

Trabajo Fin de Grado

*Encapsulación y diseño de un prototipo funcional de
sensor capacitivo para medir frecuencia
respiratoria*

Autora

Diana Navarro Sánchez

Directores

Raúl Igual Catalán

Javier Martínez Cesteros

Escuela Universitaria Politécnica de Teruel

2021

Encapsulación y diseño de un prototipo de sensor capacitivo que mide la frecuencia respiratoria

Encapsulación y diseño de un prototipo de sensor capacitivo que mide la frecuencia respiratoria

Encapsulación y diseño de un prototipo funcional de sensor capacitivo para medir frecuencia respiratoria

Resumen

Este trabajo de fin de grado consiste en el diseño y encapsulación de un prototipo funcional de un sensor capacitivo para medir la frecuencia respiratoria. El prototipo consta de un sensor capacitivo casero realizado con papel de aluminio y plástico, un circuito de acondicionamiento cuyo elemento central es un astable, un microcontrolador, un módulo de alimentación energética a través de pilas y una pantalla de visualización de resultados.

Para el desarrollo de este prototipo funcional se han utilizado varios programas de diseño industrial con los cuales se han modelado las piezas de las que consta. A partir de estos modelos, se han impreso varias placas PCB utilizando una fresadora. Posteriormente se han soldado los componentes electrónicos necesarios de los que consta el sistema sensor. También, se han utilizado impresoras 3D para imprimir las piezas del encapsulado.

Dentro de los componentes electrónicos necesarios, tenemos que destacar el uso de la placa Arduino, encargada de controlar el correcto funcionamiento de este prototipo funcional.

Palabras clave: Sensor capacitivo, impresoras 3D, Arduino, placa PCB

Abstract

This final degree project consists of the design and encapsulation of a functional prototype of a capacitive sensor to measure respiration. The prototype is composed of different elements: a home-made capacitive sensor, a conditioning circuit based on an astable configuration, a microcontroller, a power module and a screen to display the results.

For the development of this functional prototype, several industrial design programs have been used. From these models, various PCB boards have been printed using a milling machine. Then, the electronic components of the sensing system have been soldered. In addition, 3D printers have been used to print the casing. Finally, 3D printers have been used to print the previously modeled casing.

Among the electronic components, we highlight Arduino, which is in charge of controlling the correct operation of the functional prototype.

Keywords: Capacitive Sensor, 3D Printers, Arduino, PCB board.

Encapsulación y diseño de un prototipo de sensor capacitivo que mide la frecuencia respiratoria

Índice

1. Objetivos del proyecto y motivación	1
2. Definiciones previas y estructura del proyecto.....	3
3. Trabajo relacionado	5
3.1. Introducción	5
3.2. Hipótesis.....	6
3.3. Monitorización de la frecuencia respiratoria.....	6
3.3.1. Espirometría	6
3.3.2. Pletismografía corporal	7
3.3.3. Camas inteligentes	8
3.3.4. Nariz electrónica.....	9
3.3.5. Estudio de la voz.....	9
3.3.6. Dispositivos wearables	9
4. Descripción general de los elementos utilizados en el proyecto.....	11
4.1. Sensores capacitivos	11
4.1.1. Instrumentación biomédica	11
4.1.2. Sensores	12
4.1.3. Sensores capacitivos	13
4.2. Software de diseño de placas PCB (49).....	19
4.3. Placa Arduino	20
4.4. Programas de diseño 3D	21
4.5. Impresoras 3D	22
4.5.1. Métodos de impresión en 3D (55)	22
4.5.2. Proceso de impresión de una pieza en 3D	23
5. Descripción específica de los elementos utilizados en el proyecto.....	25
5.1. Prototipo utilizado.....	25
5.1.1. Descripción del sensor	26
5.2.2. LM555 Astable.....	26
5.3. Software de diseño de placas PCB (Eagle) (6) (58).....	27
5.4. Programa de diseño 3D utilizado: Inventor	29
5.5. Impresora 3D: Creality Ender 3 Pro.....	30

Encapsulación y diseño de un prototipo de sensor capacitivo que mide la frecuencia respiratoria

5.6.	Arduino Uno	33
5.7.	Otros elementos.....	34
6.	Desarrollo del proyecto.....	38
6.1.	Fase de producción	38
6.2.	Placas impresas	41
6.3.	Encapsulado	43
6.4.	Código Arduino.....	45
6.5.	Comprobaciones realizadas	47
7.	Lecciones aprendidas, conclusiones y futuras mejoras	49
7.1.	Fallos que han surgido y su resolución.....	49
7.2.	Futuras mejoras.....	50
7.3.	Conclusiones.....	50
8.	Bibliografía	51

Anexos

Anexo 1: PLANOS DEL ENCAPSULADO

Anexo 2: CÓDIGO ARDUINO

Índice de imágenes

Ilustración 1. Espiometría (26).....	7
Ilustración 2. Pletismógrafo (31).....	8
Ilustración 3. Cama inteligente (21)	8
Ilustración 4. Instrumentación biomédica (34).....	11
Ilustración 5. Condensador de placas paralelas (37)	13
Ilustración 6. Sensor según la admitancia (37)	14
Ilustración 7. Condensador diferencial (37)	14
Ilustración 8. Electrodo de guarda (37).....	15
Ilustración 9. Oscilador (42)	16
Ilustración 10. Oscilador LC (43).....	17
Ilustración 11. Oscilador Hartley (44).....	17
Ilustración 12. Oscilador Colpitts (44).....	18
Ilustración 13. Programa de diseño PCB (Eagle) (6).....	19
Ilustración 14. Símbolo Arduino (51)	20
Ilustración 15. Símbolo de Autodesk Inventor (52)	21
Ilustración 16. Métodos de impresión en 3D (55)	22
Ilustración 17. Circuito LM555 Astable (56).....	26
Ilustración 18. Circuito Astable LM555 (57).....	26
Ilustración 19. Circuito Astable LM555 final	27
Ilustración 20. Ejemplo esquemático.....	27
Ilustración 21. Icono para hacer placa	28
Ilustración 22. Ejemplo de cómo realizar una placa	28
Ilustración 23. Ejemplo de la placa final diseñada	28
Ilustración 24. Como dibujar en Inventor	29
Ilustración 25. Impresora 3D, Creality Ender 3 Pro (8).	32
Ilustración 26. Arduino Uno (50).....	33
Ilustración 27. Cinta de cobre adhesiva (64).....	34
Ilustración 28. Goma eva (65)	34
Ilustración 29. Resistencia 10k (66).....	34
Ilustración 30. Resistencia 100k (66).....	34

Encapsulación y diseño de un prototipo de sensor capacitivo que mide la frecuencia respiratoria

Ilustración 31. Condensador 1nF (67)	34
Ilustración 32. Condensador 0.01uF (68)	34
Ilustración 33. Circuito Integrado LM555 (57)	35
Ilustración 34. Especificaciones técnicas de la pantalla LCD 16x2 (69).....	35
Ilustración 35. Pantalla LCD 16x2 (69).....	35
Ilustración 36. Potenciómetro (70)	35
Ilustración 37. Borneras (71)	35
Ilustración 38. Pines (68)	36
Ilustración 39. Pila 9V (72).....	36
Ilustración 40. conector pila-arduino (73).....	36
Ilustración 41. Sensor 1	38
Ilustración 42. Sensor 2	38
Ilustración 43. Circuito final en la protoboard	39
Ilustración 44. Onda de salida del LM555	39
Ilustración 45. Esquema y montaje del circuito completo.....	40
Ilustración 46. Esquemático Circuito LM555.....	41
Ilustración 47. Placa con el circuito LM555.....	41
Ilustración 48. Esquemático circuito LCD	42
Ilustración 49. Placa circuito LCD	42
Ilustración 50. Parte inferior del encapsulado	43
Ilustración 51. Caja sensor	44
Ilustración 52. Parte superior del encapsulado	44

Índice de tablas

Tabla 1. ESPECIFICACIONES DE ARDUINO UNO (50)	33
Tabla 2. FRECUENCIA RESPIRATORIA POR EDADES	47
Tabla 3. PRUEBAS REALIZADAS EN EL LABORATORIO	47

Encapsulación y diseño de un prototipo de sensor capacitivo que mide la frecuencia respiratoria

Encapsulación y diseño de un prototipo de sensor capacitivo que mide la frecuencia respiratoria

1. Objetivos del proyecto y motivación

Los objetivos de este Trabajo de Fin de Grado son los siguientes:

- Estudiar la tecnología de sensorización capacitiva.
- Diseñar un prototipo funcional de un sensor capacitivo que mida la frecuencia respiratoria.
- Diseñar una placa PCB correctamente con Eagle
- Diseñar e implementar un sensor de respiración capacitivo vestible
- Diseñar e imprimir el encapsulado con impresoras 3D
- Comprobar el correcto funcionamiento con personas

Este proyecto va a permitir obtener un sensor de respiración funcional realizado con tecnología capacitiva. Resulta de interés para el grupo de investigación EduQTech (1), ya que servirá como base para poder comparar el funcionamiento de diversas tecnologías en la medición de la respiración. La motivación de este tipo de sistemas es la realización del control y el seguimiento de enfermedades sin que el paciente deba estar en un entorno hospitalario y poder realizar un control en tiempo real, con eficacia y validez.

Este proyecto es la continuación y mejora del proyecto “Diseño y Desarrollo de un sensor capacitivo para medir la frecuencia respiratoria”, que realizó un compañero del grado de Ingeniería Electrónica y Automática en la Escuela Universitaria Politécnica de Teruel; por lo que partimos de lo que él realizó (2).

Encapsulación y diseño de un prototipo de sensor capacitivo que mide la frecuencia respiratoria

Encapsulación y diseño de un prototipo de sensor capacitivo que mide la frecuencia respiratoria

2. Definiciones previas y estructura del proyecto

Este proyecto presenta el encapsulado de un sensor capacitivo que mide la frecuencia respiratoria.

Se van a proporcionar algunas definiciones previas que ayuden a una mejor comprensión de este trabajo:

Sensor capacitivo: *“Los sensores capacitivos son un tipo de sensor eléctrico. Los sensores capacitivos (KAS) reaccionan ante metales y no metales que al aproximarse a la superficie activa sobrepasan una determinada capacidad. La distancia de conexión respecto a un determinado material es tanto mayor cuanto más elevada sea su constante dieléctrica”* (3).

Placa PCB o placa de circuito impreso: *“Es una superficie formada por caminos, pistas o buses de material conductor laminados sobre una base no conductora. El circuito impreso se utiliza para conectar eléctricamente a través de las pistas conductoras, y sostener mecánicamente, por medio de la base, un conjunto de componentes electrónicos. Las pistas son generalmente de cobre, mientras que la base se fabrica generalmente de resinas de fibra de vidrio reforzada, cerámica, plástico, teflón o polímeros como la baquelita”* (4).

Impresora 3D: *“Es una máquina capaz de realizar réplicas de diseños en 3D, creando piezas o maquetas volumétricas a partir de un diseño hecho por ordenador”* (5).

Una vez introducidos los términos clave, vamos a describir la estructura de esta memoria explicativa, donde se indicará lo que se va a desarrollar posteriormente:

- **Punto 3:** Aborda una revisión de temas relacionados con este proyecto y de trabajos similares a este.
- **Punto 4:** Proporciona una descripción general de los sensores, programas de diseño e impresoras 3D.
- **Punto 5:** Proporciona una descripción específica del sensor utilizado, de los programas de diseño empleados (EAGLE (6), INVENTOR (7)), así como de la impresora 3D utilizada (CREALITY ENDER 3 PRO (8)).
- **Puntos 6, 7:** Explican el proceso que se ha seguido para la realización de este proyecto, los resultados obtenidos y las conclusiones y posibles mejoras futuras.

Encapsulación y diseño de un prototipo de sensor capacitivo que mide la frecuencia respiratoria

Encapsulación y diseño de un prototipo de sensor capacitivo que mide la frecuencia respiratoria

3. Trabajo relacionado

3.1. Introducción

Para comprender este trabajo vamos a hablar sobre enfermedades respiratorias, ya que es el ámbito natural de aplicación del prototipo realizado en este proyecto.

En primer lugar, vamos a definir **enfermedad respiratoria**: *“Es un tipo de enfermedad que afecta a los pulmones y otras partes del aparato respiratorio”* (9). Estas enfermedades son producidas principalmente por infecciones o consumo de tabaco.

La *Neumología* es la especialidad médica que se encarga de estudiar y tratar las distintas enfermedades del aparato respiratorio. Este tipo de enfermedades se sitúan cada año en los primeros puestos del ‘ranking’ de mortalidad y de hospitalizaciones (10).

Las tres enfermedades respiratorias más importantes son crónicas (Asma, EPOC y apnea del sueño) además del tabaquismo, que es adictiva.

Ahora vamos a hablar de cada una de ellas para conocer en qué consisten y de qué manera afectan.

El **asma** *“es una enfermedad pulmonar producida por la inflamación y estrechamiento de la mucosa de los bronquios, impidiendo la salida correcta del aire de los pulmones”* (11). El asma provoca sibilancias, dificultad para respirar. Para diagnosticar esta enfermedad se realiza la espirometría y el tratamiento se basa en broncodilatadores, que son unos fármacos inhalados (12), (13).

En cuanto al **EPOC** (Enfermedad Pulmonar Obstructiva Crónica), es una enfermedad que es causada por el consumo de cigarrillos que afecta a millones de personas en todo el mundo, de las cuales muchas de ellas presentan afectación moderada o grave. El humo del tabaco puede provocar obstrucción de las vías respiratorias y provocar enfisema. Los síntomas son tos persistente y disnea (dificultad en la respiración). Los primeros años que se padece la enfermedad los síntomas son leves, pero se agravan con el tiempo (14).

Por su parte, la **apnea del sueño** consiste en la interrupción de la respiración. Las interrupciones suelen durar pocos segundos, pero también minutos y pueden producirse varias veces por hora. El tipo más común es la apnea obstructiva del sueño, que provoca una obstrucción de las vías respiratorias durante el sueño, después de la apnea se vuelve al ronquido. La gente que padece de apnea suele roncar muy fuerte, pero no todas las personas que roncan tienen apnea (15).

La monitorización de las constantes vitales es un factor muy importante para el seguimiento y detección de estas enfermedades en los pacientes, en este caso de la **frecuencia respiratoria** (16).

La **frecuencia respiratoria** es el número de respiraciones por minuto que efectúa un sujeto. El ciclo respiratorio comprende una fase inspiratoria y una fase de espiración. Se calcula contando las contracciones torácicas producidas en un minuto, ofreciendo un dato numérico (FR) y una onda que indicará el tipo de respiración (17), (18).

Encapsulación y diseño de un prototipo de sensor capacitivo que mide la frecuencia respiratoria

Debido a la importancia de estas enfermedades, existen distintos tipos de sistemas para monitorizarlas, algunos son los siguientes:

- Detección de la frecuencia respiratoria mediante proceso digital del ECG: Para monitorizar la frecuencia respiratoria se utilizan dos de los electrodos (19).
- Sistema que convierte una señal modulada en el tiempo de un sensor resistivo en una señal digital con el objetivo de estimar la frecuencia respiratoria de un sujeto (20).
- Monitorización de respiración sin contacto mediante una cama inteligente (21).
- Sensor de gas de baja potencia basado en un transductor ultrasónico capacitivo micromecanizado (CMUT) (22).

Estas enfermedades requieren revisiones para controlarlas y curarlas o prevenirlas, pero la mayoría de las personas no se someten a estas revisiones, ya que estas pruebas son molestas.

Por ello, es necesario crear un dispositivo que mida la frecuencia respiratoria, que no sea invasivo y que se pueda medir en tiempo real, con esto se logrará que haya un mejor seguimiento y control de los pacientes que sufren este tipo de enfermedades y mejore su calidad de vida.

3.2. Hipótesis

Como hemos comentado anteriormente, la monitorización de la frecuencia respiratoria es muy importante para la detección y control de las enfermedades respiratorias.

Teniendo en cuenta las tecnologías actuales de sensores, es posible el desarrollo de un dispositivo poco invasivo, fiable y económico que permita el control y el seguimiento de estas enfermedades sin ser doloroso para los pacientes.

La monitorización con un sensor capacitivo va a permitir el control y seguimiento de la frecuencia respiratoria en tiempo real y de modo no obstructivo, siendo fiable.

Por esto, el uso de este tipo de sensores, es una buena solución para la monitorización de estas enfermedades.

3.3. Monitorización de la frecuencia respiratoria

En esta sección se presentan diferentes sistemas de monitorización de la frecuencia respiratoria usados actualmente.

3.3.1. Espirometría

La **espirometría** es la principal prueba para el estudio de la función pulmonar, y es necesaria para la evaluación y el seguimiento de las enfermedades respiratorias. Es una prueba rápida e indolora (23).

En esta prueba se utiliza un dispositivo manual denominado "espirómetro" que mide la cantidad de aire retenido por los pulmones de una persona (volumen de aire) y la velocidad de las inhalaciones y las exhalaciones durante la respiración (velocidad del flujo de aire) (24).

Hay dos tipos de espirometría (25):

Encapsulación y diseño de un prototipo de sensor capacitivo que mide la frecuencia respiratoria

- Espirometría simple: *“Consiste en solicitar al paciente que, tras una inspiración máxima, expulse todo el aire de sus pulmones durante el tiempo que necesite para ello. Permite la medición de los llamados “volúmenes estáticos” y capacidades (suma de volúmenes)”*
- Espirometría forzada: *“Es aquella en la que, tras una inspiración máxima, se pide al paciente que expulse todo el aire que sea capaz en el menor tiempo posible. Nos aporta diversos flujos”*



Ilustración 1. Espirometría (26)

3.3.2. Pletismografía corporal

La **pletismografía corporal** es un procedimiento de medición más exacto, en comparación con la espirometría (27).

La pletismografía se basa en medir cambios de presión y volumen necesarios para medir parámetros que sirven para diagnosticar enfermedades pulmonares o cardiovasculares (28).

Hay varios métodos de medición de volúmenes, el más utilizado es la **pletismografía corporal** donde el volumen es constante y las mediciones se hacen por cambios de presión. Para realizar estas mediciones el paciente tiene que introducirse en una cabina hermética que tiene dos transductores de presión (29).

Después de varias respiraciones a VC (volumen constante), donde el paciente está dentro de la cabina, se produce una oclusión que impide el flujo aéreo verdadero. Durante la oclusión, el paciente debe hacer una respiración conocida como jadeo con una frecuencia de 3-5 respiraciones por minuto. La oclusión dura aproximadamente 3 segundos y es el momento crítico de la prueba ya que es durante ésta cuando se lleva a cabo la medición de la capacidad residual funcional (CRF), a lo que llamamos volumen 1 (V1). Cuando se abre la válvula el paciente debe realizar una inspiración máxima, para medir la capacidad inspiratoria (CI) y después una exhalación completa de manera lenta y relajada.

La incógnita en esa ecuación es V1, que en realidad es la (CRF) o volumen de gas intratorácico (VGIT). La CRF es la suma del volumen de reserva espiratorio (VER) y del VR. Es el volumen de aire que queda en los pulmones después de una respiración a VC. Después de varias respiraciones a VC.

Encapsulación y diseño de un prototipo de sensor capacitivo que mide la frecuencia respiratoria

La **pletismografía corporal** mide diversos volúmenes de gas como: el volumen residual (RV), la capacidad residual funcional (FRC), la capacidad pulmonar total (TLC), volumen de gas intratorácico (VGIT). También cuantifica la resistencia específica en las vías respiratorias (sRaw), conductancia de las vías respiratorias (Gaw) y resistencia total en vías respiratorias (RawTOT) (30).



Ilustración 2. Pletismógrafo (31)

3.3.3. Camas inteligentes

Este es otro medio que se utiliza para medir la frecuencia respiratoria. Uno de estos sensores consiste en una almohadilla metálica que está colocada debajo de las sábanas, que tiene unos sensores de capacidad altamente sensibles que detectan variaciones capacitivas. Mientras el paciente respira, se producen cambios capacitivos que se correlacionan con la respiración, a medida que los pulmones se expanden el valor de la capacitancia medida disminuye (21).

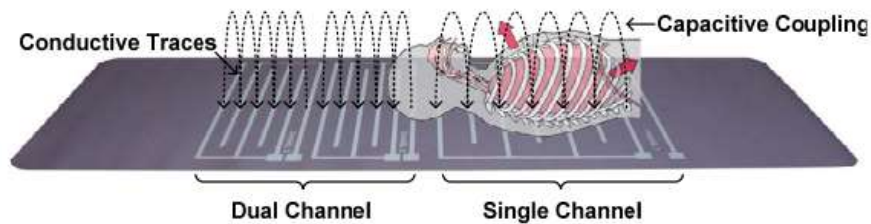


Ilustración 3. Cama inteligente (21)

Encapsulación y diseño de un prototipo de sensor capacitivo que mide la frecuencia respiratoria

3.3.4. Nariz electrónica

La nariz electrónica (E-nose), es un instrumento que comprende una matriz de sensores químicos con sensibilidades solapadas que, al ser expuestos a partículas volátiles, experimentan cambios específicos en su resistencia eléctrica (32).

La técnica de la nariz electrónica en medicina se basa en la detección de compuestos orgánicos volátiles (COV) presentes en la fase gaseosa de la respiración humana. Esta respuesta genera una señal cuyo patrón permite ser reconocida mediante comparación con patrones almacenados previamente. La tecnología de la nariz electrónica se utiliza para identificar a pacientes con cáncer de pulmón, EPOC y asma

3.3.5. Estudio de la voz

Es un método que puede ser usado para la valoración cuantitativa de los sonidos del pulmón, y como indicador de desórdenes respiratorios. Se captan los sonidos emitidos por los pacientes, como sibilancias, crepitancias y asma, y se comparan con los sonidos respiratorios normales (33).

Se sugiere una metodología de evaluación acústica basada en representaciones de vectores acústicos MFCC (Coeficientes Cepstrales en Frecuencia Mel), GMM (Modelos Mezclados Gaussianos) y LDA (Análisis Discriminante Lineal).

3.3.6. Dispositivos wearables

Cada vez las enfermedades respiratorias crónicas son más abundantes y, por tanto, los pacientes tienen que desplazarse a los hospitales a realizarse las pruebas para su seguimiento y control.

Por lo tanto, es importante la implementación de dispositivos wearables que servirán para controlar al paciente en tiempo real sin obligarle a desplazarse al hospital con tanta frecuencia, siendo mucho más cómodo para ellos.

Por lo tanto, lo que se quiere realizar en este proyecto es un dispositivo wearable, que permita medir la frecuencia respiratoria de los pacientes, que sea fácil de manejar, fiable, económico y cómodo para los pacientes.

Encapsulación y diseño de un prototipo de sensor capacitivo que mide la frecuencia respiratoria

Encapsulación y diseño de un prototipo de sensor capacitivo que mide la frecuencia respiratoria

4. Descripción general de los elementos utilizados en el proyecto

4.1. Sensores capacitivos

En este apartado vamos a describir los principios físicos en los que se basan las tecnologías de sensores capacitivos que vamos a usar en el prototipo realizado en este proyecto. Además, de describir su funcionamiento, también se describen diferentes usos de este tipo de sensores.

4.1.1. Instrumentación biomédica

Denominamos instrumento a cualquier dispositivo que utilizamos para medir una magnitud que queremos observar. La instrumentación en el ámbito de la medicina se puede considerar como una ciencia o una tecnología de diseño y uso de los instrumentos (34).

La **instrumentación biomédica** trata sobre los instrumentos que usamos para obtener para obtener información de las señales que producen los seres vivos y sobre los instrumentos que sustituyen funciones fisiológicas. Existen instrumentos para el diagnóstico, monitorización, terapia o rehabilitación.

Los sistemas de instrumentación biomédica tienen un diagrama de bloques similares, cuyo flujo de información va del hombre al equipo.

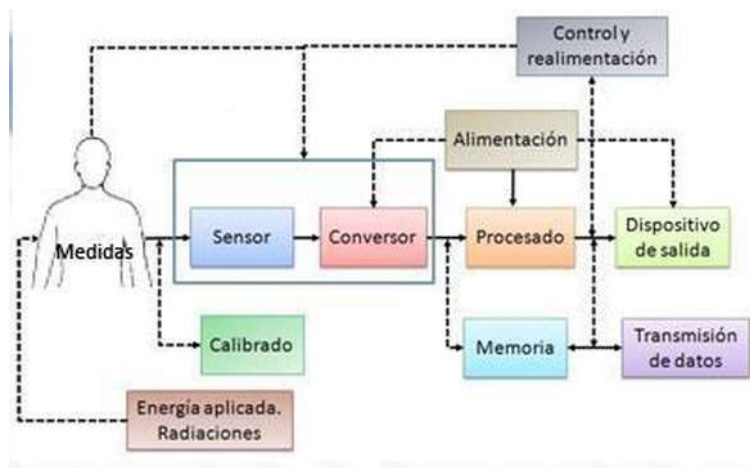


Ilustración 4. Instrumentación biomédica (34).

Encapsulación y diseño de un prototipo de sensor capacitivo que mide la frecuencia respiratoria

Los principales bloques que componen esta instrumentación son los siguientes: (34)

- **Medida:** Es la magnitud física que mide el sistema. Puede ser interna o externa (En la superficie del cuerpo, emanar del cuerpo o ser un tipo de muestra que se coje del paciente).
- **Sensor:** Son los dispositivos que convierten una medida física en una señal eléctrica.
- **Acondicionamiento de la señal:** Sirve para amplificar, filtrar y adaptar la impedancia del sensor a la pantalla, cuando la señal obtenida no puede ser aplicada al dispositivo de salida.
- **Dispositivo de salida:** Los resultados de medida y el acondicionamiento se deben mostrar de la forma más sencilla, permitiendo una interpretación de forma visual y sonora.

La fuente de las señales medidas con esta instrumentación son los tejidos vivos o energía aplicada a estos. Estas circunstancias condicionan los métodos de medida aplicables y los sensores o transductores a utilizar. Por ello, hay que cumplir unos requisitos:

- La acción de medir no debe alterar la magnitud medida
- Hay que garantizar la seguridad del paciente
- Los equipos deben ser robustos, fiables y de fácil calibración

4.1.2. Sensores

*“Un **sensor** es un objeto capaz de variar una propiedad ante magnitudes físicas o químicas, llamadas variables de instrumentación, y transformarlas con un transductor en variables eléctricas. Las variables de instrumentación pueden ser, por ejemplo, temperatura, distancia, aceleración, presión, desplazamiento, fuerza, torsión, movimiento, etc” (35).*

Se pueden **clasificar** según varios criterios: (36)

- Según el principio de funcionamiento, pueden ser activos o pasivos.
- Según el tipo de señal eléctrica que generan, pueden ser digitales, analógicos, temporales.
- Según el rango de valores, pueden ser de tipo ON-OFF o de medida.
- Según el nivel de integración, pueden ser de tipo discretos, integrados o inteligentes.
- Según el tipo de variable medida, pueden ser mecánicos, eléctricos, magnéticos, térmicos, acústicos, químicos, ópticos, etc.

Encapsulación y diseño de un prototipo de sensor capacitivo que mide la frecuencia respiratoria

4.1.3. Sensores capacitivos

Este es el tipo de sensor que vamos a utilizar en este proyecto, por lo que vamos a hablar del principio físico de este tipo de sensores y de los diferentes usos que se les puede dar.

4.1.3.1. Principio físico

Son sensores que se basan en la variación de la **capacidad** de un componente eléctrico o electrónico en respuesta a la variación de alguna magnitud física (37).

Se basan en el componente condensador. *“Un condensador es un dispositivo eléctrico que está formado por dos conductores (electrodos) separados por un material aislante (dieléctrico). Se caracterizan por almacenar carga cuando se aplica una tensión entre los dos conductores y la relación entre la cantidad de cargas almacenadas y la tensión aplicada recibe el nombre de capacidad”* (37).

La variación de la capacidad depende de: (38)

- Las características del dieléctrico:
 - Constante dieléctrica: Cuanto mayor sea la constante dieléctrica, mayor será la capacidad.
 - Material del dieléctrico: Cada material tiene una constante dieléctrica (k), por lo tanto, depende del material que sea la capacidad varia.
- Disposición geométrica de los conductores: Es directamente proporcional al tamaño y área de las chapas enfrentadas; cuanto mayor sea la superficie de éstas, mayor será la capacidad. La capacidad aumenta o disminuye de forma inversamente proporcional a la distancia de separación existente entre ambas chapas. Por tanto, mientras más separadas estén, menor será la capacidad y a menos separación, mayor será su capacidad.

Los condensadores pueden tener distintas configuraciones, como las siguientes (37):

- Condensador de placas paralelas:

La capacidad (C) depende del área (A) de las placas, de la distancia (d) entre ellas y de la constante dieléctrica ϵ (permitividad) del aislante, y viene dada por la expresión:

$$C = \frac{\epsilon A}{d}$$

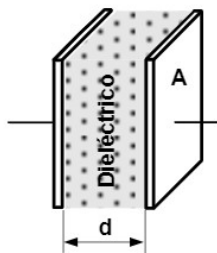


Ilustración 5. Condensador de placas paralelas (37)

Encapsulación y diseño de un prototipo de sensor capacitivo que mide la frecuencia respiratoria

Según se mida la impedancia o la admitancia y según el parámetro que se modifica, los sensores de condensador plano son o no lineales.

Si se mide la admitancia (C_x) que es proporcional a la capacidad se obtiene:

- Un sensor no lineal si hace variar la distancia x entre las placas
- Un sensor lineal si se modifica el área A de las placas, donde w es el ancho de las placas y la x la variación del área.
- Un sensor lineal si se modifica la constante dieléctrica ε , ε_0 (permitividad del vacío), l (longitud de la placa) ε_1 y ε_2 (constantes dieléctricas de los materiales).

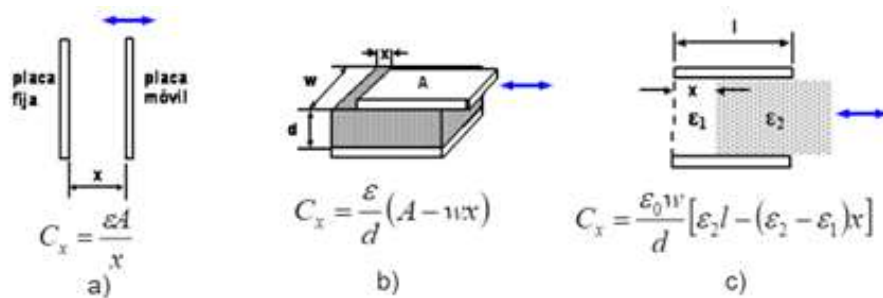


Ilustración 6. Sensor según la admitancia (37)

- Condensador diferencial:**

Se forma por dos placas metálicas fijas y entre ellas se puede mover paralelamente otra placa formando dos condensadores variables que experimentan el mismo cambio de su capacidad, pero en sentidos opuestos. Se obtiene una salida lineal y aumenta la sensibilidad mediante un circuito de acondicionamiento que proporciona una tensión de salida en función de la diferencia de las capacidades.

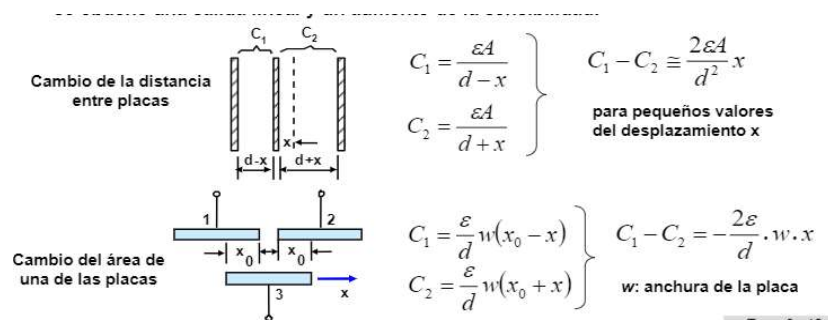


Ilustración 7. Condensador diferencial (37)

Encapsulación y diseño de un prototipo de sensor capacitivo que mide la frecuencia respiratoria

○ Electrodo de guarda:

Los tipos de sensores anteriores tiene algunas limitaciones:

- Los efectos de los bordes no pueden ser despreciados: Que haya dispersión del campo en los bordes de los electrodos provoca que la diferencia entre sus capacidades C_1 y C_2 no sean proporcional a x . Por ello se usa el *electrodo de guarda* rodeando el electrodo 3 y con mismo potencial ya que con esto se consigue que el campo eléctrico entre las placas sea uniforme.

En la figura a podemos apreciar la dispersión en los bordes de los electrodos y en la figura b vemos que se ha colocado el electrodo de guarda que se mueve junto al electrodo 3, por lo tanto, las líneas de campo están distorsionadas en el borde de la guarda y ya no afecta a los electrodos de medida. El electrodo de guarda protege al electrodo 3 de campos externos.

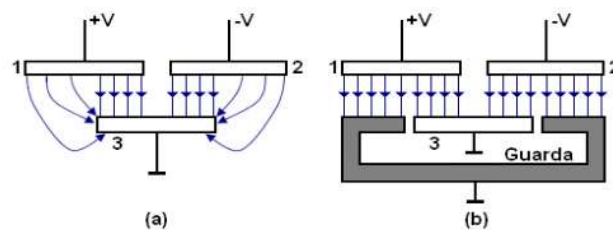


Ilustración 8. Electrodo de guarda (37).

4.1.3.2. Sensores capacitivos en la industria

Los sensores capacitivos tienen gran importancia en la industria. Estos sensores responden a un cambio de dieléctrico en el medio que rodea la zona activa y permiten detectar prácticamente cualquier sustancia.

Los sensores capacitivos se construyen en múltiples formatos, según el tipo de aplicación: (39)

- Cilíndricos lisos: Es el estilo más frecuente y tienen sensibilidad regulable.
- Cilíndricos roscados: Son fáciles de montar y en general son de sensibilidad fija.
- Cilíndricos de teflón: Para detección en ambientes agresivos.
- Rectángulo plano: Para detección en lugares estrechos.
- Tubulares: Para detección de nivel de líquidos

Algunas de las aplicaciones de estos sensores son las siguientes: (40)

- Detección de nivel : cuando un objeto entra en el campo eléctrico que hay entre las placas del sensor, varía el dieléctrico y por tanto varía el valor de capacidad.

Encapsulación y diseño de un prototipo de sensor capacitivo que mide la frecuencia respiratoria

- Sensor de humedad: El principio de funcionamiento de esta aplicación es similar a la anterior. En este caso el dieléctrico cambia su permitividad con respecto a la humedad del ambiente.
- Detección de posición: es un condensador variable, en el cual una de sus placas es móvil, así se puede tener mayor o menor superficie efectiva entre las dos placas, variando el valor de la capacidad.

4.1.3.3. Sensores capacitivos en aplicaciones médicas

Los sensores capacitivos son muy importantes en este tipo de aplicaciones.

De estos sensores el más común dentro de la medicina, es el que mide la humedad del aire inspirado y con una capa química se consigue que la capacidad del instrumento varíe. También se usan para la realización de la ECG, para obtener la frecuencia respiratoria. Por último, también tiene ventajas en el uso de sensores capacitivos para la transferencia y detección de imágenes por ultrasonido. (41)

Estos sensores son importantes en estos tipos de aplicaciones debido a las ventajas que ofrecen respecto a otros como son:

- Son de pequeño tamaño
- Tienen elevada sensibilidad
- Son económicos
- Tienen consumo energético reducido

4.1.3.4. Sensores capacitivos basados en osciladores

Teóricamente, el sensor está formado por un **oscilador** cuya capacidad la forman un electrodo interno (parte del sensor) y otro externo (una pieza conectada a masa) (40).

Estos sensores generan una señal donde la frecuencia depende de la capacidad de un condensador, que es el sensor a utilizar para hacer las mediciones deseadas.

Un oscilador es un circuito que genera una señal periódica a la salida sin tener ninguna entrada periódica. Los osciladores se clasifican en armónicos (onda sinusoidal), o de relajación (onda cuadrada) (42)

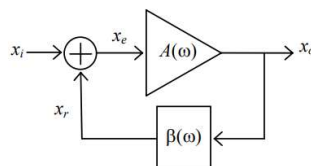


Ilustración 9. Oscilador (42)

Encapsulación y diseño de un prototipo de sensor capacitivo que mide la frecuencia respiratoria

La Figura 9 muestra un ejemplo de oscilador, donde A es la ganancia del amplificador inicial, o ganancia en lazo abierto; β es el factor de realimentación; $A\beta$ es la ganancia de lazo. Son números complejos cuyo módulo y fase varían con la frecuencia angular, ω . La ganancia del circuito realimentado es: $\frac{X_o}{X_i} = \frac{A}{1-A\beta}$

Conociendo el módulo $|A\beta|$, y la fase, $\phi_{A\beta}$, de la ganancia de lazo, podemos saber cuál es el comportamiento del circuito (42).

Según el rango de la frecuencia generado podemos distinguir dos tipos:

-De alta frecuencia: Proporcionan señales de más de 100kHz e implementan circuitos LC y osciladores de cristal.

-De baja frecuencia: Son los que proporcionan señales entre 1Hz y 100 kHz. Este tipo es el que implementa circuitos RC.

A continuación, vamos a describir los distintos tipos de osciladores:

- Osciladores LC: Se utilizan para conseguir frecuencias de más de 100 kHz y para obtener buena estabilidad. Este circuito actúa como un resonante eléctrico. Este circuito está formado por una bobina (L) y un condensador (C) (43).

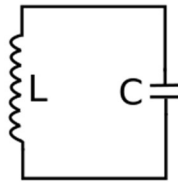


Ilustración 10. Oscilador LC (43)

Dentro de estos, hay diferentes tipos:

- Oscilador Hartley: está basado en un oscilador LC y es de alta frecuencia. Está formado por un condensador entre la base y el colector (C), dos bobinas entre el emisor y la base y el colector respectivamente, y un transistor bipolar (44).

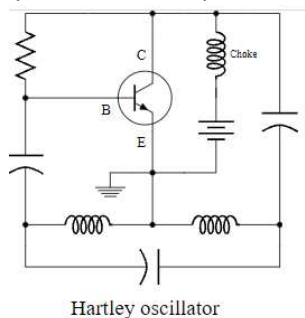
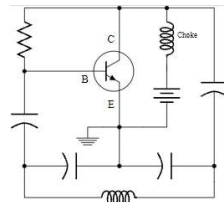


Ilustración 11. Oscilador Hartley (44)

Encapsulación y diseño de un prototipo de sensor capacitivo que mide la frecuencia respiratoria

- Oscilador Colpitts: está basado en un oscilador LC. Está formado por un transistor bipolar como etapa amplificadora, una bobina entre la base y el colector y dos condensadores entre el emisor, base y colector, respectivamente (44) (45).



Colpitts oscillator

Ilustración 12. Oscilador Colpitts (44)

- Oscilador de cristal: es un circuito oscilador que se basa en la resonancia mecánica de un cristal vibratorio piezoeléctrico, normalmente el cuarzo, para crear una señal eléctrica de alta frecuencia. Hay varios tipos como son los siguientes:
 - El *oscilador Pierce*: es un tipo de oscilador en el que se reemplaza el circuito LC por un cristal de cuarzo. Este tipo tiene una gran estabilidad para la frecuencia de oscilación (46) (47).
 - *Oscilador de Clapp a cristal*: se utiliza el cristal como elemento de realimentación de la frecuencia de oscilación (46).
- Oscilador RC: es un circuito que está formado por resistencias y condensadores. El más simple de estos circuitos es el circuito RC de primer orden, formado por una resistencia y un condensador. Estos circuitos se utilizan para filtrar una señal. Son lineales e invariantes en el tiempo. Existe distintos tipos como por ejemplo el Puente de Wien (48).

Encapsulación y diseño de un prototipo de sensor capacitivo que mide la frecuencia respiratoria

4.2. Software de diseño de placas PCB (49)

Este tipo de programas son herramientas de software destinadas al diseño de sistemas electrónicos como **circuitos impresos** (PCB) y circuitos integrados (CI). Estas herramientas ayudan a diseñar diagramas eléctricos, facilitando la conexión de los componentes, simulación, detección de errores, todo esto para después fabricar estos circuitos impresos.

Los pasos a seguir en la fabricación de PCBs es:

- Captura del diseño esquemático: los componentes del circuito se representan por medio de símbolos conectados entre sí, lo que facilita la interpretación y comprensión de la función o funciones que realizará el circuito.
- Diseño del circuito impreso (conforme al diseño esquemático): este nos muestra cómo quedarán distribuidos todos los componentes físicamente en función del diagrama esquemático. Este paso es muy importante porque se definen dimensiones máximas del impreso, la geometría y el ancho de las pistas, es decir, cómo será físicamente la PCB.
- Fabricación: Tiene una gran cantidad de variantes; puede realizarse desde técnicas caseras hasta procesos profesionales, pero por ahora sólo pretendemos describir la parte del diseño.

En este proyecto hemos elegido el software Eagle, ya que es el que hemos aprendido a utilizar en la asignatura de Diseño Electrónico en el grado de Ingeniería Electrónica y Automática y, entre los que hay, su calidad es bastante buena comparativamente hablando.



Ilustración 13. Programa de diseño PCB (Eagle) (6)

Encapsulación y diseño de un prototipo de sensor capacitivo que mide la frecuencia respiratoria

4.3. Placa Arduino

Este proyecto consiste en una maqueta que se ha dotado de capacidad de cómputo a través del uso de componentes controlados desde una placa **Arduino**.

Arduino es una placa de hardware libre, formada por un microcontrolador (Atmel AVR), elementos pasivos (resistencias, condensadores, etc.), por otros componentes (diodos, transistores, etc.), por puertos digitales y analógicos de entrada y salida, etc. También tiene un puerto USB por el que puede ser alimentada la placa y ese puerto también sirve para transferir el código del programa (50).

El *software* de Arduino consiste de dos elementos: un entorno de desarrollo, basado en el entorno(*processing*) y en la estructura del lenguaje de programación (*Wiring*), y en el cargador de arranque que se ejecuta de forma automática dentro del microcontrolador en cuanto este se enciende. Las placas Arduino se programan mediante un ordenador (51).

Las placas Arduino están disponibles comercialmente en forma de placas ensambladas o también en forma de kits, ya que el hardware es libre. Cualquiera puede fabricar su propia placa.

Algunas de las aplicaciones de estas placas son el desarrollo de objetos interactivos autónomos o su uso como tarjeta de adquisición de datos.



Ilustración 14. Símbolo Arduino (51)

Encapsulación y diseño de un prototipo de sensor capacitivo que mide la frecuencia respiratoria

4.4. Programas de diseño 3D

Para realizar el encapsulado de nuestro sensor hemos utilizado un software de diseño.

Estos programas permiten desarrollar piezas, objetos, en tres dimensiones.

Con estos programas conseguimos diseñar piezas con mayor realismo. En el caso industrial como es nuestro caso, con estos programas podemos visualizar y simular de manera muy realista las piezas que queremos fabricar.

En estos programas, antes de conseguir la pieza final, se modela la imagen en dos dimensiones y después se pasa a tres dimensiones mediante la herramienta de extrusión, que es lo que da volumen a la figura. Hay algunos objetos que no se diseñan solo con una pieza, sino que están compuestos por varias piezas realizadas en tres dimensiones, es decir, que este tipo de programas también permite diseñar piezas que luego se unen para formar estructuras más grandes.

En este proyecto, el programa que hemos elegido para realizar el encapsulado es Autodesk Inventor, ya que es uno de los programas que más beneficios nos ofrece.



Ilustración 15. Símbolo de Autodesk Inventor (52)

Encapsulación y diseño de un prototipo de sensor capacitivo que mide la frecuencia respiratoria

4.5. Impresoras 3D

En nuestro proyecto, el encapsulado ha sido impreso con una impresora 3D, después de haber sido diseñado. *“Una **impresora 3D** es una máquina capaz de realizar réplicas de diseños en 3D, creando piezas o maquetas volumétricas a partir de un diseño hecho por ordenador”* (53).

Hay distintos tipos de impresoras 3D:

- Impresoras de compactación: Fijación de una masa de polvo que se compacta por estratos. Según el método de compactación que se utiliza hay varios tipos.
 - Impresoras 3D láser: El láser transfiere energía al polvo haciendo que se polycrome. Después se sumerge en un líquido para que se solidifique.
 - Impresoras 3D de tinta: Se utiliza una tinta aglomerante para que se compacte el polvo, la tinta permite la impresión en diferentes colores.
- Impresoras de adición: Se funde un filamento de polímero y se va depositando por capas para formar el objeto final (54).

4.5.1. Métodos de impresión en 3D (55)

Tipo	Tecnologías	Materiales
Extrusión	Modelado por deposición fundida (FDM)	Termoplásticos (por ejemplo PLA, ABS), HDPE, metales eutécticos, materiales comestibles...
Hilado	Fabricación por haz de electrones (EBF3)	Casi cualquier aleación
Granulado	Sinterizado directo de metal por láser (DMLS)	Casi cualquier aleación
	Fusión por haz de electrones (EBM)	Aleaciones de titanio
	Sinterizado selectivo por calor (SHS)	Polvo termoplástico
	Sinterizado selectivo por láser (SLS)	Termoplásticos, polvos metálicos, polvos cerámicos
	Proyección aglutinante (DSPC)	Yeso
Laminado	Laminado de capas (LOM)	Papel, papel de aluminio, capa de plástico
Fotoquímicos	Estereolitografía (SLA)	Fotopolímero
	Fotopolimerización por luz ultravioleta (SGC)	Fotopolímero

Ilustración 16. Métodos de impresión en 3D (55)

Encapsulación y diseño de un prototipo de sensor capacitivo que mide la frecuencia respiratoria

Los métodos de impresión 3D más comunes son los siguientes:

Modelado por deposición fundida (FDM): Se construyen piezas en tres dimensiones mediante la fusión de un hilo fino de plástico a través de un extrusor, produciendo piezas que están listas para usar.

Estereolitografía (SLA): Produce modelos mediante el trazado de un haz de luz ultravioleta sobre una base de una resina fotosensible que se polimeriza con dicha luz. Es una impresión con alto nivel de detalle y buen acabado superficial.

Sinterización selectiva por láser (SLS): El proceso es similar a la estereolitografía salvo que se sustituye la luz UV por un láser y que la cuba de líquido es una base en polvo. Se producen piezas con gran variedad de materiales (plásticos, cerámicas, metales). Se puede utilizar en procesos de mecanizado caros.

Laminado de objetos de fabricación (LOM): Son máquinas que cortan y pegan miles de hojas de material hasta crear la forma del sólido.

Haz de electrones de fusión (MBE): el proceso es mucho más exigente que la SLS y es capaz de producir piezas de alto grado de precisión para ser utilizadas en la cirugía ortopédica. El producto final es de una alta calidad.

4.5.2. Proceso de impresión de una pieza en 3D

El proceso para llegar a tener una pieza impresa en 3D es el siguiente:

Modelado digital: Desarrollar la pieza o figura mediante un programa de CAD (Diseño Asistido por Ordenador).

Exportación: Se genera un archivo .STL de la pieza que se ha desarrollado.

Rebanado: Convierte el modelo digital en un listado de comandos que entiende y ejecuta la impresora 3D, son llamados g-code.

Conexión: Se conecta la impresora al ordenador mediante USB o con una tarjeta de memoria que contenga los archivos.

Impresión: Preparar la impresora y esperar a que acabe de hacerse la pieza.

Acabado: Quitar la pieza de la base, limpiar la base de impresión y si la pieza tiene partes adicionales de apoyo a la impresión, quitárselas.

Encapsulación y diseño de un prototipo de sensor capacitivo que mide la frecuencia respiratoria

Encapsulación y diseño de un prototipo de sensor capacitivo que mide la frecuencia respiratoria

5. Descripción específica de los elementos utilizados en el proyecto

Vamos a describir los elementos que hemos utilizado para realizar este proyecto: prototipos utilizados, programa de diseño de placas PCB, programas de diseño 3D, impresora 3D utilizada, Arduino utilizado y el resto de materiales y componentes utilizados.

5.1. Prototipo utilizado

Este proyecto es la continuación del proyecto que hizo el año pasado otro compañero del grado de Ingeniería Electrónica y Automática, como hemos nombrado en el primer punto (2). En ese proyecto se realizó una **primera versión** de un prototipo que cumplía las siguientes características:

- Dispositivo para medir respiración de bajo coste
- Fácil instalación y manejo
- Uso de tecnología capacitiva
- No invasivo

El prototipo que se eligió y que vamos a utilizar también en este proyecto para medir la frecuencia, utiliza como elemento central un circuito LM555 montado en configuración de circuito de astable ya que este da una frecuencia variable según el valor del condensador C2 (el sensor en nuestro caso).

El cambio será medido por el Arduino Uno, que mostrará los datos en la pantalla LCD. Después se podrán estudiar los valores comparándolos con una tabla de valores.

El prototipo diseñado en ese TFG tenía **algunas carencias**, enumeradas en el mismo, como son las siguientes:

- Los componentes no estaban integrados en una placa de circuito impreso.
- No tenía encapsulado (estaba todo montado en una protoboard para pruebas iniciales)
- No mostraba la información de la frecuencia respiratoria medida en tiempo real.
- No tenía algoritmo de procesamiento (únicamente mostraba las ondas registradas por el sensor de manera asíncrona).

En este TFG se va mejorar ese prototipo del trabajo anterior, solventando las carencias enumeradas. Para entender mejor el sistema, vamos primero a realizar una descripción de sus componentes.

Encapsulación y diseño de un prototipo de sensor capacitivo que mide la frecuencia respiratoria

5.1.1. Descripción del sensor

El sensor capacitivo es un sensor vestible que se pega al cuerpo de los pacientes y está formado por dos electrodos separados por un dieléctrico que varía el valor de la capacidad de este en función de la presión ejercida en él.

Los dieléctricos utilizados los describiremos más tarde en la sección 6.

5.2.2. LM555 Astable (56)

Este es un circuito que no tiene ningún estado estable y oscila entre dos estados a un determinado tiempo. El tiempo depende de la carga y descarga de los condensadores.

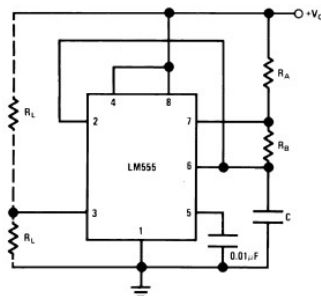


Ilustración 17. Circuito LM555 Astable (56)

Tenemos que realizar una serie de cálculos para elegir las resistencias y los condensadores

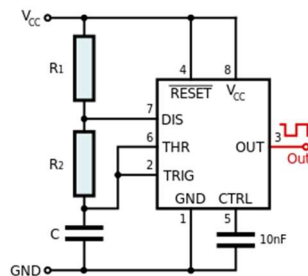


Ilustración 18. Circuito Astable LM555 (57)

C es un condensador que determina la frecuencia de oscilación. La salida de este circuito es una señal rectangular y los periodos t_1 tiempo en alto y t_2 tiempo en bajo depende de los valores R_1 , R_2 y C . Los valores de estos componentes se han tomado del TFG precedente.

$$\begin{cases} t_{ALTO} = \ln(2) * (R_1 + R_2) * C \\ t_{BAJO} = \ln(2) * R_2 * C \end{cases} \quad \text{donde } R_1=10k\Omega \text{ y } R_2=100k\Omega$$

El circuito final es:

Encapsulación y diseño de un prototipo de sensor capacitivo que mide la frecuencia respiratoria

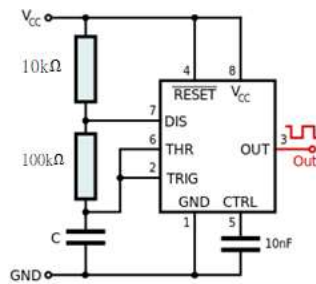


Ilustración 19. Circuito Astable LM555 final

5.3. Software de diseño de placas PCB (Eagle) (6) (58)

Vamos a describir el programa que hemos utilizado para diseñar nuestra placa PCB, en la que se basa nuestro circuito, **EAGLE**.

Es un software de diseño electrónico que permite diseñar placas de circuito impreso (es decir, realizar diagramas esquemáticos, ubicar los componentes y enrutar la PCB. Tiene un editor de diagramas electrónicos. Los componentes se colocan en el diagrama con un solo clic y se conectan con otros componentes a base de "cables" o etiquetas.

Este software permite generar archivos GERBER que sirven para producir estas placas PCB.

En primer lugar, se realiza un esquema del circuito o diagrama electrónico. Los componentes se van añadiendo de las bibliotecas que tiene este programa o diseñando tus propios componentes. También se puede descargar bibliotecas de Internet y luego implementarlas en Eagle.

La figura 20 muestra un ejemplo de esquemático diseñado en Eagle para este proyecto

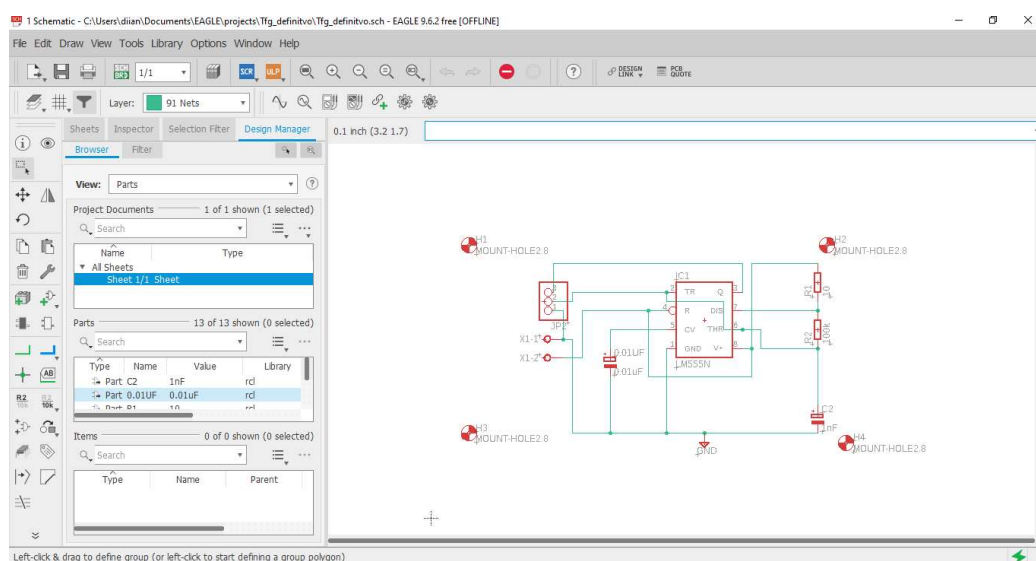


Ilustración 20. Ejemplo esquemático

Encapsulación y diseño de un prototipo de sensor capacitivo que mide la frecuencia respiratoria

Una vez tengamos unidos todos los componentes en el esquemático, el siguiente paso es convertir ese diagrama en la placa que queremos conseguir (Figura 21, Figura 22)



Ilustración 21. Icono para hacer placa

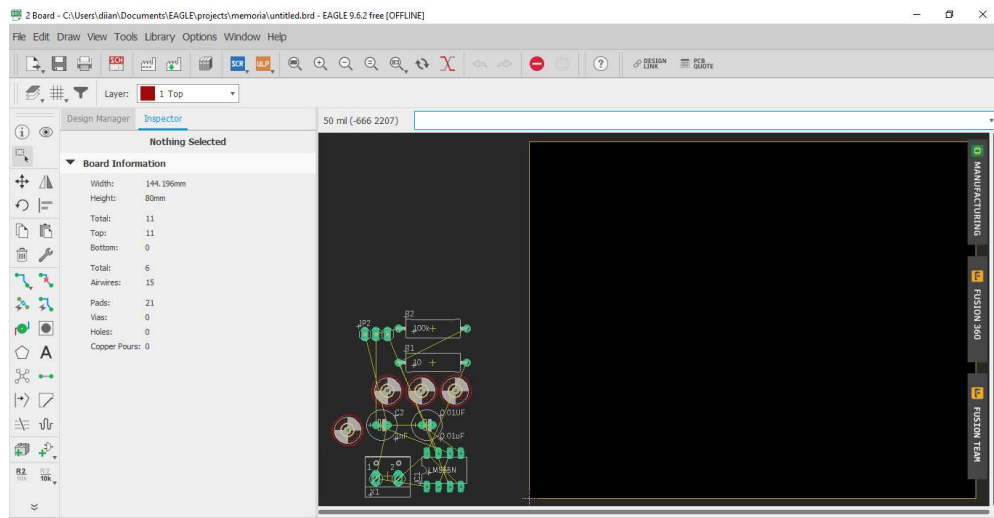


Ilustración 22. Ejemplo de cómo realizar una placa

Finalmente, iremos ordenando los componentes dentro de la placa, para conseguir el resultado final (Figura 23).

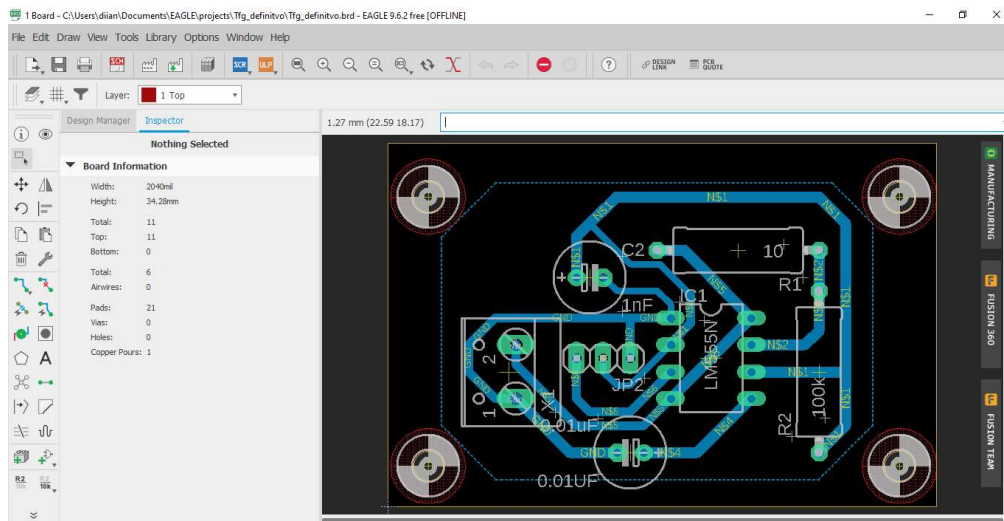


Ilustración 23. Ejemplo de la placa final diseñada

Encapsulación y diseño de un prototipo de sensor capacitivo que mide la frecuencia respiratoria

5.4. Programa de diseño 3D utilizado: Inventor (7)

En este apartado se describe el programa de diseño 3D con el que se ha diseñado el encapsulado. El software elegido fue **Inventor**, ya que permite modelar las piezas en tres dimensiones.

Este programa permite diseñar piezas y conjuntos de piezas que dan lugar a ensamblajes. Al corregir los cambios que tengan las piezas, se producen cambios en el ensamblaje. Este programa está destinado a proyectos de ingeniería, lo que permite una mejora en la producción y perfeccionamiento de los productos de manera sencilla.

El primer paso de este programa es diseñar una pieza en dos dimensiones para después, mediante la herramienta de extrusión, conseguir darle volumen para tener la pieza que queremos. Este software es muy intuitivo (Figura 24).

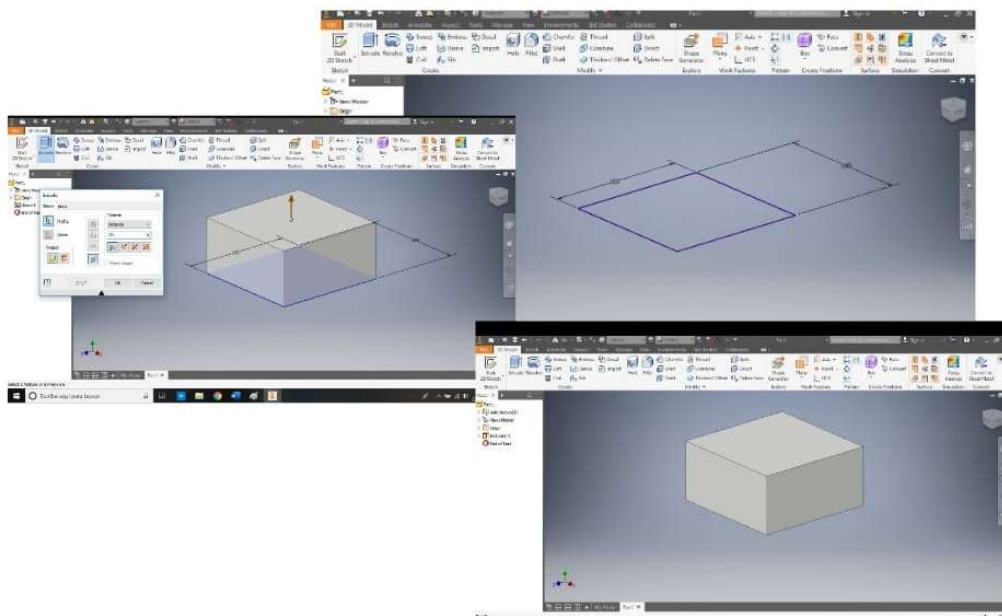


Ilustración 24. Como dibujar en Inventor

Como parte final del proceso, las partes se conectan para hacer ensamblajes. Los ensamblajes pueden consistir en piezas u otros ensamblajes. Esto se consigue agregando restricciones entre las superficies, planos, bordes, puntos y ejes. Otras restricciones incluyen: coincidencia, nivelación, inserción (insertar), ángulo, tangente, transicional, movimiento o sistema de coordenadas de usuario.

5.5. Impresora 3D: Creality Ender 3 Pro

El tipo de impresora a utilizar es el de extrusión. Su principio de funcionamiento se basa en hacer pasar un filamento de plástico (PLA, ABS o PETG) por un extrusor caliente, deritiéndolo y dejando caer esta masa de plástico sobre una cama caliente, capa a capa, para conseguir la pieza final.

Es muy importante la calibración de la cama con el extrusor para que el filamento se deposite de manera correcta. Otro factor que es importante es la configuración de los parámetros de la impresora, como el grosor de la capa inicial, el grosor de cada una de las capas, el relleno de las diferentes piezas, etc.

Vamos a describir las partes más importantes de una impresora 3D por extrusión:

- Cama caliente: es un elemento donde se deposita el filamento fundido, formándose la pieza, y debe estar caliente ya que, si lo hacemos sobre una superficie fría, este no va a tener una buena adherencia y va a terminar despegándose (59).
- Ejes: se emplean para hacer referencia a los elementos que transmiten los movimientos en la máquina. Hace referencia a los ejes cartesianos X, Y y Z en los cuales se basan la mayoría de las impresoras 3D. Todos los movimientos son producidos por motores paso a paso (60):
 1. Movimiento X: El carro permite que el cabezal de la impresora se mueva de izquierda a derecha. Para moverlo tenemos unas correas dentadas unidas a unos motores paso a paso que hacen que el cabezal se deslice sobre unas varillas lisas o guías lineales.
 2. Movimiento Y: Es un mecanismo similar al del eje X, pero se mueve la plataforma de impresión de adelante hacia atrás.
 3. Movimiento Z: Es el eje vertical. Permite que la impresora se mueva de arriba a abajo. Se produce por dos motores, unidos a unas varillas roscadas garantizando el movimiento vertical del extrusor.
- Extrusor: Es la parte que se encarga de mover y desplazar el filamento que estemos usando para luego depositarlo en la cama caliente y crear nuestra pieza en 3D. Las partes que lo componen son las siguientes (61) (62) (63):
 1. Motor paso a paso: Ejerce la fuerza que empuja el filamento de la bobina hasta la boquilla de salida.
 2. Engranaje de tracción: Rueda dentada que mueve el filamento cuando el motor gira.
 3. Rodamiento de presión: Se encarga de presionar el filamento contra el engranaje de tracción para garantizar de que se mueva continuamente.
 4. Guía de filamento: Es un tubo que hace de guía para el filamento, que va desde el motor hasta el hostend.
 5. Hostend: Consiste en un tubo que calienta el hilo de filamento a la temperatura indicada hasta derretirlo para que salga por la boquilla.
 6. Sensor de temperatura: Controla la temperatura de extrusión.
 7. Boquilla de salida: Es el orificio de salida del filamento y el que marcará el diámetro de la extrusión.

Encapsulación y diseño de un prototipo de sensor capacitivo que mide la frecuencia respiratoria

Existen dos tipos de extrusión, que son los siguientes (61):

- **Directa:** Todas sus partes del extrusor están unidas como si fueran una sola pieza. El filamento puede pasar directamente desde el engranaje de tracción hasta el *hot-end*. En este tipo de extrusores, la probabilidad de atascos es menor, es más fácil cambiar el filamento y además permite imprimir todo tipo de materiales, incluido el flexible. En este caso, la velocidad de impresión es más lenta.
- **Browden:** En este caso, la rueda dentada está separada del *hot-end* y están unidas por un tubo. La velocidad de impresión es más rápida y con buena calidad, pero no puede imprimir materiales flexibles, ya que es difícil controlar la tensión del hilo dentro del tubo.

La impresora que hemos utilizado es **Creality Ender 3 Pro**. Vamos a hablar un poco de ella y de sus características (8).

Es una versión mejorada de la *Ender 3*. Incorpora una nueva fuente de alimentación, que satisface todas las necesidades para un calentamiento más rápido y óptimo. Esta fuente de alimentación está protegida contra picos de voltaje y cortes de energía, de tal modo que, si se sufre un corte de energía, se puede reanudar la impresión desde la última capa sin perder material. Los nuevos componentes permiten que la *Ender 3 pro* imprima con más estabilidad.

El avanzado diseño del extrusor reduce el riesgo de obstrucciones y evita que la extrusión sea desigual. Tiene una alta precisión con las ruedas que incluyen cojinetes de bolas fabricadas con termoplástico, que garantizan mayor rigidez, baja fricción y mejor estabilidad. Todo esto ayuda a tener niveles de ruido muy bajos.

Comparando con la *Ender 3*, también tiene una cama magnética flexible y extraíble. La plataforma texturizada permite una adhesión más sencilla y eficaz de cualquier tipo de filamentos sin necesidad de cintas o fijadores.

Junto a la fuente de alimentación, la cama permite llegar a temperatura de 110° en solo 5 minutos, lo que nos permite imprimir filamentos más técnicos.

Las principales características de esta impresora 3D son:

- Tipos de plástico: PLA ABS, PETG
- Tipo de extrusión: Browden
- Base calefactable
- Diámetro filamento: 1,75 mm.
- Diámetro boquilla: 0.4 mm.
- Espesor de capa: 0.1 – 0.35 mm.
- Temperatura máxima extrusor: 255 °C.
- Temperatura máxima de cama: 110 °C.
- Formatos modelo 3D: STL, OBJ, G-Code
- Conectividad: Tarjeta SD y cable USB.
- Dimensiones de la impresora 3D: 440 x 410 x 465 mm.
- Entrada: AC 100-265V 50-60Hz.
- Salida DC 24V 15A 360W.

Encapsulación y diseño de un prototipo de sensor capacitivo que mide la frecuencia respiratoria



Ilustración 25. Impresora 3D, Creality Ender 3 Pro (8).

Encapsulación y diseño de un prototipo de sensor capacitivo que mide la frecuencia respiratoria

5.6. Arduino Uno (50)

Dentro de las posibles placas Arduino, vamos a utilizar la placa Arduino Uno. Esta placa está basada en el microcontrolador ATmega325P de 8 bits. Esta placa tiene 14 pines digitales, que se pueden usar tanto de entrada como de salida (de los cuales 6 pueden proporcionar salida *PWM*), 6 entradas analógicas, un oscilador de cristal de 16MHz, un puerto USB, un botón de *Reset*, un conector de alimentación y un encabezado ICSP (ver Tabla 1 y Figura 26).

Summary	
Microcontroller	ATmega328
Operating Voltage	5V
Input Voltage (recommended)	7-12V
Input Voltage (limits)	6-20V
Digital I/O Pins	14 (of which 6 provide PWM output)
Analog Input Pins	6
DC Current per I/O Pin	40 mA
DC Current for 3.3V Pin	50 mA
Flash Memory	32 KB of which 0.5 KB used by bootloader
SRAM	2 KB
EEPROM	1 KB
Clock Speed	16 MHz
the board	

Tabla 1. ESPECIFICACIONES DE ARDUINO UNO (50)

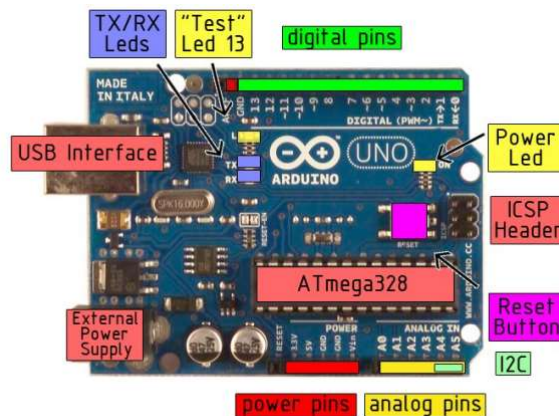


Ilustración 26. Arduino Uno (50)

La comunicación y la transferencia de datos se hace a través del conector USB, mediante un convertidor USB-serie. El Arduino se puede alimentar a través del puerto USB o a través de una fuente externa. El rango de alimentación esta entre 7V y 12V, pero el voltaje de funcionamiento es de 5V normalmente.

Encapsulación y diseño de un prototipo de sensor capacitivo que mide la frecuencia respiratoria

5.7. Otros elementos

- Condensador casero:
 - Papel de aluminio
 - Papel transparente de cocina
 - Celo
 - Cinta de cobre adhesiva: Son las placas del sensor capacitivo. En su interior albergarán el dieléctrico hecho con goma eva.



Ilustración 27. Cinta de cobre adhesiva (64)

- Goma eva: Se ha utilizado para realizar el sensor. este material ha sido usado como dieléctrico del sensor capacitivo.



Ilustración 28. Goma eva (65)

- Resistencias: $R_1=10K\Omega$ y $R_2=100K\Omega$



Ilustración 29. Resistencia 10k (66)



Ilustración 30. Resistencia 100k (66)

- Condensadores: $C=1x\ 1nF$ y $1x\ 0.01\mu F$



Ilustración 31. Condesador 1nF (67)



Ilustración 32. Condensador 0.01uF (68)

Encapsulación y diseño de un prototipo de sensor capacitivo que mide la frecuencia respiratoria

- Circuito integrado LM555



Ilustración 33. Circuito Integrado LM555 (57)

- **Pantalla LCD 16x2** (pantalla de cristal líquido): Consta de 2 líneas de escritura, admitiendo cada una de ellas hasta un máximo de 16 caracteres. Esta pantalla LCD puede operarse bien con 8 bits o con 4 bits (longitud de caracteres). La diferencia es que con la operación de 4 bits se ahorran pines en el microcontrolador (69). En la Figura 34 se muestran las especificaciones de la pantalla y la Figura 35 presenta una imagen de la misma.

Pin	Symbol	External connection	Function
1	V _{SS}	Power supply	Signal ground for LCM (GND)
2	V _{DD}		Power supply for logic (+5V) for LCM
3	V ₀		Contrast adjust
4	RS	MPU	Register select signal
5	R/W	MPU	Read/write select signal
6	E	MPU	Operation (data read/write) enable signal
7~10	DB0-DB3	MPU	Four low order bi-directional three-state data bus lines. Used for data transfer between the MPU and the LCM. These four are not used during 4-bit operation.
11~14	DB4-DB7	MPU	Four high order bi-directional three-state data bus lines. Used for data transfer between the MPU
15	LED+	LED BKL power supply	Power supply for BKL "A" (5V)
16	LED-		Power supply for BKL "K" (GND)

Ilustración 34. Especificaciones técnicas de la pantalla LCD 16x2 (69)



Ilustración 35. Pantalla LCD 16x2 (69)

- Potenciómetro: para regular la iluminación de la LCD



Ilustración 36. Potenciómetro (70)

- Borneras



Ilustración 37. Borneras (71)

Encapsulación y diseño de un prototipo de sensor capacitivo que mide la frecuencia respiratoria

- Pines



Ilustración 38. Pines (68)

- Pila: para dar alimentación



Ilustración 39. Pila 9V (72)

- Conector pila con Arduino



Ilustración 40. conector pila-arduino (73)

Encapsulación y diseño de un prototipo de sensor capacitivo que mide la frecuencia respiratoria

Encapsulación y diseño de un prototipo de sensor capacitivo que mide la frecuencia respiratoria

6. Desarrollo del proyecto

En esta sección vamos a explicar, paso a paso, lo que se ha realizado para conseguir el prototipo final.

6.1. Fase de producción

En primer lugar, se ha diseñado el sensor de dos maneras diferentes, tal y como lo hizo el compañero en su trabajo de fin de grado.

- El primer tipo de sensor se ha hecho mediante goma eva y cinta de cobre adhesiva de tal manera que la cinta son los conductores y la goma eva es el dieléctrico.



Ilustración 41.Sensor 1

- El segundo tipo de diseño es un condensador casero de hoja doblada, formado por papel de aluminio como conductor y papel transparente de cocina como dieléctrico

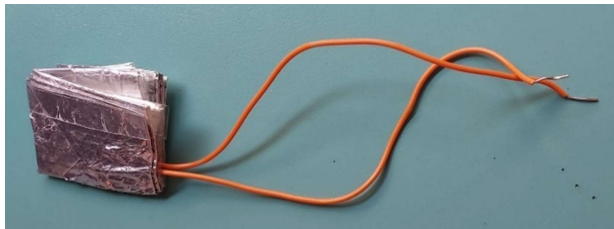


Ilustración 42.Sensor 2

Basándonos en las comprobaciones que se realizaron el año pasado, hemos escogido el **condensador casero de hojas dobladas** ya que, al probarlo con personas, varía más que el formado por goma eva y cinta de cobre.

En segundo lugar, se ha montado el circuito en una placa protoboard, donde se ha comprobado que el funcionamiento fuese el correcto.

Encapsulación y diseño de un prototipo de sensor capacitivo que mide la frecuencia respiratoria

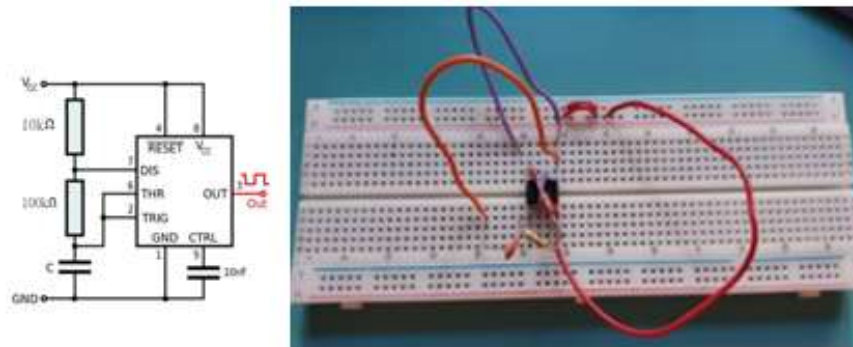


Ilustración 43. Circuito final en la protoboard

Medimos con un osciloscopio a la salida del circuito LM555 y obtenemos la siguiente señal en la cual vemos que al presionar el sensor que hemos diseñado, varía la frecuencia de salida.

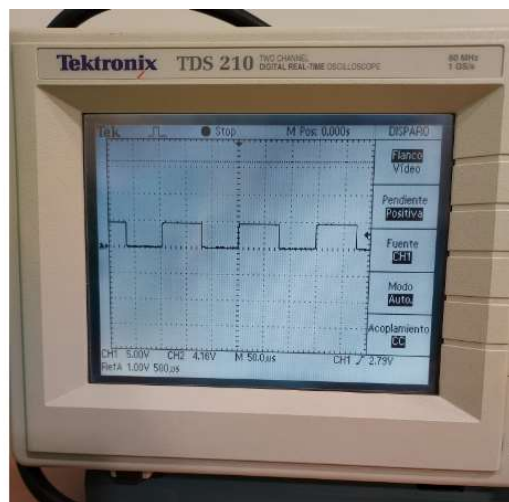


Ilustración 44. Onda de salida del LM555

Después de realizar estas comprobaciones, hemos colocado el Arduino Uno en el circuito para medir de manera automática la frecuencia, de manera que se muestre la frecuencia en la LCD implantada.

Seguido a esto como va a ser un prototipo inalámbrico, se han **diseñado varias placas PCB**, una del circuito que hemos montado anteriormente en la placa protoboard, y otra con una pantalla LCD, la cual va a hacer que consiga ser inalámbrico.

Una vez diseñadas las dos placas mediante el programa anteriormente nombrado "EAGLE", se procedió a imprimirlas en la Universidad y soldar los componentes mediante una soldadora de estaño, como la utilizada en prácticas de la asignatura diseño electrónico.

Encapsulación y diseño de un prototipo de sensor capacitivo que mide la frecuencia respiratoria

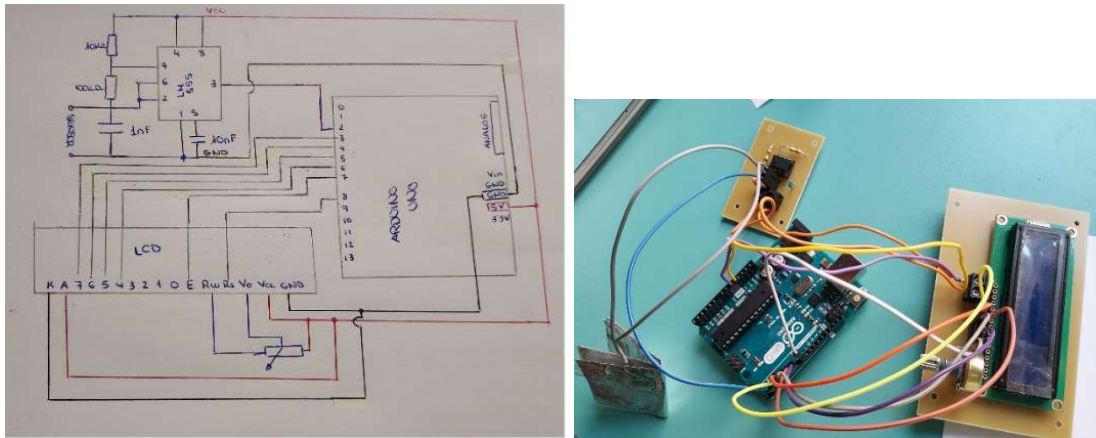


Ilustración 45. Esquema y montaje del circuito completo

Por último, se diseñó el **encapsulado** mediante el programa Inventor, y se imprimió con la impresora 3D descrita anteriormente usando el software Ultimate Cura (que sirve para crear el fichero g-code, y poder ser leído por la impresora 3D).

Encapsulación y diseño de un prototipo de sensor capacitivo que mide la frecuencia respiratoria

6.2. Placas impresas

Las placas de circuito impreso que se han realizado para ubicar los componentes eléctricos se muestran en esta sección. Las figuras 44 y 45 representan el esquemático y diseño de una de las placas compuestas por el circuito integrado LM555.

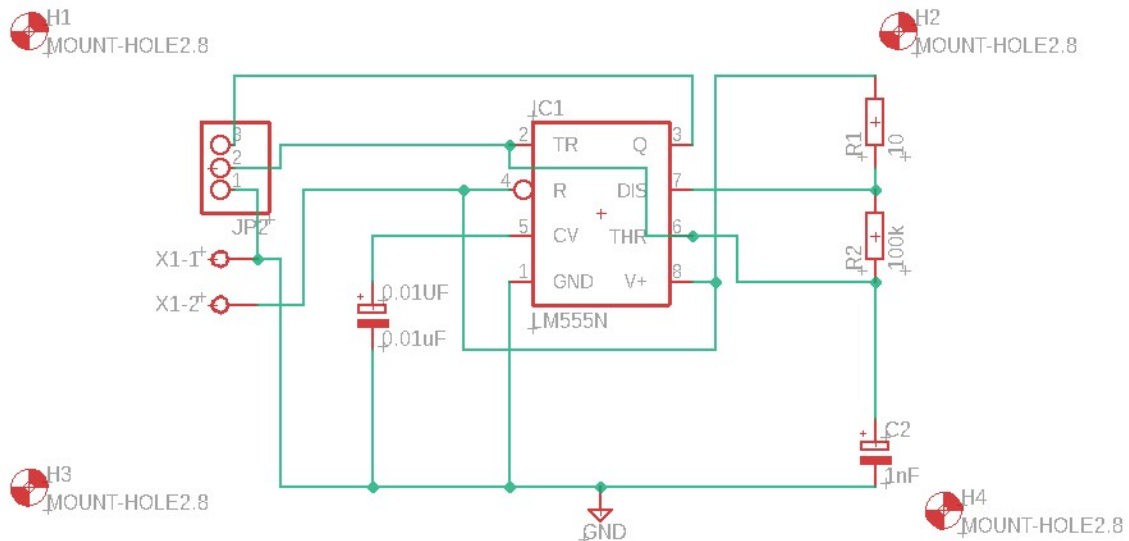


Ilustración 46. Esquemático Circuito LM555

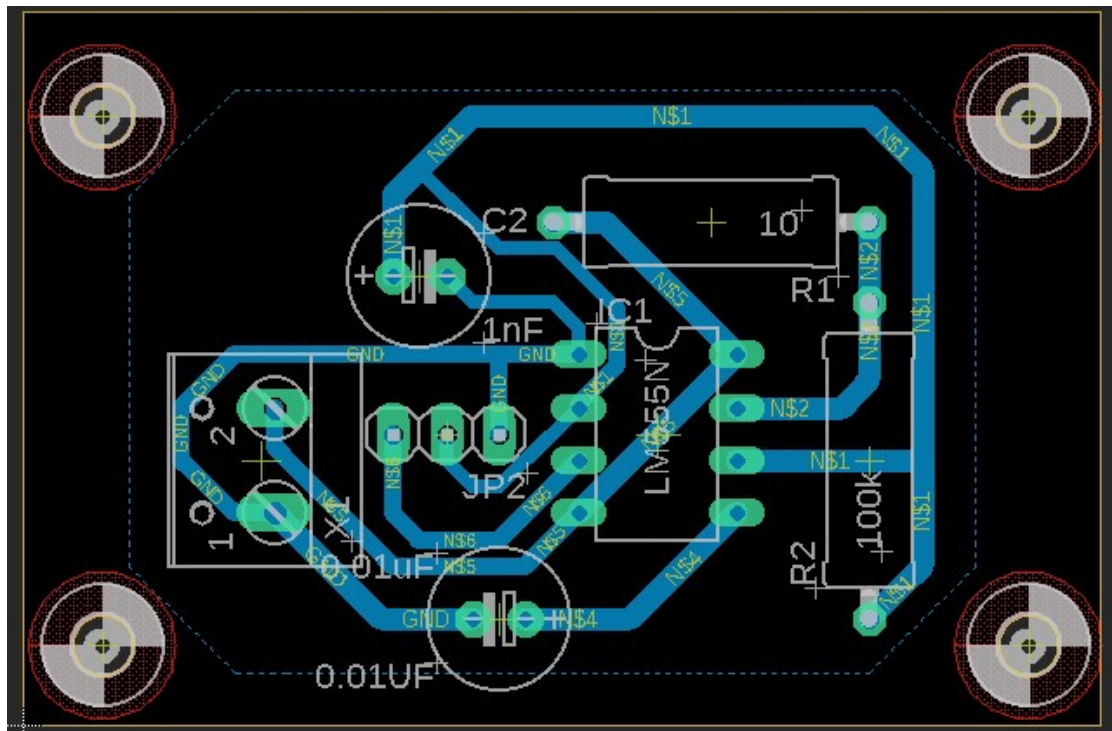


Ilustración 47. Placa con el circuito LM555

Encapsulación y diseño de un prototipo de sensor capacitivo que mide la frecuencia respiratoria

Las figuras 46 y 47 representan el esquemático y diseño de una de las placas que incluye un circuito con una LCD.

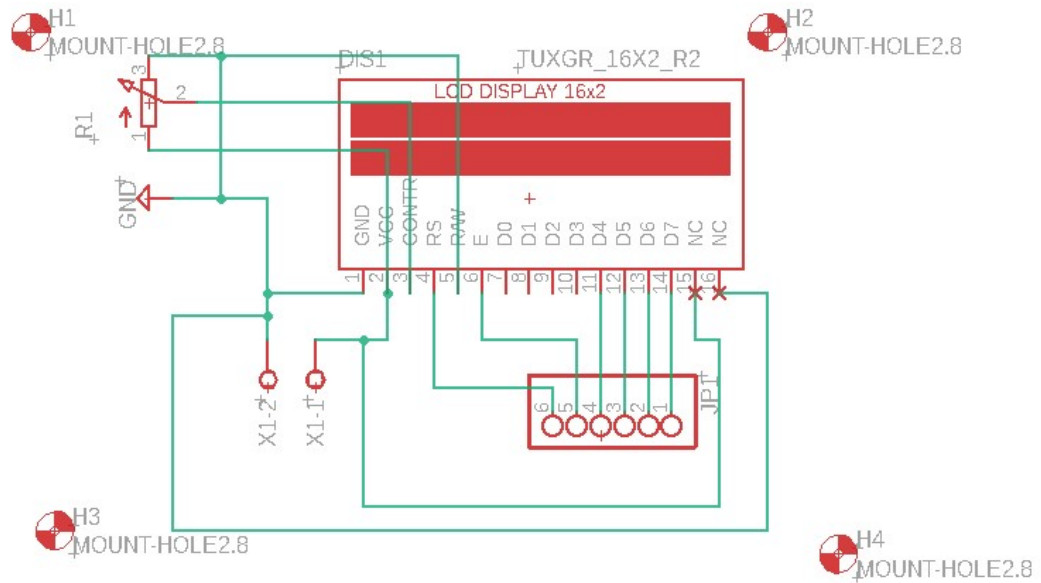


Ilustración 48. Esquemático circuito LCD

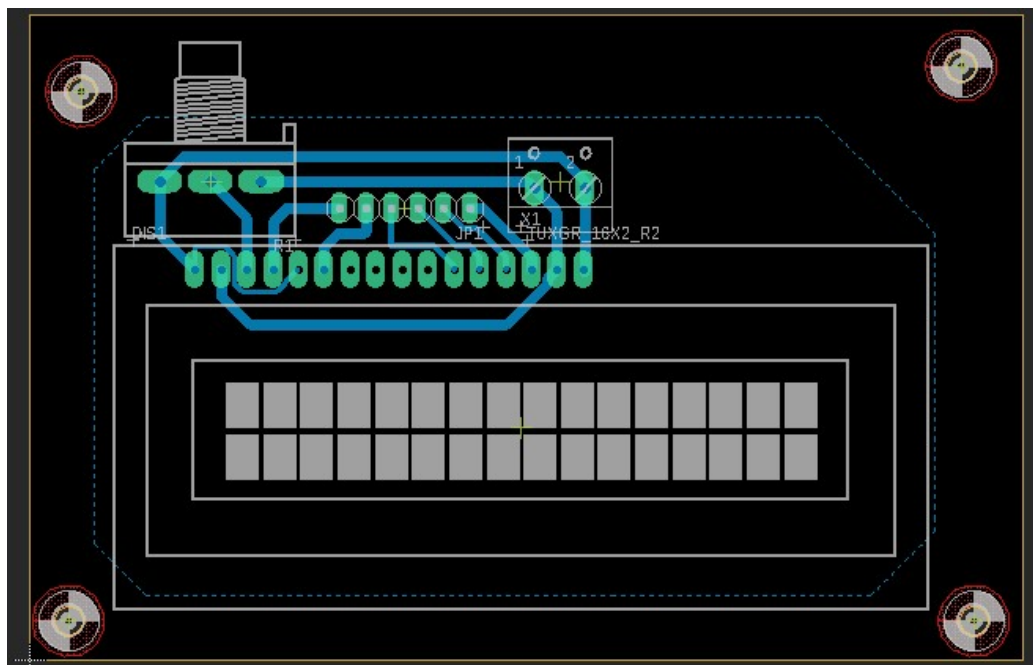


Ilustración 49. Placa circuito LCD

Encapsulación y diseño de un prototipo de sensor capacitivo que mide la frecuencia respiratoria

6.3. Encapsulado

Para el **encapsulado** se han diseñado las diferentes piezas que lo van a formar, cuyos planos están adjuntos en los anexos.

Estas piezas han sido diseñadas con *Inventor*, y tomando medidas reales para abarcar todas las partes del circuito que componen el correcto funcionamiento del sensor. Una vez diseñadas se han guardado con la extensión .STL , para posteriormente abrir esos archivos con el software *Ultimate Cura* , en el cual elegimos la impresora que vamos a utilizar, en este caso *Creality Ender 3 Pro*. Se han ajustado los parámetros necesarios para una buena impresión y hemos guardado nuevamente los archivos en g-code y en una tarjeta SD para poder introducir dicha tarjeta en la impresora y que el archivo pueda ser leído y procesado por la impresora, dando como resultado las piezas del encapsulado impresas.

El encapsulado está dividido en tres piezas. La parte inferior de la caja en la cual estará atornillado el Arduino, la placa compuesta por el LM555. En esta parte también se han diseñado unas rejillas para evitar el calentamiento de los componentes y el agujero por el cual va a introducirse el vástago que va a hacer la función de un botón para pulsar el sensor. La pila también ira en esta parte de la caja. Esta parte tiene exteriormente dos enganches en la cual ira una goma elástica para poder ponernos este dispositivo alrededor del pecho y realizar las medidas de la frecuencia respiratoria (Figura 50).



Ilustración 50. Parte inferior del encapsulado

Encapsulación y diseño de un prototipo de sensor capacitivo que mide la frecuencia respiratoria

Por otro lado, tenemos una caja de menos tamaño en la cual va a ir introducido el sensor, que a su vez se componen de dos partes, las cuales las mostramos en la siguiente imagen.

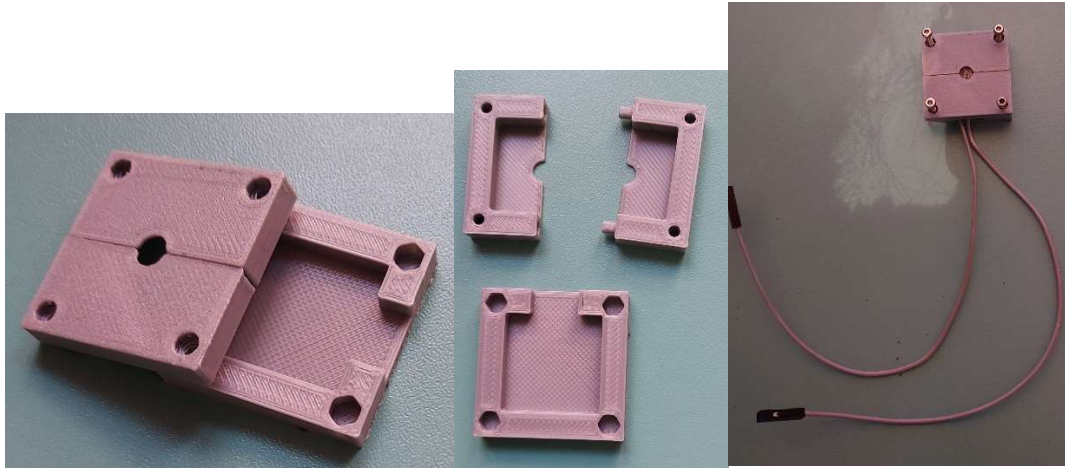


Ilustración 51. Caja sensor

Y por último la parte superior de la caja principal, en la cual se encuentra atornillada la placa de la LCD, y por lo tanto tiene una ranura en la que ira anclada la LCD, para ser visualizada desde fuera de la caja, también dentro de esta parte ira anclada la caja de menor tamaño con el sensor.

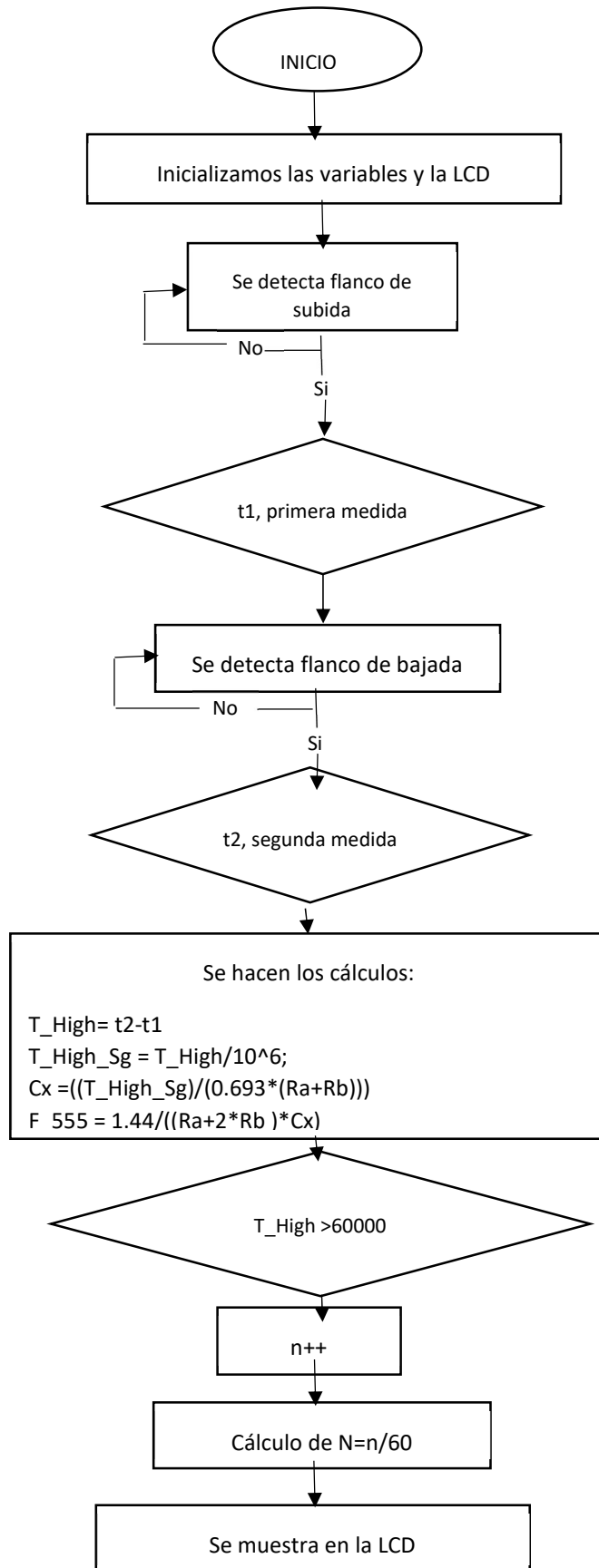


Ilustración 52. Parte superior del encapsulado

Encapsulación y diseño de un prototipo de sensor capacitivo que mide la frecuencia respiratoria

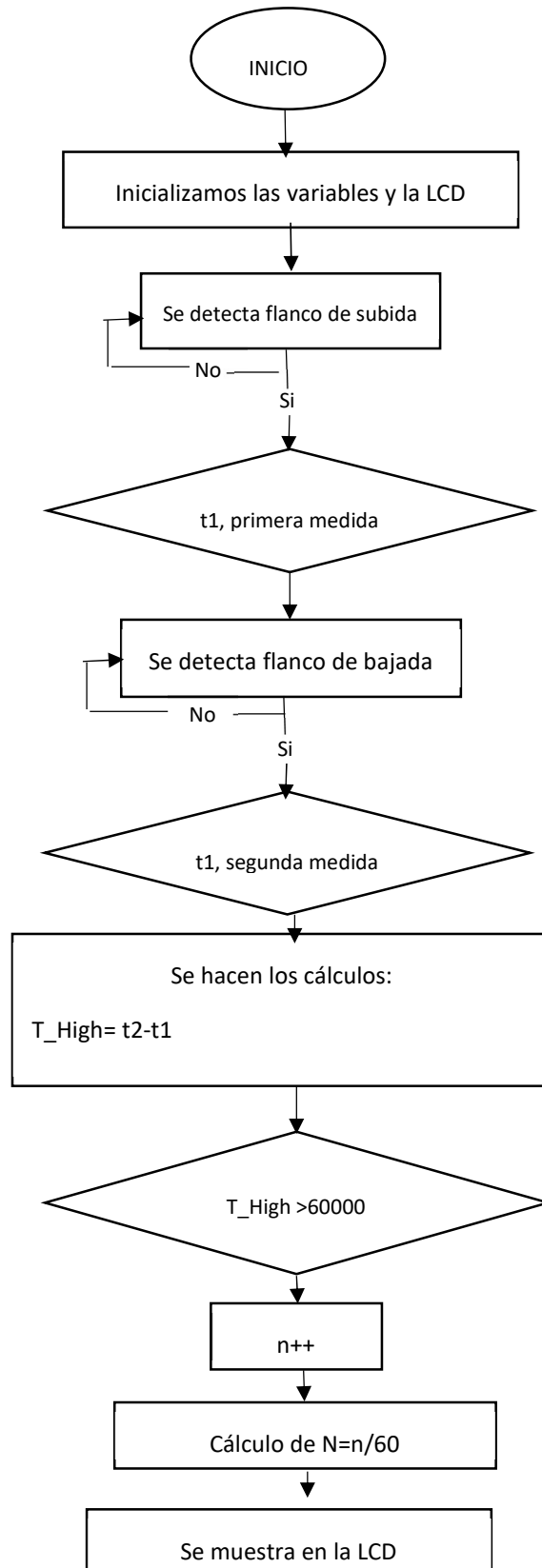
6.4. Código Arduino

En esta sección vamos a explicar el **programa** de Arduino que hemos utilizado para medir la frecuencia respiratoria. En primer lugar, presentamos el diagrama de flujo del programa desarrollado.



Encapsulación y diseño de un prototipo de sensor capacitivo que mide la frecuencia respiratoria

Realizando las pruebas de laboratorio correspondientes para medir la frecuencia respiratoria, nos damos cuenta de que, para realizar las medidas, lo más inteligente sería calcularla con el T_High , por lo tanto **reduciríamos las operaciones y el tiempo de cómputo**. Por lo tanto, el diagrama de flujo sería el siguiente:



Encapsulación y diseño de un prototipo de sensor capacitivo que mide la frecuencia respiratoria

6.5. Comprobaciones realizadas

El Doctor Álex Velasco publicó esta tabla en su perfil de Facebook, en la que se determina cual es el rango de frecuencia respiratoria en las personas según la edad.

Frecuencia respiratoria	
Valores Promedios de la Frecuencia Respiratoria normal según la edad	
EDAD	Respiraciones por minuto
Neonato	30-50
0-5 meses	25-45
6-12 meses	20-40
1-3 años	20-35
3-5 años	20-30
6-12 años	15-30
13-18 años	14-20
Adultos	12-20
Vejez	12-16

Las cifras de la frecuencia respiratoria son muy variables se deben contemplar las variaciones fisiológicas como el ejercicio, el estrés, el ambiente, ascenso a grandes alturas, medicamentos que disminuyan la frecuencia respiratoria, la edad, la fiebre (se produce un aumento de 4 a 6 respiraciones por cada °C de ascenso de la temperatura), enfermedades y otras condiciones médicas.

Alteraciones de la Frecuencia Respiratoria

TAQUIPNEA	Aumento de la frecuencia respiratoria	> 20 respiraciones por minuto
EUPNEA	Respiración normal y fácil	12 - 20 respiraciones por minuto
BRADIPNEA	Disminución de la frecuencia respiratoria	< 12 respiraciones por minuto
APNEA	Cese del flujo de aire de al menos 20 segundos de duración	

Respiración rápida Es por lo general, el primer signo de dificultad respiratoria en lactantes y niños pequeños

Si el niño tiene	El niño tiene respiración rápida si usted cuenta
Menos de 2 meses	60 respiraciones o mas por minuto
2 a 11 meses	50 respiraciones o mas por minuto
12 meses a < 5 años	40 respiraciones o mas por minuto

Tabla 2. FRECUENCIA RESPIRATORIA POR EDADES (74)

En principio se querían realizar unas medidas con personas de diferentes edades mediante el movimiento del pecho durante la respiración para validar el sensor. Debido a inestabilidades con el condensador casero, se ha optado por realizar unas pruebas en el laboratorio pulsando el sensor al compás de las respiraciones típicas. Se han testado diversos ritmos respiratorios durante un minuto cada prueba. Cada prueba se ha realizado tres veces y se ha sacado la media (Tabla 3).

Estas medidas han sido tomadas desde el propio programa Arduino, visualizándolo en la ventana de monitor serie.

	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Media	Frecuencia respiratoria teorica	Edad (años)
Prueba 1	21	16	16	18	12---20	23
Prueba 2	17	22	24	21	12---20	30
Prueba 3	15	12	18	15	12---20	26
Prueba 4	19	25	19	21	15---30	7
Prueba 5	31	35	32	33	12---20	23
Prueba 6	36	33	31	33	12---20	30

Tabla 3.PRUEBAS REALIZADAS EN EL LABORATORIO

Encapsulación y diseño de un prototipo de sensor capacitivo que mide la frecuencia respiratoria

Encapsulación y diseño de un prototipo de sensor capacitivo que mide la frecuencia respiratoria

7. Lecciones aprendidas, conclusiones y futuras mejoras

7.1. Fallos que han surgido y su resolución

Durante el desarrollo de este proyecto han surgido algunos errores, a los que he tenido que hacer frente.

1. **Fabricación del condensador casero:** Este fue uno de los primeros errores que surgió. Estuvo motivado porque resultaba muy complicado hacer un sensor de este tipo que funcionase correctamente. Después de repetirlo unas cuantas veces, se hizo uno que funcionaba más correctamente, a pesar de que causa rebotes en las mediciones y es inexacto.
2. **Cambio de componentes:** En un principio se deseaba realizar un dispositivo totalmente inalámbrico utilizando baterías recargables. Al no haber utilizado esos componentes nunca se optó por utilizar componentes que sí que se habían utilizado durante el Grado de Ingeniería Electrónica y Automática.
3. **Fallos de impresión y tamaño de las piezas:** Puesto que nunca se había utilizado una impresora 3D, resultó complicado tomar las medidas de las piezas correctamente, por lo que hubo que realizar más de una impresión de una misma pieza. En cuanto a los fallos de impresión, estos resultaron en la parte final del desarrollo del proyecto. Estos fallos fueron varios. El más importante ocurrió cuando llevaba la mitad de la pieza impresa, la impresora se paró por lo que hubo que volver a empezar y desechar la pieza que estaba a mitad, con el retraso en el avance en el proyecto. Para solucionar esto, se desmontó la impresora y se limpió correctamente para eliminar atascos. Finalmente se consiguió ejecutar la impresión de las piezas correctamente.
4. **Error en la LCD:** Cuando ya se había conseguido el funcionamiento correcto de todo el circuito, la LCD dejó de funcionar, se saturó y tras varias comprobaciones por si se había fundido se averiguó que lo que sucedió era que la LCD se había saturado, por lo que utilizando el comando `0x3f`, dentro del comando `LiquidCrystal lcd(8, 7, 6, 5, 4, 3)`; la LCD se reseteó y ya volvía a mostrar los datos correctamente.

Encapsulación y diseño de un prototipo de sensor capacitivo que mide la frecuencia respiratoria

7.2. Futuras mejoras

Como posibles mejoras, en primer lugar, en vez de usar como sensor un condensador capacitivo y, además, casero, sustituirlo por otro tipo de condensador más fiable y que al hacer las medidas no tenga tantos rebotes, para obtener medidas más estables.

Por otro lado, como mejora también se podría cambiar el Arduino Uno por un Arduino Nano, ya que a la hora de hacer el encapsulado se reducirían muchísimo el tamaño. Si se quisiera hacer bastante comprimido todo (placas, encapsulado, etc..), aparte de intercambiar el Arduino por uno más pequeño, se podrían utilizar componentes de menores tamaños a los utilizados en este proyecto.

También es necesario realizar una validación real del prototipo, que no ha podido realizarse por la inestabilidad del sensor.

7.3. Conclusiones

Como primera conclusión, este proyecto a nivel personal me ha ayudado a conocer ámbitos de la Ingeniería que no conocía, como el uso de las impresoras 3D ya que son una tecnología bastante nueva y que tiene mucha importancia a día de hoy, y que ya que se utiliza en diversos ámbitos, ya sea para la fabricación de juguetes, o para el ámbito de la medicina, por ejemplo, para diseñar prótesis que puedan mejorar la vida de la gente. Por lo tanto, me ha gustado conocer y familiarizarme con esta nueva tecnología.

La parte que más me ha costado sacar adelante ha sido la parte de programación, ya que cuando conseguía hacer funcionar el código, fallaba el sensor (que es extremadamente inestable). Me ha llevado un tiempo llegar a la conclusión de qué estaba funcionando mal para llegar a tomar las medidas correctamente.

Por otro lado, y debido a lo que he ido viendo en la realización de este proyecto, yo no recomendaría la utilización de un sensor capacitivo de este tipo para medir respiración, ya que es muy difícil tomar medidas correctas para el cálculo de la frecuencia respiratoria y, además, la manera de pulsar este sensor tiene que ser con mucho cuidado ya que si se presiona demasiado se satura y no mide (creemos que por un error en el condensador colocado en paralelo). Por lo tanto, no recomiendo utilizar este prototipo como medición de frecuencia respiratoria con pacientes debido a que no es nada fiable y si un paciente tuviese algún problema quizás no se detectase.

El prototipo obtenido no satisface los requerimientos necesarios para medir respiración de manera estable, fundamentalmente por las carencias del sensor casero. Aun así, y como conclusión general, se puede decir que ha sido un proyecto muy enriquecedor, ya que, como he dicho anteriormente, se han adquirido nuevos e interesantes conocimientos, tanto en el diseño de piezas utilizando un software profesional, como en el campo de la biomedicina.

8. Bibliografía

1. Laboratorio de Calidad, Escuela Universitaria Politécnica de Teruel. EduQTech. [En línea] <http://eduqtech.unizar.es/>.
2. Ibañez, Marcos. *Diseño y Desarrollo de un sensor capacitivo para medir la frecuencia respiratoria*. 2020.
3. Wikipedia. Wikipedia_Sensor capacitivo. [En línea] 2021. [Citado el: 18 de 11 de 2021.] https://es.wikipedia.org/wiki/Sensor_capacitivo.
4. Circuito Impreso, Wikipedia. [En línea] 2021.
5. Wikipedia. Wikipedia_Impresora3D. [En línea] 2021. [Citado el: 18 de 11 de 2021.] https://es.wikipedia.org/wiki/Impresora_3D.
6. Autodesk. EcuRed, Eagle. [En línea] 2020. [Citado el: 18 de 11 de 2021.] https://www.ecured.cu/Eagle_software.
7. Wikipedia. Wikipedia_Autodesk_Inventor. [En línea] 2021. [Citado el: 18 de 11 de 2021.] https://es.wikipedia.org/wiki/Autodesk_Inventor.
8. Creality. Creality, Ender 3 Pro. [En línea] <https://www.creality.com/es/goods-detail/ender-3-pro-3d-printer>.
9. instituo nacional del cancer. [En línea] [Citado el: 18 de 11 de 2021.] <https://www.cancer.gov/espanol/publicaciones/diccionarios/diccionario-cancer/def/enfermedad-respiratoria>.
10. InfoSalud. InfoSalud_Neumología. [En línea] 2021. [Citado el: 18 de 11 de 2021.] <https://www.infosalus.com/enfermedades/aparato-respiratorio/>.
11. TopDoctors. TopDoctors_Asma. [En línea] 2021. [Citado el: 18 de 11 de 2021.] <https://www.topdoctors.es/diccionario-medico/asma>.
12. enfermedades, Centros para el control y la prevencion de. CDC_Asthma. [En línea] 2019. [Citado el: 18 de 11 de 2021.] <https://www.cdc.gov/asthma/es/faqs.htm>.
13. Tejin, Esteve. Esteve Tejin_Enfermedades del aparato respiratorio mas frecuentes. [En línea] 2021. [Citado el: 18 de 11 de 2021.] <https://www.esteveteijin.com/cuales-son-las-enfermedades-respiratorias-mas-frecuentes/>.
14. wikipedia. Enfermedades del aparato respiratorio. [En línea] 2021. [Citado el: 18 de 11 de 2021.] https://es.wikipedia.org/wiki/Enfermedades_del_aparato_respiratorio.
15. MedlinePlus. MedlinePlus_Apnea del Sueño. [En línea] 2021. [Citado el: 18 de 11 de 2021.] <https://medlineplus.gov/spanish/sleepapnea.html>.
16. Jordi Torralbas Ortega, Marisol Jiménez Molina. (pdf)CAPITULO 4: LAS CONSTANTES VITALES, MONITORIZACIÓN BÁSICA. *Tratado de Enfermería en Cuidados Críticos y Neonatales*.

Encapsulación y diseño de un prototipo de sensor capacitivo que mide la frecuencia respiratoria

17. Wikipedia. Wikipedia_Frecuencia Respiratoria. [En línea] [Citado el: 18 de 11 de 2021.] https://es.wikipedia.org/wiki/Frecuencia_respiratoria.
18. ajibarra. Enfermeria en Cuidados Criticos Pediatricos y Neonatales, Monitorizacion de la frecuencia respiratoria. [En línea] 2018. <https://ajibarra.org/D/post/monitorizacionrespiratoria/>.
19. (PDF)*Detección de la frecuencia respiratoria mediante procesado digital del ECG*. Josep Colomines Balague, Xavier Rosell, Ramon Pallas-Areny. III Simposium Internacional de Ingeniería Biomédica.
20. *Detección de frecuencia respiratoria mediante un Sistema de medida*. E. Sifuentes, J. Cota-Ruiz, R. González-Landaeta. 2016, Revista Mexicana de Ingenieria Biomedica .Vol.37.núm.2, págs. 91-99.
21. *A Contact-Free Respiration Monitor for Smart Bed and Ambulatory Monitoring Applications*. Adam Hart*, Kevin Tallevi, David Wickland, Robert E. Kearney, and Joseph A. Cafazzo. 2010. IEEE 2010 32nd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC 2010) - Buenos Aires (2010.08.31-2010.09.4)].
22. Solution, Philips Engineering. CMUT avance de ultrasonido tecnología_Transductores ultrasónicos capacitivos micromecanizados. [En línea] 2021. [Citado el: 18 de 11 de 2021.] <https://www.engineeringsolutions.philips.com/looking-expertise/mems-micro-devices/mems-micro-devices-applications/capacitive-micromachined-ultrasonic-transducers-cmut/>.
23. *Archivos de Bronconeumología, Espirometría, Vol.49.Núm,9*. Francisco García-Río, Myriam Calle, Felipe Burgos, Pere Casan, Félix del Campo, Juan B. Galdiz, Jordi Giner, Nicolás González-Mangado, Francisco Ortega, Luis Puente Maestu. 2013, págs. 388-401.
24. KidsHealth_ Espirometría. [En línea] 2015. [Citado el: 18 de 11 de 2021.] <https://kidshealth.org/es/parents/spirometry.html#:~:text=La%20espirometr%C3%ADa%20es%20un%20estudio,velocidad%20del%20flujo%20de%20aire>.
25. GeMA_Espirometría simple. [En línea] 2021. [Citado el: 18 de 11 de 2021.] [https://www.gemasl.com/es/pruebas-diagnosticas/alergologia/espirometria-simple/#:~:text=La%20espirometr%C3%ADa%20simple,capacidades%20\(suma%20de%20vol%C3%BAmenes\)](https://www.gemasl.com/es/pruebas-diagnosticas/alergologia/espirometria-simple/#:~:text=La%20espirometr%C3%ADa%20simple,capacidades%20(suma%20de%20vol%C3%BAmenes)).
26. QuironSalud. [En línea] [Citado el: 18 de 11 de 2021.] <https://www.quironsalud.es/es/comunicacion/notas-prensa/14-octubre-dia-mundial-espirometria>.
27. Herinstitut Berlin_ Pletismografía corporal. [En línea] 2021. [Citado el: 18 de 11 de 2021.] <https://www.herzinstitut-herzpraxis.de/es/servicios-prestados/neumologia/pletismografia-corporal>.
28. Wikipedia_Pletismografía. [En línea] 2021. [Citado el: 18 de 11 de 2021.] <https://es.wikipedia.org/wiki/Pletismograf%C3%ADa>.

Encapsulación y diseño de un prototipo de sensor capacitivo que mide la frecuencia respiratoria

29. *Pruebas de función respiratoria, ¿cuál y a quién?* Claudia Vargas-Domínguez, Laura Gochicoa-Range I, Mónica Velázquez-Uncal, Roberto Mejía-Alfaro, Juan Carlos Vázquez-García, Rogelio Pérez-Padilla, Luis Torre-Bouscoulet. 2011, Neumol Cir Torax, Vol.70-Núm.2, págs. 101-117.
30. *Pletismografía corporal: recomendaciones y procedimiento.* Selene Guerrero-Zúñiga, Juan Carlos Vázquez-García, Laura Gochicoa-Rangel, Silvia Cid-Juárez, Rosaura Benítez-Pérez, Rodrigo del-Río-Hidalgo, Luis Torre-Bouscoulet. 4, 2016, Neumol Cir Torax, Vol. 75, págs. 296-307.
31. Hospital Hispania, S.L._Equipo de función pulmonar mastercreen combi. [En línea] [Citado el: 18 de 11 de 2021.] https://www.hospital-hispania.com/opencms/opencms/division/respiratorio/index.html?equipamiento=/_categorias/equipamiento/equipamiento-cardio-respiratorio/pletismografos/.
32. *Utilidad de la nariz electrónica para el diagnóstico de enfermedades de la vía respiratoria.* José Luis Valeraa, Bernat Togores, Borja G. Cosío. 6, 2012, Archivos de Bronconeumología, Vol. 48.
33. *GMM and LDA Applied to Lung Diseases Detection (GMM y LDA aplicado a la detección de enfermedades pulmonares).* P. Mayorga Ortiz, C. Druzgalski, M.A. Criollo Arellano, O.H. González Arriaga. 2, 2013, Revista Mexicana de Ingeniería Biomédica, Vol. 34.
34. Pardell, Javier. Apuntes de Electromedicina_ Instrumentación Biomédica. [En línea] 2021. [Citado el: 18 de 11 de 2021.] <https://www.pardell.es/instrumentacion-biomedica.html>.
35. Wikipedia. Wikipedia_Sensor. [En línea] 2021. [Citado el: 18 de 11 de 2021.] <https://es.wikipedia.org/wiki/Sensor>.
36. J.Ortega, Edwin. Clasificación de Sensores. 2014.
37. Enrique Mandado Pérez, Antonio Murillo Roldan, Camilo Quintáns Graña. Sensores y Acondicionadores. Tema 6. SENSORES CAPACITIVOS.
38. José Antonio, E. García Álvarez. Asi Funciona_Capacitor o condensador . [En línea] 2015. [Citado el: 18 de 11 de 2021.] http://www.asifunciona.com/electrotecnia/ke_capacitor/ke_capacitor_3.htm.
39. Marani, César Juan. PDF. Sensores Capacitivos. *Escuela de Educación Secundaria Modalidad Técnico Profesional "San José"*.
40. Wikipedia. Wikipedia_Sensor Capacitivo. [En línea] 2021. [Citado el: 18 de 11 de 2021.] https://es.wikipedia.org/wiki/Sensor_capacitivo.
41. *Electrodo Capacitivo de Alta Sensibilidad para la detección de Biopotenciales Eléctricos.* J.L. Verela-Benitez, J.O. Rivera-Delgado, J.H. Espina Hernández, J.M. de la Rosa Vázquez. 2, Mayo-Agosto de 2015, Revista Mexica de Ingeniería Biomédica , Vol. 36, págs. 131-142.
42. SEC.UIB, Apuntes. (PDF) Tema 6. Osciladores.
43. Wiipedia. Wikipedia_Circuito LC. [En línea] 2021. [Citado el: 18 de 11 de 2021.] https://es.wikipedia.org/wiki/Circuito_LC.

Encapsulación y diseño de un prototipo de sensor capacitivo que mide la frecuencia respiratoria

44. Wikipedia. Wikipedia_Oscilador Hartley. [En línea] 2021. [Citado el: 18 de 11 de 2021.] https://es.wikipedia.org/wiki/Oscilador_Hartley.
45. —. Wikipedia_Oscilador Colpitts. [En línea] 2021. [Citado el: 18 de 11 de 2021.] https://es.wikipedia.org/wiki/Oscilador_Colpitts.
46. Electronicavm. (PDF) Oscilador a cristal.
47. Wikipedia. Wikipedia_Oscilador Pierce. [En línea] 2021. [Citado el: 18 de 11 de 2021.] https://es.wikipedia.org/wiki/Oscilador_Pierce.
48. —. Wikipedia_ Circuito RC. [En línea] 2021. [Citado el: 18 de 11 de 2021.] https://es.wikipedia.org/wiki/Circuito_RC.
49. Hetpro-Store. Software para el diseño y fabricación de circuitos impresos PCB. [En línea] 2021. [Citado el: 18 de 11 de 2021.] <https://hetpro-store.com/TUTORIALES/disenio-de-pcbs/>.
50. Datasheet. (PDF) Datasheet Arduino Uno.
51. Wikipedia. Wikipedia_Arduino. [En línea] 2021. [Citado el: 18 de 11 de 2021.] <https://es.wikipedia.org/wiki/Arduino>.
52. Inventor, Todo sobre Autodesk. Autodesk Inventor. [En línea] 2017. [Citado el: 18 de 11 de 2021.] <http://todosobreautodeskinventor.blogspot.com/2017/>.
53. Wikipedia. Wikipedia_Impresora 3D. [En línea] 2021. [Citado el: 18 de 11 de 2021.] https://es.wikipedia.org/wiki/Impresora_3D.
54. AreaTecnologia. Impresoras 3D_ Tipos de Impresoras. [En línea] 2021. [Citado el: 18 de 11 de 2021.] https://www.areatecnologia.com/informatica/impresoras-3d.html#Tipos_de_Impresoras_3D.
55. 3D, Proyecto Recicla. Métodos de Impresión 3D. [En línea] 2014. [Citado el: 18 de 11 de 2021.] <https://recicla3dplabs.wordpress.com/2014/09/26/metodos-de-impresion-3d/>.
56. Datasheet. Datasheet_LM555 Timer. 2015.
57. Wikipedia. Wikipedia_Circuito Integrado 555. [En línea] 2021. [Citado el: 18 de 11 de 2021.] https://es.wikipedia.org/wiki/Circuito_integrado_555.
58. —. Wikipedia_EAGLE. [En línea] 2021. [Citado el: 18 de 11 de 2021.] <https://es.wikipedia.org/wiki/EAGLE>.
59. Maker, Zona. Impresión 3D, Cama caliente. [En línea] 2021. [Citado el: 18 de 11 de 2021.] <https://www.zonamaker.com/impresion-3d/crea-impresora/11-cama-caliente-crea-imp>.
60. ABAX. Partes de una impresora 3D(Ejes). [En línea] 2021. [Citado el: 18 de 11 de 2021.] <https://abax3dtech.com/2020/11/05/partes-de-una-impresora-3d-desde-principales-hasta-mecanicas/>.

Encapsulación y diseño de un prototipo de sensor capacitivo que mide la frecuencia respiratoria

61. Prints, Eolas. Extrusor 3D: Que es, que partes tiene y que tipos existen. [En línea] 2021. [Citado el: 18 de 11 de 2021.] <https://eolaspriints.com/es/blog/impresoras-3d/extrusor-3d-que-es-que-partes-tiene-y-que-tipos-existen>.
62. 3D, El Mundo. Extrusor: componentes impresora 3D. [En línea] 2021. [Citado el: 18 de 11 de 2021.] <https://elmundo3d.com/extrusor/>.
63. Compatibles, Tintas y Toner. Partes de la Impresora 3D y su funcionamiento. [En línea] 2021. [Citado el: 18 de 11 de 2021.] <https://www.tintasytonercompatibles.es/blog/partes-de-la-impresora-3d/>.
64. ShopTronica. Cinta de cobre adhesiva. [En línea] 2021. [Citado el: 18 de 11 de 2021.] <https://www.shoptronica.com/>.
65. arte, Mi tienda de. Imagen Goma Eva. [En línea] 2021. [Citado el: 18 de 11 de 2021.] <https://mitiendadearte.com/goma-eva-300x200x2-mm.html>.
66. Bigtronica. Resistencias 10k y 100k. [En línea] 2021. [Citado el: 18 de 11 de 2021.] <http://www.bigtronica.com>.
67. Electrocomponentes. Condensador 1nF. [En línea] 2021. [Citado el: 18 de 11 de 2021.] <https://www.electrocomponentes.es>.
68. Mouser. Componentes electronicos. [En línea] 2021. [Citado el: 18 de 11 de 2021.] <https://www.mouser.es>.
69. Caldas, Electronicos. Pantalla LCD. [En línea] 2021. [Citado el: 18 de 11 de 2021.] <https://www.electronicoscaldas.com/es/displays-lcd-alfanumericos-y-graficos/131-display-lcd-16x2-el-1602a.html>.
70. Wikipedia. Wikipedia_Potenciometro. [En línea] 2021. [Citado el: 18 de 11 de 2021.] <https://es.wikipedia.org/wiki/Potenci%C3%B3metro>.
71. Electronicas, Didácticas. Borneras 2P. [En línea] 2021. [Citado el: 18 de 11 de 2021.] <https://www.didacticaselectronicas.com/>.
72. Vinibattery. Pila 9V. [En línea] 2021. [Citado el: 18 de 11 de 2021.] <https://vinibattery.com/>.
73. Leantec. Adapatador pila 9V a Arduino. [En línea] 2021. [Citado el: 18 de 11 de 2021.] <https://leantec.es/>.
74. Velasco, Alex. Facebook, frecuencia respiratoria por edades. [En línea] 2019. [Citado el: 18 de 11 de 2021.] https://m.facebook.com/story.php?story_fbid=2567570649951992&id=1278785698830500&_tn__=-R.
75. Mediciones industriales_condensador diferencial. [En línea] 2008. [Citado el: 18 de 11 de 2021.] <http://joseal-medicionesindustriales.blogspot.com/2008/06/21-sensores-capacitivos.html>.