dispositiu Bluetooth (Bluetooth1.SendText("B")).

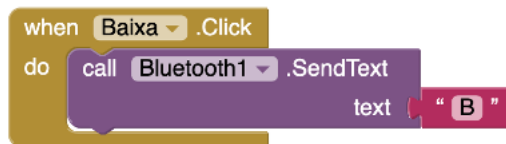


Figura 5.11. Bloc quan es fa clic al botó "BAIXA".

A la pantalla **Automàtic**, hi ha tres paràmetres que l'usuari pot introduir: distància, repeticions i velocitat. Quan es prem el botó "GO", el motor comença a moure's. A més, el botó "GO" es transforma en el botó "STOP" per permetre aturar el motor en qualsevol moment.

Quan es fa clic al botó "GO", s'envia un text per la distància (Distance.Text), la velocitat (Velocity.Text), i les repeticions (Repeticions.Text), al dispositiu Bluetooth (Bluetooth1.SendText). El format enviat és: "\*[distància]-[velocitat],[repeticions]".

A més, es fa visible el botó "STOP" i invisible el botó "GO".

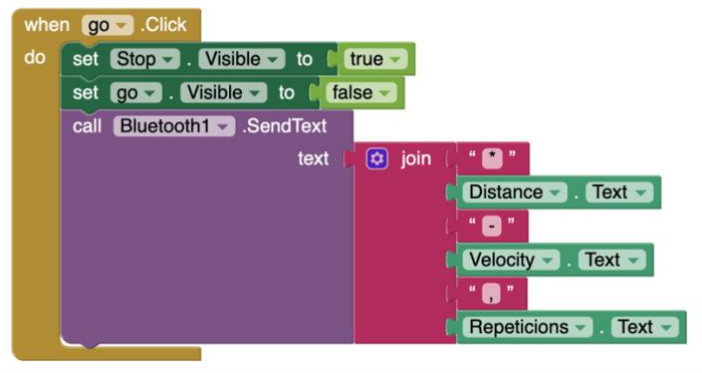


Figura 5.12. Bloc quan es fa clic al botó “GO”.

Finalment, aquest bloc envia un text “S” quan es fa clic el botó “STOP”. Altre cop es fa visible el botó “GO” i invisible el botó “STOP”.

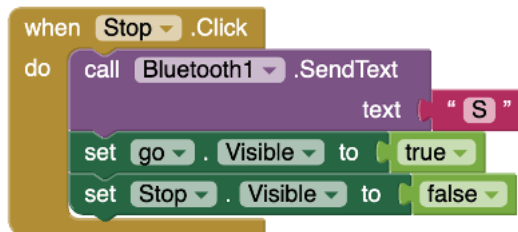


Figura 5.13. Bloc quan es fa clic al botó “STOP”.

Per acabar, la pantalla **Tests**, conté quatre botons: "TEST 1", "TEST 2", "TEST 3" i "HOME".

Quan es fa clic en un botó, s'envia un text específic ("1", "2" o "3") per iniciar el test corresponent.

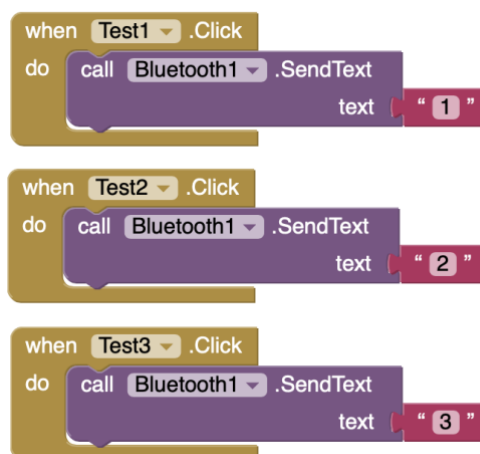
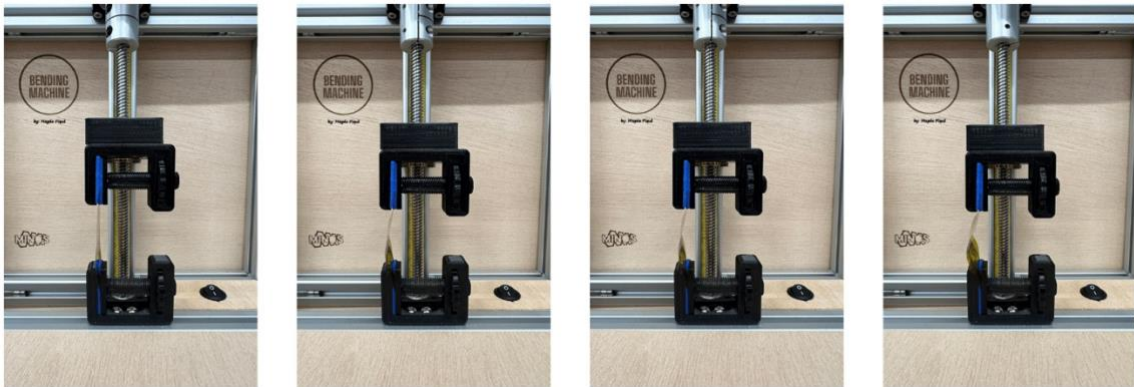


Figura 5.14. Blocs per als botons TEST 1, 2 i 3.

## 7. Proves i resultats

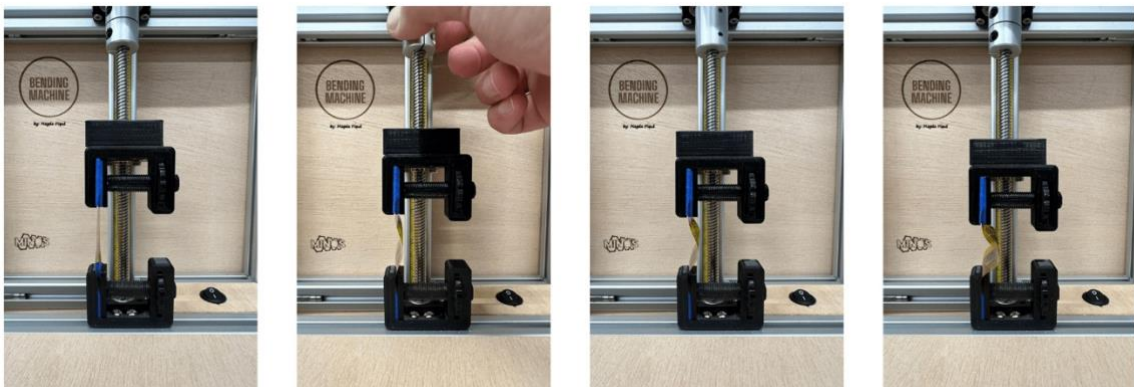
En aquest capítol es descriuen les proves realitzades per avaluar el comportament d'un sensor sobre un substrat flexible de Kapton. L'objectiu és observar i analitzar com funciona el dispositiu sota diverses condicions de deformació.

Aquesta figura mostra diferents graus de curvatura del substrat flexible quan se sotmet a una deformació de tracció.



**Figura 7.1.** Diferents graus de curvatura del substrat flexible sotmès a una deformació de tracció.

Aquesta figura il·lustra els diferents graus de curvatura del substrat flexible quan se sotmet a una deformació de compressió.



**Figura 7.2.** Diferents graus de curvatura del substrat flexible sotmès a una deformació de compressió.

A més, s'ha mesurat el corrent màxim consumit pel dispositiu per determinar la seva eficiència energètica i assegurar que les seves necessitats de potència. Aquest corrent màxim com es pot observar en la figura següent és aproximadament de **0,33 A**.



Figura 7.3. Corrent màxim del dispositiu.

Com a prova final s'ha realitzat un test amb un sensor resistiu el qual és sotmès a diferents esforços amb el dispositiu realitzat mentre analitzem el seu seva resistència mentre se li aplica un força de tracció sobre la línia del sensor.

El valor inicial de resistència base era **4,2 MΩ** com es pot observar en la figura següent.



Figura 7.4. Resistència base 4,2 MΩ

El punt més baix de resistència que hem obtingut quan el sensor era sotmès a un esforç de compressió generat per una distància d'1 mm ha estat **3,5 MΩ**.



**Figura 7.5.** Resistència (3,5 MΩ) quan el sensor és sotmès a un esforç de compressió.

Finalment el valor de la resistència una vegada s'han dut a terme 10 repeticions d'1 mm de distància i a una velocitat de 10 mm/s és **4,3 MΩ**.



**Figura 7.6.** Resistència final (4,3 MΩ.) després de 10 repeticions d'1 mm de distància.

Podem concloure que el sensor ha recuperat la seva línia base.

## 8. Pressupost

Tenint en compte tots els mòduls i materials utilitzats en aquest capítol s'exposa el pressupost.

Quantitat	Model	Preu unitari	Subtotal
1	ESP-WROOM-32, SP-Cow	10,59 €	10,59 €
1	Motor Pas a Pas Nema 17	9,99 €	9,99 €
3	Driver A4988	2,99 €	8,99 €
1	ESP32S Breakout Board	9,69 €	9,69 €
9	Perfils d'alumini	16,99 €	150,00 €
1	UniTak3D Ender 3 Dual Z Axis Upgrade Kit	29,98 €	29,98 €
1	ESP32 Board	11,25 €	11,25 €
2	Pinces Impressora 3D	3,00 €	6,00 €
50	Tuercas per a ranures en T, M4	7,99 €	7,99 €
1	Suport Pinça Superior	3,00 €	3,00 €
1	Convertidor Buck LM2596	2,47 €	2,47 €
1	Font d'alimentació 12V DC 24W 2A	4,14 €	4,14 €
4	Carcassa de fusta	2,50 €	10,00 €
<b>TOTAL</b>			<b>264,09 €</b>

Taula 8.1. Pressupost del prototip.

## 9. Conclusions i línies futures del projecte

En aquest projecte, s'ha desenvolupat i provat un dispositiu flexible capaç de flexionar sensors sobre substrats flexibles. El dispositiu ha demostrat una gran eficiència en la flexió de sensors a distàncies específiques, velocitats determinades i amb un nombre concret de repeticions. Aquestes proves han validat tant la funcionalitat com la precisió del sistema.

L'aplicació mòbil desenvolupada ha permès un control fàcil i intuïtiu del dispositiu, facilitant l'entrada de dades i la monitorització en temps real. La calibració realitzada ha assegurat que la conversió de la distància introduïda per l'usuari en passos de moviment sigui precisa.

Les línies futures del dispositiu inclouran la implementació d'una unitat de control per ordinador per facilitar el tractament i l'emmagatzematge de dades directament en programes com Excel o Origin. A més, es preveu estudiar la viabilitat de dissenyar el mateix prototip amb dimensions encara més reduïdes per poder-lo encabir dins d'una cel·la de mesura de sensors.

També es treballarà en la implementació d'un sistema per analitzar la resistència del sensor durant el procés de deformació per tracció o compressió, amb l'objectiu de monitoritzar-lo en temps real.

---

## 10. Referències i webgrafia

- [1] «MINOS - Grup de Recerca». Consulta: 1 maig 2024. [En línia]. Disponible a:  
<https://minos.recerca.urv.cat/ca/qui-som/>
- [2] M. Alvarado, S. De La Flor, E. Llobet, A. Romero, i J. L. Ramírez, «Performance of flexible chemoresistive gas sensors after having undergone automated bending tests», *Sensors (Switzerland)*, vol. 19, núm. 23, des. 2019, doi: 10.3390/s19235190.
- [3] «AGS-X 10 kN». Consulta: 30 abril 2024. [En línia]. Disponible a:  
<https://www.jenck.com/productos/producto/ags-x>
- [4] «Shimadzu». Consulta: 1 maig 2024. [En línia]. Disponible a:  
<https://www.ssi.shimadzu.com/products/materials-testing/uni-ttm/autograph-ags-x-series/index.html>
- [5] «Instron». Consulta: 2 maig 2024. [En línia]. Disponible a:  
<https://www.instron.com/>
- [6] «17HS4401 Datasheet - MotionKing Motor Industry Co.,Ltd.» Consulta: 23 març 2024. [En línia]. Disponible a: <https://pdf1.alldatasheet.es/datasheet-pdf/view/1131976/MOTIONKING/17HS4401.html>
- [7] «Driver para motores paso a paso A4988». Consulta: 23 març 2024. [En línia]. Disponible a: [https://programarfácil.com/blog/arduino-blog/a4988-drv8825-tmc2209/#Driver\\_para\\_motores\\_paso\\_a\\_paso\\_A4988](https://programarfácil.com/blog/arduino-blog/a4988-drv8825-tmc2209/#Driver_para_motores_paso_a_paso_A4988)
- [8] «A4988 Datasheet - Allegro MicroSystems». Consulta: 23 març 2024. [En línia]. Disponible a: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/455036/ALLEGRO/A4988.html>
- [9] «Driver A4988». Consulta: 23 març 2024. [En línia]. Disponible a:  
<https://www.diarioelectronicohoy.com/blog/descripcion-del-driver-a4988>
- [10] «IONOS». Consulta: 25 abril 2024. [En línia]. Disponible a:  
<https://www.ionos.es/digitalguide/servidores/know-how/que-es-bluetooth/>
- [11] Antonio Ramon Lázaro, «Bluetooth Low Energy (BLE) Technology», *Universitat Rovira i Virgili*.
- [12] «Bluetooth», Consulta: 25 abril 2024. [En línia]. Disponible a:  
<https://www.bluetooth.com/learn-about-bluetooth/tech-overview/>
- [13] «ESP32 DEV KIT V1». Consulta: 4 maig 2024. [En línia]. Disponible a:  
<https://mischianti.org/doit-esp32-dev-kit-v1-high-resolution-pinout-and-specs/>

## 11. Annexos

### 11.1. Codi

```
// Codi pel mòdul ESP32 Bending Machine
// Dades rebudes a través de Bluetooth des de l'aplicació mòbil

// S'inclouen totes les llibreries necessàries
#include <BluetoothSerial.h>
#include <Stepper.h>

// Es defineix el nom del dispositiu bluetooth
#define DEVICE_NAME "ESP32_motor_control"

// Es defineix els pins del motor
#define MOTOR_STEP_PIN 2
#define MOTOR_DIR_PIN 4

// Es defineix els paràmetres del motor
#define MOTOR_STEPS 3200
#define RPM 100
#define MS1 27
#define MS2 12
#define MS3 14

// S'inicialitza l'objecte Stepper
Stepper myStepper(MOTOR_STEPS, MOTOR_STEP_PIN, MOTOR_DIR_PIN);

// S'inicialitza l'objecte BluetoothSerial
BluetoothSerial SerialBT;

// S'inicialitzen les variables de repeticions i distancia
int repeticions = 0;
int distancia = 0;
float distancia_mm = 0;
int velocity = 0;

void setup()
{
  // S'inicialitza la comunicació serial amb una velocitat de 9600 bps
  Serial.begin(9600);

  // S'inicialitza la comunicació Bluetooth amb el nom
  // "ESP32_motor_control"
  SerialBT.begin(DEVICE_NAME);

  // Es configura la velocitat del motor
  myStepper.setSpeed(10);

  // Es configuren els pins del motor STEP i DIR com a sortides
  pinMode(MOTOR_STEP_PIN, OUTPUT);
  pinMode(MOTOR_DIR_PIN, OUTPUT);

  // Es configuren els pins del motor de microstepping com a sortides
  pinMode(MS1, OUTPUT);
  pinMode(MS2, OUTPUT);
  pinMode(MS3, OUTPUT);
}
```

```
// Es configura el microstepping amb una relació de 1/16 per
//al control del motor pas a pas
digitalWrite(MS1, HIGH);
digitalWrite(MS2, HIGH);
digitalWrite(MS3, HIGH);
}

void loop() {

  // Es comprova si hi ha dades disponibles a través de
  //la connexió Bluetooth
  if (SerialBT.available())
  {
    // Es llegeix el caràcter rebut de la connexió Bluetooth.
    char val = SerialBT.read();

    // Si es rep la lletra 'P', s'indica que s'ha de
    // fer pujar el dispositiu
    if (val == 'P')
    {
      Serial.println("PUJA");
      myStepper.step(800); // Mou el motor pas a pas cap amunt.
    }

    // Si es rep la lletra 'B', s'indica que s'ha de
    // fer baixar el dispositiu
    else if (val == 'B')
    {
      Serial.println("BAIXA");
      myStepper.step(-800); // Mou el motor pas a pas cap avall
    }

    // Si es rep el caràcter '*',
    // es rep la distància a la qual s'ha de moure el dispositiu
    else if (val == '*')
    {
      // Es llegeix la distància introduïda
      distancia = SerialBT.parseInt();
      Serial.println(distancia);

      // Es converteix la distància a passos
      distancia_mm = convertirdistancia(distancia);
    }

    // Si es rep el caràcter '-',
    // es rep una velocitat a la qual s'ha de moure el dispositiu
    else if (val == '-')
    {
      // Es llegeix la velocitat introduïda
      velocity = SerialBT.parseInt();

      Serial.println(velocity);

      // Es converteix la velocitat a revolucions per minut.
      float rpm = convertirvelocitat(velocity);
      Serial.println(rpm);

      // S'estableix la velocitat del motor pas a pas.
    }
  }
}
```

```

    myStepper.setSpeed(velocity);
}

// Si es rep el caràcter ',',
// es rep el nombre de repeticions
else if (val == ',')
{
    // Es llegeix el valor de repeticions introduït
    repeticions = SerialBT.parseInt();
    Serial.println(repeticions);

    // S'executa les repeticions amb la distància i la velocitat
    for (int i = 0; i < repeticions; i++) {

        // Es mou el motor pas a pas cap a una direcció
        myStepper.step(-distancia_mm);

        // Es comprova si s'ha rebut una ordre de stop
        char s = SerialBT.read();
        if (s == 'S'){
            Serial.println("stop");
            break;
        }

        delay(200);

        s = SerialBT.read();
        if (s == 'S'){
            Serial.println("stop");
            break;
        }

        //Es mou el motor pas a pas cap a l'altra direcció
        myStepper.step(distancia_mm);

        s = SerialBT.read();
        if (s == 'S'){
            Serial.println("stop");
            break;
        }

        delay(200);

    }
}

// Si es rep una de les opcions numèriques (1, 2 o 3), s'executen els
// tests corresponents

else if (val == '1'){ // 6 repeticions
    myStepper.setSpeed(80);
    tests(3, 4000); // 3 repeticions de 5mm
    tests(3, 8000); // 3 repeticions de 10mm
}

else if (val == '2'){ //20 repeticions
    myStepper.setSpeed(120);
    tests(10, 4000); // 10 repeticions de 5mm
    tests(10, 8000); // 10 repeticions de 10mm
}

```

```
else if (val == '3'){ // 60 repeticions
  myStepper.setSpeed(210);
  tests(30, 4000); // 30 repeticions de 5mm
  tests(30, 8000); // 30 repeticions de 10mm
}
}
}

// Funció per convertir la velocitat en mil·límetres per segon a
// revolucions per minut
float convertirvelocitat(float velocidad_s_mm) {

  float rps = (velocidad_s_mm / (2 * 3.14 * 4));
  float rpm = rps * 60;

  if (rpm > 260){
    rpm = 260;
  }

  return rpm;
}

// Funció per convertir la distància en mm a passos de motor
int convertirdistancia(int distancia_a) {

  int dist = (distancia_a * 800);

  return dist;
}

// Funció per executar un nombre específic de repeticions amb una
// determinada distància
void tests(int repe, int passos) {

  for (int i = 0; i < repe; i++) {
    myStepper.step(-passos); // Moure en una direcció
    myStepper.step(passos); // Moure en la direcció oposada
  }
}
```

## 11.2. Mòduls utilitzats al dispositiu realitzats amb impressora 3D

### 11.2.1. Suport pinça superior

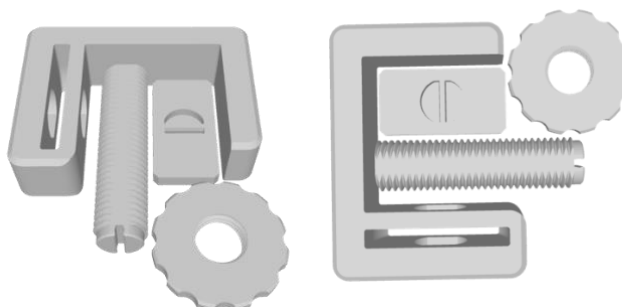


**Figura 11.1.** Visió amb 3D del suport de la pinça superior.

Mesures	
Mida (mm)	65 x 40 x 20
Volum (mm <sup>3</sup> )	32,028

**Taula 11.1.** Mesures del suport de la pinça superior.

### 11.2.2. Pinces



**Figura 11.2.** Visió amb 3D del disseny de les pinces.

Mesures	
Mida (mm)	115 x 102 x 26
Volum (mm <sup>3</sup> )	101,529

**Taula 11.2.** Mesures de les pinces.

