



COMILLAS

UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS DE TELECOMUNICACIÓN

TRABAJO FIN DE GRADO

DISEÑO DE UN SENSOR DE TEMPERATURA PARA
VETERANOS CON PARÁLISIS CON EL OBJETIVO
DE MEDIR SU TEMPERATURA CORPORAL

Autor: Paula Pijoan Gros

Director: Leonard Register

Madrid

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
Diseño de un sensor de temperatura para veteranos con parálisis con el objetivo de medir
su temperatura corporal

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el

curso académico 2023/24 es de mi autoría, original e inédito y

no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos.

El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido

tomada de otros documentos está debidamente referenciada.

Paula Pijoan Gros

Fdo.: Paula Pijoan Gros

Fecha: 03/07/2024

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Leonard Register

Fdo.: Leonard Register

Fecha: 03/07/2024



COMILLAS

UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS DE TELECOMUNICACIÓN

TRABAJO FIN DE GRADO

DISEÑO DE UN SENSOR DE TEMPERATURA PARA
VETERANOS CON PARÁLISIS CON EL OBJETIVO
DE MEDIR SU TEMPERATURA CORPORAL

Autor: Paula Pijoan Gros

Director: Leonard Register

Madrid

Agradecimientos

Quiero aprovechar esta oportunidad para dar las gracias en primer lugar a mis padres por haberme dado tantas oportunidades en la vida y estar siempre ahí cuando les necesito. No sé qué hubiese hecho sin vosotros. A mis hermanas por hacerme reír en los momentos más difíciles y siempre estar pendientes de si necesitaba algo.

Por último, gracias a todos mis amigos que durante estos años me han aguantado, ayudado y hecho de esta experiencia algo super bonito.

DISEÑO DE UN SENSOR DE TEMPERATURA PARA VETERANOS CON PARÁLISIS CON EL OBJETIVO DE MEDIR SU TEMPERATURA CORPORAL

Autor: Pijoan Gros, Paula

Director: Register, Leonard

Entidad Colaboradora: BAE Systems & Adaptive Adventures

RESUMEN DEL PROYECTO

Este proyecto aborda el diseño, desarrollo e implementación de un dispositivo avanzado de monitoreo de temperatura para veteranos con parálisis, con el objetivo de mejorar su calidad de vida y seguridad. A lo largo del trabajo, se han integrado una variedad de sensores de temperatura, conectividad Bluetooth Low Energy (BLE) y un interfaz de usuario accesible mediante un *smartphone*. Los resultados demuestran una alta precisión en la medición de la temperatura y una robusta transmisión de datos, proporcionando a los usuarios una herramienta fiable y fácil de usar para el monitoreo continuo de su salud.

Palabras clave: Monitoreo de temperatura, sensor, BLE, veteranos con parálisis, Arduino.

1. Introducción

El proyecto se centra en abordar una necesidad crítica entre los veteranos con parálisis: el monitoreo preciso y constante de la temperatura corporal para prevenir complicaciones de salud. Desgraciadamente, durante los conflictos armados los militares están expuestos a situaciones de alto riesgo que les provocan heridas graves y pueden dañar la médula espinal, llevando a diferentes grados de parálisis. Por lo tanto, existe un daño neurológico que hace que estos individuos se enfrenten a grandes retos como la incapacidad de sudar, temblar o regular temperatura [1].

A través de este trabajo, se pretende desarrollar un dispositivo tecnológico avanzado que no solo garantice seguridad y comodidad, sino que también promueva una mejora significativa en la calidad de vida de estos individuos. La innovación en dispositivos médicos portátiles es esencial para ofrecer soluciones especializadas y efectivas a poblaciones vulnerables.

2. Definición del proyecto

El proyecto tiene como objetivo desarrollar un sistema de monitoreo de temperatura corporal que ofrezca precisión, conectividad eficiente y una solución amigable para el usuario. Para cumplir estos objetivos, se han establecido criterios específicos para seleccionar sensores de alta precisión, diseñar un circuito eficiente y ensamblar un dispositivo que cumpla con los estándares de fiabilidad y eficiencia energética.

El objetivo principal es crear un sistema que proporcione lecturas precisas y confiables, asegurando un monitoreo continuo y efectivo de la salud del usuario. La

facilidad de uso y la comodidad del dispositivo también son prioridades clave para garantizar su adopción y uso consistente.

3. Descripción del modelo/sistema/herramienta

A partir de múltiples diseños iterativos y con la ayuda del estado del arte en tecnologías de sensores y microcontroladores, así como investigaciones exhaustivas, se ha logrado desarrollar un modelo final. Este modelo se basa en una arquitectura optimizada que incorpora soluciones innovadoras para el monitoreo de temperatura en veteranos con parálisis, asegurando precisión, fiabilidad y facilidad de uso.

El sistema diseñado incorpora tres sensores de temperatura. Estos sensores están conectados a un microcontrolador Arduino Nano 33 BLE, alimentado por una batería LiPo de 3.7V. El uso de múltiples sensores permite obtener un promedio de las lecturas, minimizando errores y asegurando el funcionamiento continuo incluso si uno de los sensores falla [2]. La señal analógica de los sensores se convierte en digital a través de un convertidor analógico-digital (ADC), facilitando el procesamiento y la transmisión de datos [3]. En resumen, el diagrama 1 muestra cómo se encuentran conectados todos los componentes electrónicos del sistema: sensores, microcontrolador y la fuente de alimentación.

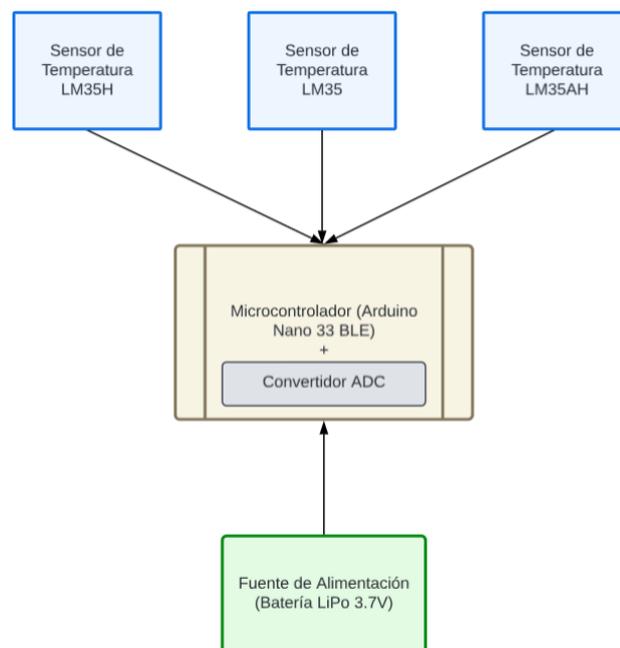


Figura 1 - Esquema del sistema diseñado para medir la temperatura corporal

4. Resultados

Los resultados del proyecto demuestran que el dispositivo cumple con los objetivos iniciales, proporcionando lecturas de temperatura precisas y una transmisión de datos robusta. La implementación de la conectividad BLE permite una actualización constante de los datos en tiempo real. Además, la aceptación del dispositivo por parte de los usuarios indica una alta facilidad de uso. El diseño iterativo tanto de la carcasa como todos los componentes en su conjunto y los materiales seleccionados aseguran que el

dispositivo sea cómodo de llevar durante largos periodos de tiempo y una ayuda al usuario.

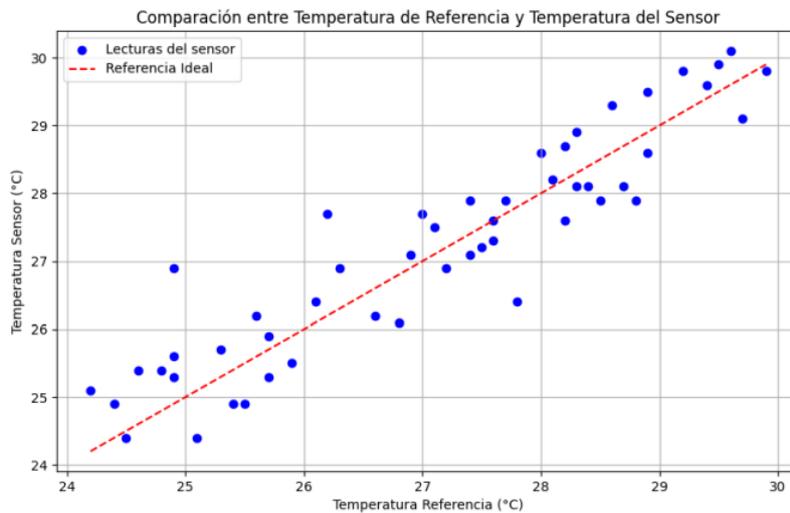


Figura 2 – Gráfico de dispersión comparando la temperatura de referencia con la capturada por el dispositivo

5. Conclusiones

El proyecto concluye con éxito en la creación de un dispositivo de monitoreo de temperatura eficaz y fácil de usar para veteranos con parálisis. Se han logrado los objetivos de precisión, fiabilidad y eficiencia energética. El dispositivo se ha implementado como una herramienta valiosa para mejorar la seguridad y la calidad de vida de los usuarios. En un futuro, se busca mejorar el sistema e incluir la optimización del protocolo de emparejamiento BLE y la integración de funciones adicionales de monitoreo de salud para ofrecer una solución más completa y holística.

6. Referencias

- [1] Spanish Encyclopedia. (n.d.). ¿Qué es la lesión de la Médula Espinal?: Veterans Affairs. Veterans' Health Library. <https://veteranshealthlibrary.va.gov/Spanish/Encyclopedia/3.41172>
- [2] TE Connectivity. (2024, August 4). Medición de la temperatura corporal con sensores de temperatura de piel. Medición de temperatura corporal. <https://www.te.com/es/industries/medical-technologies/medical-products-components/medical-sensors/body-temperature-measurement.html>
- [3] Castaño Giraldo, S. (2015, August 3). Conversión Analogo Digital Pic. Control Automático Educación. <https://controlautomaticoeducacion.com/microcontroladores-pic/14-conversion-analogodigital-ad/>

DESIGN OF A TEMPERATURE SENSING DEVICE FOR PARALYZED VETERANS WITH THE OBJECTIVE OF MEASURING THEIR BODY TEMPERATURE.

Author: Pijoan Gros, Paula.

Supervisor: Register, Leonard.

Collaborating Entity: BAE Systems & Adaptive Adventures

ABSTRACT

This project addresses the design, development, and implementation of an advanced temperature monitoring device for veterans with paralysis, with the goal of improving their quality of life and safety. Throughout the process of design and implementation, a variety of accurate temperature sensors, Bluetooth Low Energy (BLE) connectivity and a user interface accessible via smartphone have been integrated. The results demonstrate high accuracy in temperature measurement and robust data transmission, providing users with a reliable and easy-to-use tool for continuous health monitoring.

Keywords: Temperature monitoring, sensors, BLE, veterans with paralysis

1. Introduction

The project focuses on addressing a critical need among veterans with paralysis: accurate and constant monitoring of body temperature to prevent health complications. Unfortunately, during armed conflicts, military personnel are exposed to high-risk situations that cause severe injuries and can damage the spinal cord, leading to varying degrees of paralysis. Therefore, due to this neurological damage, these individuals face great challenges such as the inability to sweat, shiver or regulate temperature [1].

Through this project, I aim to develop an advanced technological device that not only ensures safety and comfort, but also promotes significant improvement in the quality of life of these individuals. Innovation in portable medical devices is essential to offer specialized and effective solutions to vulnerable populations.

2. Project definition

The project aims to develop a body temperature monitoring system that offers accuracy, efficient connectivity, and a friendly user interface. To meet these objectives, specific criteria have been established to select highly accurate sensors, design a productive circuit, and assemble a device that meets reliability and energy efficiency standards.

The main objective is to create a system that provides accurate and reliable readings, ensuring continuous and effective monitoring of the user's health. Ease of use and convenience of the device are also key priorities to ensure consistent adoption and use.

3. Description of the model/system/tool

Through the use of multiple iterative designs and with the help of the state-of-the-art sensor and microcontroller technologies, as well as extensive research, a final model has been developed. This model is based on an optimized architecture that incorporates innovative solutions for temperature monitoring with a special focus on paralyzed veterans, ensuring accuracy, reliability, and ease of use.

The designed system incorporates three temperature sensors. These sensors are connected to an Arduino Nano 33 BLE microcontroller, powered by a 3.7V LiPo battery. The use of multiple sensors allows averaging of the readings, minimizing errors and ensuring continuous operation even if one of the sensors fails [2]. The analog signal from the sensors is converted to digital through an analog-to-digital converter (ADC), facilitating data processing and transmission [3]. In summary, diagram 3 shows how all the electronic components of the system are connected. These include sensors, microcontroller and the power supply.

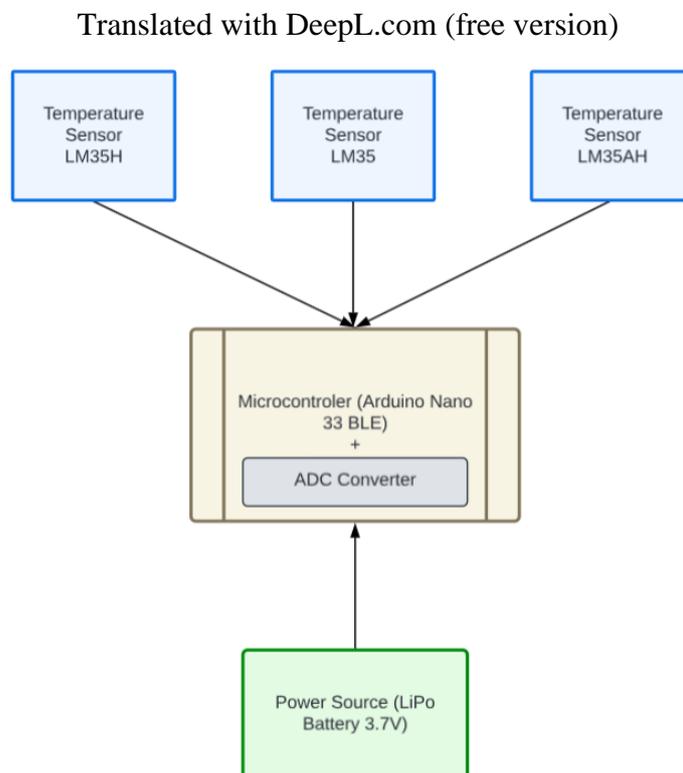


Figura 3 – Schematic of the system designed to measure body temperature through contact with user

4. Results

The project results demonstrate that the device meets the initial objectives, providing accurate temperature readings and robust data transmission. The implementation of BLE connectivity allows for a constant update of the data in real time. In addition, user acceptance of the device indicates high ease of use. The iterative design of both the shell and all the components as a whole, as well as the selected materials

ensure that the device is comfortable to wear for long periods of time and an aid to the user.

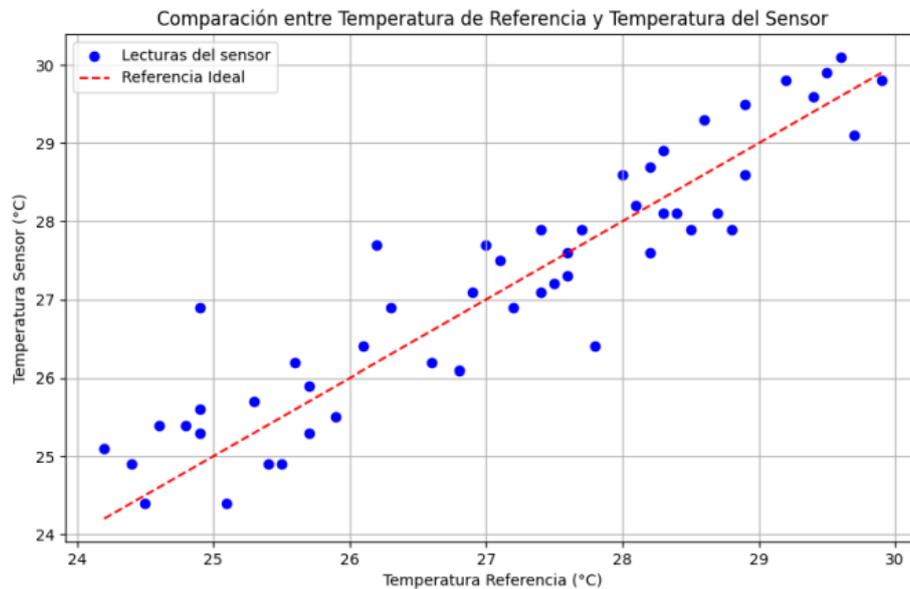


Figura 4 – Scatter plot comparing the reference temperature with that captured by the device.

5. Conclusions

The project successfully concludes in the creation of an effective and easy to use temperature monitoring device for veterans with paralysis. The goals of accuracy, reliability and energy efficiency have all been achieved. The device has proven to be a valuable tool for improving the safety and quality of life of users. Future enhancements will include optimizing the BLE pairing protocol and integrating additional health monitoring functions to provide a more complete and holistic solution.

6. References

- [1] Spanish Encyclopedia. (n.d.). ¿Qué es la lesión de la Médula Espinal?: Veterans Affairs. Veterans' Health Library. <https://veteranshealthlibrary.va.gov/Spanish/Encyclopedia/3,41172>
- [2] TE Connectivity. (2024, August 4). Medición de la temperatura corporal con sensores de temperatura de piel. Medición de temperatura corporal. <https://www.te.com/es/industries/medical-technologies/medical-products-components/medical-sensors/body-temperature-measurement.html>
- [3] Castaño Giraldo, S. (2015, August 3). Conversión Analogo Digital Pic. Control Automático Educación. <https://controlautomaticoeducacion.com/microcontroladores-pic/14-conversion-analogodigital-ad/>

Índice de la memoria

Capítulo 1. Introducción	6
Capítulo 2. Descripción de las Tecnologías.....	10
2.1 Sensores de temperatura	10
2.1.1 Tipos de sensores de temperatura	10
2.2 Microcontrolador.....	18
2.2.1 Modelo implementado	18
2.2.2 Funcionalidades y capacidades.....	18
2.3 Protocolo de comunicación BLE.....	20
2.4 PROGRAMACIÓN A TRAVÉS DE ARDUINO	21
Capítulo 3. Estado de la Cuestión	23
3.1 Patente 1: unidad de sensor para un sistema informático e integración de esta	23
3.1.1 Comparación con las necesidades y requisitos del diseño.....	24
3.2 Patente 2: dispositivo inteligente para la monitorización de temperatura corporal.....	26
3.2.1 Comparación con las necesidades y requisitos del diseño.....	28
Capítulo 4. Definición del Trabajo	29
4.1 Justificación.....	29
4.2 Objetivos	30
4.3 Metodología.....	32
4.4 Planificación y Estimación Económica.....	34
Capítulo 5. Sistema/Modelo Desarrollado.....	36
5.1 Análisis y requerimientos del sistema	36
5.1.1 Requerimientos funcionales.....	36
5.1.2 Requerimientos no funcionales.....	38
5.2 Diseño.....	41
5.2.1 Enfoque de diseño.....	41
5.2.2 Selección de componentes	43
5.2.3 Compatibilidad de los componentes.....	63
5.2.4 Diseño del circuito y ensamblaje.....	64

5.2.5 Diseño de la carcasa	69
5.3 Implementación	74
5.3.1 Desarrollo de comunicación BLE	74
5.3.2 Pruebas de conectividad y alcance del módulo BLE.....	75
Capítulo 6. Análisis de Resultados.....	77
6.1 Metodología de evaluación	77
6.1.1 Protocolo de pruebas	78
6.1.2 Criterios de éxito	78
6.1.3 Herramientas implementadas.....	80
6.2 Resultados de las pruebas.....	81
6.2.1 Pruebas de funcionamiento general.....	81
6.2.2 Pruebas de movilidad y usabilidad	91
6.3 Discusión de los resultados	95
6.3.1 Fortalezas del sistema	95
6.3.2 Innovaciones y aportaciones	96
6.3.3 Logros y desviaciones.....	96
Capítulo 7. Conclusiones y Trabajos Futuros.....	99
7.1 Conclusiones	99
7.2 Trabajos futuros.....	100
Capítulo 8. Bibliografía.....	103
ANEXO I: ALINEACIÓN DEL PROYECTO CON LOS ODS	108
ANEXO II – Código para medir la temperatura corporal con sensor LM35	110
ANEXO III – Pruebas de benchmarking y velocidad de procesamiento	111
ANEXO IV – Código BLE conexión sensor con aplicación móvil.....	113
ANEXO V – Prueba medida sensor precisión	117

Índice de figuras

Figura 1 - Esquema del sistema diseñado para medir la temperatura corporal	9
Figura 2 – Gráfico de dispersión comparando la temperatura de referencia con la capturada por el dispositivo	10
Figura 3 – Schematic of the system designed to measure body temperature through contact with user	12
Figura 4 – Scatter plot comparing the reference temperature with that captured by the device.	13
Figura 5 – Convertidor analógico digital [5]	11
Figura 6 – Proceso ADC [6]	12
Figura 7 – Señales en el proceso ADC [7]	13
Figura 8 – Curva característica de un termistor NTC [8]	14
Figura 9 – Curva característica sensor semiconductor LM35 [9]	15
Figura 10 – Diferencia entre señal analógica y señal discreta muestreo [10]	16
Figura 11 – Diagrama esquemático transversal de los sensores [13]	24
Figura 12 – Dispositivo de control portátil con cordón de silicona para el cuello [14]	26
Figura 13 – Termómetro de control principal [14]	27
Figura 14 – Gantt chart con trabajos a realizar	35
Figura 15 – Diagrama de flujo hardware	40
Figura 16 – Diagrama de bloques de los componentes hardware	42
Figura 17 – Dibujo de la unidad de hardware del prototipo en su carcasa	43
Figura 18 – Sensor LM35DZ [23]	50
Figura 19 – Sensor LM35AH [24]	50
Figura 20 – Sensor LM35CZ/NOPB [25]	50
Figura 21 – Sensor LM35DT [26]	51
Figura 22– Sensor DS [27]	51
Figura 23– Sensor SEN TMP [28]	51
Figura 24 – Sensor SEN [29]	52
Figura 25– Sensor BME 280 [30]	52

Figura 26 – <i>Arduino Nano 33 BLE</i> [12].....	58
Figura 27 – <i>Arduino UNO</i> [31]	58
Figura 28 – <i>Adafruit nRF52840</i> [32].....	58
Figura 29 – <i>ESP32</i> [33]	59
Figura 30 – <i>Arduino Mega</i> [34].....	59
Figura 31 – Dibujo del diseño del circuito y ensamblaje	68
Figura 32 – Carcasa 3D parte inferior diseño SolidWorks.....	71
Figura 33 – Parte superior de la carcasa en 3D con SolidWorks	72
Figura 34 – Proceso de iteraciones carcasa 3D	73
Figura 35 – Gráfica de dispersión de la comparación en las medidas temperatura referencia y sensor.....	83
Figura 36 – Boxplot de la desviación entre las dos medidas.....	84
Figura 37 – Histograma de las desviaciones y su frecuencia	85
Figura 38 – Gráfica Quantile - Quantile (QQ)	87
Figura 39 – Función de densidad de una distribución normal [38].....	88
Figura 40 – Gráfica de la tasa de éxito en la transmisión de datos del sistema completo...	90
Figura 41 – Distribución opinión comodidad dispositivo	92
Figura 42 – Encuesta facilidad de uso del dispositivo.....	93
Figura 43 – Distribución de la satisfacción general de los usuarios.....	94

Índice de tablas

Tabla 1 - Cronograma de las tareas a realizar	34
Tabla 2 - Entrada hardware	37
Tabla 3 - Salida de hardware	38
Tabla 4 - Características básicas sensores de temperatura	45
Tabla 5 - Resultados pruebas de precisión y tiempo de respuesta sensores de temperatura	50
Tabla 6 - Resultados prueba microcontroladores preseleccionados	57
Tabla 7 - Resultados baterías LiPo alimentación microcontrolador [35]	62
Tabla 8 - Pruebas precisión sensores de temperatura (completa en el ANEXO V)	82
Tabla 9 - Resultados prueba tasa de éxito en transmisión de datos del sistema.....	90

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, vivimos en un mundo en el cual la tecnología juega un papel fundamental en la mejora de la calidad de vida y seguridad de nuestra sociedad. La innovación tecnológica nos ha permitido alcanzar niveles de bienestar nunca vistos, desde dispositivos móviles que controlan nuestra salud, hasta dispositivos más avanzados que nos alertan sobre desastres inminentes. En efecto, la introducción de tecnologías como la inteligencia artificial, el Internet de las Cosas (IoT) y los sistemas de monitoreo en tiempo real están cambiando la forma de gestionar tanto la salud como la seguridad. Estos avances no sólo facilitan la vida cotidiana, sino que también cobran vida al brindar información importante en los momentos más críticos.

Sin embargo, existen ciertos sectores y poblaciones que aún están en riesgo, y se enfrentan continuamente a nuevos desafíos debido a sus condiciones personales y específicas de salud. Entre estos grupos, se encuentran los veteranos con parálisis, quienes requieren soluciones tecnológicas más avanzadas y especializadas para afrontar sus actividades cotidianas y mejorar su seguridad.

Durante los conflictos armados, los militares están expuestos a situaciones de alto riesgo que pueden provocar heridas graves. Explosiones, balas y escombros son algunas de las causas que pueden dañar la médula espinal, llevando a diferentes grados de parálisis [1]. Las lesiones de médula espinal son particularmente devastadoras porque pueden causar una pérdida permanente de la función sensorial y motora por debajo del nivel de la lesión. La parálisis afecta significativamente la calidad de vida de los veteranos, limitando su capacidad para realizar actividades diarias y participar plenamente en la sociedad. Adicionalmente, cabe destacar que las personas con parálisis son particularmente vulnerables a complicaciones secundarias, como úlceras por presión, infecciones urinarias y problemas circulatorios. La capacidad de monitorear continuamente a estos individuos es de extrema importancia dado que ayuda a detectar y prevenir infecciones y otros problemas de salud

antes de que se conviertan en amenazas graves, lo cual es crucial para mantener su salud a largo plazo.

Teniendo en cuenta su situación es evidente que estos individuos se enfrentan a numerosos retos en su día a día, entre los cuales está la incapacidad para detectar cambios extremos de temperatura. Es decir, la pérdida de algunas extremidades y el daño neurológico resultante les impide sudar o temblar, mecanismos naturales del cuerpo para poder regular la temperatura [2]. Esta deficiencia aumenta significativamente el riesgo de padecer hipotermia o hipertermia, especialmente durante el transcurso de actividades al aire libre donde las condiciones climáticas pueden variar rápidamente y ser extremas.

Por ejemplo, un veterano que practica esquí o senderismo puede no percatarse de que su cuerpo está alcanzando temperaturas peligrosamente bajas o altas, lo cual puede tener consecuencias graves para su salud.

Ante esta necesidad inaplazable, surge la idea de desarrollar un dispositivo portátil que permita controlar y monitorizar la temperatura corporal, emitiendo alertas en caso de encontrarse con condiciones peligrosas. De esta manera, el proyecto tiene como objetivo proporcionar una solución práctica que no solo aumente la seguridad de estos individuos, sino que también les brinde más autonomía y confianza para disfrutar de una vida cotidiana más activa. Por lo tanto, es evidente que el producto ha de ser práctico y atractivo para que los veteranos quieran cambiar sus hábitos e implementarlo, asegurándose de ser un producto cómodo, fácil de usar, y capaz de integrarse sin problemas en la vida diaria del usuario.

Este Trabajo de Fin de Grado (TFG) forma parte de un proyecto de desarrollo llevado a cabo en colaboración con la Universidad de Texas en Austin, Estados Unidos. Mi contribución principal en este proyecto se centró en desarrollar el hardware del dispositivo, mientras que la parte software fue desarrollada y proporcionada por la universidad. A través de este enfoque colaborativo, se aseguró una integración eficiente. Una vez desarrollado el proyecto, se puede comprobar que el dispositivo funcione de manera precisa y coherente integrando todos los componentes.

El prototipo de monitoreo de temperatura, una vez integrado con la parte proporcionada por la universidad, no solo será capaz de controlar la temperatura, sino que también se comunicará con una aplicación móvil para proporcionar retroalimentación en tiempo real y alertar tanto al usuario como al instructor en caso de detectarse temperaturas peligrosas.

Para poder garantizar que los veteranos participen de manera más segura en actividades que antes estaban fuera de su alcance debido a los riesgos asociados, el dispositivo tiene que ser diseñado para ser compacto, portátil y fácil de usar. Esto implica una cuidadosa selección de componentes, incluidos tanto los sensores, como las baterías o los microcontroladores de alta precisión. Los componentes electrónicos han de ser adecuados para un amplio rango de temperaturas externas y capaces de resistir condiciones ambientales adversas, proporcionando lecturas de temperatura precisas y fiables en todo momento.

Por último, la motivación detrás de este proyecto radica en la necesidad urgente de mejorar la seguridad y calidad de vida de ciertos sectores de nuestra sociedad. La incapacidad para detectar y reaccionar a cambios extremos de temperatura pone en riesgo la salud y el bienestar de estas personas, y por lo tanto llama a una solución urgente, práctica y efectiva para prevenir incidentes graves.

Además de su impacto práctico, cabe destacar que este proyecto también tiene un profundo significado social dado que proporciona a los veteranos con parálisis una herramienta sencilla pero segura que mejora su calidad de vida, fomenta su autonomía y les permite participar en actividades al aire libre con mayor confianza. A través de este proyecto se contribuye a su inclusión social, lo cual les permite llevar una vida más activa, sana a través del deporte, y plena.

Teniendo en cuenta los distintos aspectos sociales, económicos y prácticos, se puede concluir que existe una necesidad inminente para desarrollar este dispositivo de monitoreo de temperatura. Su implementación tiene el potencial de tener un impacto significativo en la vida de los veteranos, proporcionando una solución tecnología avanzada que mejora su

seguridad y nivel de vida, demostrando como la innovación tecnológica puede ser aplicada para abordar problemas reales y hacer una diferencia positiva en aquellos que más lo necesitan.

Capítulo 2. DESCRIPCIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS

En este capítulo se describen las tecnologías utilizadas para el desarrollo del presente proyecto, así como su funcionamiento. Se analizan en detalle los componentes esenciales que se van a implementar en el proyecto, siendo estos: los sensores de temperatura, los microcontroladores y el protocolo de comunicación Bluetooth Low Energy (BLE). Estas tecnologías son fundamentales para el desarrollo y éxito del proyecto.

2.1 *SENSORES DE TEMPERATURA*

Un sensor de temperatura es un componente eléctrico, el cual, a través de una señal eléctrica determinada detecta variaciones en la temperatura del aire, agua u otras sustancias que permiten medir la temperatura [4]. Estas señales son utilizadas por sistemas electrónicos para la regulación de la temperatura, y pueden ser enviadas directamente o mediante un cambio de resistencia.

El funcionamiento básico de un sensor de temperatura se basa en la detección de cambios en las propiedades físicas que varían según la temperatura, como la resistencia eléctrica, el voltaje y la frecuencia de oscilación. Estas variaciones son transformadas en señales eléctricas que pueden ser tanto analógicas como digitales, dependiendo del tipo de sensor.

2.1.1 TIPOS DE SENSORES DE TEMPERATURA

2.1.1.1 *Sensores analógicos*

En primer lugar, un sensor de temperatura analógico produce una señal de salida que varía de manera continua con la temperatura. Cualquier cambio que se detecte en la

temperatura se refleja inmediatamente en un cambio en la señal de salida. Por ejemplo, en el caso de que la temperatura aumente gradualmente, la señal de salida también aumentará de manera suave y continua, de manera que el sensor produce una salida que es directamente proporcional a la temperatura medida [4].

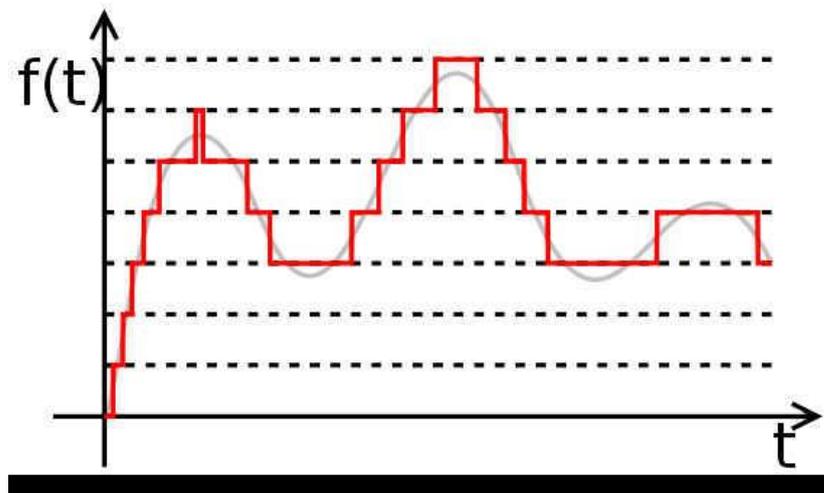


Figura 5 – Convertidor analógico digital [5]

Para poder utilizar la temperatura obtenida en un sistema digital como por ejemplo un microcontrolador o un dispositivo portátil, la señal analógica producida por el sensor se ha de convertir en una señal digital. Este proceso se logra a través de un convertidor analógico-digital (ADC).

El ADC toma la señal analógica continua, y la transforma en una serie de valores digitales discretos para ser procesados por sistemas digitales. La ilustración 5 presenta el funcionamiento de un ADC básico, donde la línea gris es la señal continua, el valor de la temperatura que se obtiene a través de un sensor analógico, mientras que la señal roja es la señal digital a la salida del ADC. Ejemplos de estos sensores incluyen los termistores Negative Temperature Coefficient (NTC) y los sensores de semiconductores.

El proceso que ocurre en la figura 5 se detalla de manera más precisa en el diagrama 6, donde la línea verde ondulada a la izquierda representa la señal analógica continua de entrada. En el caso de los sensores NTC, esta señal corresponde a la variación de voltaje en

función de la temperatura. El componente del centro de diagrama es el ADC cuya función es tomar la señal continua analógica y muestrearla en intervalos específicos para convertirla en una serie de valores digitales discretos. El ADC mide la amplitud de la señal analógica en momentos específicos y asigna un valor binario correspondiente a esa amplitud. Por último, la salida de un ADC es la serie de valores binarios representados aquí como “00111101”. Estos valores digitales son interpretables por sistemas digitales como microcontroladores.

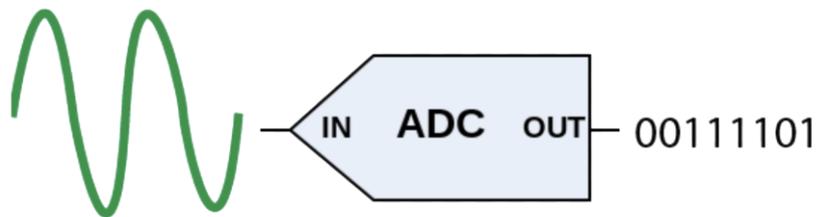


Figura 6 – Proceso ADC [6]

El proceso de conversión analógica-digital implica varios pasos clave. En primer lugar, el ADC toma muestras de la señal analógica en intervalos de tiempo regulares. Cada muestra captura el valor de la señal analógica en un momento específico. Por ejemplo, en 1.0 segundos el valor de la señal analógica es X. Este paso es crucial para capturar la variación continua de la señal analógica y convertirla en una serie de valores discretos.

De esta manera, tal y como se refleja en el diagrama 7, la entrada es una señal analógica, $x_o(t)$, y al muestrear se obtiene una señal en tiempo discreto, $x(n)$.

En segundo lugar, se cuantifica. Cada muestra analógica es asignada a un nivel digital específico. El rango de valores posibles de la señal analógica se divide en un número finito de niveles, dependiendo de la resolución del ADC. Por ejemplo, un ADC de 8 bits tiene 256 niveles posibles (2^n donde $n = \text{número de bits} \rightarrow 2^8 = 256$), mientras que un ADC de 12 bits tiene 4096 niveles. Cabe destacar que este paso introduce una pequeña cantidad de error de cuantificación, ya que los valores analógicos continuos deben ser redondeados al

nivel digital más cercano. A la entrada de este paso tenemos una señal en tiempo discreto, $x(n)$, y a la salida la señal está cuantificada, $x_q(n)$.

En tercer lugar, se codifica. Los niveles cuantificados se codifican en formato binario para ser procesados por el sistema digital. Cada nivel de cuantificación se representa mediante una secuencia de bits, que es la salida digital del ADC. De esta manera, entra una señal cuantificada en tiempo discreto, $x_q(n)$, y a la salida se tiene una señal digital.

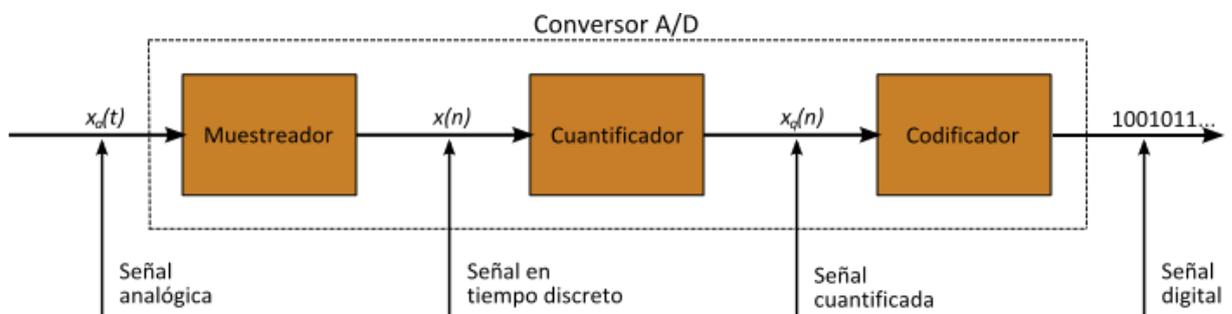


Figura 7 – Señales en el proceso ADC [7]

A través de su funcionamiento se observa la importancia de su operatividad dado que permite que la información de temperatura capturada por los sensores analógicos sea procesada y utilizada en aplicaciones digitales, como la visualización de datos en una pantalla, el almacenamiento de datos para análisis posterior o la activación de alarmas en caso de detectar temperaturas anormales.

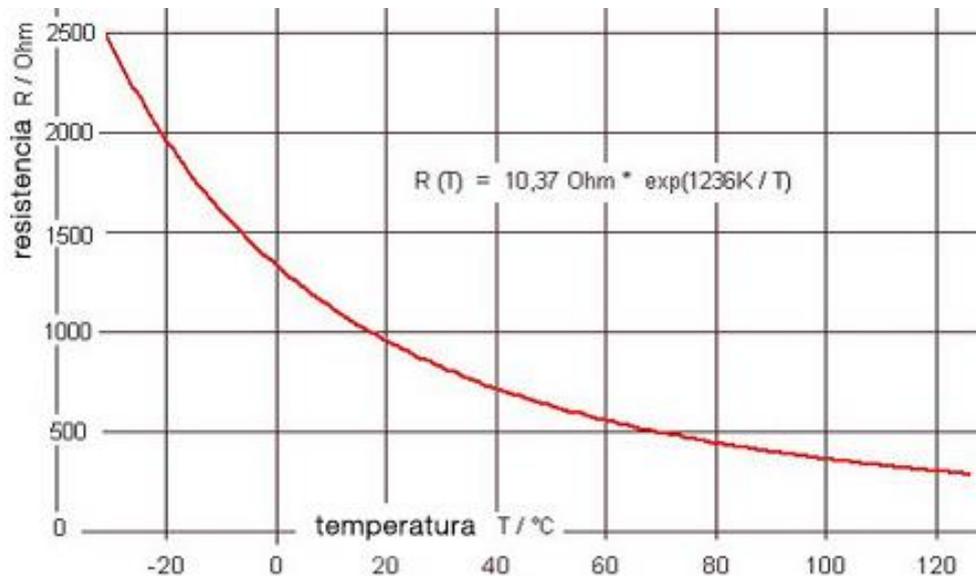


Figura 8 – Curva característica de un termistor NTC [8]

Los termistores NTC son resistencias con un coeficiente de temperatura negativo, de manera que la resistencia disminuye a medida que aumenta la temperatura, según se puede visualizar en el gráfico 8. Estos sensores tienen una alta sensibilidad, de manera que la resistencia del termistor cambia significativamente con pequeños cambios de temperatura, lo que permite medir temperaturas con precisión. Según se puede visualizar en la gráfica, los termistores NTC funcionan basados en que la resistencia eléctrica disminuye exponencialmente con el aumento de temperatura. La resistencia de un termistor NTC que se visualiza en la imagen 8, también puede ser descrita por la siguiente ecuación:

$$R(T) = R_0 * e^{\beta * (\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0})}$$

donde $R(T)$ es la resistencia que se obtiene en la temperatura T , R_0 es la resistencia a una temperatura de referencia T_0 , y β es una constante característica del material del termistor. Este cambio en la resistencia afecta la corriente que pasa a través del circuito, lo que a su vez cambia el voltaje de la salida del sensor. Este voltaje se puede medir e implementar a la hora de calcular la temperatura. De esta manera, a la hora de utilizar el sensor en un circuito de medición de temperatura, la resistencia variable del termistor se coloca en un divisor de voltaje, lo cual permite que la salida del voltaje sea proporcional a la temperatura.

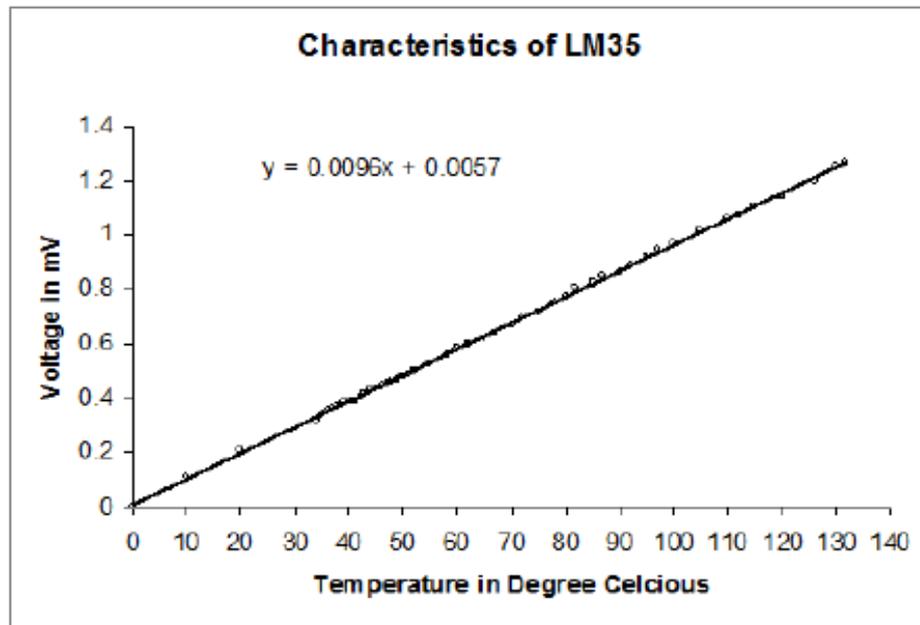


Figura 9 – Curva característica sensor semiconductor LM35 [9]

Los sensores semiconductores son el segundo tipo de sensores analógicos que se van a analizar y emplear en el proyecto. Un ejemplo de estos sensores es el LM35, que produce una salida de voltaje proporcional a la temperatura. En este caso, a diferencia de los termistores NTC, se mide la temperatura a través de un cambio en la tensión de salida, que es directamente proporcional a la temperatura en grados Celsius. Es decir, en la figura 9 se puede visualizar como un aumento de 1 grado en la temperatura resulta en un incremento de 10 mV en la salida del sensor, una relación lineal que facilita el diseño del circuito de medición y la interpretación de los datos [9]. Una vez más, este voltaje puede ser leído directamente por un ADC para su procesamiento en un sistema digital.

2.1.1.2 Sensores digitales

Por otra parte, los sensores digitales de temperatura funcionan convirtiendo los estímulos térmicos en señales eléctricas que son procesadas internamente y convertidas en un código binario. A diferencia de los sensores analógicos, los sensores digitales proporcionan una señal de salida discreta en formato binario, lo que facilita su interpretación por sistemas electrónicos sin necesidad de implementar un conversor adicional. Esta integración simplifica el diseño del sistema, y reduce tanto su coste como su complejidad.

Por lo tanto, la estructura de un sensor digital incluye los siguientes componentes: un elemento sensible a la temperatura, un módulo de comunicación digital y un ADC, de manera que permite al sensor procesar y transmitir los datos directamente a un microcontrolador.

2.1.1.3 Diferencia entre sensor digital y sensor analógico

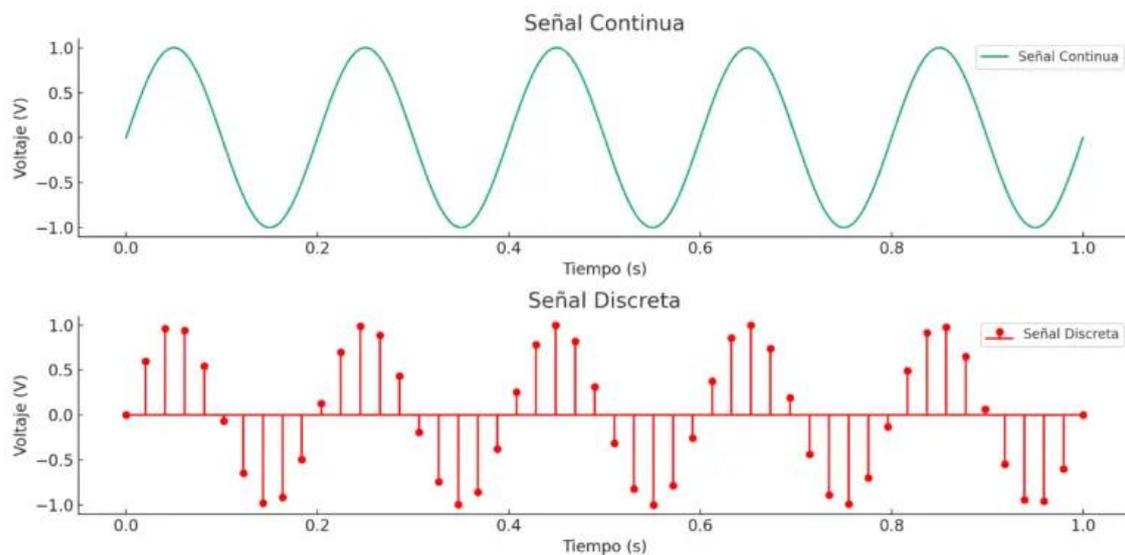


Figura 10 – Diferencia entre señal analógica y señal discreta muestreo [10]

Los sensores analógicos interpretan cada punto dentro de una señal, y proporcionan datos continuos en el tiempo, mientras que, en el caso de los sensores digitales, se muestrea la señal en puntos particulares, produciendo datos discretos. En la figura 10, se puede visualizar las diferentes repuestas que un sensor analógico y uno digital pueden dar.

En el caso de un sensor analógico, que proporciona una señal continua, se puede interpretar una cantidad infinita de valores, mientras que en el caso del sensor digital proporciona una señal discreta donde se pueden interpretar solo una cantidad finita de valores [10].

A través de la figura se puede observar como un sensor analógico puede llegar a ser potencialmente más preciso en sus mediciones. Sin embargo, cabe destacar que un sensor analógico puede presentar una variación aparente en la posición del objeto al cambiar la

posición del observador y según su interpretación, mientras que esto no ocurre en ningún instante con los sensores digitales ya que estos proporcionan un dato exacto y fácilmente interpretable.

2.2 MICROCONTROLADOR

2.2.1 MODELO IMPLEMENTADO

Un microcontrolador es un dispositivo electrónico que incluye un procesador, una memoria, y periféricos de entrada y salida. El microcontrolador está diseñado para ejecutar tareas específicas en sistemas.

A la hora de medir y monitorear la temperatura corporal de los veteranos, es imprescindible utilizar un microcontrolador para recopilar los datos de los sensores, procesar la información y en muchos casos tomar una decisión en base de su valor, como por ejemplo iluminar unas luces LED, enviar la información a través de un enlace de comunicación como UART, SPI o I2C, para su procesamiento adicional o su transmisión a un sistema de monitoreo remoto [11]. El microcontrolador interactúa con los sensores de temperatura a través de interfaces de salida/entrada para recibir señales de los sensores, y una vez adquiridos los datos puede realizar distintas acciones.

En este caso, teniendo en cuenta las características del proyecto, uno de los microcontroladores más potentes es el Arduino Nano 33 BLE dadas sus especificaciones técnicas avanzadas y su idoneidad para aplicaciones de bajo consumo energético. El microcontrolador Arduino Nano 33 BLE integra un módulo de conectividad Bluetooth Low Energy (BLE), crucial para la comunicación inalámbrica eficiente y de bajo consumo con los dispositivos móviles [12]. Adicionalmente, cabe destacar que el microcontrolador incluye un ADC de 12 bits, esencial para la lectura precisa y exacta de los sensores de temperatura.

2.2.2 FUNCIONALIDADES Y CAPACIDADES

El microcontrolador Arduino Nano 33 BLE lee los datos proporcionados por los sensores de temperatura mediante su ADC integrado, de manera que los sensores que varían su resistencia en función de la temperatura generan señales eléctricas. Estas señales son convertidas en valores digitales por el ADC del microcontrolador, lo que permite lecturas

precisas y rápidas. Adicionalmente, un microcontrolador procesa los datos. Este procesamiento de datos se implementa una vez que los datos son leídos para convertir las lecturas en valores comprensibles y adecuados para la transmisión. Se incluye en este proceso actividades como la calibración de datos para corregir cualquier desviación, y asegurar la precisión antes de enviar la información a la aplicación móvil.

2.3 PROTOCOLO DE COMUNICACIÓN BLE

El protocolo BLE es ideal para implantar en aplicaciones que requieren una comunicación constante y de baja latencia, como el caso de monitoreo de temperatura en tiempo real. Para desarrollar el proyecto es muy importante tener en cuenta el tamaño del dispositivo. El tamaño es significativo dado que se ha de desarrollar para los veteranos lo cual implica operar con baterías pequeñas. El tamaño de una batería indica el consumo que tiene disponible, por lo que es fundamental minimizar el consumo de energía. Adicionalmente, cabe destacar que BLE permite la transmisión rápida y eficiente de datos a dispositivos móviles, actualizándose en tiempo real.

La configuración del BLE en el Arduino Nano 33 implica la inicialización del módulo y la gestión de las conexiones con los dispositivos móviles. En el proceso, se han de configurar los parámetros de transmisión y recepción, así como la implementación de medidas de seguridad para asegurar la integridad y privacidad de los datos transmitidos. La transmisión de datos se realiza desde el microcontrolador al dispositivo móvil utilizando BLE. El flujo de datos se maneja a través de las características del módulo, que envía los datos de temperatura en intervalos regulares. El dispositivo móvil, al recibir estos datos, los procesa y muestra al usuario las lecturas de temperatura actuales, y en caso de estar fuera del rango normal, se envían alertas inmediatas.

BLE permite una velocidad máxima de 1Mbit/segundo con un alcance teórico de 50 metros [12]. Adicionalmente, cabe destacar que es un protocolo sin conexión, lo que implica que los dos dispositivos no tienen por qué estar conectados todo el tiempo, reduciendo significativamente el consumo de energía, siendo este tan solo el 10% de lo que consumiría un dispositivo implementando Bluetooth tradicional.

2.4 PROGRAMACIÓN A TRAVÉS DE ARDUINO

Arduino es una plataforma electrónica abierta basada en hardware y software. Los dispositivos Arduino consisten en una placa de circuito físico programable (microcontrolador) y un entorno de desarrollo integrado (IDE) que se utiliza para escribir y cargar el código en la placa.

Arduino fue diseñado originalmente para artistas y diseñadores, pero ha crecido para convertirse en una herramienta esencial en la ingeniería y el desarrollo de prototipos. Actualmente, Arduino se utiliza para construir dispositivos electrónicos interactivos que puedan recibir y enviar información a través del entorno físico. Sus aplicaciones incluyen la automatización del hogar, proyectos de arte interactivo, monitoreo ambiental, control de robots y prototipado rápido de productos electrónicos. Gracias a su facilidad de uso y su comunidad global, Arduino es una opción popular tanto para principiantes como para profesionales.

Para este proyecto, se ha seleccionado programar con Arduino debido a varias razones que incluyen:

1. **Facilidad de Uso:** Arduino ofrece un entorno de desarrollo intuitivo y fácil de usar, ideal para desarrollar rápidamente prototipos y proyectos interactivos.
2. **Amplia Comunidad y Soporte:** Arduino cuenta con una comunidad global de usuarios, lo que proporciona un amplio soporte, recursos de aprendizaje, y una gran cantidad de bibliotecas y ejemplos de código disponibles.
3. **Compatibilidad:** Las placas de Arduino generalmente son muy compatibles con una amplia gama de sensores y módulos, lo que facilita su integración en el proyecto.
4. **Conectividad BLE:** La capacidad de conectividad Bluetooth Low Energy de varios modelos del Arduino es crucial para la comunicación inalámbrica eficiente y de bajo consumo con dispositivos móviles, una característica fundamental para el monitoreo en tiempo real de la temperatura corporal.

5. **Bajo Consumo Energético:** Existen modelos de Arduino que están optimizados para aplicaciones de bajo consumo energético, lo cual es esencial para garantizar una larga duración de la batería en dispositivos portátiles.

6. **Precisión y Rendimiento:** Los modelos de Arduino previamente analizados dado su bajo consumo energético, contienen un microcontrolador ARM Cortex-M4 que proporciona la precisión y el rendimiento necesarios para aplicaciones de monitoreo y control.

En resumen, la selección de Arduino para la programación en este proyecto se basa en su facilidad de uso, compatibilidad con componentes, conectividad BLE en caso de ser necesario, bajo consumo energético y el amplio soporte de la comunidad, haciendo de él la opción ideal para desarrollar un sistema de monitoreo de temperatura eficiente y fiable.

Capítulo 3. ESTADO DE LA CUESTIÓN

La revisión exhaustiva de soluciones tecnológicas relacionadas con la regulación de la temperatura corporal en personas con parálisis revela una variedad de enfoques y desarrollos en el campo de la salud adaptativa. Se han encontrado soluciones que abarcan desde dispositivos de control de temperatura hasta sistemas integrados de asistencia médica. Además, se han identificado propuestas de integración de tecnología de telecomunicaciones para la transmisión de datos de salud en tiempo real. Estas soluciones existentes proporcionan un panorama diverso de enfoques tecnológicos y una base sólida para el desarrollo y la mejora de la propuesta de este proyecto.

3.1 PATENTE 1: UNIDAD DE SENSOR PARA UN SISTEMA INFORMÁTICO E INTEGRACIÓN DE ESTA

La patente "Unidad de sensor para un sistema informático portátil e integración de la unidad de sensor" [14] describe un invento de un sistema cerrado con un sensor que el usuario se pone y se usa para medir externamente la temperatura corporal contactando con la piel. El sensor dentro del sistema se basa en un sensor para la medición de la temperatura de la piel, complementado por el aislamiento térmico alrededor del sensor y su entorno. Esto se consigue utilizando al menos un sensor de flujo de calor y un sensor de temperatura como parte de la unidad fabricada con componentes electrónicos en una placa de circuito impresa, siguiendo el método del doble sensor, integrado en una funda para un sistema informático portátil o en una almohadilla adhesiva adecuada para fijarse a la piel [13].

Según la figura 11, la unidad de sensor (2) con los componentes electrónicos que le acompañan está encerrada, al menos parcialmente, en una funda (28). Los sensores (20, 21) están conectados a un convertidor analógico-digital (25) y a un microcontrolador (26) a través de cables o tiras conductoras. Además, mediante cables de conexión (3), los

componentes electrónicos (20, 21, 25, 26) pueden conectarse a la electrónica de un sistema informático portátil, lo que permite que el sistema comunique los datos de temperatura [13].

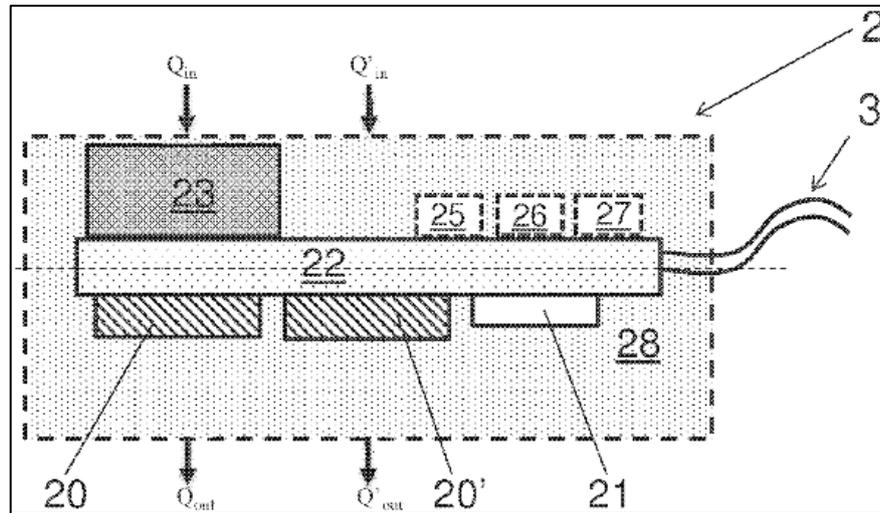


Figura 11 – Diagrama esquemático transversal de los sensores [13]

3.1.1 COMPARACIÓN CON LAS NECESIDADES Y REQUISITOS DEL DISEÑO

Esta patente tiene como objetivo determinar la temperatura corporal interna a través de lecturas continuas con un dispositivo de detección no invasivo, enfocándose en la monitorización del paciente en contextos tales como un golpe de calor durante la actividad física, en instalaciones de atención u otras condiciones médicas. Aunque el objetivo principal es detectar y monitorizar la temperatura, especialmente en veteranos con parálisis y en entornos extremos, esta solución se adapta perfectamente al objetivo de controlar la temperatura corporal de personas en situaciones vulnerables.

Además, esta solución satisface varias de las necesidades y requisitos de diseño del proyecto final, que se enumeran a continuación:

1. **Eficiencia y conservación del sensor:** Este diseño prioriza el contacto eficiente de los sensores de temperatura directamente con la superficie de la piel del usuario, lo cual permite lecturas de temperatura externas más precisas. Esto se alinea con el objetivo de recopilar y compartir una representación exacta de la

temperatura corporal en tiempo real para el usuario. Esta patente también describe una solución que emplea métodos de aislamiento para preservar la funcionalidad del sistema de sensores, así como para protegerlo de posibles daños externos.

2. **Alojamiento y colocación de la unidad de sensores:** Esta solución proporciona una variedad de modalidades para hacer frente a las distintas necesidades de los usuarios en la lectura de su temperatura corporal. Con dos métodos de montaje en la piel y adaptabilidad a múltiples tipos, combinaciones y cantidades de sensores de temperatura, esta invención permite distintas modificaciones en cualquier momento para responder a las diversas necesidades de cada usuario. En el diseño final, se busca adaptar y atender a los individuos con distintos grados y ubicaciones de parálisis, asegurando flexibilidad en el montaje y acceso a las lecturas de temperatura en diferentes partes del cuerpo según la colocación del sensor.

3.2 PATENTE 2: DISPOSITIVO INTELIGENTE PARA LA MONITORIZACIÓN DE TEMPERATURA CORPORAL

La patente titulada “*Wearable Intelligent Body Temperature Monitoring Device*” [14] describe un dispositivo portátil que rastrea la temperatura del cuerpo humano y alerta al usuario si esta se aproxima a un valor dentro del rango de fiebre. Este dispositivo consta de dos sensores de temperatura, un termómetro de seguimiento y la capacidad de transmitir los datos de temperatura a un móvil a través de Bluetooth mediante un microcontrolador.

Los sensores de temperatura determinan la temperatura corporal del usuario haciendo contacto con la piel, ya sea el cuello o en la muñeca del usuario. Cada sensor de temperatura contiene un termistor NTC que detecta constantemente la temperatura corporal, y a través del módulo de procesamiento de conversión de temperatura, la temperatura corporal medida se convierte en señales digitales y se transmite al móvil [14].

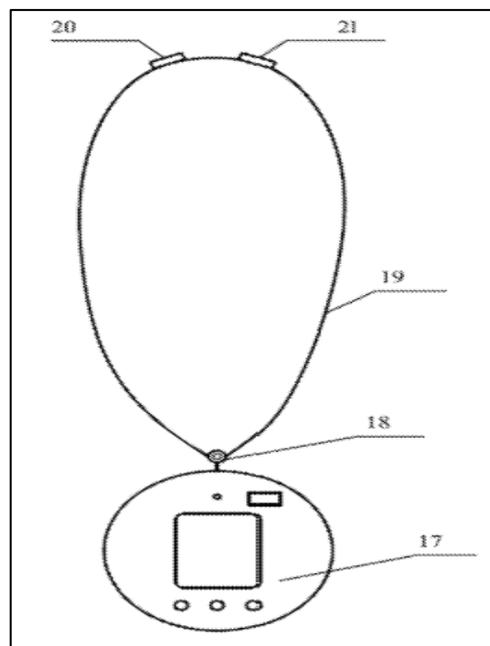


Figura 12 – Dispositivo de control portátil con cordón de silicona para el cuello [14]

En la imagen 12, se analiza cómo el dispositivo se lleva alrededor del cuello con un cordón de silicona (19). A lo largo de la parte superior del cordón, hay un primer termómetro

(20) y un segundo termómetro (21) que detectan las señales de temperatura del cuerpo al hacer contacto con la piel. Esta información se procesa y se envía al termómetro de control (17).

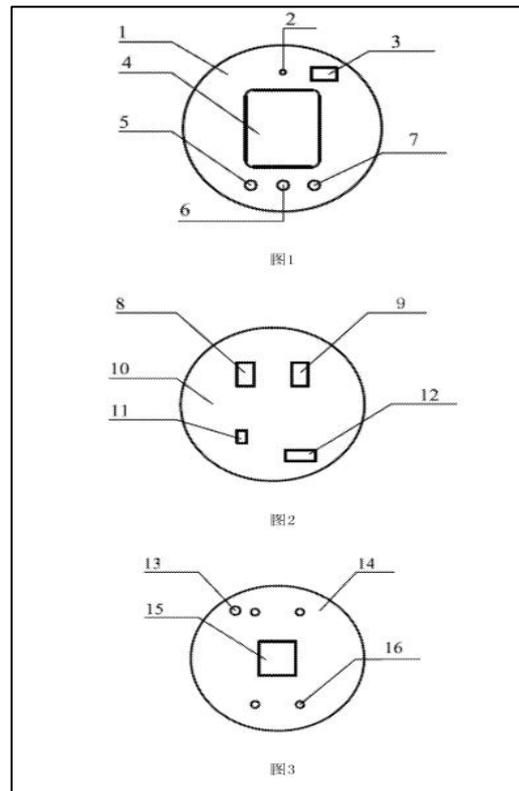


Figura 13 – Termómetro de control principal [14]

El termómetro de control principal, visualización 13, contiene tanto una funda frontal (1) como una inferior (14), y se conecta con el cordón de silicona a través de la parte delantera de la carcasa (18). El dispositivo de control tiene tanto un sensor de infrarrojos (2), como un indicador de advertencia (3) instalado en la parte frontal. Adicionalmente, existe una placa principal PCB que incluye un módulo de control de Bluetooth, un módulo de procesamiento de conversión de temperatura y un módulo de procesamiento de audio. El dispositivo en su conjunto utiliza un circuito de muestreo para convertir y amplificar la señal detectada, tras lo cual la transmite al módulo de procesamiento que la convierte en una señal digital y la envía al microprocesador [14].

3.2.1 COMPARACIÓN CON LAS NECESIDADES Y REQUISITOS DEL DISEÑO

Esta solución también satisface varias de las necesidades y requisitos de diseño del proyecto final, los cuales se enumeran a continuación:

1. **Transmisión inalámbrica de datos:** La capacidad de transmitir datos de temperatura en tiempo real a un dispositivo receptor es crucial para la monitorización continua y el análisis en remoto, facilitando la intervención rápida en caso de ser necesario. En este ejemplo, se implementa tanto un microprocesador como el protocolo BLE, aspectos esenciales para tener en cuenta para el desarrollo del proyecto.
2. **Diseño portátil y cómodo:** El dispositivo está diseñado para ser llevado cómodamente por el usuario durante períodos prolongados, lo cual es esencial para garantizar la adherencia y la eficacia del monitoreo.
3. **Precisión en la medición:** Los sensores avanzados empleados (NTC) en este dispositivo garantizan lecturas precisas de la temperatura de piel, lo cual es fundamental para obtener datos fiables y útiles para la toma de decisiones médicas.

Capítulo 4. DEFINICIÓN DEL TRABAJO

4.1 JUSTIFICACIÓN

Las soluciones de ciber salud (e-health) están revolucionando el campo de la medicina, dado que permiten una monitorización continua y precisa de los parámetros más vitales de los pacientes. Cabe destacar que estas tecnologías no solo mejoran la calidad de vida de los usuarios, sino que también facilitan el trabajo de los profesionales médicos, permitiendo una intervención temprana en caso de anomalías. Es crítico cualquier solución que permita eliminar trabajo al personal sanitario y ayudar a que los procesos sean más eficientes, ya que si volvemos a pasar por una crisis sanitaria como el COVID-19 o cualquier otro problema, la tecnología podría acortar significativamente el número de muertes. Implementar estas herramientas no solo nos prepara mejor para el futuro, sino que también fortalece nuestra capacidad de respuesta ante emergencias sanitarias, salvando vidas y optimizando recursos.

En el mercado actual y a pesar de estos avances tecnológicos, aún existen áreas donde las soluciones actuales no cumplen con las necesidades específicas de monitoreo. Tras revisar de manera exhaustiva las patentes existentes y analizar sus implicaciones, se ha identificado aspectos no cubiertos dentro del mercado de dispositivos *wearables* para la monitorización de la temperatura corporal.

En particular, aunque hay dispositivos que miden la temperatura y transmiten datos a dispositivos móviles, ninguno da una solución fiable y continua que pueda utilizarse en entornos clínicos y en el hogar. Adicionalmente, cabe destacar el público tan específico para el cual se implementaría el producto, en este caso veteranos, los cuales muchos no tienen ni brazos ni piernas, por lo que el producto ha de ser extremadamente simple pero preciso para ponerse sin la ayuda de terceros, pero asegurando que no se juega con su salud tan crítica. La necesidad de un dispositivo que no solo sea preciso y cómodo, sino que también garantice la transmisión continua y segura de datos en tiempo real es evidente.

Por lo tanto, el desarrollo de este proyecto se justifica por la carencia de un dispositivo *wearable* en el mercado que ofrezca:

1. **Transmisión Continua y Fiable de Datos:** Un sistema que asegure la transmisión ininterrumpida de datos de temperatura a dispositivos móviles para el monitoreo remoto.
2. **Diseño Portátil y Cómodo:** Un *wearable* que pueda llevarse cómodamente durante largos periodos, asegurando que los usuarios no tengan molestias. El *wearable* tiene que ser fácilmente recargable, sin problemas de seguridad, y capaz de experimentar grandes rangos de temperatura, tanto muy altas como muy bajas.
3. **Precisión y Fiabilidad:** Sensores avanzados que garantizan mediciones precisas y fiables de la temperatura corporal.

De esta manera, se concluye que a través del desarrollo de este proyecto se llena un vacío en el mercado y mejora significativamente la calidad de vida de los usuarios al proporcionarles una herramienta esencial para la monitorización de la salud.

4.2 OBJETIVOS

Los objetivos principales del proyecto sensores de temperatura para veteranos son los siguientes:

1. **Desarrollar un dispositivo con sensores de temperatura integrado en la ropa.** A través del proyecto se busca no solo controlar la temperatura corporal, sino también incorporar la tecnología para poder transmitir los datos a un dispositivo electrónico de manera eficiente y segura que permita alertar al usuario en casos extremos. La Universidad de Texas en Austin proporcionará los componentes softwares, pero será necesario implementar una manera de conectar los datos a través del módulo de bluetooth, y asegurar que todos los componentes son compatibles tanto con la aplicación software como con el diseño final.

2. **Implementar una red de comunicación inalámbrica para la transferencia de datos.** De manera general, se busca diseñar una red de comunicación robusta que permita la transmisión continua de datos de temperatura corporal desde los sensores integrados en la ropa de los veteranos hasta un centro de control, donde se podrán visualizar. Este objetivo en concreto es la prolongación del objetivo principal, buscando desarrollar tecnologías como Bluetooth o Wi-Fi dependiendo de los requerimientos específicos de la aplicación en términos de alcance, consumo de energía y ancho de banda.
3. **Promover la salud y el bienestar.** La monitorización continua de la temperatura corporal proporciona información valiosa para prevenir enfermedades graves como la hipertermia o la hipotermia. Esto no solo ayuda a evitar emergencias médicas, sino que también permite un seguimiento más concreto y detallado de la salud, lo que permite así un apoyo constante a la rehabilitación y la atención médica a distancia.
4. **Diseñar un sistema de alimentación eficiente y duradero para los dispositivos de monitoreo de temperatura.** Existe una necesidad de desarrollar soluciones que permitan que los sensores integrados en la ropa de los veteranos operen de manera continua, asegurando una larga duración de la batería y la capacidad de recarga fácilmente accesible. Por lo tanto, se han de considerar tecnologías de bajo consumo energético y sistemas de gestión de energía para optimizar el rendimiento del dispositivo y garantizar su fiabilidad en condiciones de uso prolongado.
5. **Mejorar la seguridad y la autonomía.** El proyecto busca proporcionar a los veteranos con parálisis la capacidad de participar en actividades al aire libre de manera más segura y autónoma al vigilar y alertar cambios extremos de temperatura. Al hacerlo, se les permite disfrutar de una gama más amplia de actividades sin comprometer su salud.

4.3 METODOLOGÍA

Para alcanzar los objetivos planteados, se seguirá la siguiente metodología:

- 1. Investigación y análisis de soluciones existentes.**
 - a. Analizar de manera exhaustiva la literatura y patentes existentes para identificar tecnologías y enfoques relevantes. Poner en común las ideas y diseñar de manera muy sencilla y general una idea inicial para llevar a cabo. Se han de tener en cuenta tanto posibles desarrollos existentes como aspectos a diseñar y crear dado su no existencia.
- 2. Lista de componentes necesarios**
 - a. Identificar y enumerar los componentes necesarios para el desarrollo del dispositivo. Se busca destacar cualquier característica significativa a la hora de tener en cuenta el tipo de componente, de manera que se consideren a la hora de elegir entre dos opciones.
- 3. Búsqueda y análisis de componentes**
 - a. Realizar una búsqueda de los compontes, leyendo las hojas de datos (*data sheets*) para verificar su compatibilidad con el resto de los componentes y con el *wearable* en su conjunto.
 - b. Necesidad de encontrar varios tipos y modelos de un mismo componente para ahorrar tiempo y considerar distintas situaciones. La compatibilidad teórica puede diferir de la práctica de manera significativa, por lo que es necesario analizar distintos componentes en busca de la mejor precisión y resultado final.
 - c. Se busca una amplia variedad de dispositivos compatibles con el diseño original, de manera que se prueben y se adapte el diseño en función de su operatividad.
- 4. Prueba de sensores de temperatura**
 - a. Se ha de comprobar el componente esencial para el desarrollo del proyecto, y a partir de ahí en función del mejor modelo comprobar el resto de los componentes y asegurar su compatibilidad. Por lo tanto, se han de probar

distintos sensores de temperatura bajo diversas condiciones para evaluar su precisión y tiempo de respuesta.

5. Diseño del prototipo

- a. Integrar todos los componentes de manera teórica, de forma que se simule la situación real donde se pueda medir la temperatura corporal de un individuo sin estar alimentado por un ordenador.

6. Pruebas del resto de módulos y componentes.

- a. Evaluar el funcionamiento del resto de los módulos y componentes como son BLE, microcontrolador, baterías etc. para asegurar el correcto funcionamiento y la transmisión de datos.

7. Diseño de la carcasa

- a. Implementar aplicaciones de diseño como SolidWorks para diseñar la carcasa del dispositivo. Tener en cuenta medidas de los componentes y requerimientos por parte de los veteranos para su comodidad, uso y seguridad.

8. Impresión e iteraciones de la carcasa 3D

- a. Imprimir la primera versión de la carcasa en 3D y realizar distintas iteraciones y modificaciones del diseño según su funcionamiento. Probar insertando los componentes dentro de la caja y asegurar capacidad de que no se muevan y quepan dentro de la caja.
- b. Las iteraciones en esta etapa se basarán en la comodidad de los veteranos y la seguridad a la hora de implementar el prototipo.

9. Pruebas del producto en su conjunto

- a. Ensamblar el producto y probarlo en su totalidad para evaluar su rendimiento y funcionalidad. ¿Se cumplen los objetivos originalmente establecidos?
- b. En caso de haber problemas, realizar las modificaciones e iteraciones necesarias.

10. Integración de software y hardware

- a. Juntar tanto el hardware como el software proporcionado por la universidad para realizar pruebas exhaustivas del producto completo. En esta fase

comprobar que se cumple el objetivo principal. ¿Se podría vender en el mercado?

- b. ¿Cumple con su funcionalidad de ayudar a los veteranos a prácticas actividades cotidianas al aire libre en su día a día?

4.4 PLANIFICACIÓN Y ESTIMACIÓN ECONÓMICA

Presentación temporal de las actividades a realizar y estimación del coste de desarrollo.

Tabla 1 - Cronograma de las tareas a realizar

Tarea	Start Date	End Date	Duración (días)	Coste (euros)
<i>Elección de tema y comprensión de los requerimientos.</i>	01/09/2023	02/10/2023	31	NA
<i>Investigación y análisis de soluciones existentes.</i>	02/10/2023	23/10/2023	21	NA
<i>Lista de componentes necesarios.</i>	16/10/2023	09/11/2023	24	NA
<i>Búsqueda y análisis de los componentes.</i>	23/10/2023	01/12/2023	39	NA
<i>Pedir componentes.</i>	01/12/2023	15/01/2024	45	200€ - 300€
<i>Prueba de sensores de temperatura.</i>	15/01/2024	15/02/2024	31	NA
<i>Diseño del prototipo.</i>	12/02/2024	29/02/2024	17	NA
<i>Prueba de resto de módulos y componentes.</i>	01/03/2024	22/03/2024	21	NA
<i>Diseño de la carcasa 3D.</i>	22/03/2024	02/04/2024	11	50€
<i>Impresión e iteraciones de la carcasa 3D.</i>	28/03/2024	01/05/2024	34	100€
<i>Pruebas del producto en su conjunto.</i>	08/04/2024	01/05/2024	23	NA
<i>Integración de software y hardware.</i>	01/05/2024	01/07/2024	61	NA

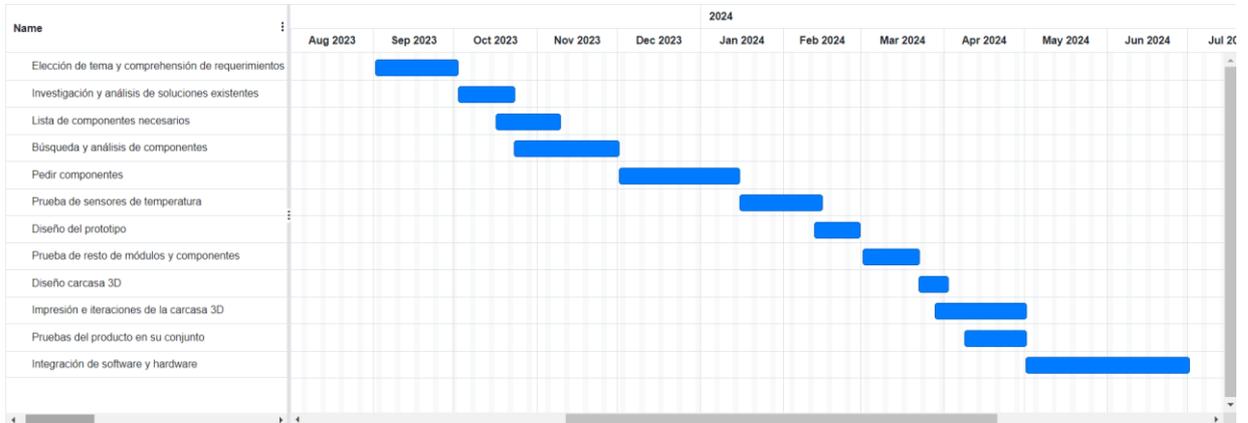


Figura 14 – Gantt chart con trabajos a realizar

Capítulo 5. SISTEMA/MODELO

DESARROLLADO

En este capítulo se describe de manera detallada el desarrollo del proyecto, abarcando desde el análisis inicial y los requerimientos del sistema hasta el diseño y su implementación final. El propósito de este capítulo es proporcionar una visión integral de cada fase del desarrollo, asegurando que en todo momento se justifican los aspectos más claves del diseño y se cumplen todos los objetivos establecidos. De esta manera, se proporciona documentación exhaustiva y técnica del desarrollo del proyecto, permitiendo a otros individuos replicar, entender y mejorar el sistema.

5.1 ANÁLISIS Y REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA

En esta sección se detalla el análisis previo realizado para la selección de componentes, y la viabilidad del proyecto. A parte de la investigación previa de soluciones existentes, hay que considerar los requerimientos del sistema y de los individuos a los que va dirigido el proyecto para definir y seleccionar los componentes.

Asimismo, en esta sección se establecen los requerimientos funcionales y no funcionales para el desarrollo del dispositivo de control de temperatura. Estos requerimientos se definen con el fin de asegurar que el dispositivo cumpla con las expectativas y necesidades del usuario final, los veteranos, en el contexto en el que se va a desarrollar la actividad.

5.1.1 REQUERIMIENTOS FUNCIONALES

1. Comodidad y usabilidad

El usuario debe poder usar de manera cómoda el dispositivo, lo cual implica que pueda realizar sus actividades sin impedimentos. El dispositivo tiene que ser una ventaja y ayuda que recibe el usuario, y en ningún momento un impedimento o distracción.

Por lo tanto, teniendo en cuenta las distintas discapacidades de cada usuario, el dispositivo debe tener la posibilidad de adaptarse y configurarse según el individuo y la parte del cuerpo que tenga disponible, sea esta los brazos, las piernas, o el pecho. De esta manera, el dispositivo debe ser diseñado con una banda o un brazalete fácil de poner para que el usuario no tenga complicaciones a la hora de ponérselo sin brazos o piernas.

El material originalmente pensado para este funcionamiento es una cinta elástica, comúnmente utilizada en linternas frontales y monitores de frecuencia cardiaca, que tenga velcro fácil de poner, pero que a su vez asegure que no se mueve del lugar donde se ubique.

2. **Medición precisa de temperatura**

El objetivo principal se centra en una medida precisa de la temperatura del usuario, y alertarlo si la temperatura supera o queda por debajo de un cierto umbral. El sensor se colocará en la banda de manera que mida la temperatura corporal a través del contacto con la piel. El dispositivo se colocará en la muñeca o pierna bajo la ropa para medirse con precisión. De esta manera, la entrada del dispositivo hardware es un valor de temperatura corporal en centígrados.

Tabla 2 - Entrada hardware

Datos	Unidad
<i>Valor de la temperatura corporal</i>	Centígrados

3. **Transmisión de datos en tiempo real**

El dispositivo debe poder transmitir datos de temperatura en tiempo real a una aplicación móvil a través de Bluetooth. De manera que, teniendo en cuenta la entrada hardware que es

un valor de temperatura corporal analógico en centígrados, la salida sea, como indica la tabla 3, un valor digitalizado de temperatura corporal.

Tabla 3 - Salida de hardware

Datos	Unidad
<i>Valor digitalizado de la temperatura corporal</i>	Float

4. **Facilidad de limpieza**

El dispositivo debe poder limpiarse adecuadamente para poder reutilizarse. Esto implica que se han de investigar materiales fáciles de limpiar y desinfectar para poder construir tanto la banda que se use para que el usuario se ponga el dispositivo como el molde que contendrá todos los componentes electrónicos. Adicionalmente, se debe considerar la posibilidad de que los componentes electrónicos se mojen en su limpieza. Este hecho implica tener en cuenta todos los posibles riesgos para mantener la seguridad en todo momento.

5. **Resiliencia a condiciones adversas**

Teniendo en cuenta el lugar donde se va a desarrollar e implementar el dispositivo, es evidente que el dispositivo debe ser resistente a variables comunes en actividades al aire libre como son el agua (de nieve, sudor o lluvia), impactos que puede sufrir tanto el individuo como el dispositivo sean estos ligeros o moderados, y posibles movimientos bruscos. Así, cabe destacar que los componentes electrónicos deben colocarse estratégicamente en una carcasa diseñada cuidadosamente para asegurar que no existe movimiento ninguno y no perjudica la capacidad de medida del dispositivo.

5.1.2 REQUERIMIENTOS NO FUNCIONALES

1. **Durabilidad y resistencia**

El dispositivo debe diseñarse para soportar un uso constante en diversas condiciones ambientales, tanto calor como frío, y manteniendo su funcionalidad en todo momento. Por lo tanto, se han de seleccionar tanto la carcasa como los componentes para que se ensamblen y maximicen su durabilidad y resistencia a factores externos.

2. Autonomía de la batería

El dispositivo se implementará varias veces durante la semana, e incluso diariamente durante un periodo de tiempo. Por lo tanto, el dispositivo debe tener una duración de batería adecuada para actividades al aire libre sin necesidad de recargarlo frecuentemente. Se buscará optimizar el consumo energético del dispositivo para asegurar una mayor autonomía.

3. Compatibilidad y conectividad

La aplicación móvil debe ser compatible con dispositivos Android e iOS, asegurando una amplia accesibilidad para los usuarios. Por lo tanto, aunque la parte software se desarrolle por parte de la universidad, se ha de tener en cuenta para que el resto de los componentes sean compatibles y la conexión de Bluetooth sea estable y de bajo consumo asegurando que no afecte significativamente la duración de la batería.

4. Diseño y usabilidad

El diseño del dispositivo debe ser intuitivo y fácil de usar, permitiendo a los usuarios interactuar con el sin complicaciones. Los usuarios tienen una movilidad muy limitada y poca ayuda a la hora de realizar actividades al aire libre, por lo que cualquier dispositivo que implementen en su día a día ha de ser una ayuda y no una distracción o limitación.

De esta manera, teniendo en cuenta tanto los requerimientos funcionales como los no funcionales, se establece la base para el desarrollo y la evaluación del dispositivo, garantizando en todo momento que se cumpla con los estándares necesarios para su uso en actividades al aire libre. El dispositivo tiene como fin ser una herramienta confiable y cómoda para el monitoreo de temperatura.

Asimismo, teniendo en cuenta toda la información, el diagrama de flujo de datos, ilustración 15, desde la medición de la temperatura corporal hasta la transmisión de esta a la aplicación móvil pasando por la digitalización y procesamiento de datos es la siguiente:

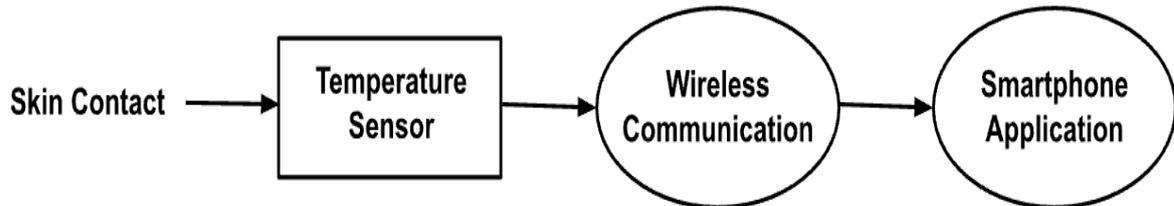


Figura 15 – Diagrama de flujo hardware

5.2 DISEÑO

En esta sección se describirá el proceso de diseño del sistema, detallando los componentes seleccionados y el diseño de la carcasa.

5.2.1 ENFOQUE DE DISEÑO

La solución de diseño que se va a implementar para el lado de hardware del dispositivo de detección de temperatura para veteranos con parálisis ofrece un medio innovador y eficiente para monitorear la temperatura de la piel en tiempo real. El dispositivo se diseña para ser usado cómodamente por el usuario final en su ubicación del cuerpo elegida, típicamente alrededor de las extremidades u otras áreas de interés.

El diseño presenta un dispositivo de detección de temperatura que hace contacto directo con la piel del usuario para capturar lecturas de temperatura de manera continua. Estas lecturas se transmiten inalámbricamente a una aplicación de teléfono inteligente, proporcionando actualizaciones en tiempo real que pueden acceder el usuario y su instructor. El diagrama de flujo del sistema, ilustración 15, describe el proceso a través el cual opera el dispositivo de detección de temperatura, desde su contacto inicial con la piel del usuario hasta la entrega de datos a una aplicación de teléfono inteligente. El proceso comienza con el dispositivo de detección de temperatura haciendo contacto directo con la piel del usuario en la ubicación elegida en el cuerpo, permitiendo un monitoreo continuo y en tiempo real de la temperatura. El sensor de temperatura del dispositivo mide con precisión la temperatura de la piel y envía los datos al microcontrolador para su procesamiento posterior.

El microcontrolador actúa como la unidad de procesamiento central, preparando los datos para la transmisión inalámbrica. Los datos procesados se transmiten de forma inalámbrica a la aplicación de teléfono inteligente del usuario utilizando la tecnología Bluetooth Low Energy (BLE) facilitada por el microcontrolador. La aplicación de teléfono inteligente recibe los datos en tiempo real, mostrando las lecturas de temperatura y proporcionando opciones personalizables para establecer umbrales de temperatura. Si la temperatura excede los umbrales elegidos, la aplicación envía alertas y notificaciones al

usuario. Este diagrama de flujo del sistema ilustra la operación eficiente del dispositivo y su capacidad para entregar alertas oportunas al usuario, mejorando su experiencia general y asegurando el bienestar de los veteranos con parálisis.

Para visualizar esta idea, el diagrama de bloques de componentes de hardware proporciona una representación visual de la configuración del dispositivo de detección de temperatura, con los componentes de hardware clave y sus interconexiones.

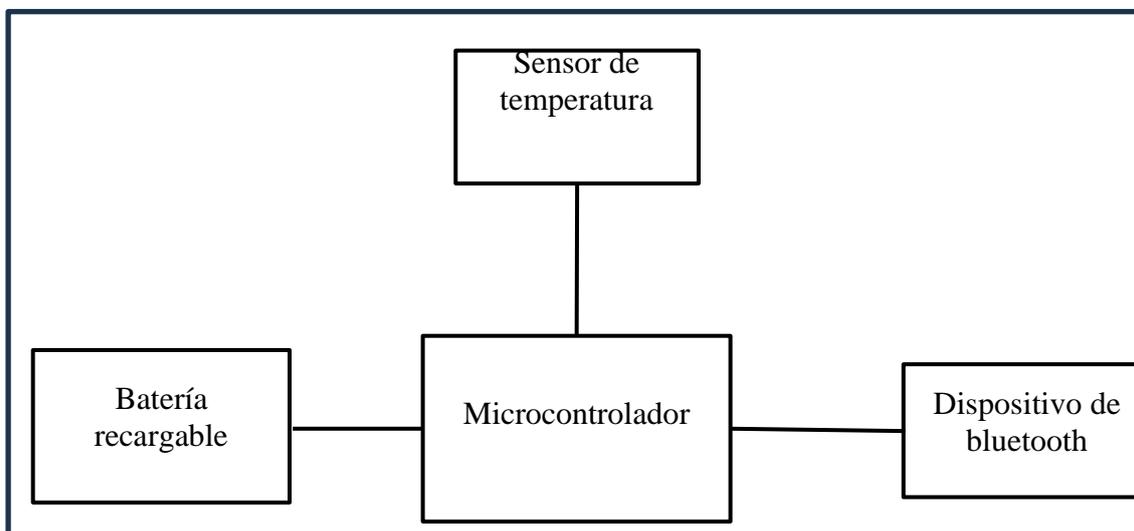


Figura 16 – Diagrama de bloques de los componentes hardware

Por lo tanto, el diseño final pretende ofrecer un rendimiento eficiente y comodidad para el usuario. El dispositivo está contenido dentro de una carcasa portátil y duradera que integra un sensor de temperatura, un microcontrolador, un módulo de comunicación inalámbrica y una fuente de alimentación. La carcasa es esencial para tener todos los componentes ubicados en un mismo lugar de manera que operen en conjunto.

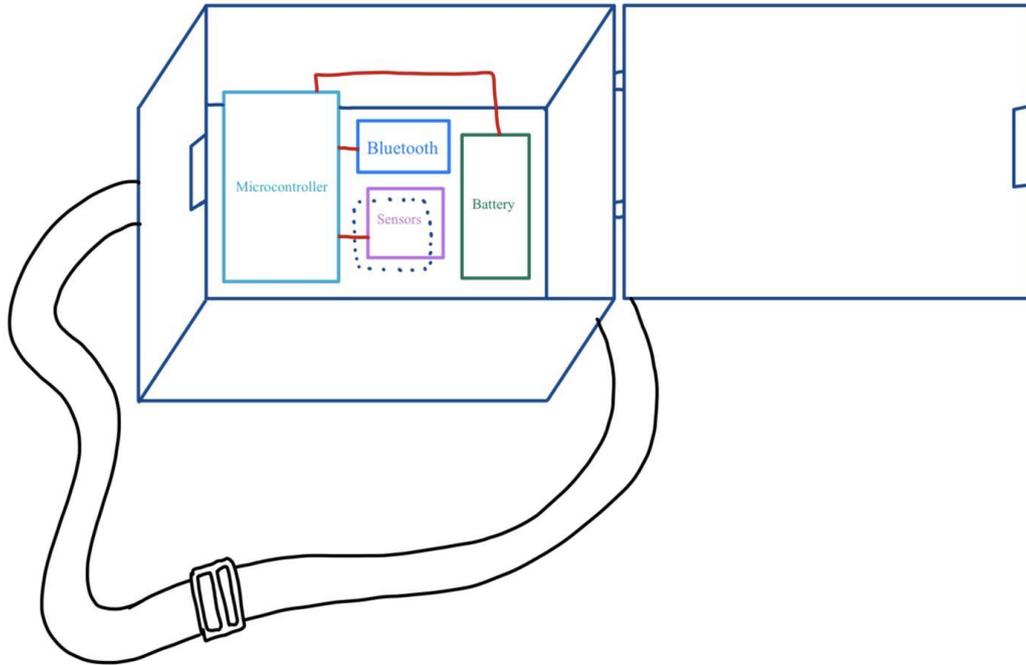


Figura 17 – Dibujo de la unidad de hardware del prototipo en su carcasa

5.2.2 SELECCIÓN DE COMPONENTES

Después de definir el enfoque del diseño, se procede a la selección específica de los componentes necesarios para el desarrollo del dispositivo. A continuación, se detalla la lista de componentes necesarios, el proceso de selección de estos y la justificación de su selección basada en los requerimientos del proyecto.

1. Sensor de temperatura

5.2.2.1 Metodología

Para la elección del mejor de sensor de temperatura se llevaron a cabo varias pruebas de aceptación para garantizar que se cumplieran con las especificaciones y requisitos predeterminados establecidos por la empresa patrocinadora del proyecto. Cada componente se prueba de manera independiente para identificar cualquier defecto o desviación del rendimiento esperado y tomar una decisión final. Estos procedimientos se centran en

verificar la comunicación entre componentes, la funcionalidad y la fiabilidad en condiciones variables. Se enfatiza la evaluación de la integración de componentes individuales en subsistemas.

Inicialmente, el conjunto de sensores de temperatura elegidos para probar incluye: LM35DZ, LM35AH, LM35CZ/NOPB, LM35DT, DS, SEN TMP, SEN, BME. Estos sensores se eligen en base a su hoja de características, tabla 4, y su capacidad para medir temperaturas en un rango amplio y con precisión.

Tabla 4 - Características básicas sensores de temperatura

	<i>Características básicas</i>			
Sensor	Precisión	Rango de temperaturas	Voltaje de operación	Datos específicos del sensor
LM35DZ [15]	$\pm 0.5^{\circ}\text{C}$	-55°C a $+150^{\circ}\text{C}$	4V a 30V	Salida lineal en grados ($10\text{ mV}/^{\circ}\text{C}$) sin necesidad de calibración externa.
LM35AH [16]	$\pm 0.7^{\circ}\text{C}$	-55°C a $+150^{\circ}\text{C}$	4V a 30V	Alta precisión y estabilidad a largo plazo – ideal para aplicaciones industriales.
LM35CZ / NOPB [17]	$\pm 0.6^{\circ}\text{C}$	-55°C a $+150^{\circ}\text{C}$	4V a 30V	Diseño compacto con encapsulado, TO-92 fácil de integrar en diversos proyectos.
LM35DT [18]	$\pm 0.4^{\circ}\text{C}$	-55°C a $+150^{\circ}\text{C}$	4V a 30V	Máxima precisión entre los sensores LM35, encapsulado TO-220 para mejor disipación térmica.
DS [19]	$\pm 0.3^{\circ}\text{C}$	-55°C a $+125^{\circ}\text{C}$	3V a 5.5V	Sensor digital con comunicación 1-Wire, muy bajo consumo de energía.
SEN TMP [20]	$\pm 0.8^{\circ}\text{C}$	-40°C a $+125^{\circ}\text{C}$	2.7V a 5.5V	Sensor de temperatura digital de bajo costo, interfaz I2C.
SEN [21]	$\pm 0.6^{\circ}\text{C}$	-40°C a $+125^{\circ}\text{C}$	2.7V a 5.5V	Alta sensibilidad y rápido tiempo de respuesta, adecuado para aplicaciones de consumo.

<i>Características básicas</i>				
Sensor	Precisión	Rango de temperaturas	Voltaje de operación	Datos específicos del sensor
BME [22]	±0.5°C	-40°C a +85°C	1.71V a 3.6V	Sensor multifuncional que mide temperatura, humedad y presión barométrica.

Para cada sensor de temperatura se realiza un pequeño programa de prueba, en el que, a través del programa Arduino, se desarrolla un pequeño código para ver si puede leer la temperatura. Este código se verifica primero con la temperatura ambiente para asegurar que tanto el código como el componente funcionan.

Este proceso se diseña dado que se conoce la temperatura de la habitación, por lo que se puede verificar y asegurar antes de realizar más pruebas. Se adjunta en el anexo II el código que se utiliza e implementa para probar el sensor de temperatura LM35DZ.

En este caso, el código está diseñado para leer la temperatura del sensor conectado a un Arduino Nano 33 BLE y mostrar su valor en centígrados.

```
void loop() {
  int temp_adc_val;
  float temp_val;
  temp_adc_val = analogRead(lm35_pin);    // Read temperature
  temp_val = (temp_adc_val * (3.3 / 1023) * 100);    // Convert
  ADC value to equivalent voltage and then to temperature
  Serial.print("Temperature = ");
  Serial.print(temp_val);
  Serial.print(" Degree Celsius\n");
  delay(1000);
}
```

}

De esta manera, la función ‘loop’ se ejecuta continuamente en un ciclo realizando las siguientes acciones. En primer lugar, lee el valor analógico del pin al que está conectado el sensor y este valor es un número entero entre 0 y 1023 que representa el voltaje medido en el pin. Para poder obtener su valor en grados es necesario convertir el valor ADC a voltaje.

El valor de 1023 se debe a la resolución del ADC incorporado en el microcontrolador. El Arduino Nano 33 BLE tiene una resolución de 10 bits [12], lo cual determina cuántos niveles discretos se pueden representar. En el caso de un ADC de 10 bits, se pueden representar $2^{10} \text{ niveles} = 1024 \text{ niveles discretos}$. Dado que el valor comienza en 0, se resta uno a los niveles totales, obteniendo 1023.

El Arduino Nano 33BLE opera a 3.3V, lo que significa que todos los pines de entrada o salida del microcontrolador y los componentes internos como el ADC funcionan con un voltaje de 3.3V en lugar de 5V, el valor que normalmente se establece entre los otros modelos de Arduino. De esta manera, el ADC convierte voltajes en el rango de 0V a 3.3V a valores digitales en el rango de 0 a 1023 [12]. Teniendo estos datos en cuenta, para convertir el valor digital a voltaje, se aplica la siguiente formula:

$$\text{Voltaje medido} = \frac{\text{Valor digital}}{1023} * 3.3V \quad [12]$$

Una vez que todos los componentes pasan la prueba y miden la temperatura ambiente correctamente, se adaptan las circunstancias para poder probar los componentes en "condiciones más extremas" y determinar la precisión de estos sensores. Además, se prueban otras características y especificaciones claves que se solicitaron inicialmente dentro del componente para garantizar que se cumpla con los objetivos del proyecto. Estas pruebas incluyen:

A. Método del baño de hielo

En el método del baño de hielo, se prepara un pequeño recipiente mezclando agua y hielo para alcanzar una temperatura estable de 0 grados centígrados. Una vez alcanzada la temperatura deseada, el sensor de temperatura se sumerge cuidadosamente en el baño de hielo y se deja estabilizar la temperatura unos minutos. Este período de estabilización asegura que el sensor tenga tiempo para aclimatarse al ambiente frío, permitiendo medidas más precisas. Después de la estabilización, se registra la lectura de temperatura del sensor y se compara el valor con la temperatura conocida del baño de hielo para evaluar la precisión del sensor a bajas temperaturas. Este método proporciona un entorno controlado para evaluar el desempeño del sensor en condiciones frías, asegurando su idoneidad para la posible integración en el diseño final.

B. Método de agua hirviendo

En el método del agua hirviendo, se hierve agua en un pequeño recipiente hasta que alcanza su punto de ebullición que son aproximadamente 100 grados centígrados. Cuando el agua alcanza un hervor constante, el sensor de temperatura se sumerge cuidadosamente en el agua hirviendo y se deja de nuevo en unos minutos para asegurar que se establezca la temperatura. Este período de estabilización ayuda al sensor a ajustarse a la alta temperatura y proporciona una lectura más precisa. Después de la estabilización, se anota la lectura de temperatura mostrada por el sensor y se compara con el punto de ebullición conocido del agua para evaluar la precisión del sensor a altas temperaturas. Una vez más, este método ofrece un medio seguro para evaluar el desempeño del sensor en condiciones de calor extremo y es esencial para determinar su idoneidad en aplicaciones donde la precisión a altas temperaturas es crítica.

Después de estos dos métodos básicos para probar la precisión de los componentes, se analizaron los resultados y se seleccionaron los mejores componentes para pruebas adicionales. Estos nuevos métodos de prueba incluyeron:

C. Comparación con termómetro de referencia

Para evaluar la precisión del sensor de temperatura utilizando un termómetro de referencia calibrado, se colocan tanto el sensor como el termómetro de referencia en el mismo entorno, como una cámara controlada a una temperatura específica. Este entorno controlado asegura condiciones consistentes para una medida precisa. Se toman lecturas simultáneas del termómetro de referencia y del sensor de temperatura. Se calcula la variación entre las mediciones de los dos dispositivos para evaluar la precisión del sensor de temperatura en comparación con el termómetro de referencia. Este método proporciona un punto de referencia claro para evaluar el rendimiento del sensor de temperatura y su idoneidad para aplicaciones precisas.

D. Pruebas de tiempo de respuesta

Para medir el tiempo de respuesta del sensor de temperatura, que es el tiempo que tarda el sensor en detectar y reportar un cambio de temperatura, se introduce un cambio repentino en el entorno. Esto se logra colocando inicialmente el sensor en un baño de hielo y luego transfiriéndolo rápidamente a agua hirviendo. Se registra el tiempo que tarda el sensor en registrar el cambio de temperatura, proporcionando una indicación de la capacidad de respuesta del sensor a fluctuaciones repentinas de temperatura.

5.2.2.2 Resultados

Se presentan los resultados de las pruebas realizadas como parte del proceso de selección y evaluación. La tabla 5 destaca los principales indicadores de rendimiento, como la precisión de 0 y 100 grados, la comparación con un termómetro referencia y el tiempo de respuesta en segundos. Cada sensor es evaluado y los hallazgos se resumen en las tablas proporcionadas. Los valores en la tabla representan promedios obtenidos de múltiples ensayos para garantizar la precisión y fiabilidad.

Adicionalmente, se indican los resultados favorables para facilitar la identificación de los sensores que exhiben una respuesta superior de precisión y capacidad de respuesta. Estos hallazgos son extremadamente valiosos para seleccionar el sensor de temperatura más adecuado.

Modelo sensor	Imagen	Método baño de hielo (°C)	Método agua hirviendo (±°C)	Comparación termómetro de referencia (±°C)	Tiempo de respuesta (segundos)
LM35DT	 <p>Figura 21 – Sensor LM35DT [26]</p>	±0.4 (Favorable)	±0.4 (Favorable)	±0.2 (Favorable)	4 (Favorable)
DS	 <p>Figura 22– Sensor DS [27]</p>	±0.3	±0.3	±0.3	8
SEN TMP	 <p>Figura 23– Sensor SEN TMP [28]</p>	±0.8	±0.7	±0.5	10

Modelo sensor	Imagen	Método baño de hielo (°C)	Método agua hirviendo (±°C)	Comparación termómetro de referencia (±°C)	Tiempo de respuesta (segundos)
SEN	 <p>Figura 24 – Sensor SEN [29]</p>	±0.6	±0.8	±0.6	9
BME 280	 <p>Figura 25– Sensor BME 280 [30]</p>	±0.5	±0.5	±0.4	11

Los resultados de las pruebas revelan variaciones significativas en el desempeño de los distintos sensores de temperatura. Los modelos LM35DZ, LM35AH y LM35DT exhibieron una precisión superior en múltiples criterios de evaluación. Estos sensores mostraron desviaciones mínimas respecto a las lecturas de temperatura esperadas tanto en condiciones de bajas como de altas temperaturas, con tiempos de respuesta dentro de los límites aceptables. A partir de la tabla 5 se puede concluir que estos sensores ofrecen objetivamente la fiabilidad y validez necesaria para funcionar conforme a las especificaciones de diseño del dispositivo.

El análisis del funcionamiento de los sensores prioriza la compatibilidad del rendimiento con la piel del usuario, asegurando que los sensores puedan medir eficazmente la

temperatura mediante el contacto directo. Es crucial reconocer que estos métodos convencionales, como el del baño de hielo y el del agua hirviendo, pueden no replicar completamente las condiciones que experimenta una persona con parálisis. Por lo tanto, aunque estas pruebas proporcionan información valiosa sobre el rendimiento de los sensores en condiciones controladas, es necesaria una evaluación adicional en colaboración con los usuarios finales para validar la efectividad del dispositivo en escenarios reales.

En resumen, se seleccionan los sensores LM35H, LM35AH, LM35 y LM35DT para pruebas adicionales una vez se diseñe el producto al completo. Además, se considera implementar múltiples sensores en lugar de un único sensor en la medición final del dispositivo, dadas las características de cada uno y la capacidad de trabajar juntos. Esta idea se desarrolla de manera más profunda en el Diseño del circuito y ensamblaje.

2. **Microcontrolador y módulo de comunicación bluetooth (BLE)**

5.2.2.3 *Metodología*

La selección del módulo BLE y el microcontrolador es crucial para garantizar una transmisión eficiente de datos de temperatura desde el dispositivo hasta la aplicación móvil. Para esta selección, se consideran distintos métodos y pruebas para llevar a cabo con diversos módulos basados en los siguientes criterios:

1. **Consumo de energía**

La eficiencia energética es fundamental para garantizar que la batería dure un largo periodo de tiempo, especialmente en dispositivos portátiles. En cuanto a un microcontrolador, se busca que se puedan realizar las funciones necesarias implementando la mínima cantidad de energía eléctrica posible. Adicionalmente, cabe destacar la posibilidad de que un microcontrolador genere calor cuando no es eficiente, lo cual consume más batería y perjudica la integridad de los componentes electrónicos.

2. **Compatibilidad**

La capacidad de que el módulo seleccionado se pueda integrar con otros componentes del sistema como el sensor de temperatura o la aplicación móvil es un requerimiento de extrema importancia para el funcionamiento del producto.

3. Rendimiento

Existe una necesidad de poder manejar la transmisión de los datos en tiempo real desde su recopilación mediante el sensor de temperatura, hasta su procesamiento necesario para poder visualizarlos en la aplicación móvil.

4. Tamaño

En todo momento se deben considerar las especificaciones del usuario final como comodidad al realizar distintas actividades al aire libre, por lo que el tamaño del componente se ha de analizar y probar para asegurar que son dimensiones adecuadas.

5. Facilidad de uso

La disponibilidad de documentación y soporte técnico, como las hojas de datos, son aspectos claves para el desarrollo del dispositivo dado el tiempo tan limitado para su desarrollo. Se busca que el componente seleccionado sea fácil de implementar e integrar con el resto de los componentes y que exista documentación para realizarlo.

6. Integración BLE

Existe la posibilidad de que el microcontrolador tenga un módulo BLE integrado, lo cual simplifica el diseño hardware, y disminuye el tamaño del producto lo cual permite cumplir con las expectativas del usuario de manera más precisa.

Teniendo en cuenta los 5 criterios más significativos para la selección, se seleccionan varios microcontroladores para su evaluación. Estos microcontroladores se obtienen tanto de búsqueda en base a los criterios de selección, como a través de trabajos previamente realizados y analizados en el Estado de la Cuestión. Los componentes seleccionados son los siguientes:

1. Arduino Nano 33 BLE
2. Arduino UNO
3. Arduino Mega
4. ESP32
5. nRF52840 (Adafruit Feather nRF52840)

Para comprobar la compatibilidad de estos componentes con las características establecidas se hacen las siguientes pruebas.

En primer lugar, para comprobar el consumo de energía se mide el consumo en distintos estados operativos como son en estado inactivo, en estado de transmisión de datos o en estado de procesamiento de datos. Este consumo se mide a través de un multímetro en modo corriente en serie con una fuente de alimentación del microcontrolador y se mide la corriente que se consume mientras el microcontrolador realiza estas tareas típicas. El consumo de energía se mide en miliamperios por hora (mAh) durante su funcionamiento normal. De manera que un consumo bajo se traduce en $< 10 \text{ mAh}$, un consumo moderado en $10 - 30 \text{ mAh}$ y un consumo alto $> 30 \text{ mAh}$.

La categorización del consumo de energía en términos de “bajo”, “moderado” y “alto” se basa en el análisis de las necesidades del dispositivo, la duración de la batería y los estándares de la industria para dispositivos portátiles similares. Para que un dispositivo portátil pueda funcionar un día completo (24 horas) sin necesidad de recargar, es crucial mantener un consumo de energía bajo. Esto implica que consuma menos de 10 mAh durante su funcionamiento normal. Sin embargo, cabe destacar que este valor es teórico e ideal, pero la realidad suele ser que se acepta un consumo moderado durante actividades de transmisión y procesamiento. El diseño de dispositivos con consumo bajo es de gran complejidad por lo que se acepta un consumo moderado que mantenga el equilibrio entre la eficiencia energética y el rendimiento [39].

Para comprobar la compatibilidad del microcontrolador con el resto de los componentes, hay que considerar la integración de este con los sensores previamente seleccionados o la aplicación móvil proporcionada por la universidad. Así, la compatibilidad se evalúa en

cuanto a facilidad de integración con los sensores y disponibilidad de librerías y soporte si es necesario. Una alta compatibilidad implica una integración fácil con múltiples sensores y amplia documentación y soporte, mientras que una baja compatibilidad implica una gran dificultad a la hora de integrar los sensores y documentación de soporte limitada. Cabe destacar que en muchos casos la documentación y las hojas de datos contienen información sobre la compatibilidad de este con otros componentes lo cual simplifica el proceso de selección. Se considera una compatibilidad alta cuando el usuario se siente cómodo y capaz de realizar el proyecto dada la información disponible.

Para las pruebas de rendimiento, se evalúa la capacidad de transmitir datos de temperatura en tiempo real y la capacidad de respuesta en caso de cambios en las lecturas de un sensor. El rendimiento se puede medir en cuanto a capacidad de procesar, capacidad de memoria o capacidad de manejar transmisiones de datos en tiempo real. De esta manera, se emplea el termino excelente para un procesador de múltiples núcleos, con alta capacidad de memoria y un manejo eficiente de datos en tiempo real. Del contrario, se considera adecuado un procesador básico con capacidad de memoria limitada y un manejo básico de datos en tiempo real. Para medir el rendimiento del microcontrolador se pueden realizar pruebas de benchmarking que midan la velocidad de procesamiento, o evaluaciones de memoria donde se pueda saber la cantidad de memoria disponible o utilizada durante la ejecución de tareas típicas [39]. Adicionalmente, se pueden realizar pruebas de transmisión tal y como se implementaron con los sensores de temperatura, ANEXO II, para poder evaluar la capacidad del microcontrolador a la hora de manejar transmisiones de datos en tiempo real. En el caso de pruebas de benchmarking, se adjunta en el ANEXO III un simple programa que realiza una operación, en este caso una suma en bucle para pedir el tiempo que tarda en ejecutarse.

En caso del tamaño, se mide físicamente con una regla tanto el largo como el ancho. El tamaño pequeño se establece en $< 50 \times 30 \text{ mm}$, mediano de $50 \times 30 \text{ mm}$ a $70 \times 50 \text{ mm}$, y grande $> 70 \times 50 \text{ mm}$,

La facilidad de uso se evalúa en términos de curva de aprendizaje, disponibilidad de recursos educativos o comunidad de soporte. Se evalúa la facilidad de configurar el

microcontrolador inicialmente o posibilidad de empezar a trabajar con él y la calidad de la documentación disponible.

5.2.2.4 Resultados

Se presentan los resultados de las pruebas realizadas como parte del proceso de selección y evaluación. La tabla 6 destaca las principales características y especificaciones que tener en cuenta. Cada microcontrolador fue evaluado y los hallazgos se resumen en esta tabla proporcionada. Los valores en la tabla representan promedios obtenidos de múltiples ensayos para garantizar la mejor elección.

Tabla 6 - Resultados prueba microcontroladores preseleccionados

Microcontrolador	Consumo de energía (mAh)	Compatibilidad	Rendimiento	Tamaño (mm)	Facilidad de uso	BLE Integrado
Arduino Nano 33 BLE  Figura 26 – <i>Arduino Nano 33 BLE [12]</i>	Bajo	Alta	Excelente	Pequeño	Alta	Sí
Arduino UNO  Figura 27 – <i>Arduino UNO [31]</i>	Moderado	Alta	Bueno	Grande	Alta	No
Adafruit Feather nRF52840  Figura 28 – Adafruit nRF52840 [32]	Bajo	Alta	Excelente	Mediano	Alta	Sí
ESP32	Moderado	Alta	Excelente	Mediano	Alta	Sí

Microcontrolador	Consumo de energía (mAh)	Compatibilidad	Rendimiento	Tamaño (mm)	Facilidad de uso	BLE Integrado
 Figura 29 – ESP32 [33]						
 Figura 30 – Arduino Mega [34]	Moderado	Alta	Bueno	Grande	Alta	No

Los resultados de las pruebas destacan tanto el Arduino Nano 33BLE como el ESP32 como los microcontroladores más adecuados para el proyecto debido a sus múltiples ventajas. En el caso del Arduino Nano 33 BLE se observa que garantiza una larga duración de batería siendo este el que menos energía consume de todos los microcontroladores estudiados. Además, tiene alta compatibilidad con el resto de los componentes estudiados que permite una fácil integración, con un rendimiento excelente. Por último, destaca su pequeño tamaño con unas dimensiones muy compactas, haciéndolo muy cómodo para el usuario con un BLE ya integrado simplificando el diseño final de hardware.

Por otro lado, aunque el ESP32 tiene un consumo de energía más alto, es moderado, y por tanto adecuado para aplicaciones que requieren más potencia de procesamiento. El microcontrolador tiene una compatibilidad alta con soporte para una gran variedad de sensores y protocolos de comunicación a parte de su excelente rendimiento con capacidades

Wi-Fi y BLE, ofreciendo gran potencial y flexibilidad. Por último, aun siendo el tamaño un poco más superior, existe amplia documentación y soporte de la comunidad ESP lo cual facilita el trabajo en caso de problemas.

Cabe destacar el modelo Adafruit Feather nRF52840 como una opción viable en caso de problemas con los otros microcontroladores previamente seleccionados debido a su soporte con BLE 5.0 y múltiples protocolos inalámbricos, sin embargo, existe la posibilidad de haber menos documentación disponible dada su reciente publicación.

En conclusión, el microcontrolador elegido para el desarrollo del producto es el Arduino Nano 33 BLE debido a su potencial y sus características superiores en comparación con el resto de los microcontroladores. Este microcontrolador asegura una solución eficiente y fácil de implementar para el control de temperatura en tiempo real. Se tendrá siempre disponible y en segundo lugar como alternativa el ESP32 si hay un problema no considerado con el Arduino Nano 33 BLE dadas sus capacidades. Con esta selección se da un equilibrio óptimo entre rendimiento, eficiencia y facilidad de uso garantizando un dispositivo final robusto y cómodo para el usuario final.

3. **Batería**

5.2.2.5 Metodología

Para seleccionar la batería adecuada para el microcontrolador elegido, Arduino Nano 33 BLE, se deben tener en cuenta varios factores claves como son la capacidad de la batería, la duración de la carga, la facilidad de la recarga y la compatibilidad con el microcontrolador. Por lo tanto, primero se considera que el Arduino Nano 33 BLE opera a un voltaje de 3.3V [12], tal y como indica su ficha técnica, por lo que se requiere una batería con un voltaje compatible. Después de realizar distintos análisis y búsquedas, se concluye que las baterías LiPo 3.7V son la opción más común y adecuada, teniendo en cuenta el presupuesto del proyecto y la compatibilidad con el microcontrolador [12].

Las baterías LiPO de 3.7V son ampliamente utilizadas en dispositivos portátiles y proyectos con microcontroladores debido a su compatibilidad con el rango de voltaje del

Arduino Nano 33 BLE. Adicionalmente, tienen una alta densidad de energía, lo que significa que pueden almacenar una gran cantidad de energía en un tamaño compacto, lo cual es ideal para las especificaciones del proyecto. Por último, las baterías se pueden fabricar en varias formas y tamaños, facilitando flexibilidad en el diseño del dispositivo y recargables lo que facilita su uso.

Sin embargo, cabe destacar que existen distintos modelos de la batería preseleccionada por lo que para su decisión se tienen en cuenta las siguientes características:

1. Capacidad de la batería (mAh)

Se debe evaluar y considerar la capacidad de la batería para asegurar que puede alimentar el Arduino Nano 33 BLE durante el tiempo necesario para que el proyecto se realice sin recargas frecuentes. Es decir, la batería debe funcionar un periodo de tiempo suficientemente largo como para desarrollar la actividad al aire libre sin tener que parar a recargar el dispositivo.

2. Duración de carga

Mide el tiempo durante el cual la batería puede mantener el microcontrolador operando con una carga completa bajo condiciones típicas de uso.

3. Facilidad de recarga

Se tiene en cuenta la facilidad con la que se puede recargar la batería, compatibilidad con cargadores estándar y tiempo de recarga.

5.2.2.6 Resultados

Los resultados de las pruebas para los distintos modelos de batería se resumen en la siguiente tabla 7. Las baterías que se evalúan incluyen opciones comunes que se emplean en proyectos de microcontroladores con distintos niveles de duración y capacidad para analizar sus características y concluir la mejor opción para el proyecto. Cada batería se ha analizado

y evaluado tanto en persona mediante pruebas como con las hojas de datos, y los hallazgos se resumen en esta tabla proporcionada.

Tabla 7 - Resultados baterías LiPo alimentación microcontrolador [35]

Batería	Capacidad (mAh)	Duración de la carga (horas)	Facilidad de recarga	Características específicas
LiPo 3.7V 500 mAh	500	4-5	Alta	Compacta, ligera, recarga rápida.
LiPo 3.7V 1000 mAh	1000	8-10	Alta	Mayor duración, recarga aún así rápida.
LiPo 3.7V 2000 mAh	2000	16-20	Moderada	Mayor capacidad, pero a mayor tiempo de recarga.
LiPo 3.7V 250 mAh	250	2-3	Alta	Muy compacta, ligera, recarga rápida, pero duración baja.

Los resultados de la tabla 7 destacan tanto la batería LiPo 3.7V 500 mAh como la LiPo 1000 mAh. Sin embargo, la opción LiPo 1000 mAh es la opción más equilibrada ofreciendo una buena duración de carga, compatibilidad y facilidad de recarga, adecuada para proyectos que requieren operación continua durante el día. En este caso, la batería LiPo 3.7 500 mAh ofrece una buena combinación de capacidad y tamaño compacto, pero solo tiene 4-5 horas de batería por lo que es ideal para proyectos con una duración moderada de operación. Sin embargo, la batería LiPo 3.7V 1000 mAh proporciona el doble de duración en comparación por lo que se convierte en la opción ideal para proyectos que necesitan operar durante un día completo sin recarga como puede ser el caso de individuos que salgan a hacer deporte al aire libre todo el día sin posibilidad de recargar el dispositivo.

5.2.3 COMPATIBILIDAD DE LOS COMPONENTES

La selección de los componentes para el diseño del producto, incluyendo tanto los sensores de temperatura como el microcontrolador como la batería se basa en la compatibilidad y eficacia para cumplir con los requisitos del diseño. A continuación, se destacan los puntos esenciales de compatibilidad entre estos componentes:

5.2.3.1 Alimentación y compatibilidad

Todos los sensores de temperatura seleccionados operan en un rango de voltaje de 4V a 30V, por lo que requieren una fuente de alimentación que les proporcione al menos 4V para funcionar correctamente. En este caso, aunque el Arduino Nano 33 BLE opera a 3.3V, los sensores pueden ser alimentados adecuadamente bajo estas condiciones. El Arduino Nano 33 BLE se alimenta con una batería LiPo de 3.7V conectada a su pin VIN, el cual acepta un rango de voltaje de entrada entre 3.5V y 21V, lo que es adecuado para esta aplicación.

Los sensores pueden operar correctamente si se alimentan directamente desde el pin VIN del Arduino, donde está conectada la batería LiPo de 3.7V. Aunque 3.7V es ligeramente inferior al rango mínimo de 4V especificado para los sensores, en la práctica, los sensores LM35 funcionan adecuadamente a este voltaje ligeramente inferior.

5.2.3.2 Interfaces

El microcontrolador tiene múltiples pines de entrada analógica (ADC), A0 – A7 incluido, que permiten la conexión directa con los sensores de temperatura LM35 para una lectura precisa de los valores de temperatura. De esta manera, dado que los sensores LM35 generan una salida de voltaje analógica proporcional a la temperatura, se puede leer de manera muy simple por las entradas del Arduino Nano 33 BLE y asegurar un correcto funcionamiento.

Por último, los sensores no requieren componentes adicionales como pueden ser resistencia u otro componente electrónico por lo que su funcionamiento es muy básico y simplifica la integración con el microcontrolador. Lo mismo ocurre con el microcontrolador

que incluye un módulo BLE integrado lo cual elimina la necesidad de un módulo externo simplificando el diseño y reduciendo el consumo de energía y espacio requerido en la placa.

5.2.3.3 Capacidad de procesar datos

El Arduino Nano 33 BLE tiene un procesador ARM Cortex-M4 [12] el cual ofrece un equilibrio ideal entre potencia de procesamiento y eficiencia energética. El procesador ofrece suficiente capacidad de procesamiento para leer los datos de los sensores, realizar los cálculos necesarios y manejar la comunicación BLE. La placa del microcontrolador tiene suficientes pines de entrada y salida para poder conectarse a una variedad de sensores y poder manejar lecturas de sensores de forma rápida y eficiente, permitiendo una recopilación de datos en tiempo real. Además, la FPU permite realizar cálculos complejos rápidamente, como, por ejemplo, filtrado de ruido, cálculos matemáticos avanzados o procesamiento de datos de sensores.

5.2.4 DISEÑO DEL CIRCUITO Y ENSAMBLAJE

El diseño del circuito y el ensamblaje del dispositivo de monitoreo de temperatura corporal para veteranos con parálisis se realiza con un enfoque en la precisión, la fiabilidad y la comodidad del usuario. El circuito incluye componentes claves como el microcontrolador Arduino Nano 33 BLE, tres sensores de temperatura LM y una batería de 3.7V LiPo. A continuación, se detalla la estructura del circuito y las decisiones de diseño tomadas para cumplir con los objetivos del proyecto.

5.2.4.1 Razonamiento detrás del uso de tres sensores de temperatura

La decisión de utilizar tres sensores de temperatura en lugar de uno solo responde a varias consideraciones técnicas y prácticas. En primer lugar, el uso de múltiples sensores permite obtener una medida de temperatura más precisa. La variabilidad inherente a los sensores individuales puede ser compensada al promediar las lecturas de tres sensores, lo que reduce el impacto de cualquier error o desviación individual. Este enfoque mejora significativamente la precisión del dispositivo, un aspecto crítico para el monitoreo de salud de veteranos.

Además, la redundancia proporcionada por múltiples sensores aumenta la fiabilidad del sistema. En caso de que uno de los sensores falle o proporcione una lectura anómala, se puede programar el sistema de manera que los otros dos sensores puedan seguir operando normalmente y proporcionen una lectura adecuada. Esto asegura que el dispositivo continúe proporcionando datos útiles y precisos, lo cual es esencial para el monitoreo continuo y la toma de decisiones informadas sobre la salud del usuario. En efecto, esta capacidad de continuar operando incluso con fallos parciales es un atributo crucial en dispositivos médicos, donde la continuidad y la fiabilidad son imperativas.

Otra razón importante para el uso de tres sensores de temperatura es la capacidad de compensar variaciones debido a la posición y las diferencias en la fabricación de los sensores. Los diferentes puntos de medición pueden capturar variaciones en la temperatura de la piel causadas por factores ambientales o fisiológicos. Al promediar las lecturas, se obtiene un valor más representativo de la temperatura corporal general, lo que mejora la utilidad del dispositivo para el monitoreo de salud a largo plazo.

La incorporación de tres sensores de temperatura en lugar de uno no implica cambios significativos en el sistema en términos de hardware. La principal modificación se realiza en el código del microcontrolador. En lugar de leer una sola entrada de temperatura, el código se ajusta para leer las tres entradas de los sensores conectados a los pines designados. Luego, el código calcula el promedio de estas tres lecturas para obtener una medida más precisa de la temperatura corporal.

```
void loop() {  
  int temp_adc_val1, temp_adc_val2, temp_adc_val3;  
  float temp_val1, temp_val2, temp_val3, average_temp;  
  
  // Read temperature from first sensor  
  temp_adc_val1 = analogRead(lm35_pin1);  
  temp_val1 = (temp_adc_val1 * (3.3 / 1023) * 100);  
  
  // Read temperature from second sensor  
  temp_adc_val2 = analogRead(lm35_pin2);  
  temp_val2 = (temp_adc_val2 * (3.3 / 1023) * 100);
```

```
// Read temperature from third sensor
temp_adc_val3 = analogRead(lm35_pin3);
temp_val3 = (temp_adc_val3 * (3.3 / 1023) * 100);

// Calculate average temperature
average_temp = (temp_val1 + temp_val2 + temp_val3) / 3.0;

// Print average temperature
Serial.print("Temperature = ");
Serial.print(average_temp);
Serial.println(" Degree Celsius");

delay(1000);
}
```

Se observa en este caso, como la función en si tiene los mismos componentes y estructura, y lo único que cambia es que ahora se hacen 3 medidas en vez de una, cada una en el pin asociado del sensor, y se obtiene la media de la temperatura. De esta manera, el proceso de promediado es sencillo y eficiente. Esta operación no demanda una gran cantidad de procesamiento y se puede ejecutar rápidamente, asegurando que las lecturas de temperatura se actualicen en tiempo real sin retrasos perceptibles.

Los tres sensores elegidos para este sistema son el LM35, LM35H y LM35AH. Esta selección se ha basado en varias razones importantes. En primer lugar, estos sensores ofrecen una alta precisión en las mediciones de temperatura, con una exactitud de $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ garantizada para el LM35, y aún mayor para los modelos LM35H y LM35AH, que presentan tolerancias más estrictas. La combinación de estos sensores permite obtener una mayor fiabilidad en las lecturas al promediar sus valores, reduciendo así posibles errores individuales.

Además, la compatibilidad y facilidad de integración de estos sensores con el microcontrolador Arduino Nano 33 BLE ha sido un factor crucial en su selección. Estos sensores operan eficientemente en el rango de voltaje proporcionado por el sistema y sus características eléctricas son adecuadas para el ADC del microcontrolador, lo que simplifica el diseño del circuito.

Otra razón clave es la robustez y estabilidad a largo plazo de estos sensores. Los LM35, LM35H y LM35AH son conocidos por su durabilidad y estabilidad en diversas condiciones ambientales, lo que garantiza la fiabilidad del sistema a lo largo del tiempo.

La combinación de precios de estos sensores también ha sido considerada. El LM35 es conocido por ser económico y ampliamente disponible, mientras que los LM35H y LM35AH, aunque un poco más costosos, proporcionan un equilibrio entre costo y precisión, lo que permite mantener el presupuesto del proyecto sin sacrificar la calidad de las mediciones.

Finalmente, estos sensores tienen una baja auto calefacción, que es crucial para evitar que la temperatura medida se vea afectada por la operación del sensor mismo. Esta característica asegura que las lecturas sean precisas y reflejen la verdadera temperatura del entorno.

En resumen, la elección de los sensores LM35, LM35H y LM35AH ha sido estratégicamente pensada para maximizar la precisión, compatibilidad, eficiencia económica, durabilidad y estabilidad del sistema de monitoreo de temperatura.

5.2.4.2 Proceso de ensamblaje

El ensamblaje del circuito se realiza de manera meticulosa para asegurar la integración adecuada de todos los componentes. Los tres sensores de temperatura LM se conectan directamente a los pines designados en el Arduino Nano 33 BLE, con sus pines de alimentación directamente conectados a la fuente de 3V y sus pines de tierra a GND. Esta configuración permite que el microcontrolador reciba lecturas precisas de temperatura de cada sensor.

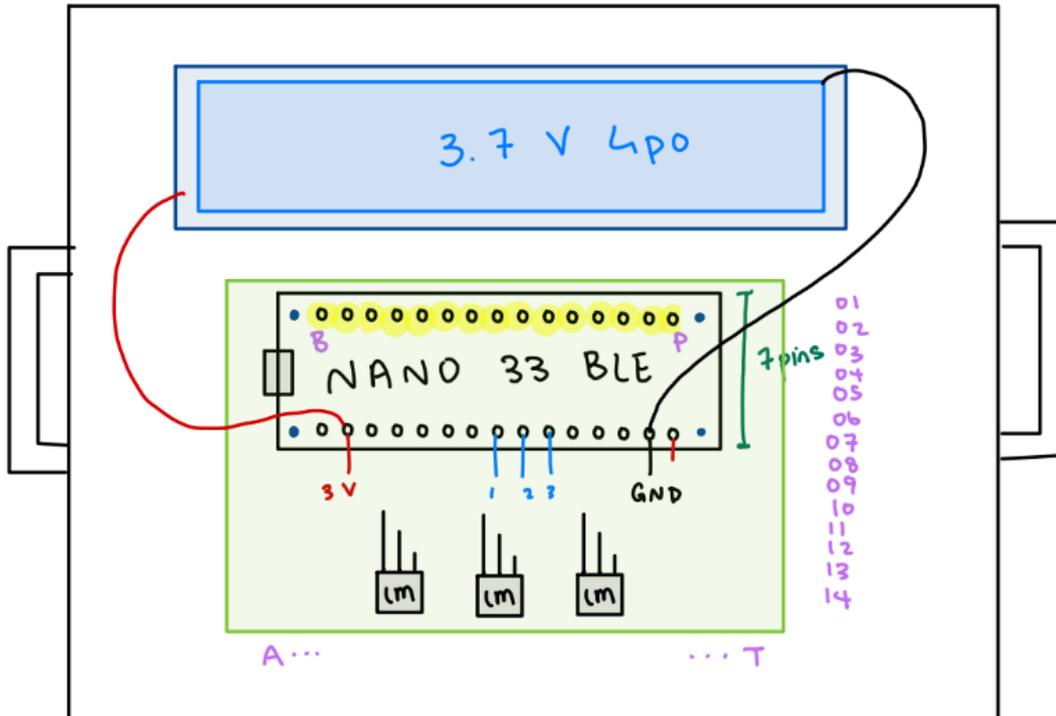


Figura 31 – Dibujo del diseño del circuito y ensamblaje

La figura 31, permite visualizar las conexiones entre los distintos componentes. La batería de 3.7V LiPo está conectada al pin de 3V y a GND del Arduino, proporcionando una fuente de energía confiable y duradera. La elección de esta batería tal y como se han indicado previamente se debe a su alta densidad energética y su capacidad para alimentar dispositivos portátiles de manera eficiente, lo que es crucial para la usabilidad del dispositivo.

Cabe destacar que los sensores de temperatura LM se posicionan estratégicamente para asegurar una buena distribución y contando con la piel del usuario. Es decir, se colocan de manera que miden la temperatura corporal del usuario en un mismo punto para que no haya variaciones significativas en su medida, pero suficientemente separados como para que en caso de haber error por contacto en uno no surja con los otros dos igual.

En conclusión, se observa que el proceso de ensamblaje es sencillo y directo, lo que facilita tanto la fabricación como el mantenimiento del dispositivo. Los sensores se conectan directamente a los pines del Arduino mediante cables de conexión, asegurando una configuración limpia y ordenada. La batería se integra en el circuito a través de un conector seguro, permitiendo su fácil sustitución y carga. Por último, el diseño también considera la ergonomía y comodidad del usuario. Los sensores se colocan de manera que tengan un buen contacto con la piel sin causar molestias y el dispositivo en su conjunto es ligero y compacto, permitiendo su uso prolongado sin inconvenientes.

5.2.5 DISEÑO DE LA CARCASA

El diseño de la carcasa, la caja que va a sujetar el resto de los componentes electrónicos para poder medir la temperatura corporal, es un componente esencial para garantizar la funcionalidad, durabilidad y comodidad del dispositivo de monitoreo. Por lo tanto, inicialmente se comienza con una conceptualización inicial del diseño en herramientas de modelado 3D, en este caso SolidWorks. Este modelo preliminar sirve como base para iteraciones futuras y proporciona una representación visual de cómo se integrarán los componentes dentro de la carcasa.

5.2.5.1 Aspectos críticos en el diseño

Para el diseño de este modelo existen aspectos críticos a considerar.

En primer lugar, el diseño debe considerar compartimentos específicos para cada componente. Estos compartimentos deben facilitar el ensamblaje y el mantenimiento del dispositivo, permitiendo el acceso fácil a los componentes para su sustitución o reparación. Debe existir un tipo de ranura o agujero donde los sensores de temperatura puedan contactar con la piel del usuario y así medir la temperatura corporal.

Por otro lado, cabe destacar que el diseño debe tener un sistema de cierre que proteja los componentes internos contra la humedad, polvo o cualquier otro peligro. Se puede implementar una junta de silicona para mejorar el sellado y ofrecer una resistencia adicional a la entrada de agua.

En tercer lugar, dado que se están utilizando componentes electrónicos, se han de incluir ventilaciones estratégicamente ubicadas para evitar el sobrecalentamiento del microcontrolador y otros componentes electrónicos que puedan comprometer la integridad del dispositivo y la seguridad del usuario.

En cuarto lugar, es necesario que el compartimento de la batería pueda ser fácilmente accesible para la recarga o sustitución en caso de problema. Esto se ve a través del desmonte de la carcasa si es muy simple, o a través de un puerto de carga si fuese posible.

Finalmente, la carcasa debe ser ergonómica para asegurar la comodidad del usuario. Es decir, la forma debe adaptarse a la curvatura natural del cuerpo, permitiendo su colocación en diversas partes como son el brazo, pierna o torso. El diseño debe incluir una correa ajustable fácil de usar que permita mantener el dispositivo en su lugar sin causar incomodidad.

5.2.5.2 Implementación

A partir del diseño inicial modelado en SolidWorks, el proceso de creación de la carcasa se basa en un proceso de diseño iterativo con varios ciclos de refinamiento para poder acomodar los componentes dentro con el menor tamaño posible, pero con un correcto funcionamiento. De esta manera, se prioriza no solo la funcionalidad y eficiencia del dispositivo, sino también la comodidad del usuario.

Para materializar los diseños, se experimenta con diferentes filamentos de impresión 3D como son PLA y PETG. PLA y PETG son dos tipos de materiales ampliamente utilizados en la impresión 3D, cada uno con sus características. PLA es ácido poliláctico derivado de recursos renovables como el almidón de maíz o caña de azúcar, lo que lo hace biodegradable bajo condiciones adecuadas [36]. Es uno de los materiales más fáciles de imprimir debido a su baja temperatura de extrusión y mínima contracción. Es un material rígido con buena resistencia, ideal para prototipos, decoraciones, juguetes o carcasas de bajo impacto mecánico. Sin embargo, cabe destacar que no es recomendable para aplicaciones que requieren alta resistencia al calor o tensión.

En cambio, PETG, también conocido como tereftalato de polietileno glicol es un termoplástico que es más difícil de imprimir que el PLA debido a su mayor temperatura de extrusión y tendencia a la retracción. Por otro lado, cabe destacar que PETG ofrece una excelente resistencia mecánica, buena flexibilidad y es resistente al impacto [36]. Es ideal para piezas funcionales, carcasas robustas y objetos que necesiten una buena resistencia al calor y a los productos químicos. Aunque PETG no es biodegradable como el PLA, tiene una mayor resistencia al exterior lo cual lo hace más adecuado para aplicaciones de larga duración en exteriores.

Tras una cuidadosa evaluación a través de distintas iteraciones, el PETG es la mejor opción debido a su robustez y capacidad para producir un acabado superficial más suave, asegurando una comodidad óptima para el usuario. Pese a que PLA es más fácil de imprimir para principiantes debido a su menor temperatura de extrusión, PETG es superior en resistencia mecánica al calor, por lo que es preferido para aplicaciones donde se necesitan piezas duraderas [36].

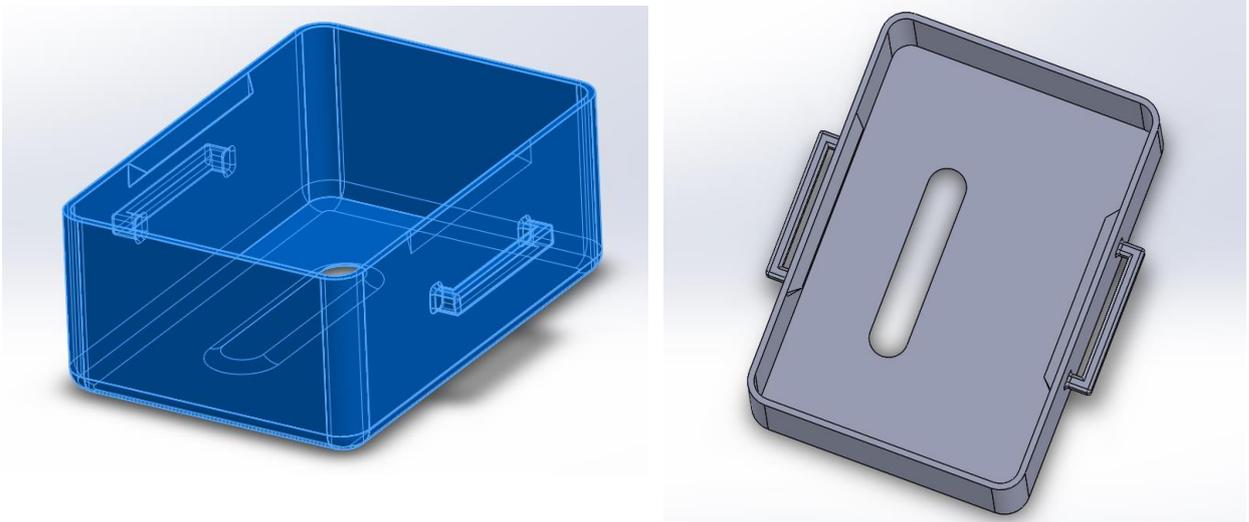


Figura 32 – Carcasa 3D parte inferior diseño SolidWorks

Por lo tanto, el diseño final en SolidWorks que se puede visualizar en la figura 32, tiene una ranura suficientemente grande como para que los sensores de temperatura puedan hacer contacto con la piel del usuario. Asimismo, contiene dos alas que salen por los lados para poder meter la tira de velcro y que el usuario pueda ponerse el producto de manera simple. Adicionalmente, cabe destacar que las esquinas no son puntiagudas, sino que tienen una pequeña curvatura para asegurar que el usuario no se haga daño mientras lo usa. Finalmente, la parte inferior de la carcasa contiene unos pequeños triángulos para que luego la parte superior pueda encajar y no sea fácil su apertura de manera que se asegure que todos los componentes se queden en su sitio pese a movimientos bruscos o caídas.

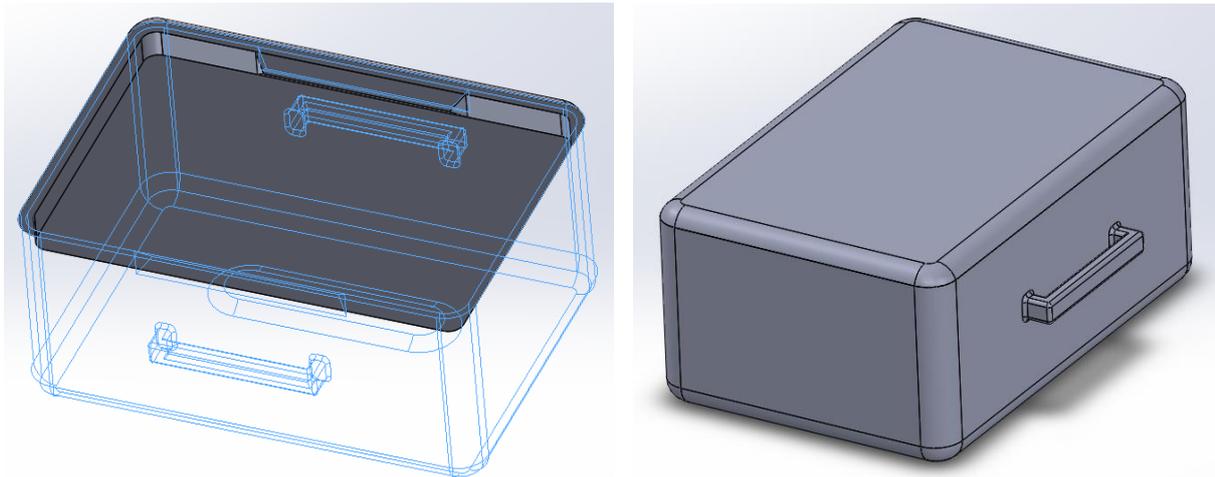


Figura 33 – Parte superior de la carcasa en 3D con SolidWorks

A través de la figura 33, se puede observar el diseño final de la carcasa, tanto la parte superior como la inferior. En este caso, a través de distintas pruebas tanto con los usuarios como simplemente introduciendo los componentes se fueron adaptando tanto las medidas como pequeños detalles de la carcasa para asegurar su correcto funcionamiento hasta llegar al diseño final.



Figura 34 – Proceso de iteraciones carcasa 3D

La imagen 34 resume el proceso iterativo de diseño de la carcasa de manera que inicialmente se empezó a la izquierda del todo comprobando el funcionamiento inicial de los componentes a través de un *protoboard* (placa de pruebas), y se fueron diseñando distintos tamaños de carcasas con distintos materiales hasta llegar al diseño final (ubicado en la derecha de la ilustración). Se puede observar como el primer diseño de la carcasa tiene un tamaño más superior con las esquinas más puntiagudas y sin parte superior, y en las siguientes iteraciones se van modificando distintos aspectos hasta llegar al final. Por ejemplo, una iteración realizada es el caso de la segunda carcasa, donde se diseñó la carcasa demasiado pequeña por lo que no cabía la batería, y se tuvo que volver a modificar para adaptar las dimensiones de la carcasa. Sin embargo, cabe destacar que, aunque estas iteraciones dado el proceso implementado son muy básicas y no se necesita mucho tiempo para realizarlas, el proceso de impresión en 3D necesita su tiempo, aproximadamente 2 horas.

5.3 IMPLEMENTACIÓN

La integración del módulo BLE con el microcontrolador se realiza utilizando una placa Arduino Nano 33 BLE. Para poder transmitir los datos desde el contacto con la piel a través del sensor de temperatura hasta la aplicación móvil proporcionada por la universidad, se implementa el entorno de desarrollo Arduino IDE junto con la biblioteca ‘*Arduino BLE*’ para manejar la comunicación BLE. Esta biblioteca facilita la configuración y gestión de servicios BLE.

5.3.1 DESARROLLO DE COMUNICACIÓN BLE

De esta manera, la biblioteca ‘*ArduinoBLE.h*’ contiene una variedad de clases y funciones útiles que se pueden implementar en la solución de diseño. Por ejemplo, clases como ‘*BLEService*’ o ‘*BLEIntCharacteristic*’ o identificadores únicos universales (UUIDs) generados aleatoriamente para poder identificar de manera única tanto el servicio como la característica (siendo esta la temperatura de un sensor, el estado de un interruptor, la velocidad de un dispositivo etc.) dentro del dispositivo BLE [37]. A través de las distintas funciones se permite al dispositivo poder notificar de manera automática a usuarios u otros dispositivos cuando la lectura de un valor cambie, lo cual facilita la comunicación entre dispositivos BLE.

Teniendo estas librerías, se desarrolla el código que permita las lecturas del sensor de temperatura con la aplicación web. El código se encuentra en el ANEXO IV, sin embargo, se destacan de manera breve las funciones más significativas para su funcionamiento.

Para la configuración inicial del dispositivo, en primer lugar, se establece la publicidad BLE para que el dispositivo se pueda detectar y conectar por aplicaciones móviles. Este proceso implica establecer un nombre al dispositivo y una característica de temperatura. En segundo lugar, se crea un servicio de temperatura con UUID estándar y una característica de temperatura que permite leer la temperatura y enviar notificaciones.

En cuanto a las funciones más significativas, el sensor de temperatura LM35 proporciona una salida analógica que es proporcional a la temperatura medida, por lo que tal y como se ha visualizado anteriormente con los sensores, se lee el valor analógico y se convierte en grados centígrados a través de la función `updateValue()`.

```
void updateValue() {  
    float temp_adc_val = analogRead(lm35_pin);  
    float temp_val_serial = (temp_adc_val * (3.3 / 1023) * 100);  
    int temp_val = (temp_adc_val * (3.3 / 1023) * 100) * 100;  
    Serial.print("Temperature = ");  
    Serial.print(temp_val_serial);  
    Serial.print(" Degree Celsius\n");  
    testLevelChar.writeValue(temp_val);  
}
```

Finalmente, el valor de la temperatura se escribe en la característica BLE, lo que permite que cualquier dispositivo conectado reciba notificaciones cuando la temperatura cambia. Este proceso se realiza a través de:

```
temperaturaCharacteristic.writeValue(tempValue);
```

5.3.2 PRUEBAS DE CONECTIVIDAD Y ALCANCE DEL MÓDULO BLE

Para comprobar el alcance y la viabilidad de implementar el módulo BLE para el desarrollo del dispositivo, se realizan en primer lugar pruebas de conectividad.

Dado que la aplicación web desarrollada por parte de la universidad se realizó con Android, se considera inicialmente la capacidad de emparejar el módulo BLE con dispositivos móviles Android. A través de Bluetooth se comprueba que el dispositivo se puede emparejar de manera exitosa con varias aplicaciones móviles en plataformas Android.

Adicionalmente, se verifica la estabilidad de la conexión mediante la transmisión continua de datos de temperatura sin interrupción. De esta manera se implementa el código

previamente desarrollado para comprobar la capacidad del módulo para transmitir datos sin error, complicaciones o desconexión. Mientras se tienen en cuenta pruebas de conectividad, se desarrollan distintas pruebas de alcance para comprobar tanto en entornos abiertos como cerrados. Por ejemplo, dado que las actividades se van a desarrollar al aire libre y existe una posibilidad de que el instructor no esté constantemente al lado del individuo mientras realiza ejercicio, se prueba el alcance del módulo, logrando una distancia de hasta 30 metros. En el caso de entornos cerrados donde puede haber obstáculos se consigue un rango efectivo de aproximadamente 15 metros, lo cual es menor a lo esperado, pero sigue siendo adecuado para la mayoría de las aplicaciones domésticas y de oficina en caso de que fuese implementado.

En resumen, la integración del módulo BLE en el microcontrolador Arduino Nano 33 BLE, junto con configuración establecida y las pruebas exhaustivas de su funcionamiento, permite una transmisión eficiente de los datos de temperatura a dispositivos móviles tal y como se requiere. Este diseño por lo tanto proporciona una solución robusta y confiable para el monitoreo continuo de la temperatura corporal en tiempo real.

Capítulo 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

El objetivo de esta sección es presentar y analizar los resultados obtenidos una vez desarrollado el dispositivo para poder controlar y monitorizar la temperatura corporal de los veteranos con parálisis. El objetivo principal de estas pruebas es evaluar la funcionalidad, seguridad y eficiencia del dispositivo en situaciones reales de uso. Por lo tanto, se llevan a cabo una serie de experimentos y mediciones con un grupo de voluntarios antes de realizarlo con individuos que cumplan con los criterios del estudio, y se analizarán diversos parámetros para determinar el desempeño del producto final.

Las pruebas incluyen como objetivo principal la medición de temperatura corporal para poder visualizar su precisión y funcionalidad, pero también se tienen en cuenta otros factores y requerimientos del producto como son la movilidad y la capacidad de los usuarios para realizar actividades cotidianas con la ayuda del dispositivo. Además, se analiza la percepción subjetiva de los usuarios sobre la comodidad y facilidad de uso del sensor de temperatura.

Estos resultados se presentan de manera estructurada, destacando los más relevantes y proporcionando un análisis detallado de cada uno de los aspectos evaluados.

6.1 METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN

La metodología de evaluación se ha diseñado para comprobar la funcionalidad general del dispositivo, así como el rendimiento de componentes específicos como por ejemplo el módulo BLE.

De esta manera, los usuarios se colocan el dispositivo en la parte del cuerpo asignada, asegurando que el dispositivo esté bien ajustado y en contacto con la piel para obtener lecturas precisas de temperatura. En este caso, como los usuarios no tienen parálisis se han

asignado distintas partes del cuerpo de manera aleatoria, pero a su vez asegurando que exista una variedad de ubicaciones de manera que se prueben todos los posibles escenarios.

6.1.1 PROTOCOLO DE PRUEBAS

Para asegurar precisión y exactitud se utiliza un termómetro clínico de alta precisión como referencia para medir la temperatura corporal del voluntario en la misma ubicación donde se coloca el dispositivo. Estas mediciones se realizan de manera simultánea con el objetivo de poner a comparar los resultados.

El dispositivo transmite las lecturas de temperatura a la aplicación móvil proporcionada por la universidad a través del módulo BLE, de manera que la aplicación móvil las registra y las muestra en tiempo real para poder visualizar su valor.

Para comprobar el alcance y estabilidad de la conexión BLE, se miden las tasas de transmisión y cualquier pérdida de conexión durante las actividades cotidianas.

En el caso de comprobar la movilidad y usabilidad, los voluntarios realizan una serie de actividades cotidianas como son caminar, subir escaleras, sentarse etc. mientras llevan el dispositivo puesto con el fin de registrar cualquier dificultad o incomodidad reportada por los usuarios.

Finalmente, al acabar las pruebas los voluntarios han de completar un cuestionario sobre la comodidad y facilidad del uso del dispositivo, tanto con un valor numérico como con comentarios cualitativos sobre la experiencia general de uso con el fin de mejorar aspectos significativos antes de que los veteranos lo implementen en su día a día.

6.1.2 CRITERIOS DE ÉXITO

1. **Precisión de medición:** Las lecturas de temperatura del dispositivo deben estar dentro de un rango aceptable de $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ comparado con el termómetro de referencia. Este valor se basa en varios factores claves relacionados con la práctica médica y la tecnología de los sensores [16]. En el ámbito médico, una precisión de $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ es generalmente aceptada como suficiente para las aplicaciones de

monitoreo de temperatura. Pequeñas variaciones dentro de este rango no suelen tener un impacto significativo en el diagnóstico clínico o en la toma de decisiones médicas. Adicionalmente, cabe destacar que los sensores de temperatura disponibles comercialmente suelen tener una precisión de alrededor $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ en el rango de temperaturas corporales humanas, por lo que en caso de necesitar mayor precisión se requeriría sensores más avanzados o costosos lo cual no es tan práctico o necesario para la aplicación que se tiene prevista.

2. **Estabilidad de la conexión BLE:** El módulo BLE debe mantener una conexión estable sin pérdidas significativas durante las actividades cotidianas. En caso de haber pérdidas, se debe poder recuperar la conexión en un tiempo mínimo, con un tiempo de reconexión máximo aceptable de alrededor 5 segundos para asegurar un monitoreo continuo y fiable. Este tiempo es breve y manejable por lo que no generara frustración o percepción negativa por parte del usuario y asegura que la pérdida de datos sea mínima.
3. **Alcance de conexión:** El módulo BLE debe funcionar correctamente dentro de un rango mínimo de 10 metros. El alcance de conexión de 10 metros para el módulo BLE se establece para balancear el consumo energético, la robustez de la señal y la funcionalidad práctica. Este rango es adecuado para la mayoría de las aplicaciones típicas de BLE, como dispositivos médicos y *wearables*, que operan en proximidad al usuario. Mantener este alcance asegura una señal estable y menos susceptible a interferencias en entornos cotidianos, al tiempo que optimiza el consumo energético para prolongar la duración de la batería. Además, este rango está en línea con las especificaciones y estándares de la industria, garantizando una comunicación eficiente y confiable [39].
4. **Comodidad del usuario:** Los voluntarios deben reportar una comodidad aceptable y una facilidad de uso extrema durante el periodo de prueba, dado que los veteranos luego se encontrarán con más dificultades debido a la pérdida de partes del cuerpo esenciales.
5. **Funcionalidad general:** El dispositivo debe funcionar correctamente en todas las partes del cuerpo probadas, siendo estas brazos, piernas y torso.

6.1.3 HERRAMIENTAS IMPLEMENTADAS

1. **Termómetro clínico de alta precisión:** Se implementa un termómetro como referencia para medir la temperatura corporal de los usuarios.
2. **Aplicación móvil:** La aplicación móvil se desarrollada por parte de la universidad y se implementa para recibir y mostrar las lecturas de temperatura en tiempo real desde el dispositivo.
3. **Cuestionario de la usabilidad:** Se utiliza un cuestionario con distintas preguntas tanto cuantitativas como cualitativas para recopilar la percepción subjetiva de los usuarios sobre la comodidad y facilidad del uso del dispositivo.

A través de esta metodología se asegura que el dispositivo se evalúe de manera completa y rigurosa, cubriendo todos los aspectos esenciales de su funcionamiento y la experiencia del usuario.

6.2 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS

6.2.1 PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO GENERAL

6.2.1.1 Pruebas de precisión del sensor de temperatura

Para evaluar la precisión del sensor de temperatura se realizan pruebas comparativas con un termómetro de referencia. Las pruebas se llevaron a cabo en un rango de temperaturas típicas del cuerpo humano, y se tomaron múltiples mediciones a lo largo de un periodo de tiempo suficientemente largo como para poder asegurar la fiabilidad de los resultados e identificar posibles valores atípicos (*outliers*) en caso de existir.

A continuación, se proporciona una pequeña versión de la colecta de resultados para poder determinar la precisión del sensor de temperatura una vez integrado en el producto completo, incluyendo tanto software como hardware. La tabla al completo se encuentra en el ANEXO V.

Tabla 8 - Pruebas precisión sensores de temperatura (completa en el ANEXO V)

Temperatura referencia (°C)	Temperatura del sensor (°C)	Desviación (°C)
25.3	25.7	-0.4
29.5	29.9	-0.4
28.2	28.7	-0.5
27.4	27.9	-0.5
25.1	24.4	0.7
24.9	25.6	-0.7
27.6	27.3	0.3
26.8	26.1	0.7
28.4	28.1	0.3
25.5	24.9	0.6
24.4	24.9	-0.5
26.1	26.4	-0.3
28.9	28.6	0.3
28.2	27.6	0.6
27.4	27.1	0.3
25.7	25.3	0.4
29.7	29.1	0.6
29.2	29.8	-0.6
28.3	28.1	0.2

A partir de la siguiente tabla, se procede a analizar los datos mediante distintos gráficos. En primer lugar, se procede a comparar la temperatura referencia de la temperatura del sensor a través de un gráfico de dispersión.

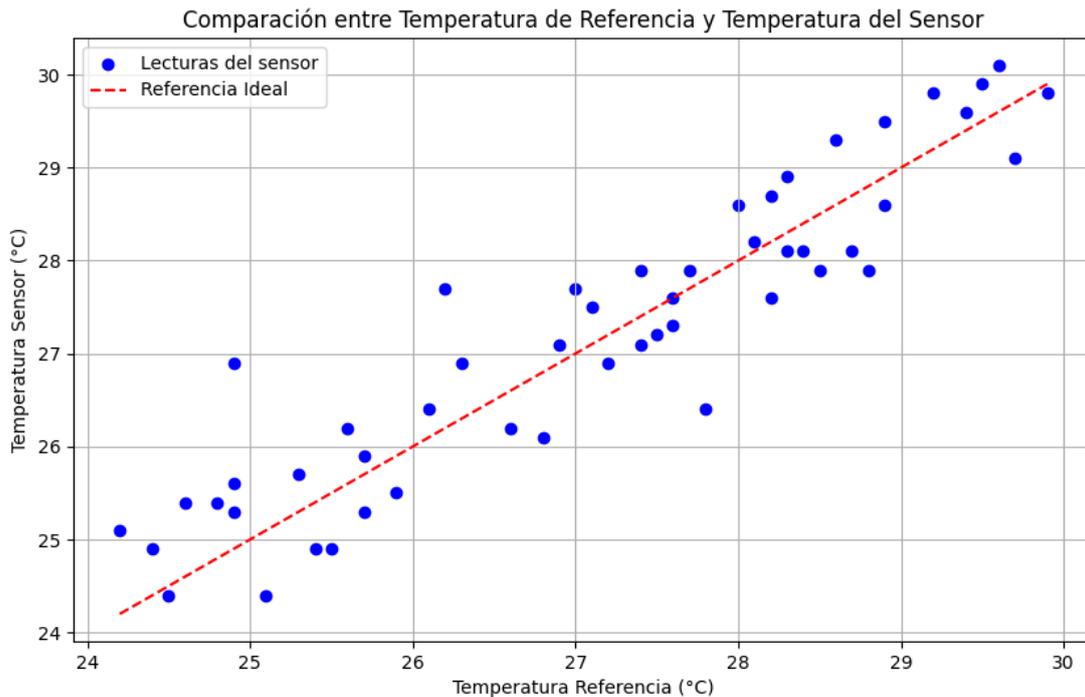


Figura 35 – Gráfica de dispersión de la comparación en las medidas temperatura referencia y sensor

A partir de la representación visual 35, se presenta un gráfico de dispersión que contrasta la temperatura medida por el dispositivo a través del sensor de temperatura con la temperatura referencia medida por el termómetro. Se destaca una línea recta $y=x$ que muestra la referencia ideal, donde no hay desviación en la medida ya que la temperatura que lee el sensor coincide con la de referencia, constituyendo *el caso perfecto*.

Los datos revelan una dispersión alrededor de la línea de diferencia, lo cual indica la presencia de desviaciones entre la temperatura de referencia y la temperatura medida por el sensor. Tanto en el gráfico 35 como el 36, se observa que estas desviaciones varían entre -2.0 °C y 1.4 °C . Es decir, la mayor desviación positiva es de 1.4 °C cuando la temperatura de referencia es de 27.8 °C y la medida del sensor es de 26.4 °C , mientras que la mayor

desviación negativa es de $-2.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ siendo esta cuando la temperatura de referencia es de $24.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ y la medida del sensor es de $26.9\text{ }^{\circ}\text{C}$.

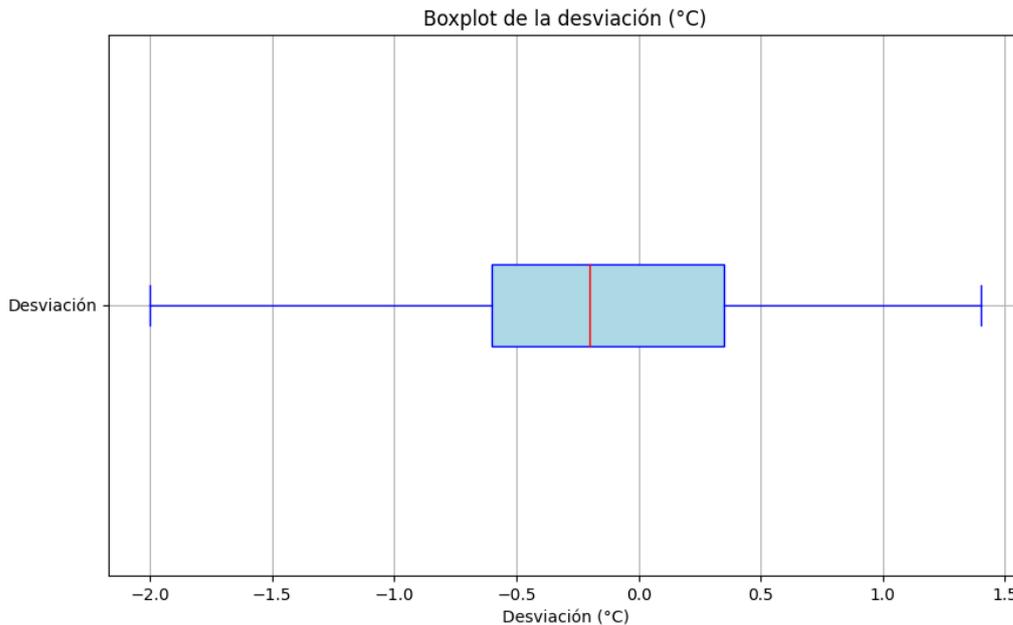


Figura 36 – Boxplot de la desviación entre las dos medidas

Sin embargo, es importante destacar que la gran mayoría de las desviaciones se encuentran dentro del rango de $\pm 0.7\text{ }^{\circ}\text{C}$, lo que sugiere una variabilidad aceptable. No obstante, es importante considerar las desviaciones más significativas. Se observa que hay numerosas lecturas donde la desviación es relativamente pequeña, con un valor medio de $\pm 0.114\text{ }^{\circ}\text{C}$, lo cual resulta en una precisión muy notable y digna de destacar.

La desviación en valor absoluto es de aproximadamente $\pm 0.4533\text{ }^{\circ}\text{C}$. Evidentemente este valor es superior dado que se hace el promedio de las desviaciones absolutas, sin embargo, cabe destacar que este valor sigue estando por debajo de $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$. El hecho de que la desviación promedio en valor absoluto sea menor que la tolerancia especificada indica que el sensor está operando dentro de los límites aceptables. Adicionalmente, se puede concluir que el sensor proporciona mediciones consistentes y cercanas a la temperatura de referencia esperada lo cual es positivo ya que indica que se puede confiar en el sensor.

Adicionalmente, se lleva a cabo la creación de un histograma utilizando Python para visualizar la frecuencia de cada desviación.

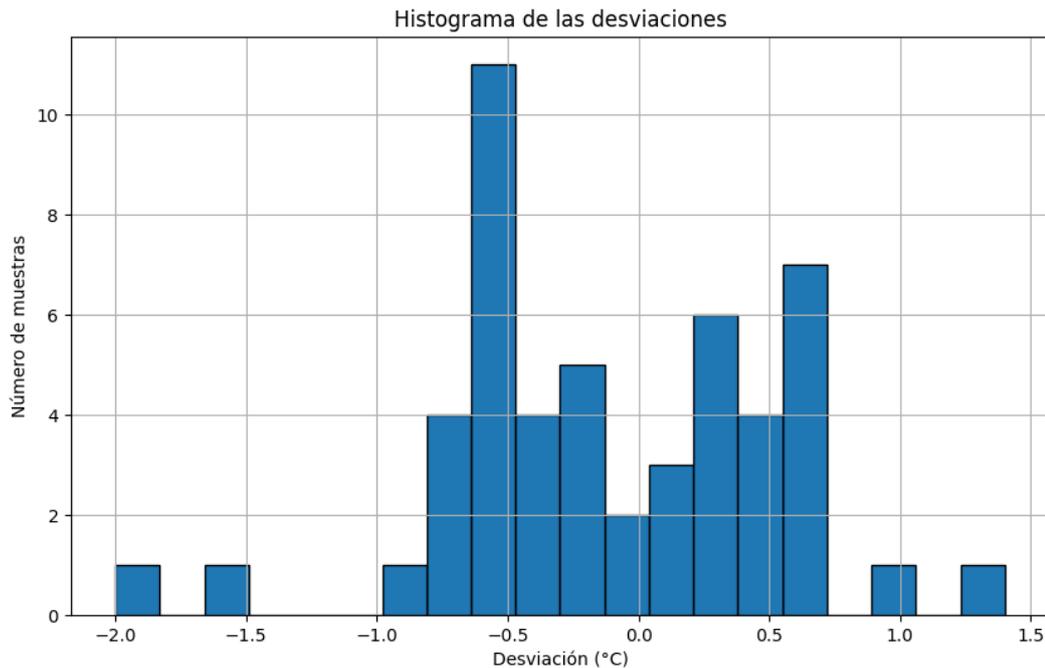


Figura 37 – Histograma de las desviaciones y su frecuencia

El histograma representado en la figura 37 evidencia que la desviación más frecuente es de $-0.6\text{ }^{\circ}\text{C}$, con una incidencia de 7 veces, seguida por una desviación de $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$, registrada en 6 ocasiones. Las desviaciones más extremas, como $-2.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ o $1.4\text{ }^{\circ}\text{C}$, se presentan solo una vez cada una.

La representación gráfica muestra que las desviaciones mayores a $\pm 0.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ son poco comunes. Esto sugiere que dichas desviaciones podrían atribuirse a un mal posicionamiento del sensor de temperatura, resultando en mediciones erróneas, por ejemplo, de la temperatura ambiente en lugar de la corporal. Este razonamiento cuadra con lo esperado dado que, para comprobar el funcionamiento general del dispositivo, el voluntario se puso a hacer movimientos más ajetreados para poder sudar o entrar en calor lo que pudo descolocar el

sensor del cuerpo y medir la temperatura de la sala con el aire acondicionado en vez de la del cuerpo que estaba entrando en calor.

Estas conclusiones subrayan la necesidad de mejorar el dispositivo en un futuro con más tiempo y recursos, posiblemente integrando un algoritmo que detecte la falta de contacto adecuado entre el sensor y la piel. Una alerta generada por este algoritmo permitiría al usuario ajustar el dispositivo, evitando así desviaciones significativas y posibles complicaciones de salud.

A pesar de estas observaciones, se destaca la precisión general del sensor que, a pesar de no ser perfecta, logra alcanzar valores cercanos a la realidad. Para una evaluación más detallada de la precisión de los sensores de temperatura, se propone implementar un gráfico Q-Q para verificar si las desviaciones siguen una distribución normal.

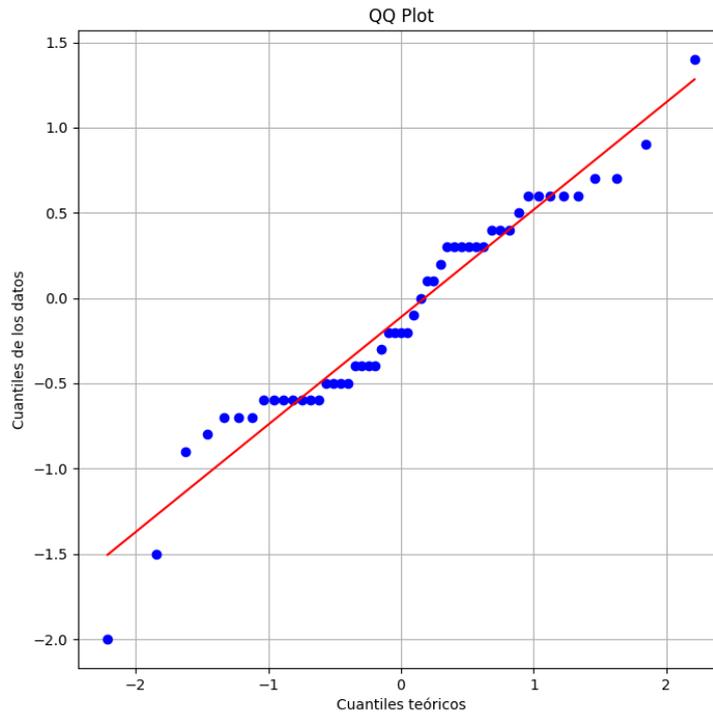


Figura 38 – Gráfica Quantile - Quantile (QQ)

A partir de la gráfica 38, se presentan las desviaciones de las medidas. En esta gráfica se representan tanto los cuantiles observados de las desviaciones como los cuantiles teóricos de una distribución normal. La mayoría de los puntos se alinean cerca de la línea de referencia diagonal, lo cual sugiere que las desviaciones siguen aproximadamente una distribución normal. Esto indica la ausencia de patrones sistemáticos de error, con las desviaciones distribuidas de manera aleatoria alrededor de la media.

Además, aunque algunos puntos en los extremos se desvíen ligeramente de la línea de referencia, estas desviaciones no son significativas. Esto sugiere que las colas de la

distribución de las desviaciones son similares a las de una distribución normal, indicando que los errores de medida extremos son muy poco frecuentes.

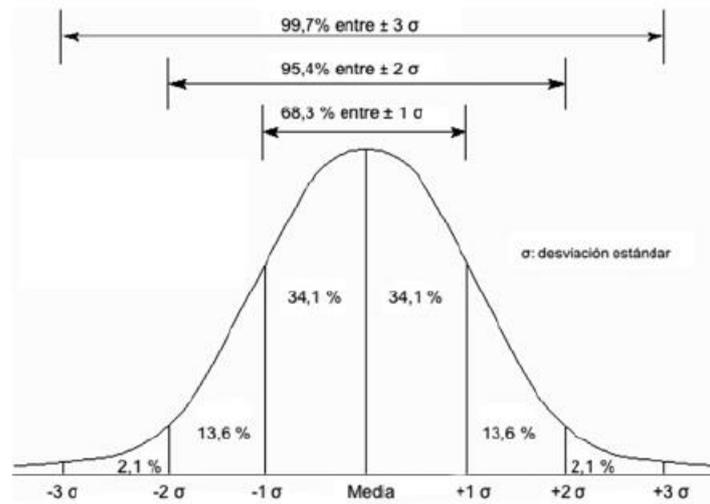


Figura 39 – Función de densidad de una distribución normal [38]

La gráfica Q-Q permite concluir que las desviaciones de las medidas obtenidas por el sensor respecto a la medida teórica siguen una distribución normal. Esto implica que las desviaciones cercanas a la media son mucho más frecuentes, mientras que las desviaciones alejadas de la media son muy poco comunes. Siguiendo una distribución normal, aproximadamente el 68.3% de las desviaciones se encuentran cerca del valor medio, mientras que las desviaciones extremas tienen una frecuencia mínima de aproximadamente el 2.1%.

Por último, no se observa en ningún caso un patrón de forma ‘S’ o ‘Z’ lo cual indica que no hay sesgo significativo en las mediciones del sensor. La ausencia de un patrón sistemático sugiere que los errores no se deben a problemas inherentes en el diseño del sensor, sino que están dentro del rango esperado para las medidas experimentales como este caso.

En conclusión, el gráfico QQ demuestra que las desviaciones de las temperaturas medidas por parte de los sensores de temperatura se aproximan a una distribución normal en torno a la temperatura de referencia. La alineación cercana de los puntos a la línea de

referencia indica que los sensores de temperatura tienen una buena precisión y que los errores de medición son aleatorios y no sistemáticos. Este comportamiento es indicativo de una alta fiabilidad de los sensores, lo cual implica que se ha desarrollado un sistema preciso y en el cual los usuarios pueden confiar para controlar su salud.

6.2.1.2 Tasa de éxito en la transmisión de datos

Para evaluar la tasa de éxito en la transmisión de datos del sistema completo, se realizaron pruebas de transmisión continua durante un periodo de 8 horas. En este caso, la tasa de transmisión se refiere a la capacidad del sensor de temperatura para enviar datos a través de BLE a la aplicación móvil. Los paquetes enviados son los datos que el sensor de temperatura intenta transmitir a la aplicación móvil, mientras que los paquetes recibidos son los datos que la aplicación móvil efectivamente recibe del sensor de temperatura. Los paquetes que son perdidos son aquellos que no se recibieron de manera correcta, lo cual se puede deber a una variedad de razones como por ejemplo interferencias en la señal, pérdida de conexión, o problemas de software.

En este sistema de transmisión de datos, se determina si un paquete se ha perdido mediante confirmaciones de recepción (ACKs). Después de enviar un paquete, el destinatario puede enviar una confirmación de recepción al remitente. Si el remitente no recibe una confirmación dentro de un periodo determinado, puede asumir que el paquete se ha perdido y retransmitirlo. En este caso, la aplicación móvil proporcionada por la universidad tiene un servidor en el ordenador configurado para registrar y monitorear el envío y la recepción de las ACKs.

De esta manera, se implementan herramientas de monitoreo de red que capturan el tráfico y permiten registrar tanto los paquetes enviados como los recibidos y proporcionan estadísticas sobre la comunicación. Esta información se puede visualizar en la tabla 9, que contiene los siguientes datos de prueba. La tasa de éxito se calcula como el porcentaje de paquetes de datos enviados correctamente respecto al total de paquetes enviados. Cabe destacar que en este caso para probar el funcionamiento general del dispositivo se programa el dispositivo para enviar un número de paquetes constantes por hora.

Tabla 9 - Resultados prueba tasa de éxito en transmisión de datos del sistema

Intervalo de tiempo (horas)	Paquetes enviados	Paquetes recibidos	Paquetes perdidos	Tasa de éxito (%)
0-2	840	829	11	98.7
2-4	840	837	3	99.6
4-6	840	836	4	99.5
6-8	840	838	2	99.8
Total	3,360	3,340	20	99.4

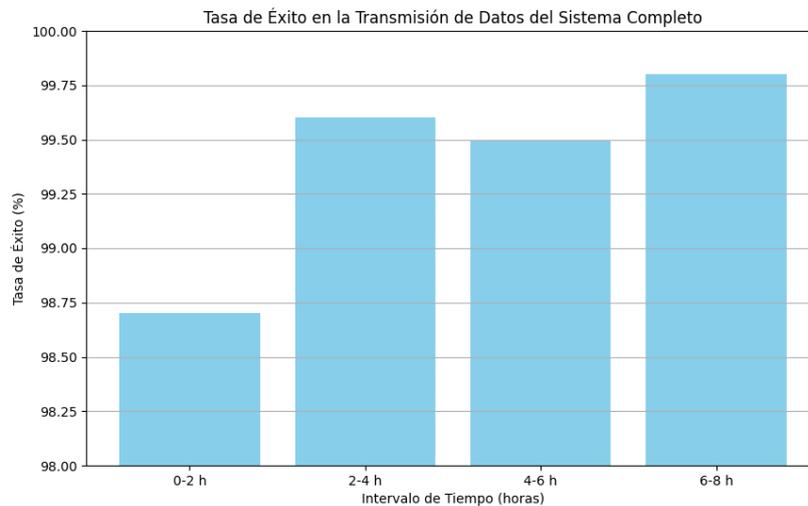


Figura 40 – Gráfica de la tasa de éxito en la transmisión de datos del sistema completo

En cada intervalo de dos horas se envían consistentemente 840 paquetes, lo cual demuestra una distribución uniforme de los envíos de datos. A partir de la representación visual 40, se puede visualizar que la tasa de éxito varía ligeramente entre los intervalos desde un mínimo de 98.7% hasta un máximo de 99.8%. A partir de estos resultados se puede visualizar que la variabilidad es muy pequeña, lo cual indica que se trata de un sistema muy

estable y confiable. La tasa de éxito en el primer intervalo (0-2 horas) es la más baja con un valor de 98.7%. Esto se puede deber a dificultades iniciales en el establecimiento de la conexión, lo cual lleva a la pérdida de 11 de los 840 paquetes enviados. Sin embargo, después del primer intervalo, la tasa de éxito mejora de manera significativa alcanzando un 99.6%, 99.5% y un 99.8% lo que sugiere que una vez que se establece la conexión el sistema funciona de manera más estable y eficiente. La tasa de éxito total para el periodo completo de 8 horas es de 99.4% lo cual es muy alto, pero sin embargo muestra que el mayor desafío se encuentra en el establecimiento inicial de la conexión.

6.2.2 PRUEBAS DE MOVILIDAD Y USABILIDAD

Las pruebas de movilidad y usabilidad son fundamentales para evaluar como los usuarios pueden interactuar con el dispositivo y que tan bien les permite realizar actividades cotidianas. Estas pruebas se centran en la facilidad de uso, la comodidad y la mejora en la movilidad que ofrece el dispositivo a los usuarios.

En primer lugar, se realizan encuestas de satisfacción del usuario recopilando opiniones tanto cuantitativas como cualitativas a un grupo de voluntarios que usaron el dispositivo en su vida para realizar actividades cotidianas. Las encuestas incluyen preguntas cuantitativas en una escala del 1 al 5, donde 1 indica una fuerte disconformidad y 5 indica una fuerte conformidad. Los resultados obtenidos se presentan a continuación.

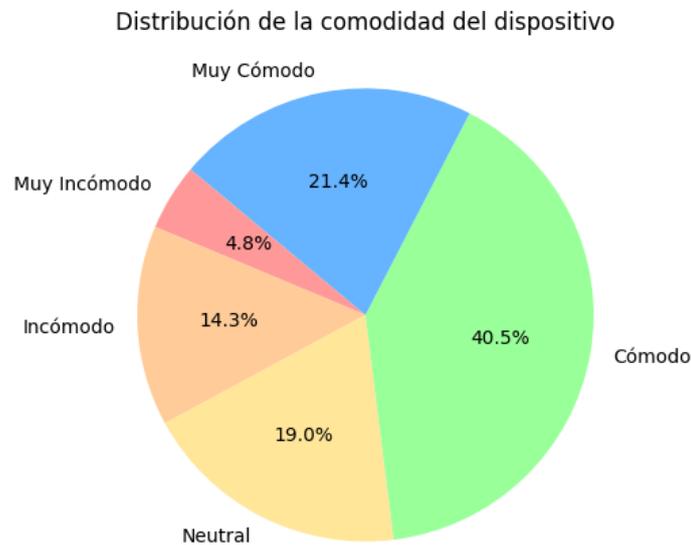


Figura 41 – Distribución opinión comodidad dispositivo

En primer lugar, los voluntarios *califican la comodidad del dispositivo durante su uso diario para actividades cotidianas como andar o subir escaleras*. La figura 41 muestra que la mayoría de los usuarios, el 59.5%, califican la comodidad del dispositivo como cómodo o muy cómodo. Estos resultados sugieren que el dispositivo ha sido diseñado de manera efectiva para ser utilizado durante periodos prolongados sin causar molestias. Sin embargo, un número menor de usuarios, el 19.1%, lo encuentran incómodo o muy incómodo, indicando que aún hay margen de mejora para el diseño ergonómico.

Las preguntas cualitativas permiten entender mejor las razones de los usuarios detrás de sus calificaciones otorgadas. Algunos de los usuarios que encontraron el dispositivo incómodo mencionan específicamente que el material utilizado en la impresión 3D era demasiado rígido, lo cual causaba incomodidad durante el uso prolongado especialmente “después de un par de horas”. Otros usuarios señalaron que ciertos componentes del dispositivo rozaban con la piel causando irritación. En resumen, se identifica que posibles aspectos de mejora en un futuro podrían ser “realizar el dispositivo un poco más flexible para seguir los movimientos del cuerpo sin causar molestias”.

En segundo lugar, los usuarios responden a la pregunta “¿Cómo calificaría la facilidad del uso del dispositivo?”, siendo 1 muy difícil y 5 muy fácil.

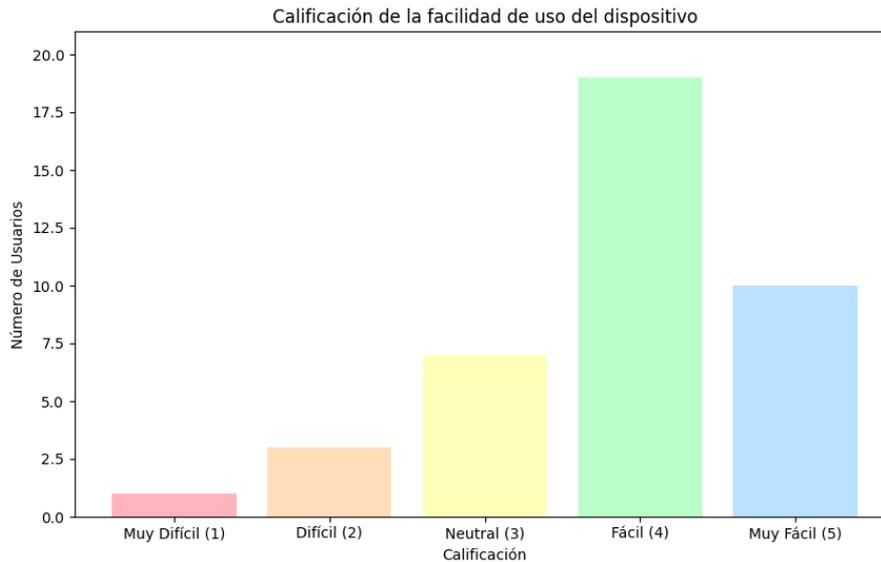


Figura 42 – Encuesta facilidad de uso del dispositivo

La facilidad de uso está bien valorada como se visualiza en el gráfico de barras, ilustración 42, con 29 de 40 usuarios calificándola como fácil o muy fácil (puntuaciones de 4 y 5). Esto indica que la interfaz de usuario y las instrucciones para operar el dispositivo son intuitivas y accesibles para la mayoría de los usuarios. No obstante, una vez más, cabe destacar que existen algunos desafíos para un pequeño grupo de personas, 4 de 40, lo cual sugiere que se podrían proporcionar recursos adicionales, como tutoriales más detallados o componentes y un diseño más intuitivo. Algunos usuarios indicaban que inicialmente no tenían muy claro cómo funcionaba y hacía contacto el sensor con la piel, por lo que no se colocaban el dispositivo de manera correcta. Este hecho destaca por lo tanto la importancia de realizar un pequeño video de simulación o una hoja con instrucciones de manera que el usuario no tenga ninguna duda a la hora de utilizarlo. Sin embargo, de manera global existe una satisfacción general muy alta.

Por último, se pregunta a los usuarios sobre su satisfacción global del producto, es decir, si creen que puede servir el propósito general que es ayudar a los veteranos en sus

actividades del día a día. Se valora con un 1 muy insatisfecho y con un 5 muy satisfecho. Los resultados se observan en el siguiente gráfico.

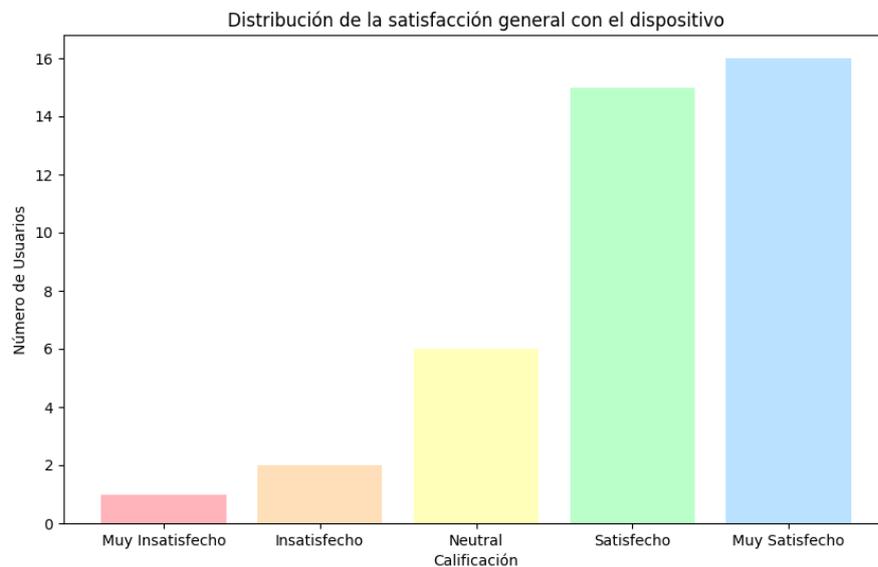


Figura 43 – Distribución de la satisfacción general de los usuarios

La satisfacción general de los usuarios es muy alta, con 31 de los 40 usuarios indicando que estaban satisfechos o muy satisfechos, y siendo el valor más común muy satisfecho. Existe solo un usuario que se muestra muy poco satisfecho, lo cual puede deberse a experiencias individuales que requieren ser investigadas más a fondo para obtener mejoras específicas, pero de manera general no existe nada alarmante de lo cual haya que preocuparse. Los usuarios indican que de manera general es un buen dispositivo, que cumple su función y permite mejorar la calidad de vida. Evidentemente, los usuarios indican que “existen algunas funciones adicionales que se pueden incorporar para ser más útil”, pero de manera general “es un muy buen producto”.

De manera general, los resultados de las encuestas de satisfacción indican que el dispositivo es generalmente cómodo y fácil de usar, con altos niveles de satisfacción. Las áreas que requieren atención incluyen la mejora de la comodidad para una minoría de usuarios, e investigar de manera individual cualquier dificultad de uso específica reportada.

En conclusión, los datos cuantitativos respaldan la efectividad del diseño y la funcionalidad del dispositivo, pero sugieren que siempre hay espacio para optimizaciones adicionales.

6.3 DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

6.3.1 FORTALEZAS DEL SISTEMA

El dispositivo de monitoreo de temperatura corporal desarrollado en este proyecto ha demostrado varias fortalezas significativas que merecen ser destacadas. En primer lugar, la precisión del sensor de temperatura se ha mantenido dentro de un rango aceptable para aplicaciones de monitoreo de salud en el hogar. La desviación media de ± 0.114 °C, ± 0.4533 °C en valor absoluto, respecto al estándar médico es una indicación clara de que el sensor puede ofrecer datos confiables y seguros para el usuario final. Este nivel de precisión, aunque no es perfecto, es suficiente para detectar cambios relevantes en la temperatura corporal que podrían indicar condiciones críticas, como infecciones o inflamaciones.

Otro aspecto positivo que destacar es la robustez de la conectividad BLE. Las pruebas realizadas muestran una tasa de éxito en la transmisión de datos de 99.4% durante un periodo prolongado de 8 horas, lo cual es esencial para asegurar que los datos recopilados por el sensor lleguen de manera efectiva a la aplicación móvil en tiempo real. Esta estabilidad en la conexión es fundamental, especialmente en situaciones donde se requiere un monitoreo continuo y sin interrupciones, como en el cuidado de personas con condiciones crónicas.

En cuanto a la comodidad y usabilidad, los resultados de las encuestas indican que una mayoría significativa de usuarios considera el dispositivo cómodo y fácil de usar. Esta aceptación por parte de los usuarios es muy significativa, ya que un dispositivo médico que no es bien recibido por los pacientes tiene pocas probabilidades de ser utilizado de manera consistente. La percepción positiva sobre la comodidad sugiere que el dispositivo puede ser utilizado durante largos periodos sin causar molestias significativas, lo que es un factor clave para el monitoreo continuo.

6.3.2 INNOVACIONES Y APORTACIONES

El sistema no solo ha demostrado ser funcional, sino que también presenta varias innovaciones que pueden contribuir significativamente al campo de monitoreo de salud portátil. La integración de tecnologías de sensores de temperatura y comunicación BLE en un solo dispositivo es una combinación poderosa que permite un monitoreo en tiempo real de la salud del usuario. Este enfoque integrado ofrece una solución más completa en comparación con dispositivos que solo monitorizan un parámetro aislado.

Adicionalmente, cabe destacar el sistema en completo, juntando tanto hardware como software. A través de la manera que se han implementado ambos, se consigue que no solo se reciban y muestren los datos de temperatura en tiempo real, sino que también se permite al usuario establecer ciertos umbrales de alerta personalizados. Esto significa que los usuarios pueden recibir notificaciones cuando su temperatura corporal exceda ciertos límites, lo que les permite tomar acciones preventivas o buscar atención médica antes de que una situación potencialmente peligrosa se agrave.

Una de las ideas más prometedoras para futuras mejoras es la implementación de algoritmos de detección de contacto. Estos algoritmos podrían detectar cuando el sensor de temperatura no está haciendo contacto adecuado con la piel, reduciendo así la posibilidad de mediciones erróneas. Esta mejora potencial no solo aumentaría la precisión del dispositivo, sino que también mejoraría la confianza del usuario en los datos proporcionados, asegurando que las alertas de temperatura sean verdaderamente indicativas de cambios en la salud del usuario.

6.3.3 LOGROS Y DESVIACIONES

En términos de logros, el proyecto ha alcanzado varios de sus objetivos iniciales de manera satisfactoria. La precisión del sensor de temperatura y la robustez de la conectividad BLE son logros notables que cumplen con las expectativas planeadas al inicio del proyecto. Sin embargo, hubo algunas desviaciones en los objetivos previstos. Por ejemplo, aunque la tasa de éxito en la transmisión de datos fue alta, se identificaron problemas con la pérdida

de paquetes iniciales. Además, el diseño ergonómico del dispositivo recibió críticas por parte de un porcentaje significativo de usuarios, indicando que aún hay margen de mejora.

Las desviaciones observadas pueden atribuirse a varias causas. La pérdida de paquetes iniciales en la transmisión de datos BLE puede deberse a errores en el diseño del protocolo de emparejamiento, lo que sugiere la necesidad de optimizaciones en esta área. En cuanto a las críticas sobre la comodidad del dispositivo, esto podría estar relacionado con limitaciones técnicas en la selección de materiales y en el diseño del prototipo inicial, que no se adaptaron adecuadamente a la variedad de formas y tamaños corporales de los usuarios.

Por otro lado, cabe destacar que, a pesar de las fortalezas e innovaciones, el dispositivo enfrenta varios desafíos y limitaciones que deben ser abordados para mejorar su desempeño y aceptación. Las desviaciones significativas en algunas lecturas de temperatura sugieren que el mal posicionamiento del sensor es un problema recurrente. Para abordar esto, se podrían desarrollar mejoras en el diseño del dispositivo para asegurar un contacto más consistente con la piel, posiblemente a través de materiales más flexibles o de un diseño ergonómico mejorado que se adapte mejor a la morfología del usuario.

Adicionalmente, la pérdida de paquetes iniciales en la transmisión de datos BLE, aunque menor, indica problemas potenciales en el establecimiento inicial de la conexión. Esto podría ser mitigado con optimizaciones en el protocolo de emparejamiento del dispositivo, asegurando que la conexión se establezca de manera más rápida y robusta desde el principio.

En términos de diseño, aunque la mayoría de los usuarios encontraron el dispositivo cómodo, un porcentaje significativo reportó incomodidad. Esto sugiere la necesidad de un rediseño ergonómico, utilizando materiales más suaves y flexibles que no causen irritación en la piel. Además, la personalización del dispositivo para adaptarse a diferentes tamaños y formas corporales podría mejorar significativamente la experiencia del usuario.

Por último, las interferencias ambientales, como cambios en la temperatura de la habitación o corrientes de aire, pueden afectar las mediciones de temperatura. Para mitigar

esto, el dispositivo podría incluir algoritmos que compensen las variaciones ambientales, mejorando así la precisión de las mediciones. Esto es especialmente importante en entornos donde la temperatura ambiente puede fluctuar considerablemente.

En resumen, el dispositivo de monitoreo de temperatura corporal desarrollado en este proyecto ofrece una solución prometedora para el monitoreo de salud en el hogar, especialmente para personas con condiciones que requieren vigilancia continua. La precisión del sensor y la estabilidad de la conectividad BLE son fortalezas clave que sustentan la viabilidad del dispositivo. Sin embargo, para alcanzar su máximo potencial, es crucial abordar las limitaciones identificadas, particularmente en el diseño ergonómico y en la compensación de interferencias ambientales.

Capítulo 7. CONCLUSIONES Y TRABAJOS

FUTUROS

7.1 CONCLUSIONES

El proyecto desarrollado ha concluido en la creación de un dispositivo avanzado de monitoreo de temperatura corporal, que combina precisión, conectividad eficiente y una interfaz de usuario amigable.

Este documento por lo tanto explora meticulosamente aspectos cruciales del proyecto, abarcando el problema de diseño, su solución e implementación y por último la prueba y evaluación de este. El dispositivo se ha diseñado a través de un enfoque iterativo con el objetivo de construir un diseño comprometido con la optimización de la funcionalidad, mientras se mejora la comodidad y conveniencia del usuario.

El objetivo principal del dispositivo es lograr una mejora profunda en la calidad de vida de los veteranos que se enfrentan a lesiones de médula, en sus articulaciones o parálisis. De esta manera, se espera brindarles acceso a monitores de temperatura, promoviendo su seguridad y comodidad.

A través de este dispositivo los objetivos iniciales del proyecto se han cumplido de manera significativa, y algunos incluso se han superado.

En primer lugar, se ha logrado una precisión de medición excepcional, con una desviación media mínima respecto a los estándares médicos, lo cual es fundamental para la fiabilidad de monitoreo de salud. Esta precisión asegura que los usuarios pueden confiar en las lecturas para tomar decisiones informadas sobre su salud.

La implementación de la conectividad BLE ha demostrado ser robusta y eficaz, con una alta tasa de éxito en la transmisión de datos. Este hecho es crucial para el monitoreo en tiempo real, permitiendo a los usuarios recibir datos actualizados sin interrupciones.

La aceptación del dispositivo por parte de los usuarios es otro logro significativo que destaca la comodidad y facilidad de uso como factores clave. Esto no solo facilita la adopción del dispositivo, sino que también asegura que los usuarios lo utilicen de manera consistente, permitiendo una recopilación continua y precisa de los datos.

De esta manera, las aportaciones del proyecto incluyen la integración exitosa de tecnologías de sensores y comunicación, el fomento de un monitoreo proactivo de la salud y el establecimiento de una base sólida para futuros desarrollos en dispositivos médicos portátiles.

7.2 TRABAJOS FUTUROS

A pesar de los significativos logros que se han alcanzado en el desarrollo del dispositivo de monitoreo de temperatura corporal para veteranos con parálisis, existen varias áreas que presentan oportunidades para mejoras y desarrollos futuros. Estas áreas no solo buscan optimizar el rendimiento del dispositivo, sino que también buscan mejorar la experiencia del usuario y expandir las capacidades tecnológicas del sistema.

En primer lugar, se consideran trabajos futuros en relación con el producto diseñado y el *feedback* obtenido por parte de los usuarios de prueba. De esta manera, se propone mejorar la rapidez y fiabilidad del protocolo de emparejamiento inicial BLE. Reducir el tiempo necesario para establecer la conexión entre el dispositivo de control de temperatura y el *smartphone* es fundamental. A través de esta mejora se puede aumentar la estabilidad de la conexión y por tanto minimizar la pérdida de datos. Un emparejamiento más rápido y fiable asegura que los usuarios puedan comenzar a utilizar el dispositivo sin retrasos ni complicaciones, mejorando así la experiencia del usuario y la eficacia del monitoreo en tiempo real.

En segundo lugar, se propone rediseñar el dispositivo y ajustar ciertos aspectos en el diseño que permitan mejorar la comodidad y adaptabilidad a diversas formas y tamaños corporales. Este proceso implica utilizar materiales más suaves y flexibles que minimicen la irritación de la piel, y ajustar el diseño para que sea más cómodo de llevar durante largos periodos de tiempo. La comodidad del usuario es un aspecto crucial para la aceptación y el uso continuo del dispositivo por lo que un diseño ergonómico que se ajuste mejor a las necesidades individuales puede aumentar significativamente la adherencia al uso del dispositivo.

Otra área de mejora incluye la incorporación de algoritmos que detecten cuando el sensor no está en contacto adecuado con la piel, de manera que se alerta al usuario cuando no está correctamente colocado. A través de este algoritmo se pueden reducir las mediciones erróneas causadas por una mala colocación del sensor, lo cual afecta la precisión de las lecturas. Un sistema de detección de contacto mejorará la fiabilidad de las mediciones al asegurar que el sensor siempre esté colocado correctamente.

En términos de expansión funcional, con el objetivo de en un futuro poder integrarlo en el mercado de manera que permita ayudar a personas que lo necesiten se considera en primer lugar explorar la posibilidad de integrar el dispositivo con otros monitores de salud como pueden ser por ejemplo el ritmo cardíaco o presión arterial para poder ofrecer una visión más completa del estado de salud del usuario. Esta integración con otros dispositivos de salud puede proporcionar una solución más holística para el monitoreo de salud dado que se facilita el monitoreo de múltiples parámetros de salud desde una única plataforma. Esto permitirá a los usuarios y a los profesionales de la salud tener una visión más amplia y detallada del estado de salud del paciente, mejorando la capacidad de respuesta ante cualquier anomalía.

Finalmente, se desea llevar a cabo estudios clínicos más amplios y diversos que permitan validar la precisión y eficacia del dispositivo. Esto significa evaluar el rendimiento del dispositivo en diferentes grupos de usuarios y condiciones médicas, de manera que se obtengan datos robustos que respalden el uso del dispositivo en entornos clínicos. Pruebas

clínicas exhaustivas son esenciales para demostrar la eficacia y seguridad del dispositivo en una amplia gama de escenarios. A través de estos ensayos no solo se ayuda a mejorar el dispositivo, sino que también es crucial para obtener aprobaciones regulatorias y aceptación en el mercado médico.

En conclusión, los trabajos futuros propuestos no solo buscan mejorar el dispositivo actual, sino que también buscan expandir sus capacidades y aplicaciones. Estas mejoras y desarrollos tienen el potencial de hacer que el dispositivo sea aún más útil y efectivo para que los veteranos con parálisis, ayudándoles a gestionar su salud de manera más eficiente y proactiva.

Capítulo 8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Spanish Encyclopedia. (n.d.). ¿Qué es la lesión de la Médula Espinal?: Veterans Affairs. Veterans' Health Library.
<https://veteranshealthlibrary.va.gov/Spanish/Encyclopedia/3,41172>
- [2] Mayo Clinic. (2023, December 30). Lesiones de la Médula Espinal.
<https://www.mayoclinic.org/es/diseases-conditions/spinal-cord-injury/symptoms-causes/syc-20377890>
- [3] Sensores. Ingeniera Mecnica Elctrica. (n.d.).
<https://virtual.cuautitlan.unam.mx/intar/ime/sensores/#:~:text=Existen%20dos%20tipos%20de%20sensores,datos%20que%20dan%20son%20discretos>
- [4] Bausà Aragonés, J. (n.d.). Sensores de temperatura. Universidad Tecnológica Nacional.
https://frrq.cvg.utn.edu.ar/pluginfile.php/14089/mod_resource/content/0/SensoresTemperatura.pdf
- [5] Convertidor analogico digital de 10 bits pic 16f88 Proyecto Numero de Punto Flotante en LCD microcontrolador Tarjeta de Desarrollo EB88 Punto Flotante S.A. (n.d.). <https://www.puntofotante.net/CONVERTIDORAD.html>
- [6] ADC sampling rate. Cadence. (2024, March 28).
<https://resources.pcb.cadence.com/blog/2023-adc-sampling-rate>
- [7] Wikimedia Foundation. (2024, April 7). Cuantificación Digital. Wikipedia.
https://es.wikipedia.org/wiki/Cuantificaci%C3%B3n_digital
- [8] Academia Testo. (n.d.). Termistores: Academia testo. Termistores | Academia Testo.
<https://www.academiatesto.com.ar/cms/termistores>
- [9] Texas Instruments. (n.d.). LM35 precision centigrade temperature sensors.
<https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm35.pdf>
- [10] González, A. G. (2023, December 20). Discretización de Señales Analógicas. Panama Hitek. <https://panamahitek.com/discretizacion-de-senales-analogicas/>

- [11] Ingeniería Mecafenix. (2023, November 22). Que Es un microcontrolador y como funciona.
<https://www.ingmecafenix.com/electronica/programacion/microcontrolador/>
- [12] Arduino. (n.d.). Datasheet for Arduino Nano 33 Ble Sense Arduino. Octopart.
https://octopart.com/datasheet/arduino+nano+33+ble+sense-arduino-116872662?msclkid=59b8ac6e38401926da2aca1251060cbb&utm_source=bing&utm_medium=cpc&utm_campaign=b_cpc_emea-es_search_dsa_english_en_usd_all-categories&utm_term=semiconductors&utm_content=Discrete+Semiconductors+DSA
- [13] M. Zahner, T. Helbling, L. Durrer, and E. Schwyter, “Sensor Unit for a Portable Computer System and Integration of the Sensor Unit,” Sep. 19, 2023. [Online].
<https://patentimages.storage.googleapis.com/a9/8e/30/82768ffcb696ab/US11759111.pdf>
- [14] Xincheng Song, Cheng Huanlong, Zhang Xinhua, Xie Jing, and Zhang Yinglong. “Wearable Intelligent Body Temperature Monitoring Device .” Espacenet, August 20, 2021.
https://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?CC=CN&NR=113273971A&KC=A&FT=D&ND=3&date=20210820&DB=&locale=en_EP.
- [15] LM35DZ/NOPB Texas Instruments - linear ICS - distributors, price comparison, and datasheets: Octopart Component Search. Octopart. (n.d.-b).
https://octopart.com/lm35dz%2Fnopb-texas+instruments-24814031?msclkid=bda2d82a77611fd91e4ebe561dc2dea9&utm_source=bing&utm_medium=cpc&utm_campaign=b_cpc_emea-es_search_dsa_english_en_usd_all-categories&utm_term=texas+instruments&utm_content=Categories%3A+Big+Brands
- [16] LM35AH Texas Instruments - Linear ICS - distributors, price comparison, and datasheets: Octopart Component Search. Octopart. (n.d.-b).
<https://octopart.com/lm35ah-texas+instruments-24839686?r=sp>

- [17] LM35CZ/NOPB Texas Instruments - linear ICS - distributors, price comparison, and datasheets: Octopart Component Search. Octopart. (n.d.-c).
<https://octopart.com/lm35cz%2Fnopb-texas+instruments-24814024?r=sp>
- [18] LM35DT/NOPB Texas Instruments - linear ICS - distributors, price comparison, and datasheets: Octopart Component Search. Octopart. (n.d.-d).
<https://octopart.com/lm35dt%2Fnopb-texas+instruments-24814028?r=sp>
- [19] DS18S20+T&R Analog Devices - linear ICS - distributors, price comparison, and datasheets: Octopart Component Search. Octopart. (n.d.-b).
<https://octopart.com/ds18s20%2Bt%26r-analog+devices-124204944?r=sp>
- [20] SI7013-A10-IM1 silicon labs - sensors - distributors, price comparison, and datasheets: Octopart Component Search. Octopart. (n.d.-g).
<https://octopart.com/si7013-a10-im1-silicon+labs-31447993?r=sp>
- [21] SI7021-A20-im Silicon Labs - linear ICS - distributors, price comparison, and datasheets: Octopart Component Search. Octopart. (n.d.-h).
<https://octopart.com/si7021-a20-im-silicon+labs-52675246?r=sp>
- [22] BME680 Bosch tools - linear ICS - distributors, price comparison, and datasheets: Octopart Component Search. Octopart. (n.d.-b). <https://octopart.com/bme680-bosch+tools-84623084?r=sp>
- [23] IMIMG. (n.d.). <https://5.imimg.com/data5/FU/AL/MY-1833510/lm35-temperature-sensor.pdf>
- [24] Digikey(n.d.-a).
https://mm.digikey.com/Volume0/opasdata/d220001/medias/docus/399/BQ30Z50_55-R1_TechRef.pdf
- [25] LM35DZ/LFT1 texas instruments - linear ICS - distributors, price comparison, and datasheets: Octopart Component Search. Octopart. (n.d.-g).
<https://octopart.com/lm35dz/lft1-texas+instruments-24814030>
- [26] DS18B20 temperature sensor. Components101. (n.d.).
<https://components101.com/sensors/ds18b20-temperature-sensor>

- [27] Pierre, C. (2019, July 16). Guide for DS18B20 temperature sensor with Arduino. Random Nerd Tutorials. <https://randomnerdtutorials.com/guide-for-ds18b20-temperature-sensor-with-arduino/>
- [28] Index of /assets/parts/1/1/9/4/7/ - sparkfun. SparkFun Electronics. (n.d.). <https://cdn.sparkfun.com/assets/parts/1/1/9/4/7/>
- [29] Kbowerma. (n.d.). Temperature sensor - waterproof (DS18B20). SEN-11050 - SparkFun Electronics. <https://www.sparkfun.com/products/11050>
- [30] GY-BME280 pressure humidity temperature sensor module. ProtoSupplies. (2024, March 6). <https://protosupplies.com/product/gy-bme280-pressure-humidity-temperature-sensor-module/>
- [31] Uno R3. docs.arduino.cc. (n.d.). <https://docs.arduino.cc/hardware/uno-rev3/>
- [32] Ada, Lady. (n.d.). Introducing the Adafruit NRF52840 feather. Adafruit Learning System. <https://learn.adafruit.com/introducing-the-adafruit-nrf52840-feather/overview>
- [33] ESP32 Series Datasheet. ESP32 Series. (n.d.). https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf
- [34] ARDUINO. (n.d.). Arduino® MEGA 2560 REV3. ARDUINO Documents. <https://docs.arduino.cc/resources/datasheets/A000067-datasheet.pdf>
- [35] FabioLeon. (2020, February 29). Baterías Lipo, características Y cuidados!. DynamoElectronics. <https://www.dynamoelectronics.com/baterias-lipo-caracteristicas-y-cuidados/#:~:text=%C2%BFBater%C3%ADas%20de%20lipo%2C%20que%20son%3F%201%20Caracter%C3%ADsticas%20Vida,las%20bater%C3%ADas%20LiPo%20...%207%20Preguntas%20frecuentes%20>
- [36] Dayton Solutions. (2024, May 3). Guía comparativa: Pla vs. ABS vs. Petg en impresión 3D. <https://www.daytonsl.com/post/gu%C3%ADa-comparativa-pla-vs-abs-vs-petg-en-impresi%C3%B3n-3d>
- [37] Arduino Libraries. Libraries - Arduino Reference. (n.d.). <https://www.arduino.cc/reference/en/libraries/>

- [38] Distribución normal y sus porcentajes respecto de la desviación estándar. | download scientific diagram. Research Gate. (n.d). https://www.researchgate.net/figure/Distribucion-normal-y-sus-porcentajes-respecto-de-la-desviacion-estandar_fig1_275021043
- [39] Amir, M., & Deshmukh, R. G. (2023, August 19). Energy Storage Technologies: An integrated survey of developments, global economical/environmental effects, optimal scheduling model, and sustainable adaption policies. Journal of Energy Storage. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352152X23020911>

ANEXO I: ALINEACIÓN DEL PROYECTO CON LOS ODS

El proyecto de fin de grado de sensores de temperatura para los veteranos con parálisis se centra en mejorar la calidad de vida de aquellos que se enfrentan a dificultades en la termorregulación debido a sus lesiones traumáticas, y se alinea con múltiples Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la ONU. Es decir, el enfoque innovador del proyecto que busca aplicar la tecnología de telecomunicaciones para supervisar la temperatura corporal contribuye directamente a varios ODS, destacando especialmente su impacto en promoción de la salud y el bienestar (ODS 3), la innovación tecnológica y la infraestructura (ODS 9), la reducción de desigualdades al ofrecer oportunidades inclusivas (ODS 10) y la colaboración entre actores diversos para alcanzar metas comunes (ODS 17).

- **ODS 3 – Salud y Bienestar.**

- Este proyecto de fin de grado contribuye directamente a este objetivo dado que busca mejorar la calidad de vida de los veteranos con parálisis al prevenir enfermedades relacionadas con la temperatura. La monitorización continua de la temperatura corporal ayuda a prevenir dolencias graves como la hipertermia y la hipotermia, promoviendo así la salud y el bienestar. Se busca a través de este dispositivo obtener una solución innovadora que busque mejorar la salud de los individuos con lesiones en la medula o parálisis que no puedan auto regular su temperatura corporal.

- **ODS 9 – Industria, Innovación e Infraestructura.**

- El desarrollo de un dispositivo tecnológico para controlar la temperatura corporal de manera eficiente y precisa demuestra la innovación en el campo de la tecnología aplicada a la salud y la discapacidad. En concreto, este proyecto tiene el objetivo de mejorar la infraestructura tecnológica para el cuidado de la salud. A través de este proyecto se busca poner en común todo

lo que existe hasta el momento, y buscar soluciones tecnológicas que sean innovadoras y rellenen todos esos huecos a los que todavía no se ha conseguido llegar.

- **ODS 10 – Reducción de Desigualdades.**
 - Al proporcionar a los veteranos con parálisis herramientas que les permitan participar más plenamente en actividades al aire libre, el proyecto contribuye a reducir la desigualdad, mejorando las oportunidades de participación social y recreativa de los veteranos.
- **ODS 11 - Ciudades y Comunidades Sostenibles.**
 - Si bien no está directamente relacionado con una ciudad específica, el proyecto promueve la inclusión de personas con discapacidades en actividades al aire libre, lo cual puede aplicarse en entornos urbanos y comunidades, fomentando la accesibilidad.
- **ODS 17 - Alianzas para lograr los Objetivos.**
 - La colaboración entre Adaptive Adventures, BAE Systems y la Universidad de Texas muestra la importancia de las alianzas entre organizaciones sin fines de lucro, empresas y entidades educativas para abordar desafíos sociales y mejorar la calidad de vida de las personas con discapacidades.

ANEXO II – CÓDIGO PARA MEDIR LA TEMPERATURA CORPORAL CON SENSOR LM35

Se proporciona el código que se desarrolló para comprobar el funcionamiento del sensor LM35 y su capacidad para medir la temperatura corporal. En este caso, el sensor de temperatura está conectado al PIN A6.

```
const int lm35_pin = A6; // Assuming the LM35 sensor is connected
to analog pin A6 on the Arduino Nano 33 BLE
void setup() {
  Serial.begin(9600);
}
void loop() {
  int temp_adc_val;
  float temp_val;
  temp_adc_val = analogRead(lm35_pin); // Read temperature
  temp_val = (temp_adc_val * (3.3 / 1023) * 100); // Convert ADC
value to equivalent voltage and then to temperature
  Serial.print("Temperature = ");
  Serial.print(temp_val);
  Serial.print(" Degree Celsius\n");
  delay(1000);
}
```

ANEXO III – PRUEBAS DE BENCHMARKING Y

VELOCIDAD DE PROCESAMIENTO

Se adjunta el código desarrollado para probar el funcionamiento de los componentes, realizando pruebas de benchmarking como de velocidad de procesamiento de manera que se puedan comprobar los resultados y seleccionar el mejor componente.

```
void setup() {
    Serial.begin(9600);
    unsigned long inicio = micros();

    // Realizar operaciones de benchmarking
    int suma = 0;
    for (int i = 0; i < 1000; i++) {
        suma += i;
    }

    unsigned long fin = micros();
    // Calcular la velocidad de procesamiento
    unsigned long tiempo = fin - inicio;
    Serial.print("Tiempo de ejecucion (microsegundos): ");
    Serial.println(tiempo);
    // Evaluar la memoria disponible y utilizada
    Serial.print("Memoria disponible (bytes): ");
    Serial.println(__builtin_available_heap_size());
    Serial.print("Memoria utilizada (bytes): ");
    Serial.println(20000 - __builtin_available_heap_size());
}

void loop() {
```



COMILLAS
UNIVERSIDAD PONTIFICIA

UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS DE TELECOMUNICACIÓN

ICAI

ICADE

CIHS

III – PRUEBAS DE BENCHMARKING Y VELOCIDAD DE PROCESAMIENTO

```
// Nada que hacer en el loop  
}
```

ANEXO IV – CÓDIGO BLE CONEXIÓN SENSOR CON APLICACIÓN MÓVIL

El código que se adjunta a continuación incluye la manera de conectar la medida de temperatura que se obtiene por parte del sensor de temperatura para que se pueda visualizar luego en la aplicación web.

Este código se implementa luego en el código de la aplicación proporcionado por parte de la universidad para el funcionamiento completo. De esta manera, a través de este código se inicializa el componente, se le pone un nombre y se comprueban ciertos rasgos importantes para su funcionamiento como es el nivel de batería.

Finalmente, una vez que todo está inicializado se mide la temperatura.

```
#include <ArduinoBLE.h>

BLEService testService("37b11d5e-ece1-4bb8-9e76-132521d99ef6");

// Bluetooth® Low Energy Battery Level Characteristic

BLEIntCharacteristic testLevelChar("33718771-a266-4194-9a74-3ea52862d7d0", // standard 16-bit characteristic UUID

    BLERead | BLENotify); // remote clients will be able to get
notifications if this characteristic changes.

const int lm35_pin = A6;

long previousMillis = 0; // last time the battery level was checked,
in ms

void setup() {
```

```
Serial.begin(9600);

// begin initialization

if (!BLE.begin()) {

    while (1);

}

BLE.setLocalName("tempSensor"); //set local name.

BLE.setAdvertisedService(testService); // add the service UUID.

testService.addCharacteristic(testLevelChar); // add the battery
level characteristic.

BLE.addService(testService); // Add the service.

testLevelChar.writeValue(0); // set initial value for this
characteristic.

// start advertising

BLE.advertise();

}

void loop() {

    // wait for a Bluetooth® Low Energy central

    BLEDevice central = BLE.central();

    // if a central is connected to the peripheral:

    if (central) {

        // turn on the LED to indicate the connection:
```

```
//digitalWrite(LED_BUILTIN, HIGH);

// check the battery level every 200ms

// while the central is connected:

while (central.connected()) {

    long currentMillis = millis();

    // if 200ms have passed, check the battery level:

    if (currentMillis - previousMillis >= 1000) {

        previousMillis = currentMillis;

        updateValue();

    }

}

// when the central disconnects, turn off the LED:

//digitalWrite (LED_BUILTIN, LOW);

}

}

void updateValue() {

    float temp_adc_val = analogRead(lm35_pin);

    float temp_val_serial = (temp_adc_val * (3.3 / 1023) * 100);

    int temp_val = (temp_adc_val * (3.3 / 1023) * 100) * 100;

    Serial.print("Temperature = ");
```



```
Serial.print(temp_val_serial);  
  
Serial.print(" Degree Celsius\n");  
  
testLevelChar.writeValue(temp_val);  
  
}
```

ANEXO V – PRUEBA MEDIDA SENSOR PRECISIÓN

Se adjunta una tabla que contiene las medidas de todas las pruebas realizadas para saber la precisión del sensor de temperatura LM35, comparado con un termómetro de precisión de referencia.

Temperatura referencia (°C)	Temperatura del sensor (°C)	Desviación (°C)
25.3	25.7	-0.4
29.5	29.9	-0.4
28.2	28.7	-0.5
27.4	27.9	-0.5
25.1	24.4	0.7
24.9	25.6	-0.7
27.6	27.3	0.3
26.8	26.1	0.7
28.4	28.1	0.3
25.5	24.9	0.6
24.4	24.9	-0.5
26.1	26.4	-0.3
28.9	28.6	0.3
28.2	27.6	0.6
27.4	27.1	0.3
25.7	25.3	0.4
29.7	29.1	0.6
29.2	29.8	-0.6
28.3	28.1	0.2
24.2	25.1	-0.9

26.9	27.1	-0.2
27.8	26.4	1.4
29.4	29.6	-0.2
26.2	27.7	-1.5
27.0	27.7	-0.7
28.6	29.3	-0.7
26.3	26.9	-0.6
24.9	26.9	-2.0
25.6	26.2	-0.6
29.9	29.8	0.1
27.7	27.9	-0.2
28.1	28.2	-0.1
28.7	28.1	0.6
24.8	25.4	-0.6
27.2	26.9	0.3
28.0	28.6	-0.6
24.6	25.4	-0.8
25.4	24.9	0.5
27.5	27.2	0.3
27.6	27.6	0.0
28.3	28.9	-0.6
24.5	24.4	0.1
25.7	25.9	-0.2
26.6	26.2	0.4
28.8	27.9	0.9
24.9	25.3	-0.4
25.9	25.5	0.4
27.1	27.5	-0.4
28.5	27.9	0.6

29.6	30.1	-0.5
28.9	29.5	-0.6