

Portada del Informe Técnico

Smart-Hand: Innovación en Robótica y Rehabilitación

Proyecto de Ingeniería



Fecha: 07 de junio de 2022



Autor: Santiago Jácome Ceniceros



Ingeniero en Mecatrónica

Resumen

Smart-Hand es un proyecto enfocado en crear una herramienta accesible y versátil que combine tecnología inmersiva para estudiantes y soluciones económicas para la rehabilitación muscular. Este sistema integra conceptos de ingeniería mecánica, electrónica y programación para ofrecer una experiencia educativa y médica de gran impacto social.



Contacto: san.jacome@hotmail.com



LinkedIn: [Santiago Jácome Ceniceros](#)

Nota: Este proyecto fue diseñado para fomentar la innovación, la educación y la accesibilidad en la tecnología.

Abstract.

¿Cómo podemos recuperar la motivación de estudiantes de preparatoria para estudiar ingeniería? El proyecto *Smart-Hand* logra conectar con estudiantes al tener una experiencia con tecnología inmersiva sobre temas básicos para futuros ingenieros. También es un método económico para la implementación de la tecnología portátil a pacientes en rehabilitación muscular, los cuales requieren de un monitoreo de las variables eléctricas que definen el movimiento muscular de la mano. Actualmente hay una falta de estrategias que logren un aprendizaje experiencial, donde los estudiantes jueguen un papel activo en el proceso de aprendizaje teniendo una gratificación mayor a adquirir conocimientos, reactivando interés y motivación por los estudios y adquiriendo experiencia, resultando en más proyectos fundamentados y de impacto social.

En el modelo Tec21 se ha notado una educación más experiencial, sin embargo, en los proyectos existe una gran oportunidad para ir más allá, de conectar la teoría de la ingeniería con un impacto social que conecte a un nivel más cercano con los estudiantes.

(*Modelo Tec21*, 2019).

Es por eso que se propone el prototipo de *Smart-Hand*, un proyecto que se puede llevar a cabo con un grupo de estudiantes permitiéndoles tener una experiencia directa con la electrónica, con la construcción de su propia mano robótica como del futuro. También es una herramienta muy útil para personas que estén en rehabilitación muscular, dado que puede integrarse al apoyo del progreso de un paciente, por ejemplo, monitoreando variables críticas de recuperación. Este prototipo provocará la curiosidad por temas ingenieriles, motivándolos a seguir estudiando y fomentando su creatividad para proyectos similares que tengan un impacto social, como lo puede tener este con el apoyo a la rehabilitación, que puede ser muy útil para necesidades futuras del país, específicamente en la delegación Álvaro Obregón.

Introducción.

La comprensión de conceptos básicos como voltaje, corriente y resistencia puede llegar a ser obstaculizada por el método de enseñanza que usen los profesores, que generalmente llega a ser tediosa y repetitiva. Hoy en día notamos una megatendencia con la tecnología inmersiva, la cual otorgaría a los estudiantes una experiencia más profunda a los conceptos fundamentales para el futuro de sus carreras como ingenieros.

Los componentes que forman el prototipo del guante, tienen un costo muy pequeño, por lo que otra aplicación como lo es el análisis del progreso en pacientes de rehabilitación también es muy viable, ya que un gran problema llega a ser que el equipo de terapia física puede ser muy costoso. Con este método podemos generar herramientas operables de bajo costo que puedan registrar, analizar y graficar el progreso de algún paciente con su movimiento de la mano.

Delimitación del objeto de estudio.

La tecnología portátil e inmersiva tienen muchas complicaciones de disponibilidad, por lo que se busca encontrar un diseño simple y efectivo que permita la utilización de sistemas mecatrónicos para un público mayor que se beneficie directamente, como estudiantes y personas en rehabilitación física.

Planteamiento del problema.

Podemos notar que los guantes comerciales que logran asimilar el movimiento humano tienen unos precios muy altos y requieren de un software complicado, por lo que usualmente se recurre a sensores ópticos como un Kinect o se terminan con un costo exorbitante como los HaptX. Esto limita proyectos y herramientas que requieren ser simples y accesibles para estudiantes o pacientes.
(Varga, 2021).

Justificación.

El proyecto *Smart-Hand* se diseñó teniendo en mente la accesibilidad y simplificación de manufactura del producto tangible, es por eso que para exagerar su flexibilidad, se hizo con materiales como papel reciclado. Probando el punto que es algo que con la tutoría correcta podría elaborar un estudiante de preparatoria para su aprendizaje, o bien, que pudieran ser elaborados con materiales diferentes como textiles para un producto más profesional de uso médico.

Marco teórico.

Comprendemos este proyecto dividido en dos secciones, mecánica y electrónica.

Comenzando por el mecanismo de la mano robótica, esta fue construida y diseñada a partir de la ecuación de **Grübler-Kutzbach**, la cual define la cantidad de grados de libertad que tiene un mecanismo a partir de sus eslabones y juntas. (Norton, 2009).

La parte de electrónica tiene una piedra angular, la cuál es traducir el movimiento, la flexión de los dedos, a valores numéricos que puedan ser interpretados por microcontroladores. La base fue utilizar un material conductor sobre un material flexible, en este caso para demostrar la viabilidad del proyecto, se utilizó grafito y papel. El grafito es un material conductor, el cuál fue aplicado sobre un papel. Cuando se tiene el papel con grafito sin ningún tipo de flexión, las partículas conductoras del material se mantienen a cierta distancia una de las otras, teniendo una resistencia eléctrica definida. Al sufrir una flexión, estas partículas se acercan, haciendo que sea más fácil conducir una carga eléctrica, en otras palabras, disminuye la resistencia eléctrica. Esta resistencia es la que podemos medir, mediante un convertidor analógico-digital o ADC y posteriormente trabajar con los valores. (Shahrizan, 2019). (Romero 2020).

Objetivos

- Diseñar un sistema económico
- Diseñar un sistema confiable
- Aplicar conceptos aprendidos durante el semestre
- Encontrar una forma de implementar el sistema para la educación simultáneamente con pacientes de rehabilitación física de la mano
- El aprovechamiento de la conductividad sensible del grafito
- La práctica de software ingenieril
- La práctica de herramientas ingenieriles
- La práctica de diseño de un sistema mecatrónico

Metodología

Aplicando lo aprendido en el marco teórico, se diseñó cada dedo a partir de la ecuación de **Grübler-Kutzbach**;

$$GDL = 3(L - 1) - 2J_1 - J_2$$

Si queremos que cada dedo tenga tres eslabones representando tres falanges, podemos calcular cuántas juntas son necesarias para tener un mecanismo de un grado de libertad.

$$GDL = 3(4 - 1) - 2(4) - 0$$
$$GDL = 1$$

Se requieren 3 eslabones más la tierra, en este caso 3 falanges más la palma, unido por 4 juntas completas para que el mecanismo pueda ser controlado con un solo servomotor.

El siguiente paso fue aprovechar la resistencia variable del grafito al ser flexionado, para hacer esto, se hizo un circuito muy simple para medir el voltaje a través de la tira de grafito, el cual es llamado divisor de voltaje y se puede ver en la figura 1.

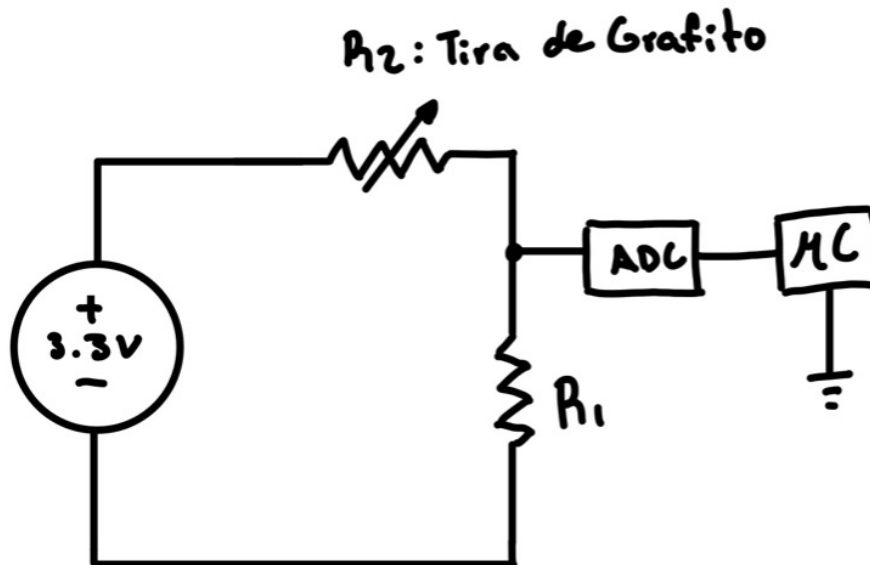


Figura 1. Circuito para medir el voltaje en tira de grafito.

Sin embargo, para lograr que la tira funcionara como resistencia, requería de alguna manera de estar conectada al circuito, para esto se perforó la tira en seis secciones a los extremos, en donde se entretejió un alambre de cobre por cada costado como se puede apreciar en la figura 2.

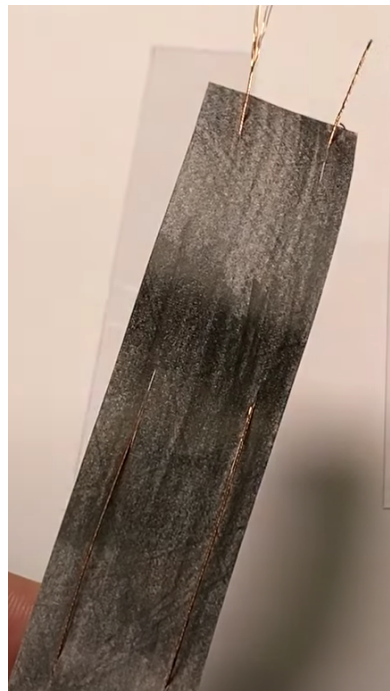


Figura 2. Tira de grafito con alambre de cobre entretelado.

Es importante que los dos contactos de la parte superior no entren en contacto porque se estaría conduciendo la electricidad por ahí y no a través del grafito. A partir de esto tenemos dos terminales que se pueden conectar como se puede ver en la figura 1 con el diagrama del circuito.

El voltaje llega al microcontrolador, el cuál es recibido por un convertidor analógico-digital, en este caso de 12 bits, o bien que tiene 4096 posibles valores para convertir una señal analógica a la digital que podemos manejar. Este ADC tiene una resolución de 0 a 3.3 Voltios a 0 a 4095 valores enteros, así que al pasar el voltaje a través de la tira de grafito, hay una pérdida de potencial que finalmente llega al ADC y hace la conversión de ese voltaje de entrada al valor correspondiente del rango de 12 bits.

Como se mencionó en el marco teórico, al flexionar esta tira, la resistencia disminuye, si conectamos esta resistencia en serie con otra, haciendo un divisor de voltaje, la diferencia de potencial en el ADC será menor, por lo que el valor digital será menor y es con esos valores que podemos graficar y mapear a los grados posibles en un servomotor, de 0° a 180°, para posteriormente enviar, a través de un protocolo de WiFi llamado ESP-NOW, a otro microcontrolador que tendrá como salida los valores de la tira en grados para que los servomotores imiten la flexión de la tira y en sí la flexión de un dedo. Este proceso se puede visualizar en la figura 3. (Para el código completo, ver **Anexo A**).

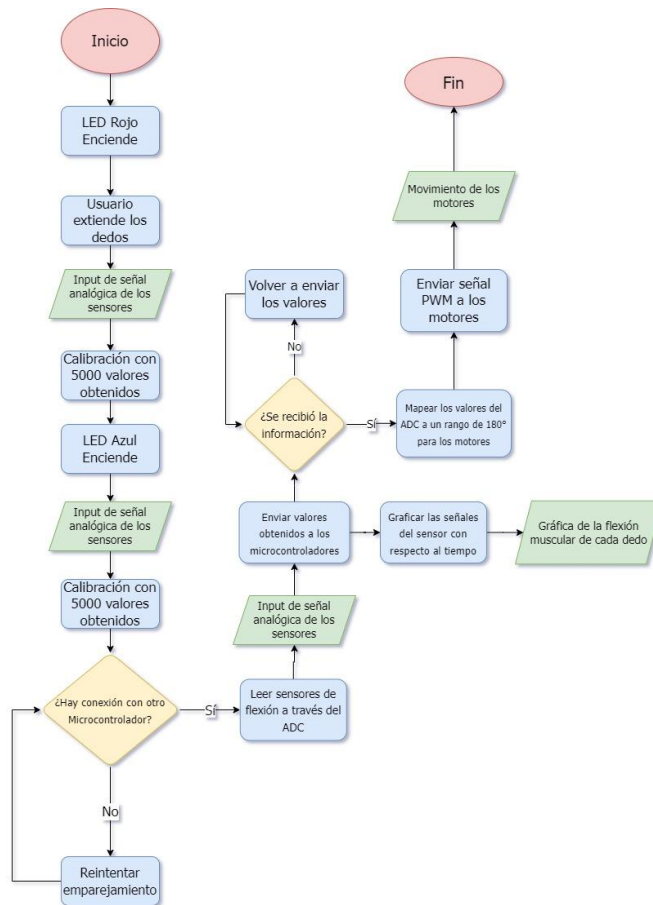


Figura 3. Diagrama de flujo de la programación.

Propuesta metodológica a utilizar

Para el desarrollo del proyecto se llevó a cabo la metodología de prototipado descrita en el libro *Product Design and Development*, por Karl Ulrich, en la séptima edición del libro.

Comenzamos en la etapa inicial, la planeación. En esta etapa se escribieron post-its con lugares, como escuela, hospital, restaurante, etc. A partir de estos post-its se agregaron debajo problemas que se encontraban en cada uno de estos lugares. Aquí se escogieron dos problemas y se describieron soluciones, para posteriormente elegirlos, como se puede inferir, los dos problemas eran la falta de herramientas educativas sobre electrónica y el alto costo de tecnología portátil para pacientes de hospitales. Donde lo que encajó perfecto fue el guante y la mano robótica, que envolverá e interesará a alumnos en la ingeniería y que también facilitará el acceso a tecnología moderna a pacientes en rehabilitación.

La segunda etapa se desarrolló más a fondo el concepto, es decir, se investigó las bases ingenieriles que pueden llevar este proyecto a la realidad. En materias como Análisis de Mecanismos se aprendieron fundamentos esenciales para diseñar la mano robótica,

posteriormente en Análisis de Elementos de la Mecatrónica se aprendió la programación y la electrónica para darle vida al sistema.

En la tercera etapa se diseñó el sistema mecatrónico que permitiría el funcionamiento correcto ya sea en la aplicación para estudiantes o para rehabilitación, comenzando básicamente con una máquina de estados.

Al tener los diseños del mecanismo y de la electrónica, se procedió a diseñar los detalles como la calibración de motores y sensores ajustada a lo planeado previamente y lo que se encontró en el paso de la elaboración.

Finalmente se llevaron a cabo las pruebas finales en donde se notaron ciertos problemas como la mala calibración del guante, la responsividad de los motores retardada y otros detalles que tuvieron que ser solucionados para el prototipo final. (Ulrich. 2011).

Técnicas y herramientas de ingeniería empleadas

Las ecuaciones y conversiones mencionadas en la metodología fueron fundamentales para el desarrollo de la mano robótica, sin embargo, herramientas como ha sido *SolidWorks* en donde se llevó el dibujo, diseño, ensamble y planos para manufactura han sido esenciales para traer el proyecto a la vida y no solo en cálculos.

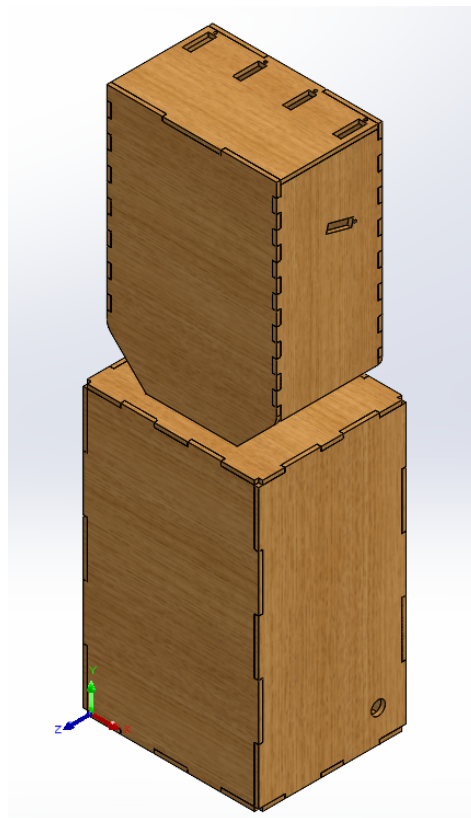


Figura 4. Ensamble CAD de la base del sistema.

Aquí se pudo probar la funcionalidad del ensamble y si el diseño de cada pieza podía entrar correctamente con las otras sin causar algún problema o ruptura del mecanismo.

Otra herramienta de ingeniería es *RDWorksV8* que nos permite manejar el equipo de corte láser para la manufactura de nuestras piezas.

Una técnica importante fue la soldadura blanda, aprendida en Análisis de Elementos de la Mecatrónica. Esta permitió reducir los circuitos utilizados en la mano robótica y en el guante a tarjetas de circuito impresas (PCBs por sus siglas en inglés) de 5 cm x 6 cm.

También encontramos la programación, específicamente en los lenguajes de C y C++ que permitieron el uso de estos microcontroladores y adecuarlos para su funcionamiento correcto en el sistema.

Infraestructura

De la mano con las herramientas previamente mencionadas, se utilizó la maquinaria de manufactura del campus. En esta encontramos la cortadora láser con la cuál se cortaron las piezas para la mano robótica. Para el guante, se necesitó de los laboratorios de electrónica para contar con material como cautín, estaño/plomo, pasta, bomba desoldadora, entre otras.

Recursos utilizados

- Microcontrolador ESP32-WROOM-32D (x2)
- Pliego de papel reciclado
- Lámina de PVC (30x30)
- Cables Jumper (x10)
- Panel MDF
- Ligas de papelería (x5)
- Resistol blanco
- Estación de soldadura Weller
- Aleación Estaño/Plomo 60/40 con núcleo de resina
- Alambre de cobre
- Resistencias 470 Ohm (x5)
- Resistencias 1k Ohm (x5)
- LEDs (x2)
- PCBs (6x5) (x2)

- Servomotor MG995 (x5)

Resultados

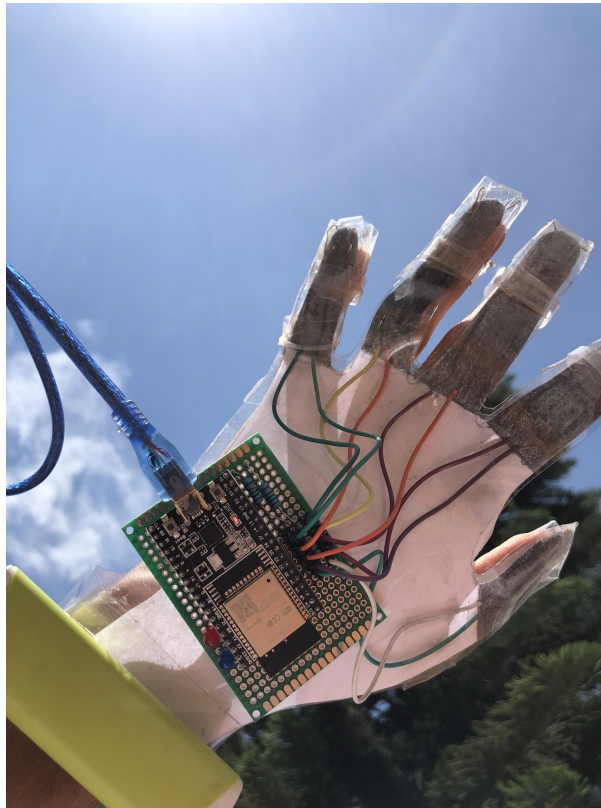


Figura 5. Guante con sensores de flexión; *Smart-Hand*.

Tenemos el guante, la parte fundamental de *Smart-Hand*, con este guante podemos analizar el movimiento de la mano para los dos propósitos que tiene el proyecto, formar una experiencia con tecnología inmersiva para estudiantes y también brindar herramientas más accesibles para la rehabilitación muscular.



Figura 6. Eje X: Tiempo ms, Eje Y: Valor numérico del ADC. Gráfica de señal analógica del movimiento de la mano.

El guante envía 5 señales analógicas, una por cada dedo, las cuales son útiles para asignar valores exactos a la flexión de los dedos. Esto nos sirve para medir el progreso de un paciente en rehabilitación de una manera más precisa que solo por vista, donde hay veces que no se nota el progreso pero realmente sí lo hay; esta información puede ayudar mucho a la motivación del paciente.

Estos valores podemos trabajarlos para la mano robótica, para hacer una experiencia divertida y didáctica de aprendizaje, en donde el conjunto de informática, mecánica y electrónica se conectan directamente con el usuario.



Figura 7. Mano robótica.

Este proyecto se enfoca en la accesibilidad para alcanzar a más estudiantes y a más pacientes, que la tecnología esté al alcance de todos y no solo de una mínima parte de la población. *Smart-Hand* logra enfocar su manufactura y diseño a la educación inmersiva y a la disminución de costos de herramientas para que más personas puedan utilizarlas y beneficiarse directamente de ellas.

Conclusiones

Smart-Hand da una solución económica a la problemática planteada brindando un sistema didáctico y divertido para estudiantes y uno alcanzable y disponible para la rehabilitación. Su diseño es modular por lo que se puede cambiar y rediseñar fácilmente para una aplicación más profesional y dedicada a un objetivo. Se aplican técnicas de ingeniería de manera eficiente permitiendo el aprovechamiento de propiedades de materiales, de herramientas y de matemáticas para optimizar recursos y tener un sistema el cual sea confiable y consistente.

El proyecto tiene como propósito apoyar a los objetivos tres y cuatro de desarrollo sostenible de la Organización de las Naciones Unidas, los cuáles son salud y bienestar, donde el proyecto brinda una herramienta accesible para la salud de los pacientes. Y educación de calidad, porque es una herramienta de tecnología inmersiva que logra hacer la educación sobre la electrónica más experiencial, que se entiende a un nivel más amigable y profundo en los estudiantes.

Anexos

Anexo A. Código de Microcontroladores.

```
#include <Arduino.h>
#include <esp_now.h>
#include <WiFi.h>
```

```
#define FLEX1 34
#define FLEX2 35
#define FLEX3 32
#define FLEX4 33
#define FLEX5 39
```

```
#define RED 22
#define BLU 23
```

```

unsigned short int sensors[5]={FLEX1,FLEX2,FLEX3,FLEX4,FLEX5};

// Variables para servos
int servos[5]={0};

//Calibración
void calibrate();
int flex[5][2];

// MAC Address
uint8_t broadcastAddress[] = {0x40, 0x91, 0x51, 0xBD, 0x53, 0xA4};
uint8_t broadcastAddress1[] = {0x30, 0xC6, 0xF7, 0x0B, 0x5E, 0x2C};

//Data structure
typedef struct message{
    int a;
    int b;
    int c;
    int d;
    int e;
}message;
message Data;

// Peer info
esp_now_peer_info_t peerInfo;

// Función para saber si se recibió la información o no
void OnDataSent(const uint8_t *mac_addr, esp_now_send_status_t status) {
    Serial.print("\r\nLast Packet Send Status:\t");
    Serial.println(status == ESP_NOW_SEND_SUCCESS ? "Delivery Success" : "Delivery
Fail");
}

void setup() {

```

```
for(int i=0;i<5;i++){
    pinMode(sensors[i],INPUT);
}

pinMode(RED,OUTPUT);
pinMode(BLU,OUTPUT);

// Serial Monitor
Serial.begin(115200);

// ESP32 como una Wi-Fi Station
WiFi.mode(WIFI_STA);

// Inicializar ESP-NOW
if (esp_now_init() != ESP_OK) {
    Serial.println("Error initializing ESP-NOW");
    return;
}

// Revisar función de información recibida
esp_now_register_send_cb(OnDataSent);

// Register peer
memcpy(peerInfo.peer_addr, broadcastAddress, 6);
peerInfo.channel = 0;
peerInfo.encrypt = false;

// Add peer
if (esp_now_add_peer(&peerInfo) != ESP_OK){
    Serial.println("Failed to add peer");
    return;
}
```

```

memcpy(peerInfo.peer_addr, broadcastAddress1, 6);
peerInfo.channel = 0;
peerInfo.encrypt = false;

// Emparejamiento
if (esp_now_add_peer(&peerInfo) != ESP_OK){
    Serial.println("Failed to add peer");
    return;
}

calibrate();
}

void loop() {

    int a=map(analogRead(FLEX1),flex[0][0],flex[0][1],5,122);
    int b=map(analogRead(FLEX2),flex[1][0],flex[1][1],5,110);
    int c=map(analogRead(FLEX3),flex[2][0],flex[2][1],38,175);
    int d=map(analogRead(FLEX4),flex[3][0],flex[3][1],175,47);
    int e=map(analogRead(FLEX5),flex[4][0],flex[4][1],175,83);

    Serial.println(analogRead(FLEX1));

    if(a<5) a=5;
    if(b<5) b=5;
    if(c<38) c=38;
    if(d<47) d=47;
    if(e<83) e=83;

    if(a>122) a=122;
    if(b>110) b=110;
    if(c>175) c=175;
    if(d>175) d=175;
    if(e>175) e=175;

```

```

Data.a=a;
Data.b=b;
Data.c=c;
Data.d=d;
Data.e=e;

// Enviar estructura vía ESP-NOW
esp_err_t result = esp_now_send(broadcastAddress, (uint8_t *) &Data, sizeof(Data));

if (result == ESP_OK) {
    Serial.println("Sending confirmed");
    digitalWrite(REDA,LOW);
}
else {
    Serial.println("Sending error");
    digitalWrite(REDA,HIGH);
}
//Gráfica
Data.a=analogRead(FLEX1);
Data.b=analogRead(FLEX2);
Data.c=analogRead(FLEX3);
Data.d=analogRead(FLEX4);
Data.e=analogRead(FLEX5);

result = esp_now_send(broadcastAddress1, (uint8_t *) &Data, sizeof(Data));

if (result == ESP_OK) {
    Serial.println("Sending confirmed");
    digitalWrite(REDA,LOW);
}
else {
    Serial.println("Sending error");
    digitalWrite(REDA,HIGH);
}

```



```
}
```

```
delay(200);
```

```
}
```

```
void calibrate(){
```

```
    //ALTO
```

```
    //INDICADOR
```

```
    digitalWrite(RED,HIGH);
```

```
    digitalWrite(BLU,LOW);
```

```
    Serial.println("ALTO");
```

```
    delay(2000);
```

```
    for (int i=0;i<5;i++){
```

```
        for (int j=0;j<4999;j++){
```

```
            flex[i][0]+=analogRead(sensors[i]);
```

```
        }
```

```
    }
```

```
    //BAJO
```

```
    //INDICADOR
```

```
    digitalWrite(RED,LOW);
```

```
    digitalWrite(BLU,HIGH);
```

```
    Serial.println("BAJO");
```

```
    delay(2000);
```

```
    for (int i=0;i<5;i++){
```

```
        for (int j=0;j<4999;j++){
```

```
            flex[i][1]+=analogRead(sensors[i]);
```

```
        }
```

```
    }
```

```
    for (int i=0;i<5;i++){
```

```
        //PROMEDIO
```

```
        flex[i][0]/=5000;
```

```

flex[i][1]/=5000;
}

digitalWrite(RED,LOW);
digitalWrite(BLU,LOW);
}

```

Referencias

- Romero, A. Romero, M. y Romero, G. (2020). *Conductividad eléctrica: el grafito como excelente conductor eléctrico*. Recuperado de [Sitio Web]: <https://esgraf.com.mx/blog/conductividad-electrica-usando-grafito/>
- Shahrizan, N. (2019). *Graphite-on-paper based bending sensor*. Recuperado de [Sitio Web]: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1174/1/012009>
- Varga, S. (2021). *Haptic gloves for virtual reality and robotics* Recuperado de [Sitio Web]: <https://haptx.com/>
- *Modelo Tec21*. (2019). Tec.mx. Recuperado de [Sitio Web]: <https://tec.mx/es/modelo-tec21>
- Norton, R. (2009). Fundamentos de Cinemática. *Diseño de Maquinaria. Síntesis y análisis de máquinas y mecanismos*. (pp. 27 a 40). McGraw-Hill.
- Ulrich, K. (2011). *Product Design and Development*. McGraw-Hill