|  |  |
| --- | --- |
|  | SISTEMEN INGENIERITZA ETA AUTOMATIKA SAILA  DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE SISTEMAS Y AUTOMÁTICA |

[UNIVERSIDAD DEL](https://www.ehu.eus/) [PAÍS](https://www.ehu.eus/) [VASCO](https://www.ehu.eus/)

[ESCUELA DE](https://www.ehu.eus/en/web/ingeniaritza-bilbo/hasiera) [INGENIERÍA DE](https://www.ehu.eus/en/web/ingeniaritza-bilbo/hasiera) [BILBAO](https://www.ehu.eus/en/web/ingeniaritza-bilbo/hasiera)

BECAS FUNDACIÓN JESÚS DE GANGOITI BARRERA

**Diseño y desarrollo de un sistema  
de apoyo a la diagnosis e identificación  
de patologías**

*Autor: Supervisor:*

Imanol Ayude Prieto Dr. Eloy Irigoyen Gordo

2 de noviembre de 2022

***AGRADECIMIENTOS***

*Mi más sincero agradecimiento a todas las personas que, de un modo u otro, me han ayudado en este camino, y en especial;*

*A mi familia, que ha sido un apoyo constante y fundamental en toda mi vida, y que, sin su ayuda, no hubiera sido posible desarrollarme, tanto personalmente como formativamente.*

*A mi director, Dr. Eloy Irigoyen Gordo, que, gracias a su apoyo y motivación casi diaria, así como a todo su conocimiento tanto técnico como conocimiento a la hora de gestión del trabajo, este trabajo ha llegado hasta este punto.*

*A todas las instituciones involucradas tanto en mi desarrollo como estudiante/investigador, así como las entidades que han ayudado a la elaboración y puesta en marcha de este proyecto. Pero, en especial, al Grupo de Investigación de Control Inteligente y a la Fundación Jesús Gangoitia Barrera.*

***RESUMEN***

**Resumen**

En este Proyecto Fin de Máster se plantea y resuelve el control …. utilizando un algoritmo de control, una red neuronal y …. El esquema de control propuesto se aplica al problema de …. contribuyendo de esta forma a ….

**Laburpena**

Projektu honetan kontrol ……. planteatzen eta konpentzen da kontrol alogoritmo, sare neuronal eta … erabiltzen. Proposatzen den kontrol eskema aplikatzen da … arazoan, honela laguntzen …

**Summary**

In this project is setted out and resolved the control … using a control algorithm, a neural network and …. The proposed control scheme it is applied in the problem of … helping to ….

**Palabras clave:** Pseudo Tiempo Real, IoT, Bioseñales, ESP32, Python

***INDICE DE CONTENIDOS***

Contenido

[1 Introducción 2](#_Toc122004993)

[1.1 Motivación 2](#_Toc122004994)

[1.2 Antecedentes 3](#_Toc122004995)

[2 Objetivos y alcance 6](#_Toc122004996)

[2.1 Objetivos principales 6](#_Toc122004997)

[2.2 Objetivos parciales 6](#_Toc122004998)

[2.3 Alcance 6](#_Toc122004999)

[2.3.1 Ámbito tecnológico 6](#_Toc122005000)

[2.3.2 Ámbito socio sanitario 7](#_Toc122005001)

[2.4 Estructura 7](#_Toc122005002)

[3 Estado del arte 10](#_Toc122005003)

[3.1 Sistema circulatorio 10](#_Toc122005004)

[3.2 Sistema nervioso 12](#_Toc122005005)

[3.3 Dispositivos anteriores 12](#_Toc122005006)

[4 Dispositivos y tecnologías 14](#_Toc122005007)

[4.1 Dispositivos 14](#_Toc122005008)

[4.1.1 BITlaino 14](#_Toc122005009)

[4.1.2 Arduino 14](#_Toc122005010)

[4.1.3 ESP32 15](#_Toc122005011)

[4.1.4 Raspberry Pi 15](#_Toc122005012)

[4.2 Tecnologías 16](#_Toc122005013)

[4.2.1 Pulso y SPO2 16](#_Toc122005014)

[4.2.2 EDA/GSR 17](#_Toc122005015)

[4.2.3 ECG 18](#_Toc122005016)

[5 Metodología 20](#_Toc122005017)

[5.1 Creación de una Base de Datos 20](#_Toc122005018)

[5.1.1 Configuración del adaptador USB 20](#_Toc122005019)

[5.1.2 Configuración del Router 21](#_Toc122005020)

[5.1.3 Configuración de la Máquina Virtual 22](#_Toc122005021)

[5.1.4 Instalación y configuración de PostgreSQL 23](#_Toc122005022)

[5.1.5 Creación de la base de datos 26](#_Toc122005023)

[5.2 Raspberry Pi 28](#_Toc122005024)

[5.2.1 Instalación de un OS 28](#_Toc122005025)

[5.2.2 Configuración Raspberry 29](#_Toc122005026)

[5.2.3 Programación Python 30](#_Toc122005027)

[6 Conclusiones 40](#_Toc122005028)

[6.1 Conclusiones 40](#_Toc122005029)

[6.2 Acciones futuras 40](#_Toc122005030)

[7 Referencias bibliográficas 42](#_Toc122005031)

[8 ANEXO I: TÍTULO DEL ANEXO 1 46](#_Toc122005032)

***INDICE DE FIGURAS***

***INDICE DE FIGURAS***

[Figura 3.1.- Esquema de circulación sanguínea 10](#_Toc122426232)

[Figura 3.2.- Esquema de la inervación autónoma del corazón 11](#_Toc122426233)

[Figura 3.3.- Diagrama de Wiggers, muestra los eventos durante el periodo cardiaco 11](#_Toc122426234)

[Figura 4.1.- BITlaino (r)evolution Board 14](#_Toc122426235)

[Figura 4.2.- Arduino nano 33 IoT 14](#_Toc122426236)

[Figura 4.3.- *ESP32* 15](#_Toc122426237)

[Figura 4.4.- Raspberry Pi Zero 2W 15](#_Toc122426238)

[Figura 4.5.- Raspberry Pi Model 4B 16](#_Toc122426239)

[Figura 4.6.- Observación de la refracción de la luz en la *Hb* y la *HbO2* 17](#_Toc122426240)

[Figura 4.7.- Tipos de electrodos según su contacto 18](#_Toc122426241)

[Figura 4.8.- Circuito AD8232 18](#_Toc122426242)

[Figura 5.1.- Dispositivos TL-WN725N (USB) y TL-WR841ND (Router) 20](#_Toc122426243)

[Figura 5.2.- Instalador de drivers del TL-WN725N 20](#_Toc122426244)

[Figura 5.3.- Leds encendidos para la configuración del TL-WR841ND 21](#_Toc122426245)

[Figura 5.4.- Puertos LAN 21](#_Toc122426246)

[Figura 5.5.- Solicitud de usuario y contraseña configuración TL-WN725N 21](#_Toc122426247)

[Figura 5.6.- Configuración de Wireless Settings 21](#_Toc122426248)

[Figura 5.7.- Configuración de Wireless Security 22](#_Toc122426249)

[Figura 5.8.- Configuración de Network adapter (VMware) 22](#_Toc122426250)

[Figura 5.9.- Configure Adapters (VMWare) 23](#_Toc122426251)

[Figura 5.10.- Autoridad y permisos de Data, server.key y server.crt (root) 24](#_Toc122426252)

[Figura 5.11.- Autoridad y permisos de Data, server.key y server.crt (postgres) 25](#_Toc122426253)

[Figura 5.12.- Cambio escucha todas las IP (postgresql.conf) 25](#_Toc122426254)

[Figura 5.13.- Activación y actualización de localización certificados (postgresql.conf) 25](#_Toc122426255)

[Figura 5.14.- Whitelist de direcciones IP (pg\_hba.conf) 26](#_Toc122426256)

[Figura 5.15.- Listado de usuarios 27](#_Toc122426257)

[Figura 5.16.- Listado y visualización de tabla 27](#_Toc122426258)

[Figura 5.17.- Ventana Advanced Options 28](#_Toc122426259)

[Figura 5.18.- Esquema de I2C 29](#_Toc122426260)

[Figura 5.19.- Ventana inicial Raspi-config 29](#_Toc122426261)

[Figura 5.20.- Ventana habilitación *interfaces* 29](#_Toc122426262)

[Figura 5.21.- Logo de Python 30](#_Toc122426263)

[Figura 5.22.- Diagrama multithreading 30](#_Toc122426264)

[Figura 5.23.- Diagrama Multiprocessing 31](#_Toc122426265)

[Figura 5.24.- Diagrama de activación de una Tarea Periódica 31](#_Toc122426266)

[Figura 5.25.- Registro Protegido 32](#_Toc122426267)

[Figura 5.26.- Diagrama de comunicación – Primer programa 32](#_Toc122426268)

[Figura 5.27.- Tarea periódica con plazo 33](#_Toc122426269)

[Figura 5.28.- Tarea periódica simplificada 34](#_Toc122426270)

[Figura 5.29.- Función CogerGuardarDatosPOX 35](#_Toc122426271)

[Figura 5.30.- Cálculo del valor GSR 35](#_Toc122426272)

[Figura 5.31.- Función CogerGuardarDatosGSR 36](#_Toc122426273)

[Figura 5.32.- Función COMS 36](#_Toc122426274)

[Figura 5.33.- Estructura Programa principal (V1 Python) 37](#_Toc122426275)

[Figura 5.34.- Estructura tipo usada en el segundo programa 37](#_Toc122426276)

[Figura 5.35.- Esquema estructura programa total 37](#_Toc122426277)

[Figura 5.36.- Función generar\_buffer\_pox 38](#_Toc122426278)

[Figura 5.37.- Función generar\_buffer\_gsr 38](#_Toc122426279)

[Figura 5.38.- Función generar\_buffer\_ecg 39](#_Toc122426280)

[Figura 5.39.- Main del programa principal 39](#_Toc122426281)

[Figura 5.40.- Programa obtener\_valores 40](#_Toc122426282)

***INDICE DE TABLAS***

[Tabla 4.1.- Especificaciones generales de placas buscadas 16](#_Toc121903302)

[Tabla 4.2.- Comparativa entre Max30100 y Max30102 17](#_Toc121903303)

*CAPITULO 1*

**INTRODUCCIÓN**

*El título de este capítulo es fijo. Comience todos los capítulos en página impar. Si es preciso incluya una página en blanco. Borre este texto en la versión final del documento.*

# Introducción

## Motivación

A día de hoy, que ya han pasado dos años del comienzo de la pandemia de *COVID-19*, la situación sanitaria sigue estando afectada por esta situación. Pero, no solo se ven afectadas los y las sanitarias y otros trabajadores vinculados al sector socio sanitario, sino que también sigue estando afectada la forma en la que los usuarios de estos servicios, en definitiva, pacientes son atendidos, cuidados y curados.

Una de las grandes causas que ha provocado este efecto negativo sobre el sector, a parte, de que se trataba de una enfermedad desconocida, fue también, la falta de recursos, ya no solo humanos (faltaba personal en el sector de la salud) sino que también de material sanitario. Y debido a esta situación, se ha sacado a la palestra la ya obvia necesidad de sistemas que apoyen a la labor sanitaria.

Desde ya hace unos años, la tecnología de *Internet of the Things* se ha desarrollado exponencialmente, esto ha provocado, junto a la mejora de la potencia de los microprocesadores que la creación de dispositivos que ayuden a la diagnosis prolifere. Mediante este tipo de herramientas, se amplía el volumen de gente a la que se puede atender, al mismo tiempo que se ofrece una mejor calidad en esta atención gracias a la información que se ha ido recogiendo gracias a estas herramientas.

Pero fuera de esta situación, que lo único que ha hecho, ha sido visibilizar el estado del sector socio sanitario, existen otros tipos de situaciones en las que la diagnosis de patologías comunes como pueden ser las cardiovasculares, no se ven atendidas. Y según la OMS, este tipo de patologías son las que más muertes causan por encima de todas. Sobre todo, se destaca que un alto porcentaje de estas muertes se dan en países subdesarrollados a causa de infartos.

Pero según diferentes libros y estudios, una parte de estos infartos pueden ser previamente detectados, ya que suelen estar precedidos por eventos ventriculares mediables mediante diferentes sensores.

Todos estos hechos, junto a la motivación del propio becario, y la continuación de la línea de investigación del *Grupo de Investigación en Control Inteligente*, se ha logrado llevar a cabo este proyecto que estará centrado en la elaboración de un dispositivo de adquisición fiable y en tiempo real de diferentes señales biológicas, que caractericen tanto los periodos ventriculares que pueden denotar una cardiopatía futura, como señales que puedan alertar al médico de otro tipo de patologías. El valor de este proyecto, se encontrará en los algoritmos y diseños electrónicos que se elaborarán para la creación de este dispositivo.

## Antecedentes

Como se ha comentado anteriormente, este proyecto se desarrolla en la *Universidad del País vasco*, para ser concreto dentro del *Grupo de Investigación en Control Inteligente*, de la *Escuela de Ingeniería de Bilbao*. Este grupo de investigación, pertenece al departamento de *Ingería de Sistemas y Automatización* en el cual se busca dar soluciones a problemas complejos mediante la aplicación de sistemas de computación inteligente. El director de este proyecto es el Dr. Eloy Irigoyen Gordo, el cual tiene ya una gran experiencia en la dirección de proyectos centrados tanto en la computación inteligente como de toma correcta de señales para el correcto funcionamiento y diseño de estos. Este proyecto, se encuentra dentro del campo de la bio-ingeniería, en el cual este grupo de investigación lleva varios años centrado. Dentro de los proyectos, tesis etc. elaborados en el grupo, la que más destaca, es la elaborada por la *Dr. Raquel Martínez Rodríguez* con el título, *“*[*Diseño de un sistema de detección y clasificación de cambios emocionales basado en el análisis fisiológicas no invasivas*](https://addi.ehu.es/bitstream/handle/10810/18804/TESIS_MARTINEZ_RODRIGUEZ_RAQUEL.pdf?sequence=1&isAllowed=y)*”*[1] en la cual se estudiaba desde el año 2006 como se podía gestionar de las señales fisiológicas para detectar alteraciones emocionales que pueda sufrir el paciente, así como poder clasificar esos estados de ánimos para que después puedan ser usados para conocer el estado emocional de cara por ejemplo, a hacer una intervención quirúrgica. Continuando la línea de investigación abierta por la *Dr. Raquel Martínez Rodríguez*, el *Dr. Unai Zalabarria Pena* realizo su tesis cuyo título es *“*[*Identificación del nivel de estrés y relajación en personas basadas en el estudio y procesamiento avanzado de señales fisiológicas relacionadas con la actividad del sistema nervioso autónomo*](https://addi.ehu.es/handle/10810/50668)*”* [2], con la que se dio otro paso más en la línea de investigación implementando técnicas de inteligencia artificial, así como procesamientos avanzados sobre las señales fisiológicas.

Esta tesis supuso en el grupo la apertura de nuevas líneas de investigación para la obtención, procesado y detección de patologías cardiovasculares. Y centrándose en el procesado para la detección de estas, de nuevo, el *Dr. Unai Zalabarria Pena*, publicó en la revista llamada *Applied Mathematics and Computation* en artículo de nombre *“*[*Online robust R-peaks detection in noisy electrocardiograms using a novel iterative smart processing algorithm*](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0096300319308318?via%3Dihub)*”*[3] que ayudó a iniciar en *GICI* el estudio e investigación para la extracción robusta y segura de patrones en las señales fisiológicas a partir de señales que partan del sistema cardiovascular, como puede ser el electrocardiograma.

Estas señales que derivan del sistema cardiovascular fueron posteriormente estudiadas junto a otras señales como puede ser la sudoración o la respiración para así poder lograr mediante algoritmos inteligentes los parámetros de estas señales fisiológicas, con el fin de que pudieran ser procesados en un dispositivo de bajo costo. Esta investigación finalmente derivo en la publicación del artículo “[*A low-cost portable solution for stress and relaxation estimation based on a real-time fuzzy algorithm*](https://ieeexplore.ieee.org/document/9069202)*”* [4] en la revista *IEEE Access*.

El siguiente paso que se dio en la línea de investigación fue de nuevo un estudio encabezado por el *Dr. Unai Zalabarria*, junto a varios investigadores pertenecientes al grupo de investigación GICI y a al Instituto de Tecnologías Biomédicas de la universidad de Tecnológica de Auckland, Nueva Zelanda. En este desarrollo se buscaba la avalación de las técnicas desarrolladas en el trabajo anterior, además de realizar un profundo análisis de la vinculación entre la señal pletismográfica y diferentes patologías cardiovasculares. Finalmente, en el año 2020 se publicó un nuevo artículo en la prestigiosa revista *Computer Methods and Programs in Biomedicine* bajo el título “[*Diagnosis of atrial fibrillation based on arterial pulse wave foot print detection using artifical neural network*](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169260720315145?via%3Dihub)*”* [5]. En el cual se presentaba la validación de las técnicas inteligentes para la predicción de eventos anómalos o patologías cardiovasculares mediante el correcto procesamiento de los parámetros físicos extraídos de señales como, el ritmo cardiaco o de la presión arterial.

Y siguiendo estos pasos ya dados en la línea de investigación, el trabajo que se ha desarrollado en esta beca, nace del interés del beneficiario por la correcta obtención de las señales fisiológicas, para así ofrecer un valor casi infinito de datos para poder seguir desarrollando los algoritmos y técnicas inteligentes de computación para la detección de patologías. Además, se quiere implementar esta adquisición de datos en un dispositivo portable y de bajo costo, pero sin perder en ningún momento la seguridad que es necesaria para trabajar con estas señales.

Como se ha comentado en cada uno de los trabajos, tesis o artículo, las señales fisiológicas más usadas para la detección de estas patologías, son la señal de pulso, oxigenación de sangre, y respuesta galvánica de la piel. Por lo que, en este trabajo se quiere que la toma de todas estas señales sean recogidas en los periodos adecuados para la recogida correcta de cada una de las señales, así como que todas ellas sean en tiempo real.

*CAPITULO 2*

**OBJETIVOS Y ALCANCE**

*El título de este capítulo es fijo. Comience todos los capítulos en página impar. Si es preciso incluya una página en blanco. Borre este texto en la versión final del documento.*

# Objetivos y alcance

## Objetivos principales

El principal objetivo de este trabajo se centra en la creación de un dispositivo de bajo costo, que sea capaz de recoger diferentes señales fisiológicas en tiempo real, o al menos, garantizando plazos. Las señales que se quieren adquirir deberán ser de la manera menos invasiva posible, para que así, el paciente no se vea afectado y las medidas recogidas sean lo más reales posible. Además, se quiere hacer que el dispositivo aparte de ser de bajo costo, se quiere también que sea lo más portable posible, ya sea mediante una pulsera, o mediante una petaca en el cinto.

Este planteamiento, hace que el sistema pueda ser usado tanto en el sector sanitario (hospitales, residencias) como para uso doméstico. De este modo, se pretende poder hacer una evaluación efectiva de mayor número de gente, usando un menor número de recursos. O simplemente, creando un archivo de datos sobre las señales fisiológicas del paciente, para que después en un menor tiempo puedan ser leídas, y mostradas a el médico interesado para así poder hacer diagnosticar si existen una patología.

Dado que el proyecto que se va a llevar a cabo, trata de obtener y manipular datos personales altamente confidenciales, ya que pueden servir para la identificación del usuario, el trabajo se atendrá a los principios éticos que se pidan en él.

## Objetivos parciales

Para lograr los objetivos principales en este trabajo, se han definido los siguientes objetivos parciales:

* Búsqueda bibliográfica y estudio en profundidad del estado del arte. En este se estudiará la fisionomía humana para así poder relacionar que señales fisiológicas son necesarias para la detección de patologías
* Desarrollo de algoritmos para la lectura de las señales fisiológicas en tiempo-real.
* Creación y configuración de un servidor para el correcto almacenamiento de las señales fisiológicas.
* Comunicación segura entre el dispositivo de adquisición de datos y el servidor.
* Testeo del prototipo final mediante la ejecución de este en condiciones de funcionamiento reales.

## Alcance

Debido a que el trabajo que se va a desarrollar por parte del beneficiario trata de aplicar una solución tecnológica a un problema sanitario como puede ser la identificación anticipada o en tiempo real de una posible patología en el sistema cardiovascular, el proyecto supone un tema de gran interés en ambos ámbitos.

### Ámbito tecnológico

* El desarrollo de una solución avanzada para la recogida autónoma de señales fisiológicas fiables en cuanto a cumplimento de plazo supondría un hito interesante en este ámbito, ya que, mediante este dispositivo, se podrá abastecer a diferentes sistemas de clasificación de patologías cardiovasculares de información suficiente para el entrenamiento y validación de ellos.
* El uso de una programación en Pseudo tiempo real a la hora de programar el microcontrolador Tensilica Xtensa LX6 presente en la placa ESP32 para la obtención de tres señales simultáneamente. Que supone ser de los primeros sistemas en implementar este tipo de programación para el ámbito socio-sanitario en placas de bajo-costo.
* Creación e implementación de una biblioteca con tareas periódicas basadas en tiempo real para el lenguaje de programación *Python*, desplegable en varios sistemas como puede ser la *Raspberry Pi 4B+*. Con la que se podría usar unos dispositivos de mejores especificaciones para la continua mejora del dispositivo.

### Ámbito socio sanitario

* Diseño de un dispositivo portátil para la obtención de datos para la identificación de patologías cardiovasculares y estados de ánimo, lo que supone mejorar la calidad de vida de los usuarios, ya que mediante este se podrá detectar de forma preventiva estos estados o patologías.
* El dispositivo no solo podrá ser usado por un usuario en específico, si no que este podría dar lugar a una implementación en el ámbito sanitario, ya sea en una planta de hospital o en las residencias. Lo que ayudaría a lograr una diagnosis precisa de una forma más rápida.

## Estructura

A continuación, se presenta la estructura del proyecto, explicando de forma general el contenido que se expondrá en cada uno de los apartados.

El Capítulo 3 es el estado del arte, en este se lleva a cabo un estudio y descripción general de las modalidades entre las que cabalga este proyecto, el sistema cardiovascular, sistema nervioso y la programación en pseudo tiempo real.

En el Capítulo 4 se explica paso a paso los caminos en plataformas y lenguajes de programación diferente que se han trabajado. Por un lado, *Python* en la *Raspberry*, y por otro lado *C* compilado en *Arduino IDE* en la *ESP32*. En cada uno de ellos se expondrá tanto el montaje como la programación usada para la validación del dispositivo.

El Capítulo 5 estará compuesto por la creación y configuración de la base de datos o servidor para poder llevar a cabo comunicaciones seguras mediante el protocolo *SSL*. Además, se expondrá el proceso seguido para que la comunicación entre el servidor y los dispositivos se haga correctamente.

En el penúltimo capítulo, el 6, se mostrarán los resultados obtenidos en cada una de las fases de desarrollo de los dispositivos.

Y finalmente, en el Capítulo 7 se discuten las conclusiones alcanzadas en torno a los resultados obtenidos en el capítulo anterior. También se incluirá las líneas futuras que este proyecto ha abierto y las que se podría trabajar considerando el gran potencial que podrían tener estas futuras contribuciones.

*CAPITULO 3*

**ESTADO DEL ARTE**

*El título de este capítulo puede cambiar en función de la tipología del PFM (Estudio Técnico, Estudio Científico, Proyecto, Metodología,…). Se ofrecen unos cuantos ejemplos para el título: “ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS”, ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS”….*

*Comience todos los capítulos en página impar. Si es preciso incluya una página en blanco. Borre este texto en la versión final del documento.*

# Estado del arte

Como ya se comentó en el capítulo 1.1, la situación sanitaria a día de hoy no es de las mejores, debido a la pandemia, y sus efectos que se siguen observando actualmente. Pero si se habla de otras enfermedades que tiene una gran mortalidad, son las concernientes al sistema cardiovascular, que generalmente comienzan con cardiopatías.

Desde el año 2020, se estima que al menos el 50% de la población mayor de 60 años tiene una cardiopatía. De estas, el 3% de ellas podrían sufrir un ataque al corazón que resulte con la muerte prematura de la persona [6]. Este valor puede parecer muy bajo, pero teniendo en cuenta que la población mundial actual es de 8.000 millones de personas, aunque sea un porcentaje bajo, el número de personas que podrían fallecer debido a este tipo de cardiopatías es muy grande.

Para conocer cómo se puede detectar este tipo de cardiopatías, en primer lugar, es necesario conocer de una forma más general el funcionamiento del sistema circulatorio, a veces también denominado como sistema cardiovascular, ya que es en este dónde se forman las cardiopatías.

El sistema circulatorio es esencial para la vida. Es el encargado de transportar oxígeno y nutrientes a todas las células y órganos, mediante el torrente sanguíneo. Debido a este transporte de los nutrientes, el sistema es capaz de combatir las enfermedades y mantener la homeostasis. Está formado por el corazón, que se trata de un músculo cardiaco que tiene varias diferencias con los músculos esqueléticos, y por un sistema de vasos sanguíneos cerrados llamados, venas, arterias y capilares. Las venas son las encargadas de transportar la sangre ya oxigenada por todo el cuerpo, a diferencia de las arterias, las cuales trasportan la sangre desoxigenada del cuerpo de nuevo al corazón para su reoxigenación. El corazón proporciona un flujo constante de sangre repleta de oxigenación, la cual pasa inicialmente por los pulmones (Para abastecerse de oxigeno) y después por todo el cuerpo, como se puede observar en la Figura 3.1[7].

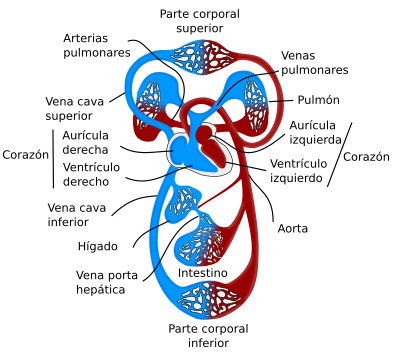


Figura 3.1.- Esquema de circulación sanguínea

**Fuente:** https://mmegias.webs.uvigo.es/2-organos-a/guiada\_o\_a\_05cardiovascular.php

## Sistema circulatorio

El sistema cardiovascular tiene un papel vital en el correcto matneimiento de la homeostasis, la cual depende directamente del flujo continuo de sangre a traves de la red de miles del kelimetros de capilares que componen todo cuepro humano [8]. Existen un gran numero de mecanismo para autorregular al sistema cardio vascular, pero están todos asociados al sistema nervioso autónomo y al sistema endocrino, el cual gestiona toda la creación y distribución de hormonas [7].

Además, el sistema circulatorio se encuentra bajo el control del sistema nervioso el cual está compuesto por dos ramas diferenes, la rama simpática, y la rama parasimpáica [7]. Estas son las encargadas de controlar el periodo cardíaco, la dilatación de los vasos sanguineos y la fuerza de contracción y constricción del propio corazón [8].

El sistema nervioso parasimpático es el encargado de la reducción del pulso cardiaco mediante la segregación de *Acetilcloina*, y el sistema nervioso simpático es el encargado del incremento de la frecuencia cardiaco mediante la segregación de *Norepinefrina*. A todo este proceso de excitación y relajación del pulsoc cardiaco se le llama *inervación* del corazón el cual se muestra en la Figura 3.2.

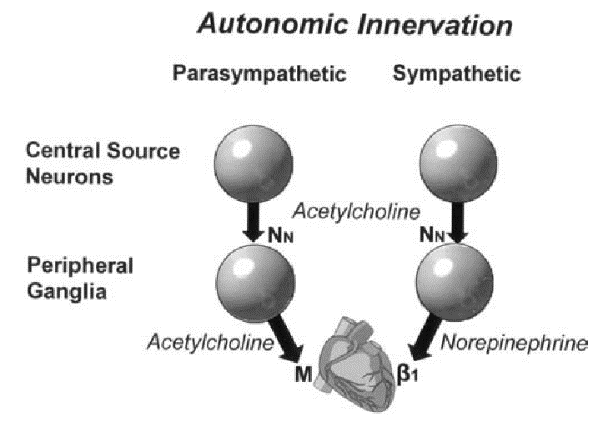


Figura 3.2.- Esquema de la inervación autónoma del corazón

**Fuente:** Handbook of Psychophysiology [7]

Para evaluar el estado del sistema cardiaco se utiloizan una gran cantidad de medidas, como pueden ser, el periodo cardiaco, el fujo sanguineo, la resistencias vascular y el gasto cardiaco [7]. Uno de los más utilizados y que es conocido por la mayoria del mundo, es el periodo caridaco, medinate el cual se puede estimar no solo el comportamineto del sistema cardiaco, si no que también se puede estimar la actividad del sistema nervioso simpático y parasimpático.

El periodo cardíaco se define como el funcionamiento del corazón entre un latidó y el siguiente. Este proceso consta de dos periodos diferentes:

* ***Diástole:*** cuando el corazón se llena de sangre.
* ***Sístole:*** cuando el corazón se vacía de sangre debido al bombeo de ella.

En la Figura 3.3 se muestra una gráfica en el cual se representa el diagrama de *Wiggers*, que muestra la presión que hace un corazón sano en la Sístole y en la Diástole.

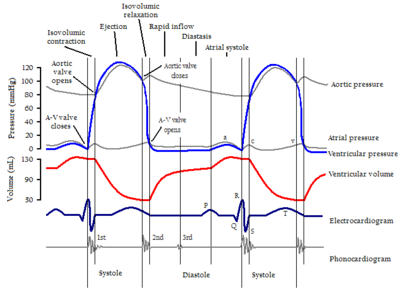


Figura 3.3.- Diagrama de Wiggers, muestra los eventos durante el periodo cardiaco

**Fuente:** https://www.aastweb.org/blog/join-us-at-the-aast-fall-course-for-jon-atkinsons-talk-on-cardiac-events

## Sistema nervioso

Como se acaba de comentar, el sistema nervioso también actúa en el sistema cardiovascular abasteciendo de diferentes sustancias químicas para provocar que el corazón palpite a diferentes frecuencias dependiendo de la situación. Pero este sistema, no solo actúa sobre este sistema, si no que actúa sobre todos los sistemas del cuerpo humano, por lo que existen gran variedad de señales biológicas para la detección del funcionamiento de este.

Uno de los más fáciles de medir y menos invasivo, es la *actividad electro dermal*, ya que es completamente instintiva y generalmente no puede ser manipulable. Esta actividad se presenta en el cuerpo humano como alteración de la humedad de la dermis, ya sea porque se comienza a sudar en una situación comprometida, o se deja de hacerlo por estar relajado [7].

## Dispositivos anteriores

Con todo esto, existen gran variedad de dispositivos que son capaces de medir señales de los sistemas cardiovascular y nervioso para así poder observar su estado. Estos dispositivos se pueden agrupar en dos ramas diferentes, por un lado, los sistemas profesionales y, por otro lado, los sistemas portables. Esta última rama de dispositivos, se centran en la detección precoz de las cardiopatías, y su característica principal, es que son portables, y pueden ser transportados con facilidad. Para dar esa portabilidad al dispositivo generalmente, se suele pensar en colocarlos en la muñeca como si fuera una pulsera [9], o incluso en una camiseta que el usuario pueda quitar y ponerse cada vez que quiera hace uso del dispositivo [10].

Pero este tipo de dispositivos al estar en desarrollo o ser de grandes empresas tecnológicas tiene sus aspectos positivos, y sus aspectos negativos, entre los que se encuentra el alto precio que suelen costar los dispositivos de mayor calidad para la detección de estas señales fisiológicas. Ya que para poder obtener una medida de calidad es necesario tener en cuenta aspectos como las no-idealidades de las señales por ejemplo del *SPO2* [11] y la del *Pulsioxímetro* [12]. La seguridad con la que estos gestionan los datos que se van recogiendo periódicamente [13]. O la calidad de la toma de datos, en cuestión de tiempo-real [14].

Pero este proyecto se quiere centrar en el desarrollo preliminar de un dispositivo que mejore estos aspectos negativos y explorar otras tecnologías. Como por ejemplo utilizar la comunicación vía WIFI, en vez de la comúnmente usada Bluetooth (como se hace en [13]). De esta forma se puede introducir mayor seguridad introduciendo certificados y restricciones de IP como se comenta en [15]. Además se quiere implementar circuitos propios para el acondicionamiento de señal como se hace en [16], en vez de usar el sensor comercial AD8232 como se hace en la mayoría de dispositivos [17].

Y siguiendo la estructura de bloques que suele ser usada [18], y el posicionamiento habitual de los sensores como se hacen en [9], trabajar en un sistema garantista de plazos, logrando que funcione en Pseudo Tiempo Real usando *MultiThreading* o *FreeRTOS* como se hace en otro tipo de dispositivos[19], [20].

Todo esto quiere ser implementado en otro tipo de tarjetas como puede ser una *Raspberry PI*, que se trata de un ordenador en miniatura con una gran potencia de cálculo, o una *ESP32*, que está más centrada en la toma de datos de una forma más rápida y constante.

*CAPITULO 4*

**DISPOSITIVOS Y TECNOLOGÍAS**

# Dispositivos y tecnologías

En este apartado se resumirán las tecnologías y dispositivos disponibles para la adquisición de señales fisiológicas. Los dispositivos serán placas que tengan la posibilidad de comunicarse con otros dispositivos sin ningún tipo de cable (*WiFi*, *Bluetooth* ...)

## Dispositivos

Existen gran variedad de dispositivos que pueden ser usados para la adquisición de señales fisiológicas, desde placas dedicadas para la adquisición de este tipo de señales. Tras hacer un estudio de los posibles dispositivos que podían ser usados en este proyecto, se obtuvo una lista de cuatro dispositivos de marcas diferentes.

### BITlaino

La primera de las placas encontradas, es la *BITlaino (r)evolution Board* (Figura 4.1), que es usada en diferentes proyectos [21], [22]. Esta placa está dedicadas y diseñadas para la única función de adquirir señales fisiológicas, lo que hace que la capacidad de comunicación con una *Base de Datos* o con algún dispositivo externo se haga solamente por medio de *Bluetooth*, lo que limita en gran medida su uso, por la inseguridad de esa vía. Además si se observa la Tabla 4.1 destaca frente a otros dispositivos en su tamaño, peso y precio, y su único núcleo en el procesador. Debido a este motivo, la capacidad de hacer que el sistema sea garantista de plazo es menor, ya que no se podrá independizar las tareas en diferentes núcleos. Por todo ello, el uso de este dispositivo para el proyecto fue descartado.

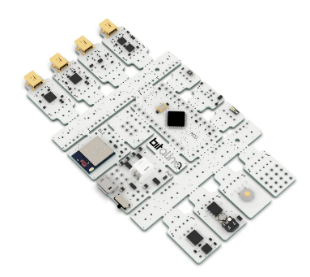


Figura 4.1.- BITlaino (r)evolution Board

**Fuente:** https://www.pluxbiosignals.com/collections/teaching-kits/products/bitalino-revolution-board-kit-ble-bt

### Arduino

A continuación, se observó que el fabricante más usado para crear dispositivos de adquisición de datos de todo tipo era los de *Arduino* [23], [24]. Observando el catálogo de esta compañía de llegó a la conclusión de que la placa que más podía concordar con el proyecto que se tenía en mente, era la *Arduino nano 33 IoT* (Figura 4.2), la cual destaca por su tamaño y peso muy reducidos. Además se tiene la vía de comunicación *WiFi* (como se recoge en la Tabla 4.1), para poder comunicarse con dispositivos externos, y entradas tanto analógicas, para la recogida de señales como el *EDA* (Actividad Electrodérmica) y el *ECG*, como entradas y salida digitales, para recoger la señal del pulsioximetro.

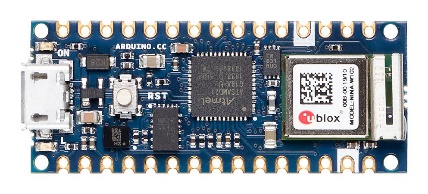


Figura 4.2.- Arduino nano 33 IoT

**Fuente:** https://docs.arduino.cc/hardware/nano-33-iot

Pero como sucedía en el dispositivo de *BITalino*, la especificación limitante del dispositivo es el procesador. Ya que, de nuevo, se trata de un procesador mono-núcleo, lo que como se ha comentado anteriormente, hace imposible que el dispositivo final sea garantista de plazos con las tres tareas de adquisición de datos y de comunicación. Por lo que se llegó a la conclusión de nuevo, de que esta placa no podía ser usada para el proyecto que se quería llevar a cabo.

### ESP32

Continuando con la labor de investigación, se observó que en la línea de las placas de *Arduino*, la empresa *Espressif* había creado una placa de tamaño, peso y precio reducido para proyectos de dispositivos de recogida y gestión de datos, *ESP32* (Figura 4.3). Además de que en el ámbito de investigación estaba siendo usada en diferentes proyectos también [25], [26], pero en este caso, no en el campo de la recogida de señales fisiológicas.



Figura 4.3.- *ESP32*

**Fuente:** https://www.espressif.com/en/products/socs/esp32

Como se puede apreciar en la Tabla 4.1, el dispositivo es capaz de comunicarse con otros dispositivos vía *WiFi* y *Bluetooth*, lo que como se ha comentado anteriormente permite la comunicación segura que se quería crear en el dispositivo final. Además, observando las características del procesador, que fueron las responsables de descartes de placas anteriores, en este caso, se aprecia que este procesador está compuesto por dos núcleos (*DualCore*) independientemente programables. Con lo que se podría ejecutar las tareas de comunicación y adquisición de datos en núcleos diferentes para lograr que el dispositivo fuese garantista de plazos. Por todo esto, esta placa, fue una de las elegidas para la elaboración del dispositivo final.

### Raspberry Pi

Finalmente se observó que existían ciertas investigaciones dónde la labor de adquisición de datos con un periodo alto se hacía con los famosos ordenadores en miniatura del fabricante *Raspberry Pi*. En este caso, no se trata de una placa, que su único objetivo es recoger y comunicar los datos, si no que estos, al ser ordenadores completos, si se lograba que el sistema fuese garantista de plazo, se podían implementar otros elementos, como pantallas, altavoces …

El ordenador de este fabricante que más encajaba en este proyecto era la *Raspberry Pi Zero 2W* (Figura 4.4) atendiendo a las características mostradas en la Tabla 4.1. Dónde destacaba no solo el tamaño, peso y precio, para las opciones que ofrecía. Además de que cumplía, las restricciones tanto de vías de comunicación (*WiFi* y *Bluetooth*), como de número de núcleos en el procesador. La gran duda que quedaba por resolver era sí era posible que un micro-ordenador fuera garantista de plazos en la recogida de datos. Por lo que este dispositivo fue también seleccionado para resolver esta cuestión, y ver si se podía desarrollar el proyecto con este ordenador.

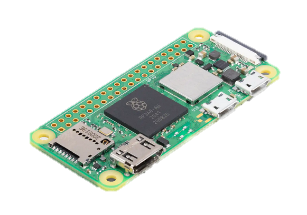


Figura 4.4.- Raspberry Pi Zero 2W

Pero, debido al estado actual del mercado de componentes electrónicos lograr un dispositivo de este modelo era completamente imposible (debido al alza de los precios y los grandes tiempos de envío), se decidió aprovechar material del que ya se disponía, un ordenador en miniatura de este mismo fabricante *Raspberry Pi Model 4B*. Este modelo de ordenador tenía como gran diferencia respecto al seleccionado, el tamaño, peso y precio, que eran superiores. Pero en cuanto a especificaciones del procesador y vías de comunicaciones eran muy similares.

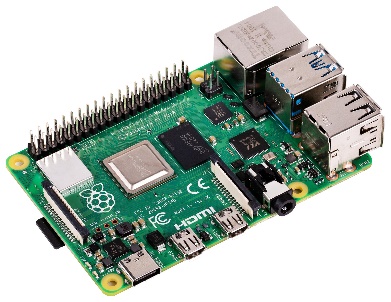
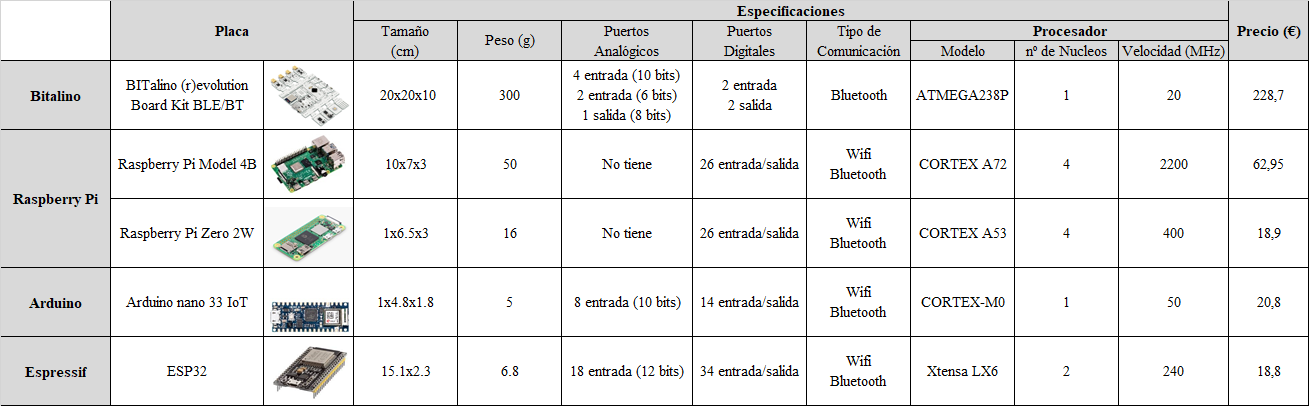


Figura 4.5.- Raspberry Pi Model 4B

Por lo que se decidió trabajar en este ordenador y una vez se tuviera una respuesta a la incógnita de si este dispositivo era capaz de garantizar los plazos en la adquisición de datos, migrar todos los programas y configuraciones a la placa originalmente seleccionada (*Raspberry Pi Zero 2W*).

Tabla 4.1.- Especificaciones generales de placas buscadas



## Tecnologías

En este segundo apartado, se resumirán los sensores y tecnologías que son comúnmente usados para la adquisición de las señales fisiológicas de *Pulso/SPO2*, *EDA* o *GSR* y por último el *ECG*.

### Pulso y SPO2

La tecnología usada en los dispositivos portables para la detección del pulso y del nivel de oxigenación en sangre, es mediante la fotopletismografía. Esta tecnología también está siendo usada para detectar la concentración de hemoglobina [27], así como para el seguimiento de personas con asma [28].

El funcionamiento de esta tecnología es bastante sencillo. Se hace que dos leds, uno rojo y otro infrarrojo iluminen generalmente la tercera falange del dedo de una mano. Dependiendo de la intensidad con la que estas luces se reflejen en el dedo se podrá detectar el valor de pulso y de nivel de oxigenación en sangre.

La situación de los leds es fundamental, ya que en esta última falange del dedo la cantidad de capilares es muy alta, por lo que existe una gran circulación de sangre por ella. La sangre que circula por el cuerpo humano, está compuesta entre otras sustancias, de hemoglobina. Que dependiendo de si el corazón está en *Diástole* o en *Sístole*, la cantidad de hemoglobina (*Hb*) y hemoglobina saturada de oxigeno (*HbO2*) es diferente como se puede observar en la Figura 4.6. Cada una de estas sustancias tiene diferentes índices de refracción frente a las longitudes de onda del color rojo e infrarrojo, por lo que matizando lo escrito anteriormente, la luz reflejada no por el propio dedo, si no, por la hemoglobina que circula por él se detecta tanto el pulso como el nivel de oxigenación en sangre.

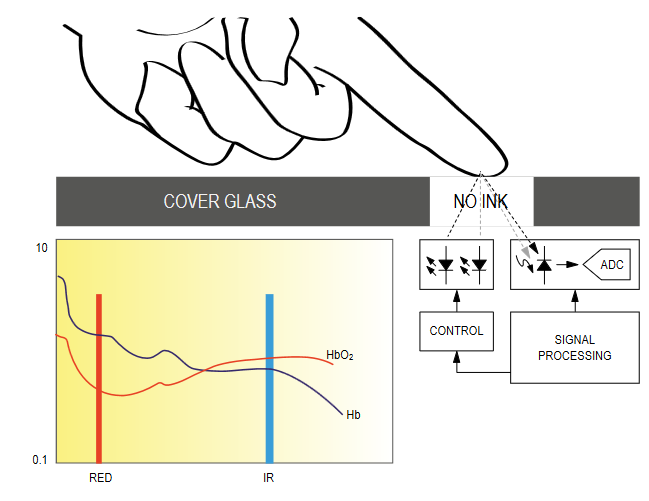


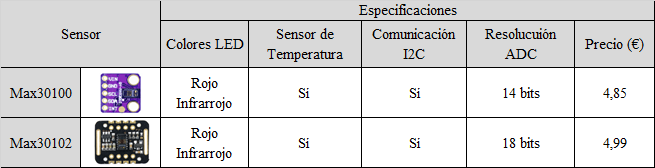
Figura 4.6.- Observación de la refracción de la luz en la *Hb* y la *HbO2*

**Fuente:** https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX30100.pdf

En ambos trabajos comentados anteriormente [27], [28], el sensor usado para la detección de estas dos señales es el *Max30100*. Este sensor incorpora la tecnología de encendido de los LED, recogida de la intensidad de luz que se refleja, así como el paso de esta unidad analógica a una digital (por medio de una *ADC* – *Conversor analógico digital*). La comunicación con la placa del microcontrolador es por medio de la tecnología *I2C*.

Tras indagar en las posibilidades de compra de este componente para que fuese usado en el proyecto, se descubrió la existencia de una versión superior del sensor, el *Max30102*. Este, tenía las mismas especificaciones que su versión anterior, pero el conversor analógico digital tenía una mayor resolución, lo que aportaba al dispositivo final una mayor fiabilidad en la recogida de las señales fisiológicas.

Tabla 4.2.- Comparativa entre Max30100 y Max30102



Atendiendo al estudio comparativo de la Tabla 4.2, se decidió que el sensor que iba a ser usado para el desarrollo del proyecto fuese la versión *Max30102*, ya que ese incremento en la resolución repercutía notablemente en la calidad de la señal recogida. Y el precio de este no incrementaba en exceso.

### EDA/GSR

La segunda señal fisiológica que se quiere recoger es la Actividad Electrodérmica (EDA) o también llamada, Respuesta Galvánica de la Piel (GSR). Esta señal, mide la conductividad de la piel del ser humano. Esta conductividad varía constantemente debido a los cambios constantes en el estado de ánimo provocados por situaciones cortas o largas.

Dependiendo de la situación a la que se someta al sujeto, su sistema nervioso provocará una variación en la sudoración de la piel. Este sudor afectará a la conductividad de la piel en consecuencia. Por lo que gracias a esta señal se podrá detectar el cambio en el estado de ánimo observando solo las variaciones en la señal *EDA*.

En la investigación se observó que la recogida de la señale *EDA*, no usaba circuitos integrados de fabricantes en concreto [29], si no que al tratarse de una conductancia la medición de esta es muy sencilla. Solo sería necesario aplicar una tensión en un dedo, y medir la tensión en otro dedo. Para aplicar y medir esas tensiones, se usan los electrodos.

Existen dos tipos genéricos de electrodos, los de contacto húmedo, y los de contacto seco (Figura 4.7). Las diferencias entre estos dos tipos, es que uno hace uso de gel que favorece la conducción entre la parte metálica del electrodo y la piel, y el otro no.

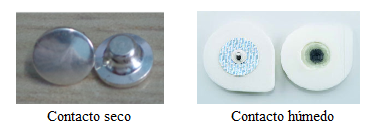


Figura 4.7.- Tipos de electrodos según su contacto

Debido a que a lo largo de los trabajos hechos en la línea de investigación la recogida de señal EDA se hizo mediante electrodos de contacto seco [1], [4], se decidió que para este proyecto se iba a seguir con esta decisión.

### ECG

La tecnología usada para la detección de la señal electrocardiográfica como ya se ha comentado anteriormente, puede ser con tarjetas especificas que filtran y acondicionan la señal, dejando al usuario el mínimo margen para mejorar la señal recogida, o con circuitos propios diseñados específicamente para un proyecto en particular.

En la investigación llevada a cabo, se observó que la mayoría de trabajos en los que se recogía esta señal, se hacía por medio de circuitos prediseñados, como puede ser el *AD8232* [30] (Figura 4.8) o el propio módulo de adquisición presente en la placa *BITalino* [22]. Uno de los aspectos positivos de este circuito prefabricado (El AD8232) es que en su envoltorio de fábrica viene incluido los cables de conexión y electrodos necesarios para la correcta detección de la señal electrocardiográfica.

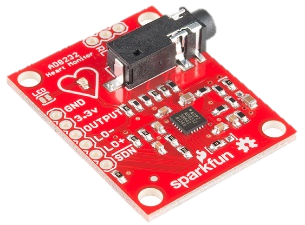


Figura 4.8.- Circuito AD8232

**Fuente:** <https://eu.robotshop.com/es/products/ad8232-heart-rate-monitor>

Pero, en el intento de seguir desarrollando nuevos caminos en la línea de investigación, se decidió alejarse de este producto prefabricado, e intentar diseñar e un circuito y una placa propia para así poder tener mayor margen de ajuste para la correcta obtención de la señal. Así mismo, aprovechando el material comprado por el grupo de investigación y con la intención de aprovechar al máximo los recursos del grupo, también se decidió que los electrodos que se usarían en el proyecto serían los de contacto húmedo.

*CAPITULO 5*

**METODOLOGÍA**

# Metodología

En este quinto capítulo se expondrá y explicará el proceso seguido para llegar a la solución final. Este se dividirá en tres grandes sub-apartados. En primer lugar, el proceso seguido para la creación y configuración de una base de datos en una máquina virtual. El segundo y tercer sub-apartado se centrarán en el dispositivo de adquisición de datos y como este se comunica con la base de datos antes creada. Se trata de dos apartados diferentes, ya que como se ha comentado en el Capítulo 4.1, se decidió intentar desarrollar una solución en dos dispositivos diferentes, una *Raspberry Pi 4B* y una *ESP32*.

## Creación de una Base de Datos

En este trabajo se ha trabajado con una máquina virtual de Linux, pero el proceso se ha probado en dos versiones diferentes del sistema operativo *Ubuntu*, la versión *22.04* y la *18.04 minimal version.* En el caso de que futuros trabajos se desarrollen mediante máquinas virtuales conectadas mediante *ethernet* a la intranet de la universidad, es necesario hacer uso de un adaptador USB para otorgar a los dispositivos de la universidad de conexión wifi.

Para este proyector se ha hecho uso del dispositivo *TL-WN725N*. Par así poder estar conectado tanto a la intranet de la UPV/EHU, que al fin y al cabo es la que abastece al ordenador de internet, y a la wifi sin internet creada mediante el Router *TL-WR841ND*, a la cual se conectarán tanto la base de datos como el dispositivo de adquisición de datos diseñado en los siguientes apartados.

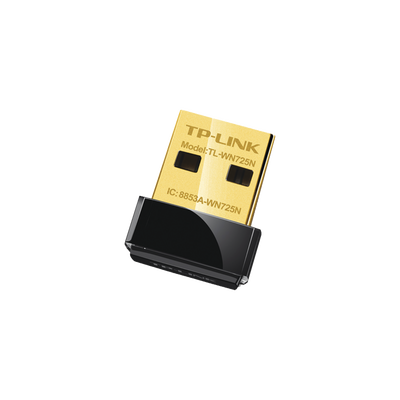


Figura 5.1.- Dispositivos TL-WN725N (USB) y TL-WR841ND (Router)

**Fuente:** https://www.tp-link.com/es/home-networking/adapter/tl-wn725n/  
https://www.tp-link.com/es/home-networking/wifi-router/tl-wr842nd/

### Configuración del adaptador USB

Para la configuración del *TL-WN725N*, solo sería necesario hacer uso del CD incorporado en el envase dónde viene el dispositivo, en él se encuentra un ejecutable llamado *autorun.com* (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) que instalará los drivers necesarios para abastecer al ordenador de la comunicación wifi. Además, dentro del empaque también se encuentra una guía rápida de instalación, en la cual se dan todas las instrucciones para llevar a cabo la instalación.

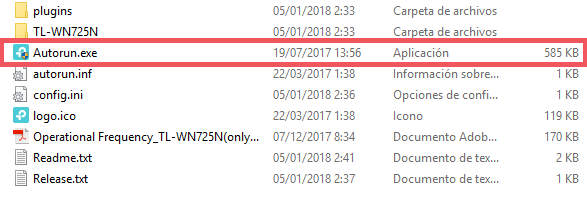


Figura 5.2.- Instalador de drivers del TL-WN725N

A partir de este momento, el ordenador ya dispondrá de comunicación wifi, y la conexión a redes será de la forma habitual de Windows.

### Configuración del Router

El primero de los pasos para configurar una red privada, en un instante inicial, sin internet, es conectar el dispositivo *TL-WR841ND* a la red eléctrica. Una vez se hayan encendido los dos primeros leds (Figura 5.3), el primero de ellos permanentemente y el segundo de forma parpadeante, se podrá acceder al panel de configuración del fabricante.



Figura 5.3.- Leds encendidos para la configuración del TL-WR841ND

Pero antes de entrar en la configuración, será necesario hacer una conexión entre alguno de los cuatro puertos LAN (amarillos) (Figura 5.4) y un ordenador con al menos un explorador web.



Figura 5.4.- Puertos LAN

Mediante este explorador web se accede a la siguiente dirección *192.168.0.1*, se trata de la dirección IP que el fabricante ha dispuesto para la configuración del dispositivo. Eso sí, antes de entrar en el panel de configuración, se solicita una autenticación (Figura 5.5) que como no se ha hecho ningún cambio de credenciales, son el usuario y la contraseña por defecto (*admin/admin*).

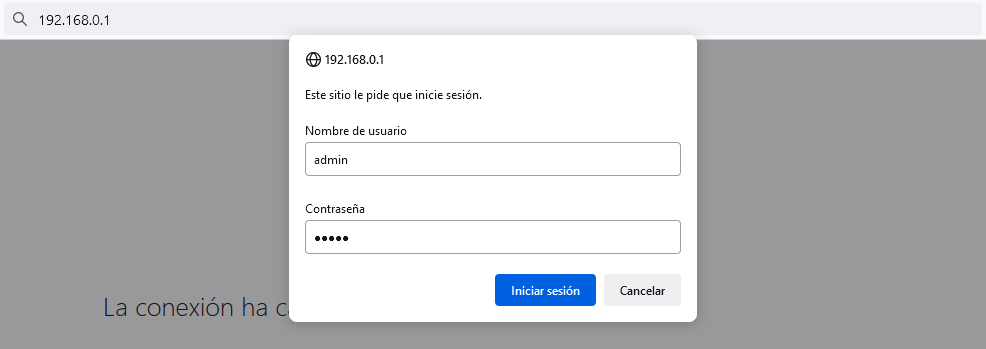


Figura 5.5.- Solicitud de usuario y contraseña configuración TL-WN725N

Dentro de todas las opciones que existen para la configuración, la que se va a utilizar para la creación de una red wifi privada, es la llamada *Wireless*, y dentro de ella, se configurarán tanto *Wireless Settings* como *Wireless Security*. Como se puede apreciar en la Figura 5.6, el campo que se va a modificar es tan solo el nombre de la red (*GICI*).

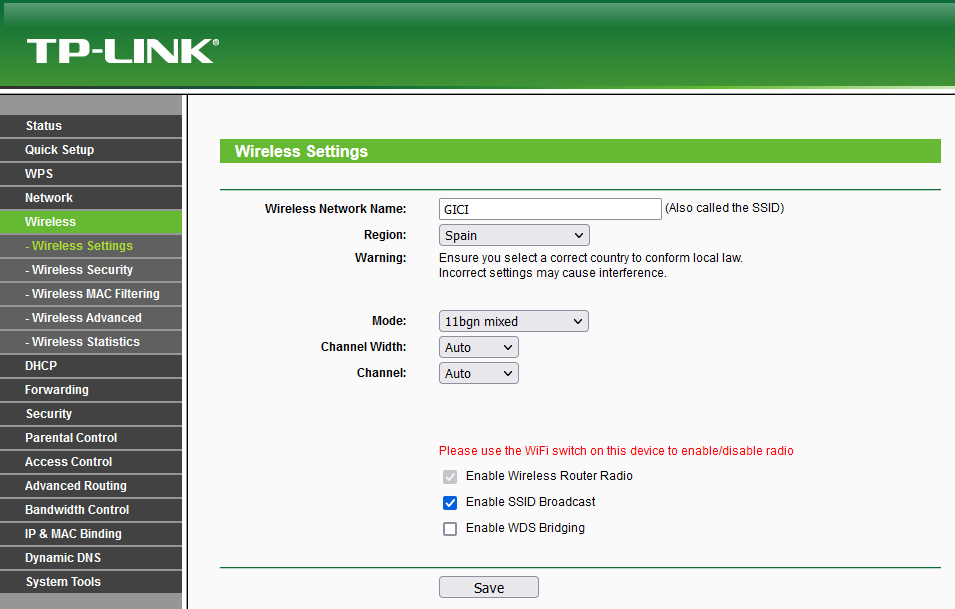


Figura 5.6.- Configuración de Wireless Settings

En cambio, en la pestaña de *Wireless Security*, se configurará como su propio nombre indica la seguridad que se le va a otorgar a la red. Para esta aplicación se ha seleccionada la recomendada por el propio fabricante *WPA2-PSK*, en la que tan solo se va a cambiar la contraseña (*delfingiciehu*). En la Figura 5.7 se muestra la totalidad de los campos para no dejar espacio a las dudas.

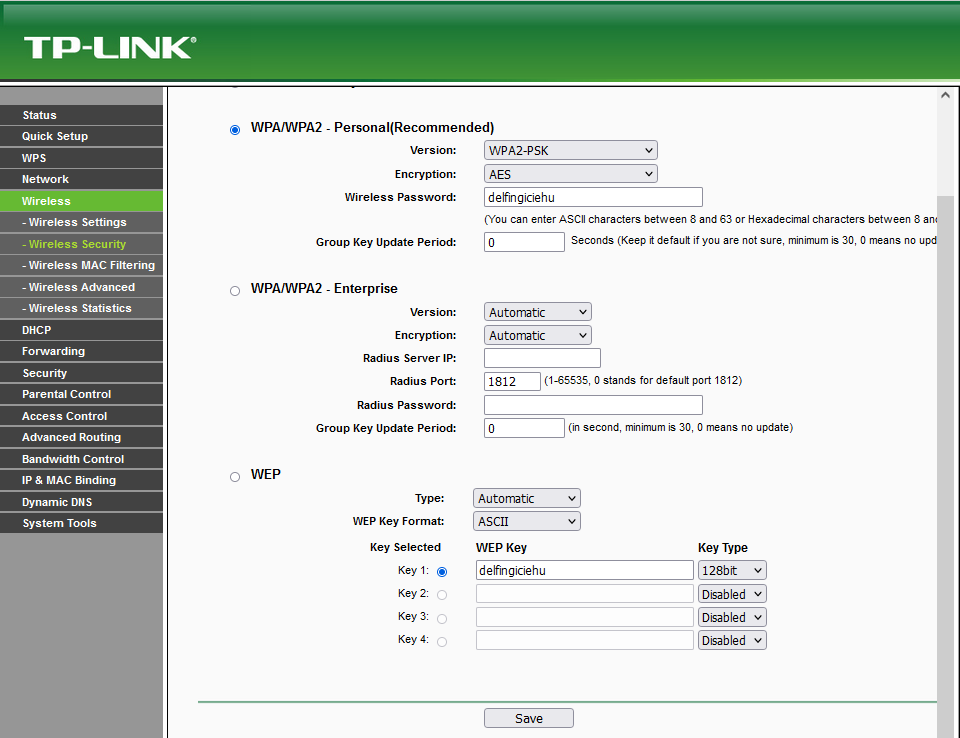


Figura 5.7.- Configuración de Wireless Security

### Configuración de la Máquina Virtual

La aplicación usada para la utilización de la máquina virtual es *VMWare Worksation 16* (Descargable en https://www.vmware.com/es/products/workstation-player.html) y como se ha comentado anteriormente, para este desarrollo se ha utilizado la versión *Ubuntu 22.04*, que es la última versión estable lanzada públicamente por la propia organización.

El gran problema encontrado para el correcto funcionamiento de la máquina virtual, ha sido que esta, debería de tener una dirección IP propia y accesible para todos los dispositivos conectados a la red wifi antes creada. Por lo que una vez se haya inicializado la máquina virtual, y se haya actualizado todo el sistema, se va a configurar correctamente la máquina virtual para que esta tenga una dirección *IP* diferente a la del ordenador dónde se encuentra.

Dentro de los ajustes de la máquina virtual en cuestión, en este caso la denominada *Ubuntu22.04,* los cambios que se van a hacer son los concernientes a las conexiones de red, que como se puede observar en la Figura 5.8, la pestaña en cuestión, es *Network Adapter*.

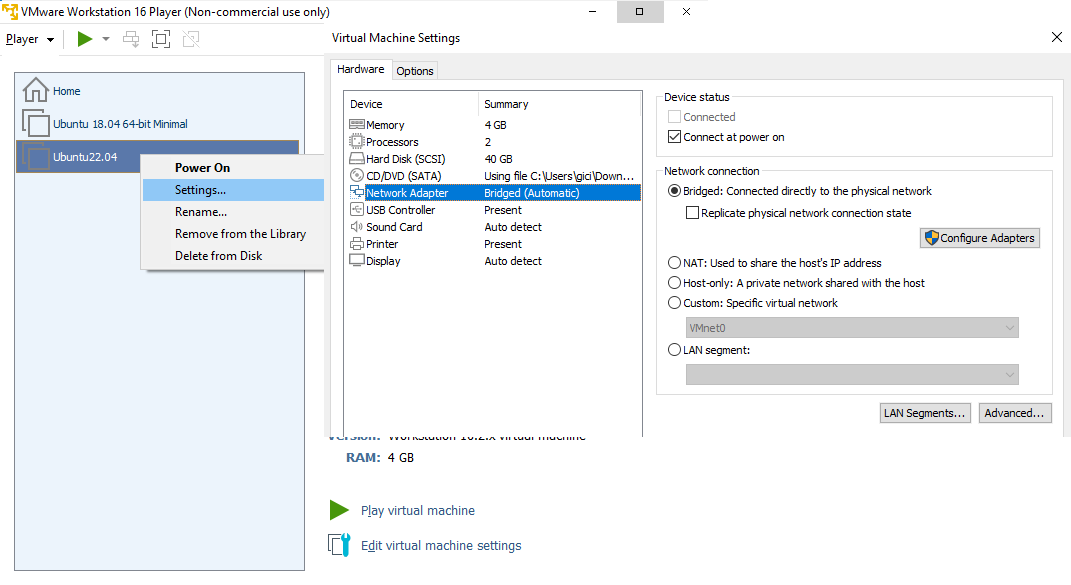


Figura 5.8.- Configuración de Network adapter (VMware)

Dentro de esta pestaña se encuentran varias opciones, la seleccionada por defecto, es la llamada *NAT*, en la que la máquina virtual tiene las mismas direcciones IP que el ordenador físico. El gran problema de esta configuración es, que a la hora de direccionar al dispositivo de acquisición de datos a la IP de la máquina virtual se estaría conectando realmente al ordenador que contiene la máquina virtual.

Por ello, se va a seleccionar la opción *Bridged*, la cual hace que la máquina se conecte directamente a la red física. Además, se deseleccionará la casilla de *replicate physical network connection state*. Pero queda configurar esta opción así que se hará clic en el botón de *Configure Adapters*. Al hacerlo, y conceder los permisos que pide, se abrirá la ventana mostrada en la Figura 5.9, y se elegirá solamente la casilla correspondiente a *TP-Link Wireless USB Adpater*.

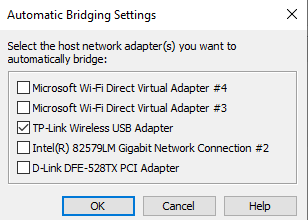


Figura 5.9.- Configure Adapters (VMWare)

Es importante comentar que el cambio entre la configuración *NAT* y *Bridges*, va a ser prácticamente constante, ya que la primera de ellas es necesaria para poder obtener una conexión a internet, y así poder descargar paquetes en Linux. Y *Bridges*, en cambio*,* será la configuración usada para el levantamiento y gestión de la base de datos.

### Instalación y configuración de PostgreSQL

Una vez se tiene configurada la red y la máquina virtual con la que se va a trabajar, solo queda instalar la aplicación va a ser usada para la creación de la base de datos dentro de ella. En este caso, se usará *PostgreSQL*, que se trata de un sistema de código abierto y gratuito para la administración de bases de datos, cuyo desarrollo se lleva adelante por una gran comunidad de colaboradores.

Antes de instalar *PostgreSQL*, es necesario actualizar el repositorio de apt, mediante la ejecución de la siguiente instrucción en la línea de comando (en Ubuntu se puede abrir mediante Ctrl + Alt + T):

|  |
| --- |
| sudo apt update |

A continuación, se puede llevar a cabo la instalación de *PostgreSQL*:

|  |
| --- |
| sudo apt install -y postgresql |

Si ya existe una versión instalada se procede a la eliminación y desinstalación:

|  |
| --- |
| sudo apt remove --purge postgresql-\* |

Una vez se tiene instalada la última versión disponible para el dispositivo en cuestión de *PostgreSQL* se puede comenzar a configurar esta aplicación para que solo acepte conexiones con encriptación *SSL*. Este tipo de encriptación proporciona una conexión segura entre el cliente y el servidor. Además, se trata de un protocolo de internet que encripta los datos que viajan por la conexión, y así se hacen imposibles de leer para un dispositivo externo.

Para la configuración de la comunicación por medio del protocolo *SSL*, es necesario seguir los pasos establecidos por *Oinatz Aspiazu* en su trabajo fin de máster [31]. El primero de los pasos es, cambiar de usuario y establecerse como usuario *ROOT*, un usuario que tiene acceso a todas las carpetas y documentos que existen en el sistema. En segundo lugar, se sitúa en un directorio concreto para así poder crear en tercer lugar una carpeta y situarse de nuevo en ella.

|  |
| --- |
| sudo su  cd /var/lib/postgresql/  mkdir data  cd data |

Una vez se tiene creada la carpeta, se ejecuta las instrucciones encargadas de la creación de los certificados y claves necesarias para la encriptación *SSL*.

|  |
| --- |
| openssl genrsa -des3 -out server.key 2048  # se solicita una contraseña  chmod 400 server.key  openssl req -new -key server.key -days 36500 -out server.crt -x509 –subj '/C=SP/ST=Bizkaia/L=Bilbao/O=UPV\_EHU/CN=rpsensors.com/emailAddress=name@mail.com’  # subj se rellena con datos personales |
| openssl rsa -in server.key -out server.key  # se elimina la contraseña introducida para proteger el archivo server.key (la pide por última # vez)  chmod 600 server.key server.crt  # se establece los permisos necesarios de lectura/modificación/escritura a los certificados |

Como se han creado tanto la carpeta *data* como los archivos *server.key* y *server.crt* bajo el usuario *root* es necesario cambiar el *Owner* y el *Group* de todos ellos, para que estos puedan ser leídos y utilizados por *PostgreSQL*, que tiene su propio usuario (*postgres*).

Para visualizar los datos de autoridad de archivos y carpetas, se usa la función (*ls -l*). En la Figura 5.10 se puede observar como la carpeta y los archivos recién creados pertenecen al usuario *root*.

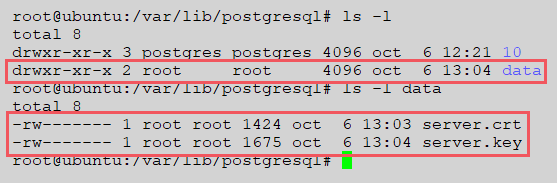


Figura 5.10.- Autoridad y permisos de Data, server.key y server.crt (root)

El comando usado para la modificación tanto de propietario como de grupo es la llamada *chown*:

|  |
| --- |
| cd /var/lib/postgresql  # se coloca en este directorio para cambiar las propiedades de data  chown postgres:postgres data  # el primero de los términos hace referencia al usuario y el segundo al grupo  cd data  chown postgres:postgres server.key server.crt |

En la Figura 5.11 se puede observar el resultado de volver a ejecutar el comando (*ls -l*) para comprobar que se ha hecho el cambio de propietario y grupo.

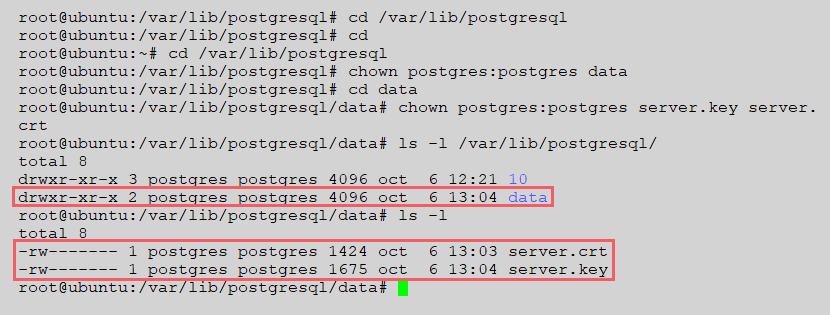


Figura 5.11.- Autoridad y permisos de Data, server.key y server.crt (postgres)

En este punto, se puede continuar con la configuración de *PostgreSQL*, en primer lugar, se modificará el archivo *postgresql.conf* (para habilitar la comunicación con cifrado SSL) y el archivo *pg\_hba.conf* (para determinar las direcciones IP que podrán conectarse a la base de datos), ambos archivos están alojados en el directorio siguiente:

*/etc/postgresql/14(version\_de\_postgresql)/main*

Y para ejecutar las modificaciones se hará uso del comando *nano*, la cual ejecuta un editor de texto llamado *nano* en el archivo que le sea indicado.

|  |
| --- |
| nano /etc/postgresql/14/main/postgresql.conf # para el caso del primer archivo  nano /etc/postgresql/14/main/pg\_hba.conf # para el caso del segundo archivo |

Las modificaciones en el archivo *postgresql.conf*, son las siguientes (Figura 5.12 y Figura 5.13):

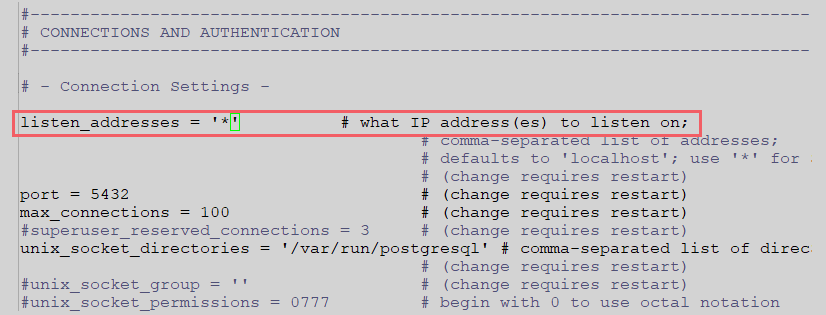


Figura 5.12.- Cambio escucha todas las IP (postgresql.conf)

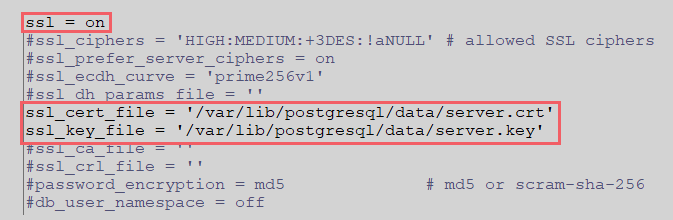


Figura 5.13.- Activación y actualización de localización certificados (postgresql.conf)

En este punto, la base de datos podría comunicarse con cualquier dispositivo que esté conectado a la misma señal wifi que ella por medio de cifrado SSL. Debido a que el objetivo es lograr que solo los dispositivos que el diseñador quiera puedan conectarse con la base de datos, es necesario introducir las direcciones IP de estos, en una *whitelist*, una lista de direcciones IP con las que se puede conectar.

Esta *whitelist*, se introduce en el otro archivo antes mencionado, *pg\_hba.conf*, y los cambios a hacer son los mostrados en la Figura 5.14:

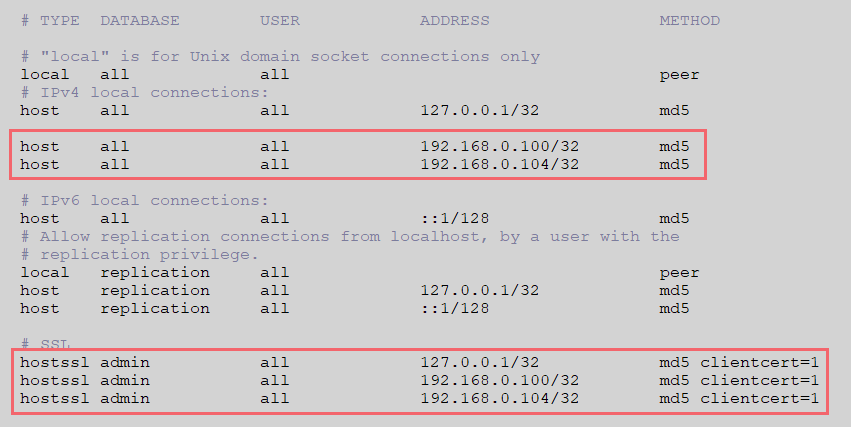


Figura 5.14.- Whitelist de direcciones IP (pg\_hba.conf)

Dónde, la dirección IP referente a la base de datos es, *192.168.0.100*, y la referente al dispositivo al que se le quiere permitir la conexión es, *192.168.0.104*. además, se ha introducido en una de las columnas la palabra *admin*, que se trata de un usuario creado específicamente para conectarse con la base de datos en *postgreSQL* (La creación de este usuario se mostrará a continuación).

### Creación de la base de datos

Una vez ya está configurado todo lo concerniente a la seguridad y conexión con el dispositivo dónde se encontrará la base de datos, es el momento de crearla. Para ello tendremos que hacer primeramente los siguientes comandos:

|  |
| --- |
| sudo su postgres # solicitará contraseña, es la que se usa para iniciar sesión en  psql |

De aquí en adelante, todas las instrucciones que se escriban serán en lenguaje *SQL*, que se trata de un lenguaje específico de computación para el manejo de grandes conjuntos de datos y las relaciones que existen entre ellos (todas las instrucciones deberán finalizar con “;”).

Lo primero que se va a crear siguiendo las siguientes líneas de comando, es el usuario antes mencionado, *admin*:

|  |
| --- |
| CREATE USER admin;  ALTER ROLE admin WITH PASSWORD '\*1kRzhuYj!$'; # se introduce una contraseña  ALTER ROLE admin WITH SUPERUSER;  \du # (SIN “;”) visualización de los usuarios existentes |

La contraseña elegida para el usuario es muy importante, ya que esta, será necesaria para que la conexión entre el dispositivo de adquisición de datos y la base de datos sea correcta. Además, en la última de las instrucciones, se pide al *postgreSQL* que liste todos los usuarios que existen. En este caso, la respuesta del sistema es la siguiente (Figura 5.15):

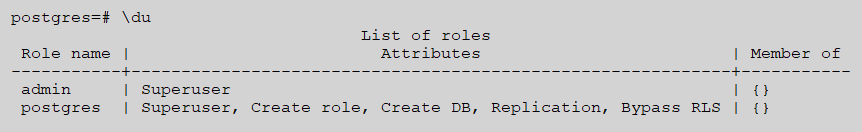


Figura 5.15.- Listado de usuarios

El segundo paso es crear una base de datos, ya que en un mismo dispositivo se pueden crear múltiples bases de datos para diferentes quehaceres. Para este proyecto solo se usará una base de datos, y dentro de ella, se itnroducirán diferentes tablas, una por cada sensor implementado en el dispositivo adquisidor de datos. Las instrucciones a seguir son las siguientes:

|  |
| --- |
| CREATE DATABASE databio;  \c databio # a partir de esta instrucción se trabaja dentro de la BBDD “databio”  CREATE TABLE pox (acq\_time timestamp, red\_val int, ir\_val int); |

Dónde *pox*, se trata del nombre de la tabla, y dentro del paréntesis se introduce el nombre y el tipo de valor a introducir en cada una de las columnas. Para poder observar, si se ha creado correctamente se sugieren dos instrucciones diferentes, la primera de ellas, “*\dt”*, que listará las tablas dentro de la base de datos y la segunda *“SELECT\*FROM* pox*”,* que mostrará el contenido de esta tabla.

Las respuestas del sistema a estas dos instrucciones serían las mostradas en la Figura 5.16:

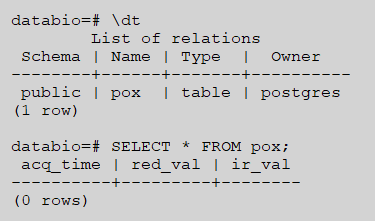


Figura 5.16.- Listado y visualización de tabla

Finalmente se otorga todos los privilegios posibles (modificación, escritura, lectura…) para esta base de datos mediante la instrucción *GRANT ALL PRIVILLEGES*.

|  |
| --- |
| GRANT ALL PRIVILEGES ON DATABASE databio TO admin; |

## Raspberry Pi

Como se ha comentado al inicio de este capítulo, en este segundo sub-apartado referente a la metodología se va a centrar en comentar y explicar el proceso seguido para lograr una primera aproximación al dispositivo objetivo. En el capítulo 4.1.4 se comentó que el mini ordenador a usar para implementar una solución era la *Raspberry Pi 4B*. Para que después la solución sea migrada a una placa de menor tamaño y similar potencia (*Raspberry Pi Zero 2W*).

### Instalación de un OS

El primero de los pasos a dar en cualquier tipo de dispositivo similar a un ordenador es instalar un sistema operativo (*OS*) para que el mini-ordenador pueda funcionar. Sería como instalar *Windows 11* o *Mac OS*. En este caso, para los dispositivos del fabricante *Raspberry* el sistema operativo mayormente usado es *Raspbian*.

Para la instalación se recomienda el uso de la herramienta [*Raspberry PI Imager*](https://www.raspberrypi.com/software/). En ella seleccionar el sistema operativo recomendado, ya que para este proyecto está siendo usado un ordenador con potencia suficiente para ejecutar la última de las versiones de *Raspbian OS*.

A la hora de instalar el OS, en la herramienta antes comentada, también se hizo una configuración avanzada de la instalación como se muestra en la Figura 5.17. En ella, se introdujo un nombre personal para este dispositivo, se habilitó la comunicación vía *SSH*, así como la conexión *WIFI*.

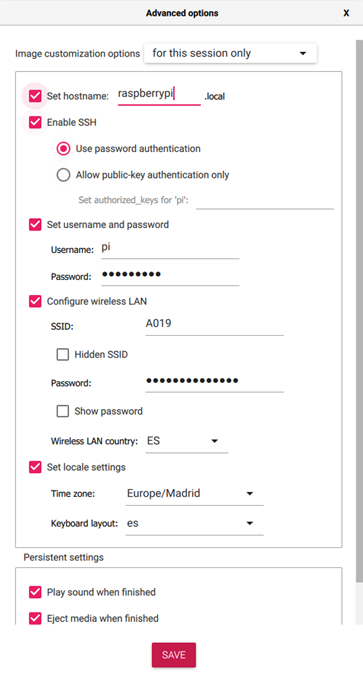


Figura 5.17.- Ventana Advanced Options

### Configuración Raspberry

Una vez se tiene instalado un *OS*, solo queda configurar correctamente la *Raspberry*, para que esta pueda funcionar correctamente como un dispositivo de recogida de datos. La configuración para ello será necesario habilitar dos *interfaces*, que este sistema operativo inhabilita por defecto, *I2C* y *VNC*.

* **I2C**

Este tipo de comunicación se trata de un *BUS* de 4 cables (*Vcc, Sda, Scl, Gnd*), que conecta un *Maestro* y un *Esclavo* (Figura 5.18). La comunicación solo podrá ser iniciado por el *Maestro*, por lo que el *Esclavo* solo podrá reaccionar a estas llamadas.

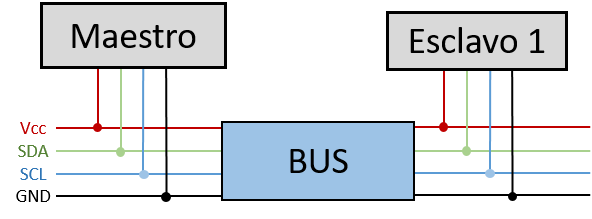


Figura 5.18.- Esquema de I2C

El I2C será usado para comunicar el dispositivo de adquisición de datos con el sensor pulsioxímetro seleccionado en el Capítulo 4.2.1, el *MAX30102*.

* **VNC**

Esta comunicación puede ser usada para conectarse al dispositivo remotamente, pero con la *interface* completa, es decir, observando una pantalla y usando un ratón y un teclado. Esta tecnología ha sido usada para los momentos en los que no se disponía de cables HDMI, para usar pantallas, y así poder seguir con el proyecto.

Para la correcta habilitación de estas dos *interfaces*, es necesario abrir la ventana de comandos de *Raspbian* (mediante el atajo *Ctrl + Alt + T*), y en ella escribir la instrucción *sudo raspi-config*. La ventana emergente que aparece es la mostrada en la Figura 5.19 (Se podrá navegar por las opciones con las *flechas* del teclado).

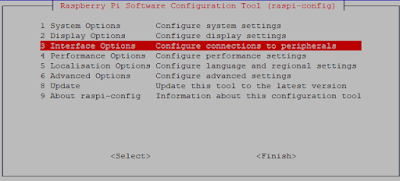


Figura 5.19.- Ventana inicial Raspi-config

Tras seleccionar la tercera de las opciones llamada *Interface Options*, se desplegará una nueva ventana (Figura 5.20), en la que se podrán habilitar las *Interface I2C* y *VNC*.

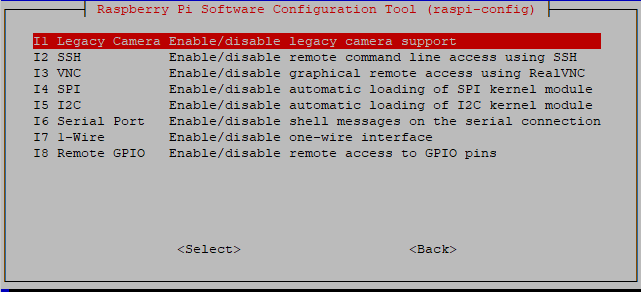


Figura 5.20.- Ventana habilitación *interfaces*

### Programación Python

En este punto, la *Raspberry Pi 4B* ya estaría lista para comenzar a programar el funcionamiento para la recogida y subida de datos. Debido a que la *Raspberry* que va a ser usada se trata de un mini-ordenador existen gran cantidad de lenguajes de programación con los que crear la función final del dispositivo.

El lenguaje de programación elegido para el desarrollo de este dispositivo es *Python* (descargable en la Figura 5.21). Este fue seleccionado debido a que se trata de un lenguaje de programación de propósito general, es decir, puede ser usado casi para cualquier cosa. También se trata de uno de los lenguajes más sencillos de programar y aprender, y existen una gran cantidad de bibliotecas y funciones generadas por otros usuarios que facilitan la implementación de sensores, y comunicaciones con otros dispositivos.



Figura 5.21.- Logo de Python

**Fuente:** https://www.python.org/downloads/

#### Soluciones a Tiempo Real en Python

El gran objetivo de este proyecto es que el sistema se comporte como un sistema de tiempo real. Esto implica, entre una gran variedad de restricciones que el sistema debe cumplir plazos. Esto significa que, si se impone una frecuencia de muestreo de diez muestras por segundo, en cualquier situación, cada segundo debe de enviar diez muestras sin perder ninguna. En todos los leguajes de programación dedicados a ejecución de código en tiempo se busca que el código ejecute diferentes tareas (funciones generalmente) al mismo tiempo.

El lenguaje Python aporta dos soluciones diferentes en forma de biblioteca para que los programas desarrollados en este lenguaje puedan ejecutar diferentes tareas al mismo tiempo, *Multithreading* y *Multiprocessing*.

* ***Multithreading:*** se refiere a la capacidad de que un sistema sea capaz de ejecutar diferentes hilos al mismo tiempo, pero ejecutando cada uno de ellos en diferentes núcleos del procesador. En la Figura 5.22 se puede observar un diagrama de cómo se comportaría un procesador de cuatro núcleos cómo el que va montado en la *Raspberry Pi 4B*.

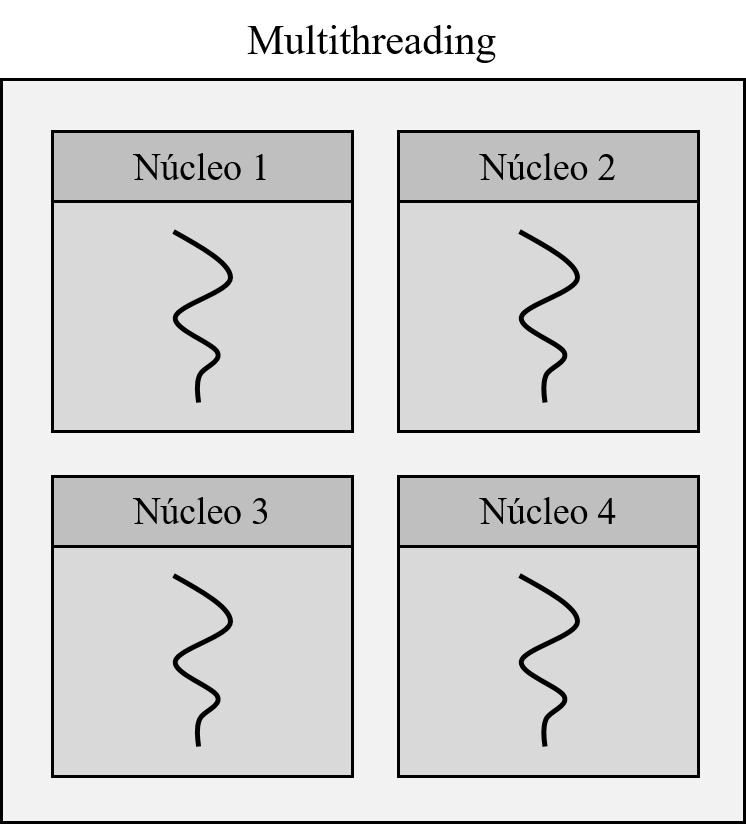


Figura 5.22.- Diagrama multithreading

* ***Multiprocessing:*** se refiere a la capacidad de que un sistema pueda ejecutar diferentes hilos al mismo tiempo, pero, a diferencia del *multithreading,* en el *Multiprocessing* los hilos se separan por todos los núcleos del procesador, lo que hace que se puedan gestionar mayor cantidad de hilos (siempre y cuando la capacidad del procesador pueda). En la Figura 5.23 se puede observar de nuevo, un diagrama de *Multiprocessing* en un procesador de cuatro núcleos como el que usa la *Raspberry Pi 4B*.

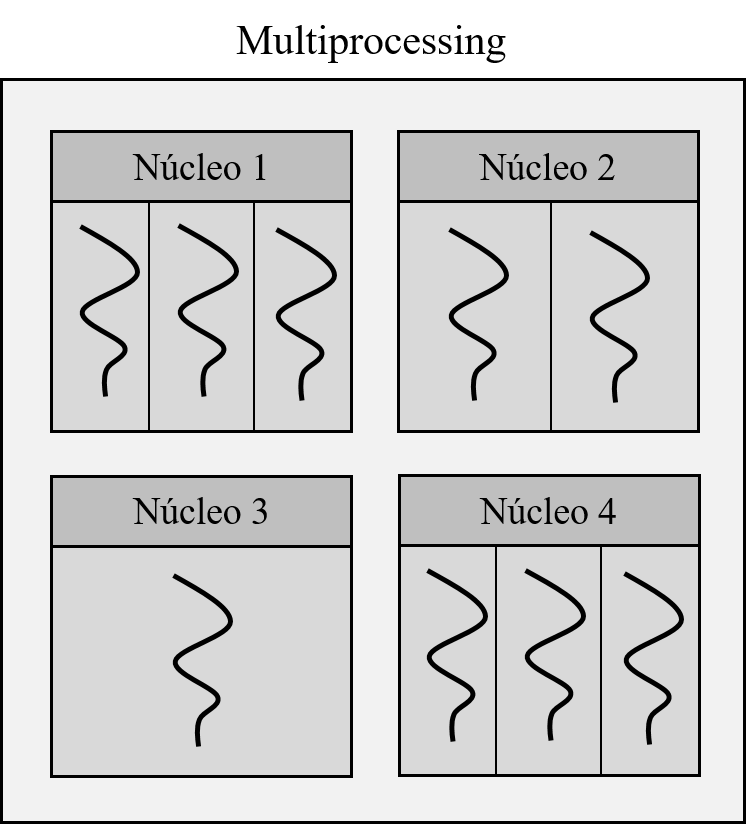


Figura 5.23.- Diagrama Multiprocessing

Observando las dos definiciones se decidió hacer uso de la biblioteca *Multiprocessing*, ya que, al tratarse de un mini-ordenador, la *Raspberry* tendrá diferentes procesos o hilos activos por el mero hecho de estar encendido, y de esta manera, se podría mandar los hilos o tareas generados en el programa a los núcleos que estén menos saturados en cada instante.

#### Componentes de un sistema en tiempo-real

Una vez conocida la biblioteca que iba a ser usada para la generación de un sistema multitarea, se puede comenzar a pensar la estructura que se va a seguir el programa a diseñar. El objetivo inicial fue que el programa recogiera dos señales diferentes, la señal del Pulsioxímetro y la señal del GSR. Se quiso crear un programa que no distara demasiado de los programas escritos en lenguajes centrados en el tiempo real.

Los tipos de elementos con los que se trabajó en este primer acercamiento a un programa funcional son, las *Tareas Periódicas*, *Registros Protegidos* y *Recursos Pasivos*. Pero es necesario saber cómo funcionan y que hacen cada uno de estos elementos.

* **¿Qué es una Tarea Periódica?**

Es decir, una sección de código que se repetiría cada cierto periodo de tiempo. Este tipo de tarea está definida por dos parámetros temporales, el *Periodo (P)* y el *Plazo (D)*. La tarea periódica se activará cada *P* tiempo, y su ejecución no podrá retrasarse más de *D* instantes. En el caso de que se supere el instante marcado por el plazo en cualquiera de las activaciones de esta tarea, la tarea no será garantista de plazos.

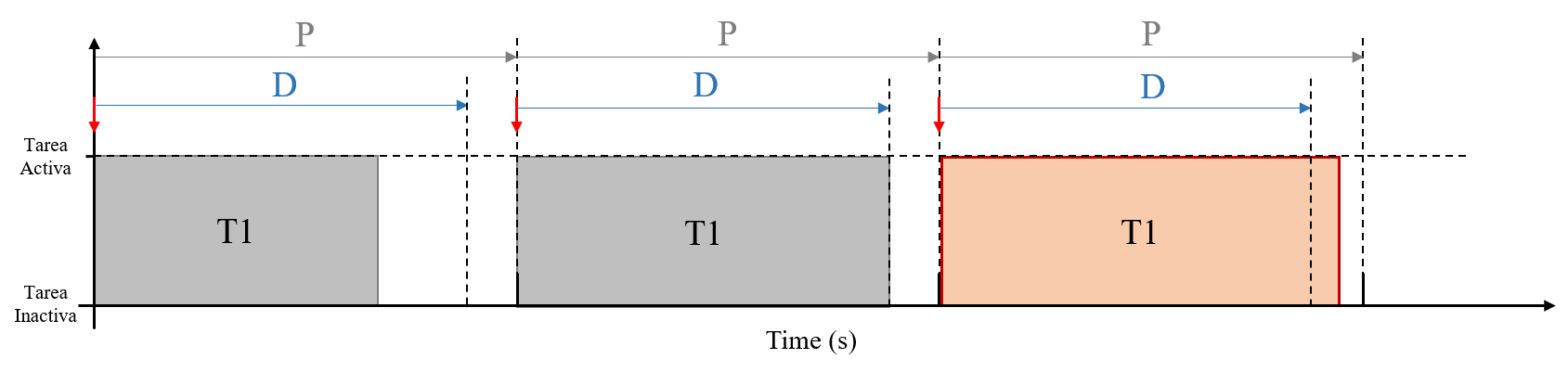


Figura 5.24.- Diagrama de activación de una Tarea Periódica

En la Figura 5.24 se puede observar como una tarea llamada *T1* se activa en tres instantes diferentes, todos ellos separados por el *Periodo*. En la primera y la segunda activación el tiempo de finalización de la tarea es menor o igual que el *Plazo*, por lo que la tarea funciona correctamente. En cambio, la tercera de las activaciones tiene un tiempo de finalización mayor que el *Plazo*, por lo que como se ha comentado anteriormente, la *T1* tendría un fallo de plazos.

* **¿Qué es un registro protegido?**

Los recursos protegidos, son aquellos que necesitan protección debido a que son usados o accedidos por dos o más tareas. La protección trata de que dos tareas no puedan acceder en el mismo instante al recurso, ya que esto podría suponer un mal funcionamiento del recurso o un fallo a la hora de recoger los datos que hay en él. En concreto, un registro protegido es un espacio de memoria dónde se guarda más de una variable, y que tiene la protección frente a lecturas simultaneas dando prioridad a la que antes acceda al registro (Figura 5.25).

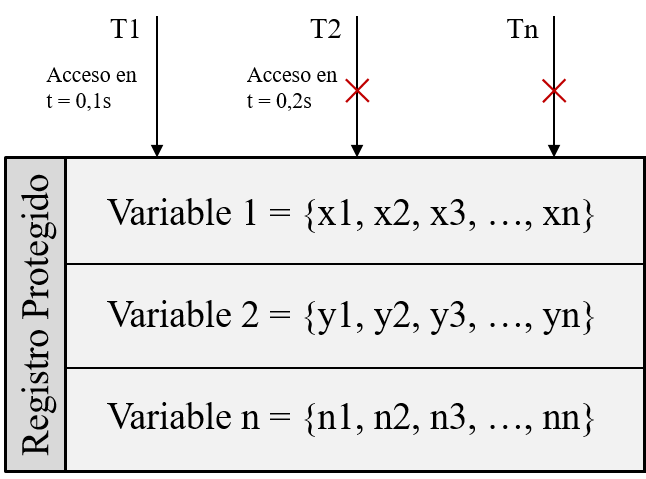


Figura 5.25.- Registro Protegido

* **¿Qué es un recurso pasivo?**

Estos recursos son aquellos que el usuario no puede programar en el programa principal. Existen gran variedad de recursos pasivos, como por ejemplo los sensores, de los cuales no se programa como recogen las señales, pero sí la recogida de estas. Al igual que ocurre con las bases de datos, de las cuales se programan como van a estar ordenadas, así como la seguridad con la que van a trabajar, pero no en el programa del dispositivo que se quiere llevar a cabo.

#### Biblioteca Tareas Periódicas

Tras conocer el funcionamiento y comportamiento de las *Tareas Periódicas*, *Registro Protegido* y *Recursos Pasivos* se decidió que el programa se dividiese en tres tareas periódicas diferentes, un registro protegido, dónde se guardarían los datos obtenidos de los sensores, y tres recursos pasivos. Dando como resultado la Figura 5.26 dónde se observa cómo se comunican cada uno de estos componentes entre sí, para lograr el objetivo de funcionamiento del dispositivo.

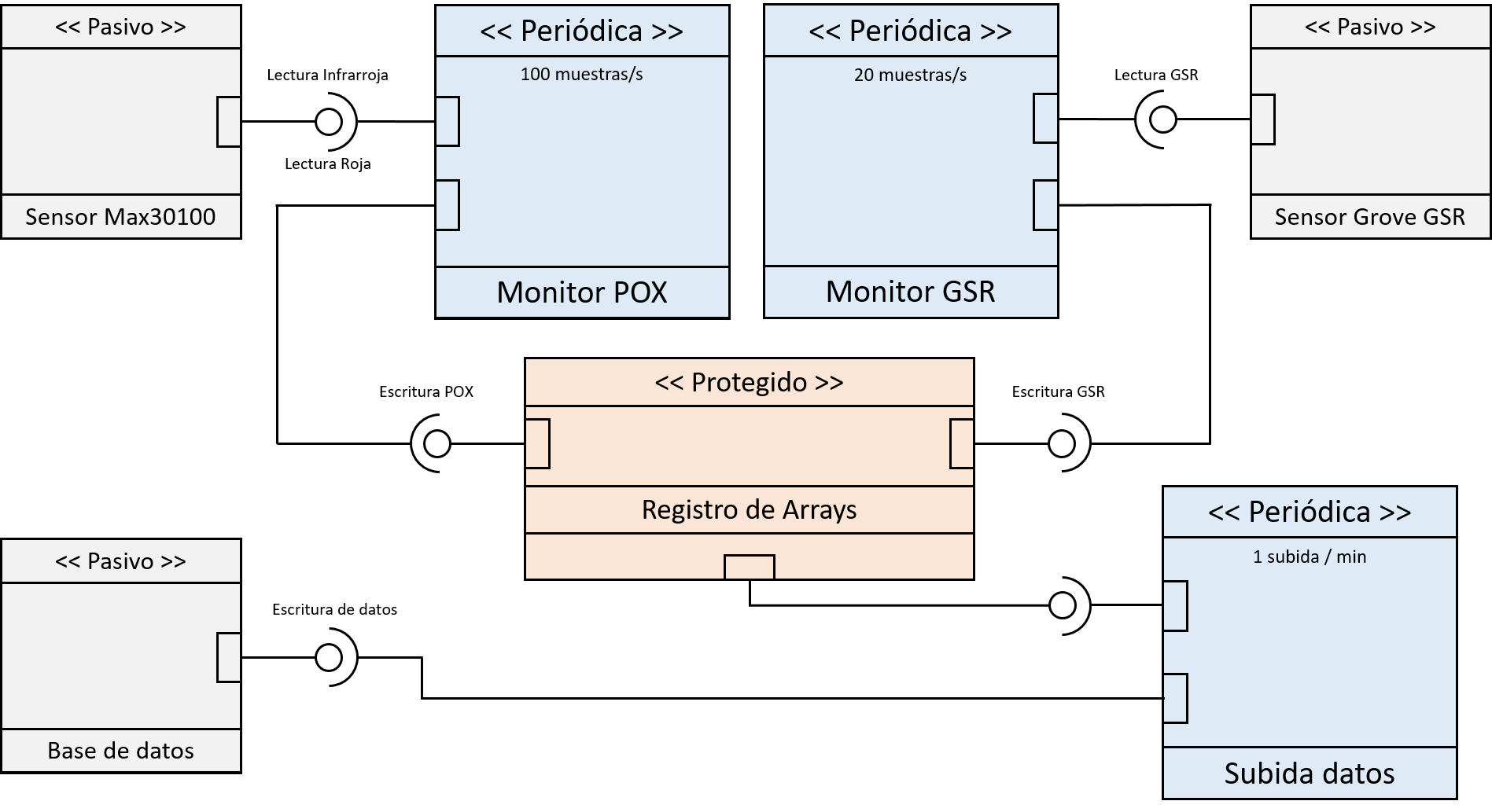


Figura 5.26.- Diagrama de comunicación – Primer programa

El primer impedimento que se encontró en el desarrollo del programa una vez se tenía clara la estructura que se quería seguir, fue que a pesar de tener una biblioteca que facilitaba que el dispositivo desarrollado fuera multi-tarea, las tareas periódicas no estaban definidas. Por lo que el paso inicial era crear una biblioteca que introdujera las tareas de tipo periódica.

* **Biblioteca Tareas periódicas V1:**

La biblioteca desarrollada para la introducción de las tareas periódicas de forma fácil se le puso el nombre de *BiblioTareasPeriodicas.py*. La creación de estas tareas se basó en las tareas por defecto que se tienen en lenguajes de programación dedicados al tiempo-real (*ADA*). En la Figura 5.27 se muestra el flujograma seguido para la creación de esta función.

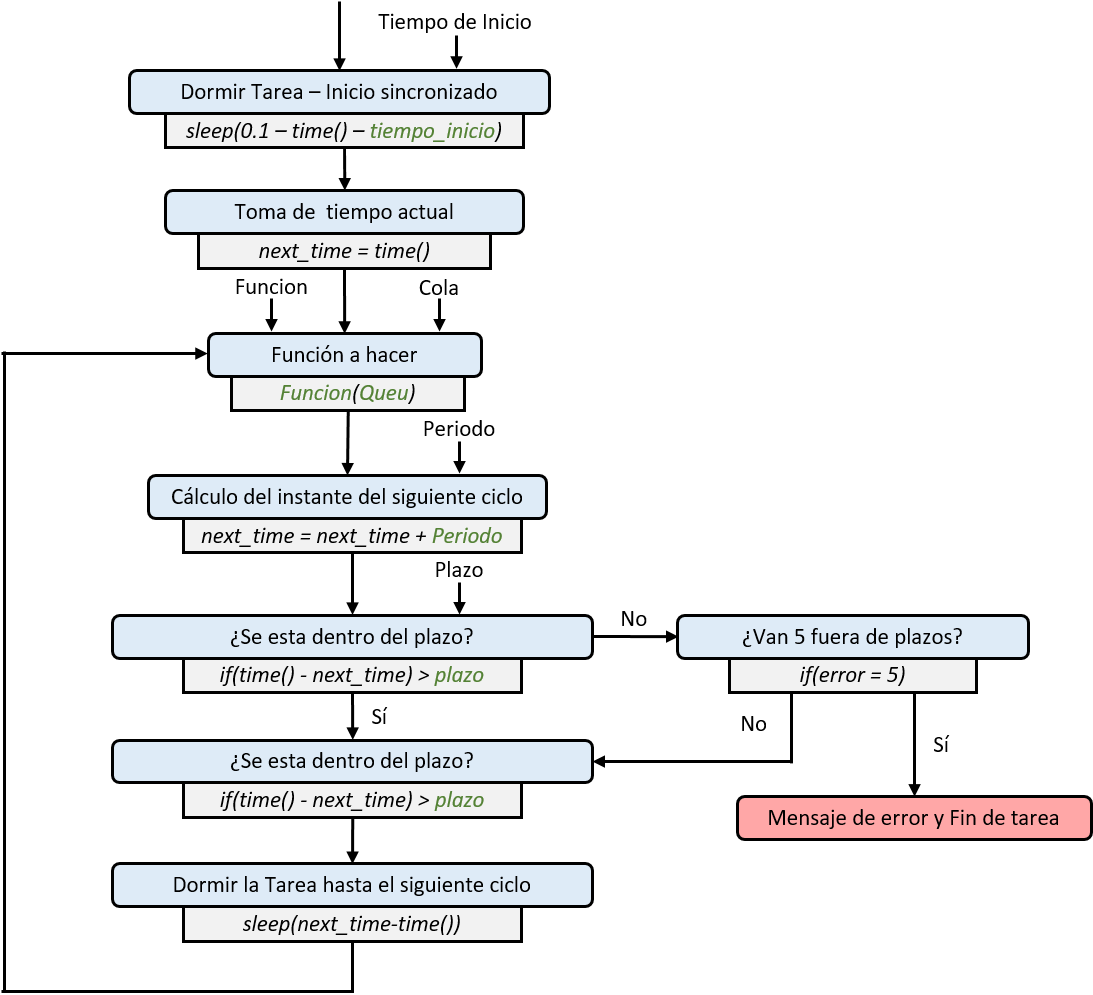


Figura 5.27.- Tarea periódica con plazo

En el flujograma se puede observar como hay ciertas palabras coloreadas en verde, estas palabras realmente son variables que tiene que dar el usuario que use la biblioteca para que la tarea periódica funcione correctamente.

1. **Tiempo de inicio:** se trata del instante en el que se llama a las tareas a iniciarse. Este tiempo será usado para llevar a cabo un inicio sincronizado de todas las tareas que se programen. Es decir, que todas las tareas comiencen en el mismo instante de tiempo.
2. **Funcion:** este parámetro contendrá el nombre de la función que se ha creado para que se repita cíclicamente. Por lo que lo que esté dentro de esta función será lo que periódicamente se haga.
3. **Queu:** se trata de la cola, o los parámetros necesarios para que la función antes comentada funcione correctamente.
4. **Periodo:** es la cantidad de tiempo que pasa entre activación y activación de la tarea periódica en segundos.
5. **Plazo:** tiempo en segundos a partir del cual se da por perdida la muestra obtenida en ese instante.

Como se aprecia en el flujograma de la Figura 5.27, nada más activar la tarea, se duerme, para poder hacer un inicio sincronizado, una vez se termina ese periodo de tiempo se toma el tiempo en el que este ha acabado,

A partir de este instante la tarea periódica se comporta ya cíclicamente. En primer lugar, lleva a cabo la función para la que está programada. Y se calcula el tiempo en el que se daría la siguiente activación. Inmediatamente después se comprueba si el tiempo tardado en ejecutar estas instrucciones, es menor que el plazo. Si esta comprobación resulta positiva, la ejecución cíclica seguirá. En cambio, si esta comprobación es negativa, y la situación se da más de cinco veces, la ejecución de esa tarea finalizará. Al introducir esta posibilidad de que la tarea se pase del *Plazo* un número mayor que uno, se hace que el sistema deje de ser de tiempo real **estricto**, y pase a ser uno **blando.**

* **Biblioteca Tareas periódicas V2:**

Tras ejecutar gran cantidad de tareas periódicas mediante esta biblioteca, se observó, que el código desarrollado podía ser depurado para que las tareas tuvieran un tiempo de ejecución menor.

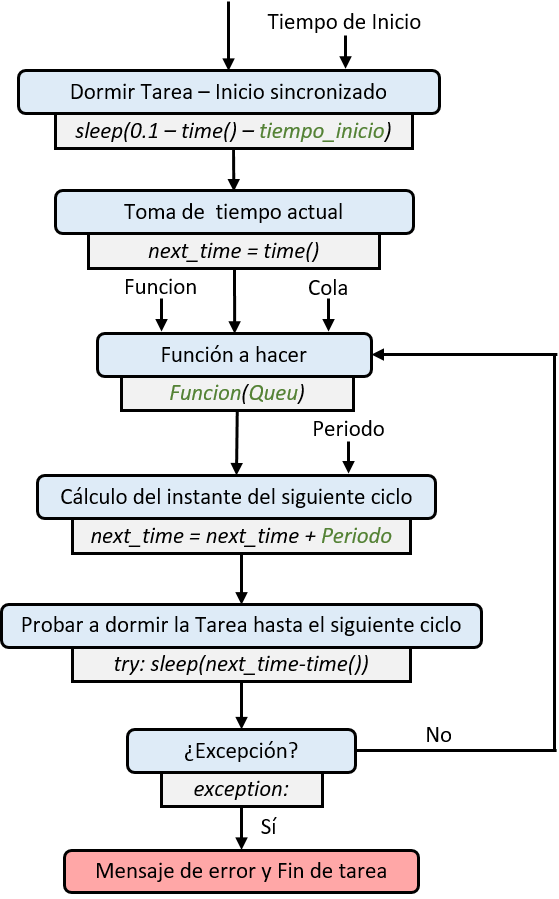


Figura 5.28.- Tarea periódica simplificada

La segunda versión de la biblioteca que aportaba las tareas periódicas al lenguaje de programación *Python*, se basó en el flujograma mostrado en la Figura 5.28. A diferencia del de la primera versión (Figura 5.27), en esta el plazo no es solicitado como parámetro, si no que se trabaja con un *Plazo* igual al *Periodo*. De esta manera, cuando de manda a la tarea a dormir el tiempo restante hasta la siguiente activación, si se da una excepción (que la reta de los tiempos sea negativa) se estaría superando el *Periodo* y el *Plazo*, por lo que finaliza la ejecución de la tarea.

#### Creación del primer programa

Con la biblioteca ***BiblioTareasPeriodicas*** recién generada ya se tendrían disponibles todos los elementos para programar en la *Raspberry Pi* las tres tareas periódicas, el registro protegido y los recursos protegidos. Como este primer acercamiento a una solución mediante Python para la comprobación de la viabilidad de ella, la subida de datos a la base de datos se llevó a cabo de forma ficticia, es decir, los datos se guardarían en la memoria del propio ordenador. Si este programa funcionara correctamente, el siguiente paso sería la implementación de esta subida de datos por *WIFI*.

Como se ha comentado anteriormente, el programa estará compuesto de tres tareas periódicas, dos de adquisición de datos, y una de comunicación. La primera parte del programa se compondrá de las funciones que regirán el comportamiento de estas tareas. Es decir, el código necesario para que se recojan los datos de los sensores, y las instrucciones necesarias para que los datos guardados en el *registro protegido* se conviertan en un archivo *XML* y se introduzca en una carpeta seleccionada del sistema.

* **Función:** CogerGuardarDatosPOX

Como el propio nombre indica, esta función se encargará de recoger y guardar los datos recibidos desde el sensor *MAX30102* en el recurso protegido. EL propio fabricante ofrece una biblioteca para recoger estos datos para el lenguaje Python, por lo que para esta función la biblioteca *max30102* es usada.

Entre todas las funciones dentro de la biblioteca, al función *read\_fifo()* es la seleccionada, ya que recoge los datos del sensor (el valor del reflejo de la luz roja y la luz infrarroja en el dedo) de forma rápida.

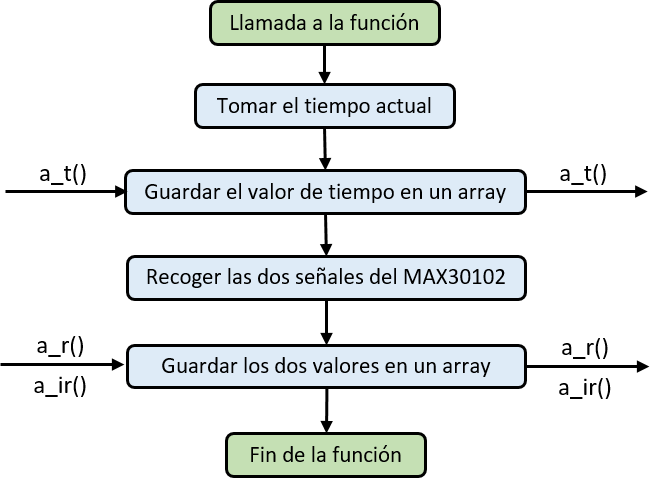


Figura 5.29.- Función CogerGuardarDatosPOX

La estructura de esta función es muy sencilla y se muestra en la Figura 5.29. Como se puede apreciar en ella, en primer lugar, se toma la hora actual para conocer en que instante se tomó la muestra, e inmediatamente después se guarda en un array, que a la hora de llamar a la función será un *recurso protegido*. A continuación, se recogerán los dos valores del sensor y se guardarán también en dos arrays diferentes que al igual que con el de tiempo serán *recursos protegidos.*

* **Función:** CogerGuardarDatosGSR

La segunda de las funciones creadas, es la encargada de recoger los datos de los electrodos para la obtención del valor *GSR*. En este caso no se necesita la ayuda de ninguna biblioteca, ya que el valor recogido es una tensión. Pero sí que se necesita hacer una serie de cálculos para conocer el valor *GSR* correspondiente a esa tensión.

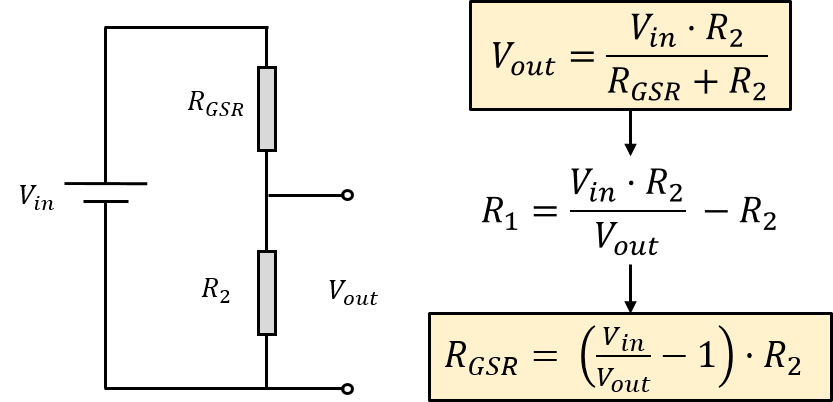


Figura 5.30.- Cálculo del valor GSR

En la Figura 5.30 se puede observar las fórmulas necesarias para calcular el valor de la resistencia. Se trata de un divisor de tensión, dónde la resistencia llamada es la del dedo del sujeto en estudio. Por lo que conociendo la tensión de entrada y el valor de la , que están ambas a la selección del diseñador, se puede calcular fácilmente el valor de esa resistencia.

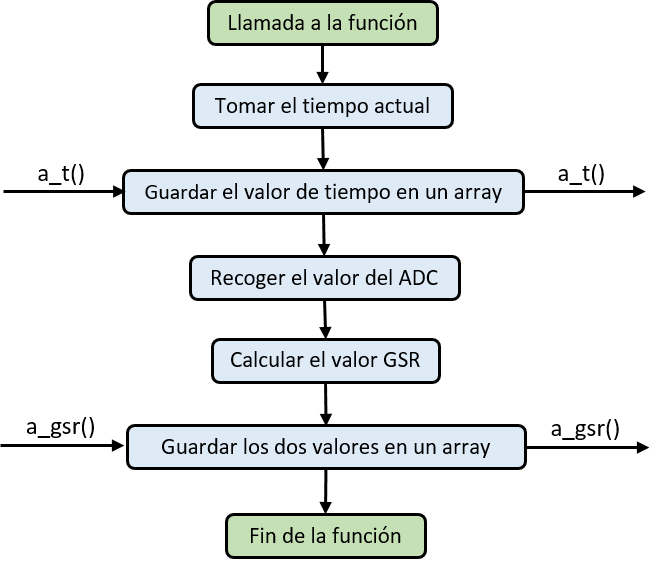


Figura 5.31.- Función CogerGuardarDatosGSR

Una vez se conocen los cálculos necesarios para obtener el valor *GSR*, la estructura de la función es practicante igual que la creada para la función de la señal del Pulsioxímetro (Figura 5.31). En primer lugar, se toma la hora actual y se guarda en el array que después se tratará de un recurso protegido. A continuación, se toma la tensión mediante un ADC (Conversor Analógico Digital) y se calcula el valor *GSR*, y este se introduce en otro array protegido.

* **Función:** Coms

La última de las funciones a programa es la concerniente a las comunicaciones. Esta función se encargará de guardar de una forma rápida los datos de los arrays protegidos en archivos *CSV* en la memoria interna, y después subir estos datos a una *bbdd* local (Base de datos).

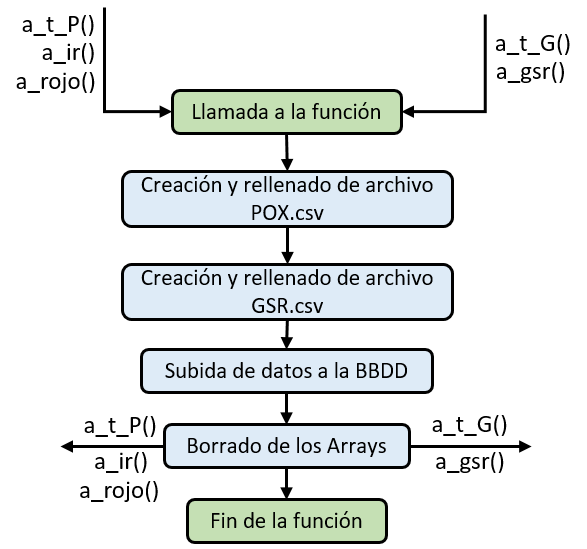


Figura 5.32.- Función COMS

En la Figura 5.32 se puede observar cómo sería la estructura de esta función de forma genérica. Al tratarse de una tarea de comunicaciones, será necesario darle acceso a los arrays generados en las otras funciones, para que esta pueda tomar los datos al inicio de la función y borrarlos a su final.

Para poder llevar a cabo todas las funcionalidades que se piden a esta función, creación de un archivo *CSV* y subida de datos a una bbdd, es necesario apoyarse en dos nuevas bibliotecas llamadas *csv* y *psycopg2* que suplen al usuario de instrucciones para crear esas funcionalidades.

* **Programa Principal:**

Una vez se tienen creadas las tres funciones que determinarán el comportamiento de las tareas periódicas, se procedió a crear el programa principal dónde se crearían todos los recursos protegidos tareas periódicas.

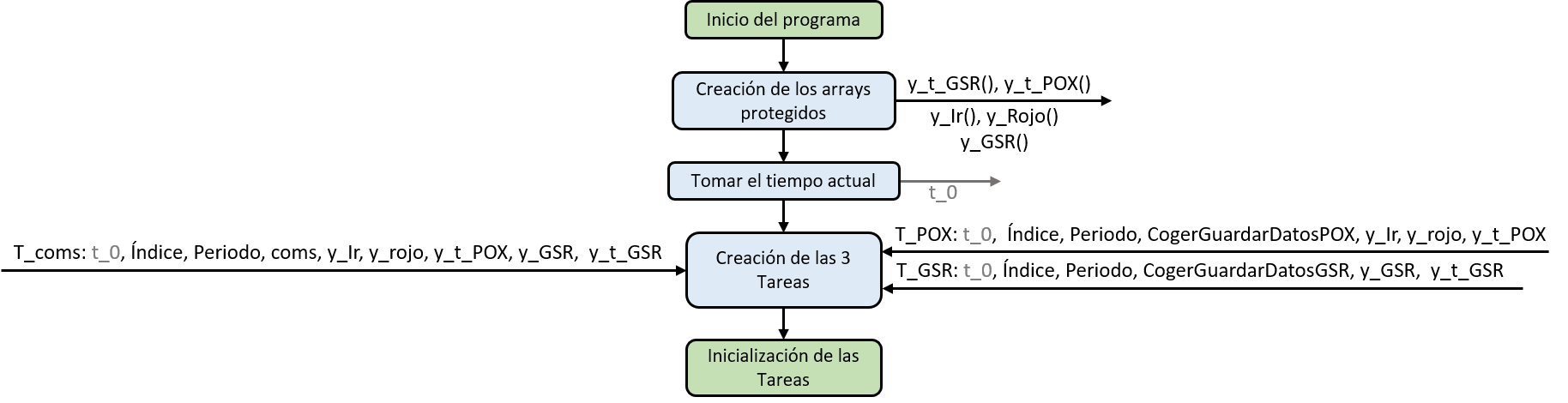


Figura 5.33.- Estructura Programa principal (V1 Python)

En la Figura 5.33 se puede observar la estructura que sigue el programa principal dónde como se acaba de comentar se crean los arrays protegidos y las tareas periódicas, así cómo estas últimas se inicializan con los parámetros seleccionados por el diseñador.

#### Creación del segundo programa

Tras la elaboración de este primer programa se siguió probando cómo hacer que este funcionara de una forma mucho más rápida. La solución se encontró en el trabajo de fin de máster de un compañero del Grupo de Investigación que se centraba en las comunicaciones de este dispositivo [31]. Esta mejora en la velocidad de la toma y subida de los datos se debe a la implantación de *Queue*, un recurso protegido en el que se almacenan datos, dónde el primer dato que entra es el primer dato que sale (*FIFO*). Además de la implementación de la función *executemany* de la biblioteca *psycopg2*.

En este nuevo programa el diagrama de tiempo real con el que se comenzó a diseñar el programa era algo diferente ya que no se usaba una tarea periódica para llevar a cabo la subida de datos a la base de datos, si no que se usaría un Proceso de la biblioteca *Multiprocess* que se activaría cada vez que la *Queue* correspondiente llegase a los cien datos. Un comportamiento parecido a lo que serían las *Tareas Esporádicas*.

La estructura en tiempo-real básica que fue usada es la mostrada en la Figura 5.34.

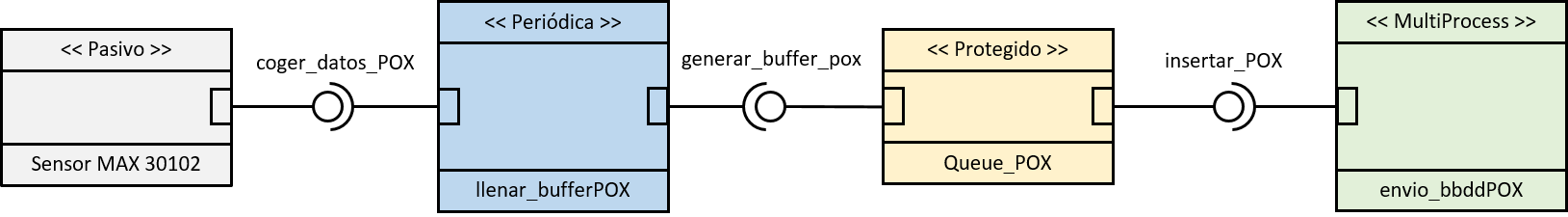


Figura 5.34.- Estructura tipo usada en el segundo programa

Si esta estructura básica se repite tres veces una para cada sensor o señal que se quiere recoger, se tendría el diagrama de comunicación entre las tareas periódicas, objetos protegidos, objetos pasivos y los nuevos procesos llamados *mutlirpocess*.

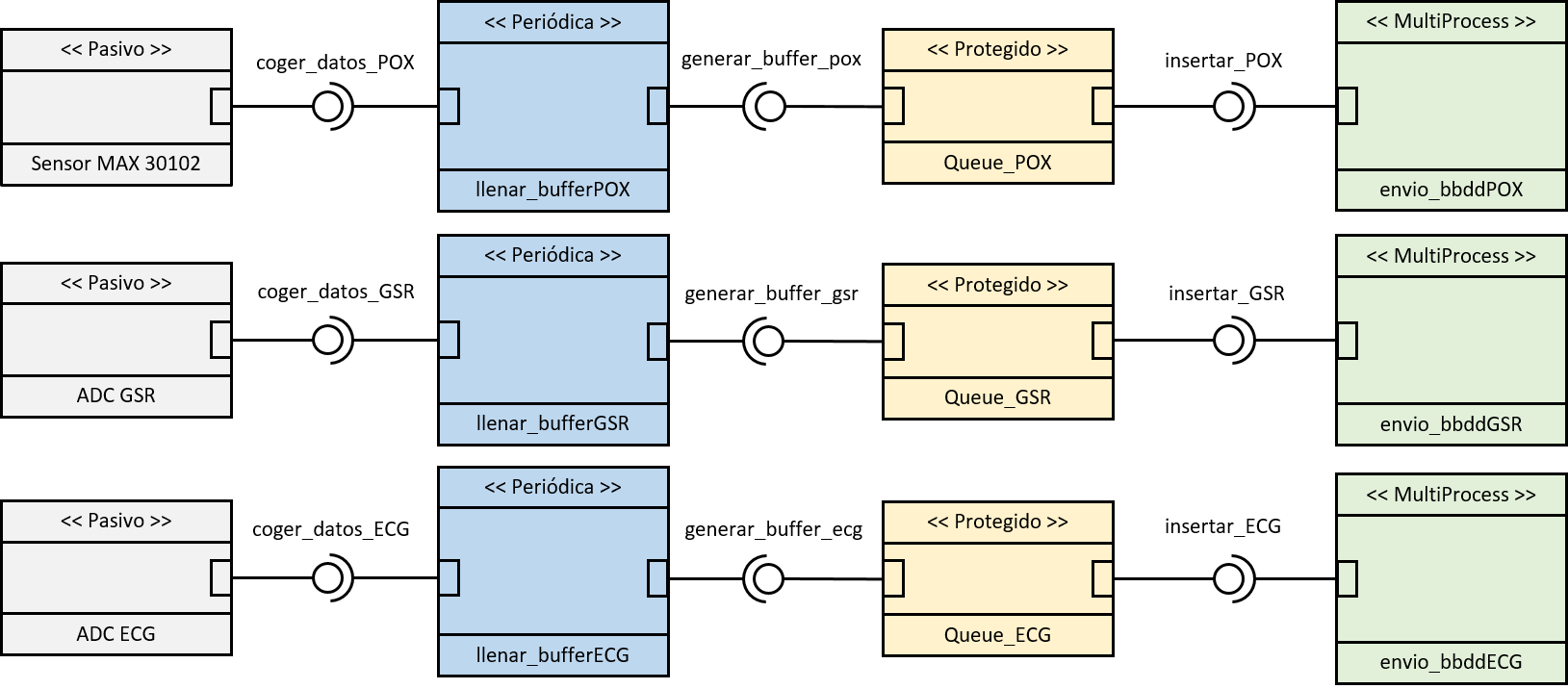


Figura 5.35.- Esquema estructura programa total

En la Figura 5.35 se puede observar el diagrama de comunicación ya finalizado dónde cada una de las ramas como se acaba de comentar, se centra en una señal biológica. La primera de ellas, la señal del P*ulsioxímetro*, a continuación, la señal *GSR* y finalmente el no implementado *ECG*.

Al igual que se ha hecho en el programa anterior, se comentará la estructura de las funciones, programas y subprogramas usados para el desarrollo de esta segunda versión e Python. De nuevo, el programa principal comienza con la creación de las funciones dónde se crean los códigos encargados de tomar los datos desde los sensores y guardarlos en los archivos protegidos.

* **Programa:** main

Se trata del programa principal desde el que se va a llamar a otras funciones situadas en subprogramas. En este programa se encuentran tres funciones, y una parte principal.

* **Función:** generar\_buffer\_pox

La primera función que se introduce en el programa principal, se encarga de gestionar la obtención de guardar los datos recibidos de los sensores, en una estructura que finalmente es guardad en la variable *queue* correspondiente a esa señal.

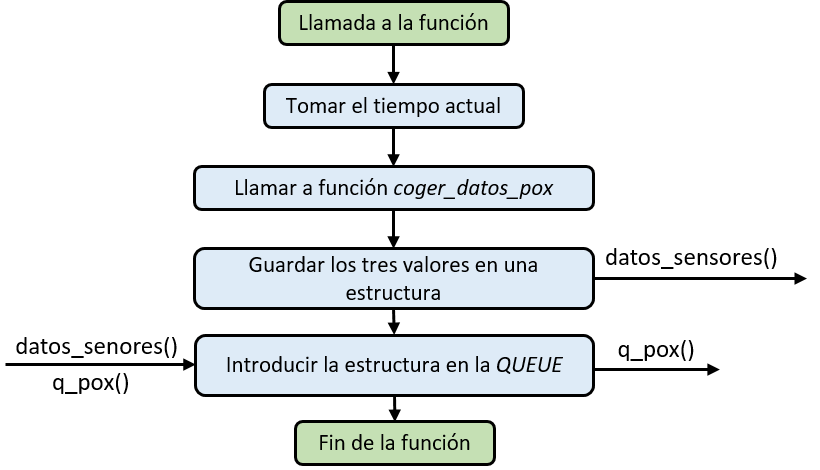


Figura 5.36.- Función generar\_buffer\_pox

Como se puede observar en la Figura 5.36 esta función llama a otra función de nombre *coger\_datos\_pox*, que se trata de la función encargada de tomar los datos del sensor *max30102*. Esta función, como ya hacía en la primera versión de la programación, hace uso de la biblioteca del fabricante, y tan solo toma los datos y los devuelve a la función desde dónde esta ha sido llamada.

* **Función:** generar\_buffer\_gsr

La segunda de las funciones, se centra en el guardado los datos concernientes a la señal *gsr*. La estructura es exactamente igual que la anterior, la única diferencia es la función a la que esta llama.

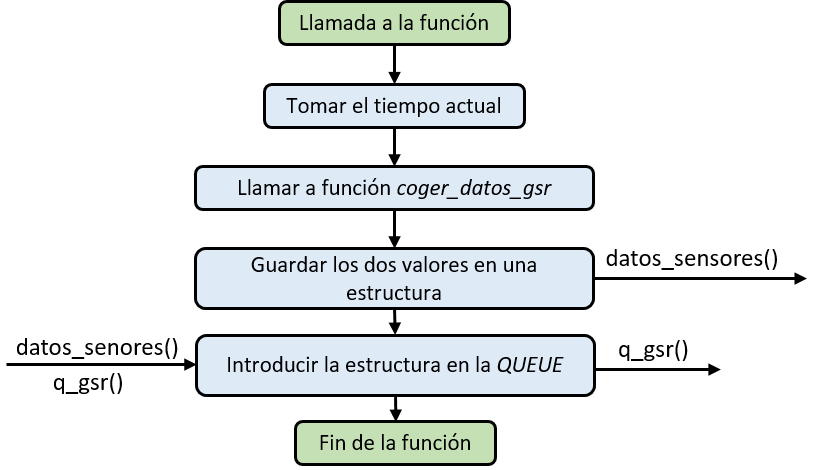


Figura 5.37.- Función generar\_buffer\_gsr

En este caso la función a la que se llama es la *coger\_datos\_ecg* (Figura 5.37). En ella se toma el dato del conversor analógico digital y transforma este valor en una tensión y a continuación, en un valor de conductancia, que después se devolverá a la función principal. Como ya hacía la función centrada en el Pulsioxímetro, el dato de la función y el tiempo se introducen en una estructura, que después es guardada en la variable *queue* correspondiente a esa señal.

* **Función:** generar\_buffer\_ecg

La última función dentro del programa principal, es la que se centra en la última señal fisiológica que queda, el *ecg*. La estructura vuelve a ser exactamente igual que las dos anteriores (Figura 5.38), con la excepción de nuevo, de la función a la que esta llama.

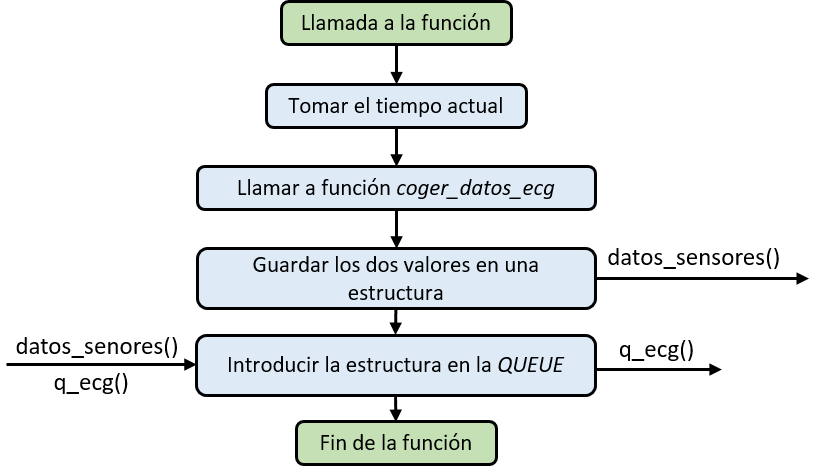


Figura 5.38.- Función generar\_buffer\_ecg

Como se puede apreciar en la Figura 5.38, la función en este caso tiene como nombre *coger\_datos\_gsr*. El funcionamiento implementado en esta función no es la del sensor *ecg*, si no que para hacer las pruebas se implementó una adquisición de datos más sencilla. De esta manera se podía comprobar la viabilidad de esta plataforma de una forma más rápida. Esta función como las anteriores devuelve el dato adquirido a la función principal. Con este dato y con el tiempo que se recoge en el instante inicial, se añaden a una estructura, que finalmente es guardad en la cola (*queue*) correspondiente a esta señal.

* **Main:**

La estructura del *main* de este programa principal es muy parecida a la de la primera versión del código creada, la gran diferencia entre ambas, es que el método de creación de las tareas, al simplificar todos los arrays en una sola estructura *FIFO* (*First In First Out*), se ve simplificada también, ya que solo es necesario introducir esa cola como parámetro (a parte de un identificador, instante inicial, periodo y función a repetir).

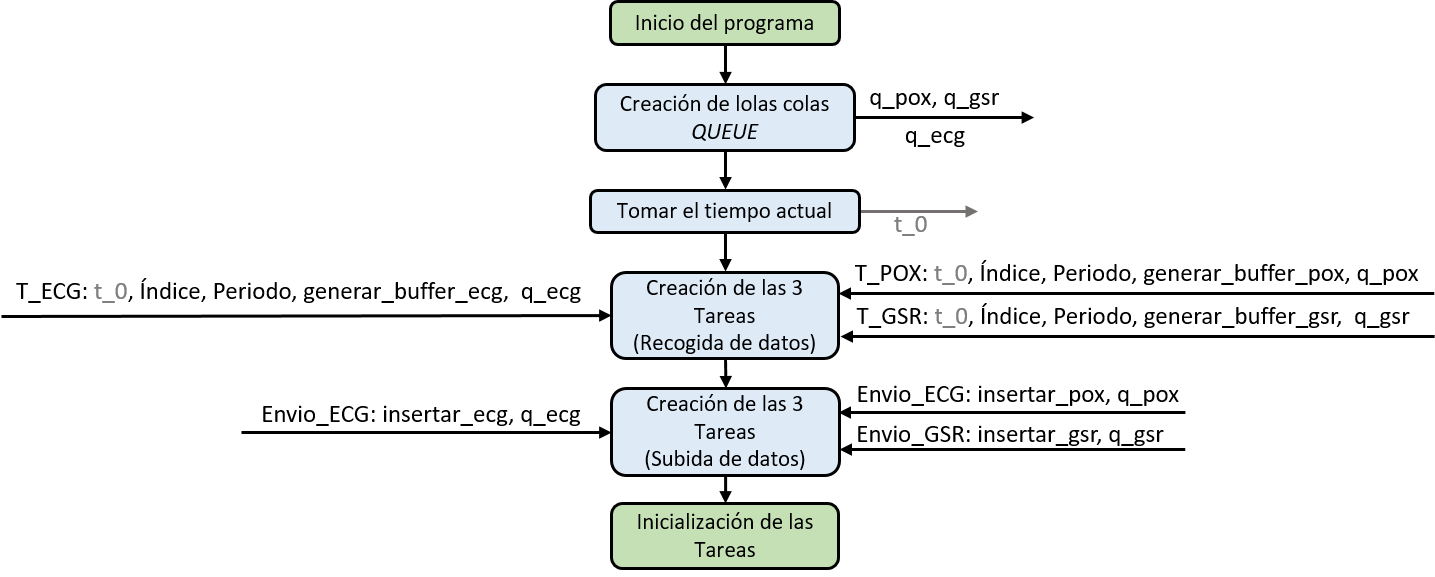


Figura 5.39.- Main del programa principal

En la Figura 5.39 se puede observar ese cambio en la cantidad de parámetro que son necesarios para la creación de las primeras tres tareas. Además, como se comentó al principio del capítulo, esta segunda versión iba a usar un total de seis tareas, las tres periódicas, y otras tres centradas en la subida de datos cunado las colas llegaran a un valor de cien elementos. Debido a esto, en el *main* del programa principal después de la creación de las tareas periódicas, es necesario crear las tres nuevas tareas. Estas solo tienen como parámetros de entrada la función que tiene que llevar a cabo y la cola (*queue*) correspondiente. Finalmente, con todas las tareas creadas, se inicializan todas ellas, para que comience a funcionar el programa.

* **Programa:** obtener\_valores

Para mejorar la limpieza de la programación, se decidió que las funciones antes comentadas *coger\_datos\_pox*, *coger\_datos­\_gsr*, *coger\_datos\_ecg* estuvieran guardadas en un mismo programa. Ya que todas ellas servían para tomar los datos desde los sensores o conversores analógico-digital. Debido a que este programa solo sirve para tener guardadas las funciones antes listadas, la estrcutra del programa no tiene una parte *main*. Por lo que la estructura del programa es simplemente la definición de las tres funciones (Figura 5.40).

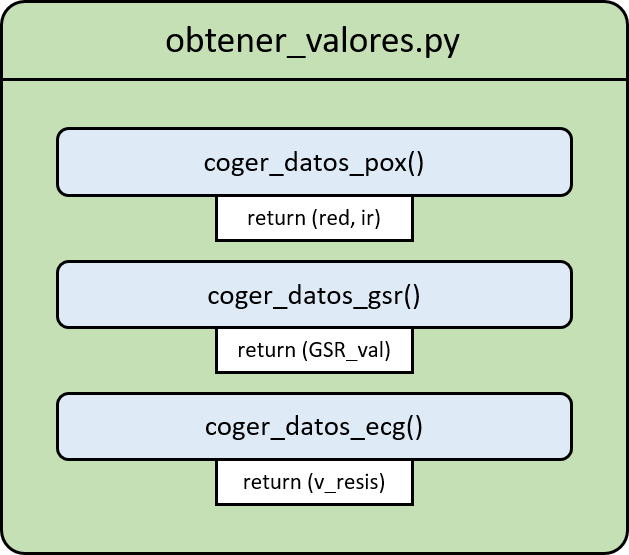


Figura 5.40.- Programa obtener\_valores

* **Programa:** connect\_bbdd

El último programa que forma parte de la solución es de nuevo un contenedor de funciones. En este caso, las tres funciones que están dentro de este, son las encargadas de enviar los datos introducidos en las colas (*queue*) a la base de datos. Por lo que habrá tres funciones diferentes, una por cada tipo de señal. Todas ellas tienen casi la misma estructura ya que todas toman los datos de la cola, y los suben a la base de datos. La diferencia entre ellas, es que cada una sube los datos a tablas diferentes de la base de datos, por lo que el código necesario para la subida de estos datos es algo diferente en cada una de ellas.

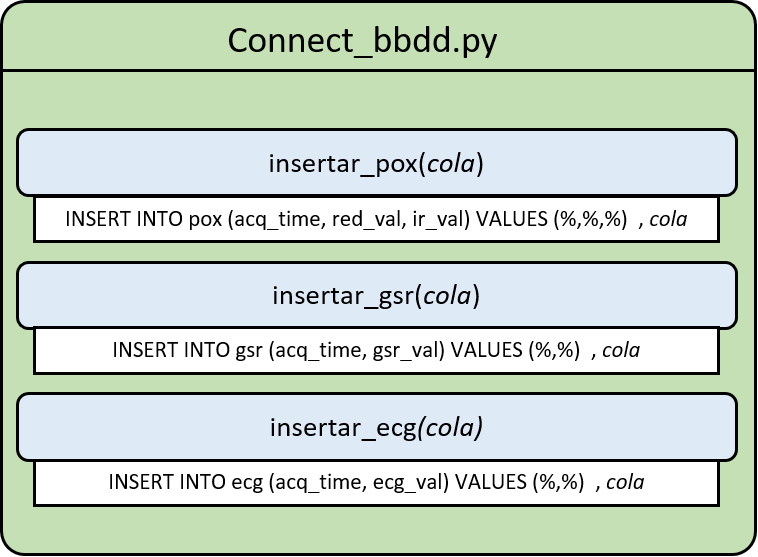


Figura 5.41.- Programa connect\_bbdd

En la Figura 5.41 se puede observar la línea de código en la que se diferencian cada una de las funciones. Como se ha comentado anteriormente, este programa tampoco tiene una parte *main*, lo que hace que el programa solo sea un mero contenedor de las funciones para ofrecer un mayor orden en el proyecto.

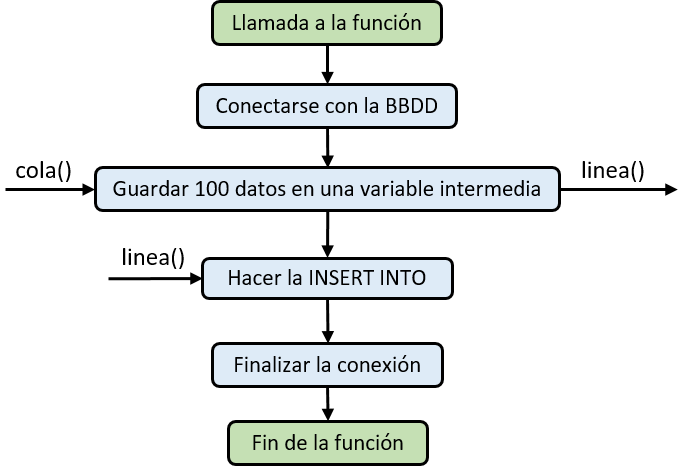


Figura 5.42.- Función tipo insertar en bbdd

El flujograma que siguen las tres funciones es el mostrado en la Figura 5.42. En primer lugar, se conecta el dispositivo a la base de datos. A continuación, se guardan los cien datos de la cola en una variable intermedia, ya que de esta manera se reduce en gran medida los problemas derivados que se pueden dar cuando dos tareas accedan simultánea y concurrentemente a un mismo registro. Una vez se tiene los datos en la variable intermedia, llamada línea, se hace la instrucción INSERT INTO y finalmente se finaliza la conexión con la bbdd.

#### Montaje del dispositivo

El montaje seguid

## ESP32

## Grafana

*CAPITULO 6*

**RESULTADOS**

*El título de este capítulo es obligado. Comience todos los capítulos en página impar. Si es preciso incluya una página en blanco. Borre este texto en la versión final del documento.*

# Resultados

## Raspberry Pi

### Primera versión del programa

### Segunda versión del programa

## ESP32

Como acciones futuras o líneas de investigación abiertas e identificadas se proponen las siguientes:

*CAPITULO 7*

**CONCLUSIONES**

*El título de este capítulo es obligado. Comience todos los capítulos en página impar. Si es preciso incluya una página en blanco. Borre este texto en la versión final del documento.*

# Conclusiones

## Conclusiones

El trabajo realizado en este proyecto Fin de Máster ha contribuido a ….. Las principales aportaciones y/o conclusiones que se extraen son …

## Acciones futuras

Como acciones futuras o líneas de investigación abiertas e identificadas se proponen las siguientes:

*CAPITULO 8*

**REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

*Comience todos los capítulos en página impar. Si es preciso incluya una página en blanco. Borre este texto en la versión final del documento.*

# Referencias bibliográficas

[1] R. Martinez Rodriguez, «Diseño de un sistema de detección y clasificación de cambios emocionales basado en el análisis de señales fisiológicas no intrusivas», UPV/EHU, 2016. Accedido: nov. 15, 2022. [En línea]. Available: https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=112122&info=resumen&idioma=SPA

[2] U. Zalabarria Pena, «Identification of the stress and relaxation level in people, based on the study and the advanced processing of physiological signals related to the activity of the autonomic nervous system», 2020. Accedido: nov. 15, 2022. [En línea]. Available: http://addi.ehu.es/handle/10810/50668

[3] U. Zalabarria, E. Irigoyen, R. Martinez, y A. Lowe, «Online robust R-peaks detection in noisy electrocardiograms using a novel iterative smart processing algorithm», *Appl Math Comput*, vol. 369, mar. 2020, doi: 10.1016/J.AMC.2019.124839.

[4] U. Zalabarria, E. Irigoyen, R. Martinez, M. Larrea, y A. Salazar-Ramirez, «A Low-Cost, Portable Solution for Stress and Relaxation Estimation Based on a Real-Time Fuzzy Algorithm», *IEEE Access*, vol. 8, pp. 74118-74128, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2988348.

[5] U. Zalabarria, E. Irigoyen, y A. Lowe, «Diagnosis of atrial fibrillation based on arterial pulse wave foot point detection using artificial neural networks», *Comput Methods Programs Biomed*, vol. 197, p. 105681, dic. 2020, doi: 10.1016/J.CMPB.2020.105681.

[6] M. I. Ahmad, M. J. Singleton, P. D. Bhave, H. Kamel, y E. Z. Soliman, «Atrial cardiopathy and stroke mortality in the general population», doi: 10.1177/1747493019876543.

[7] «Handbook of Psychophysiology», *Handbook of Psychophysiology*, ene. 2007, doi: 10.1017/CBO9780511546396.

[8] B. Medić, «The role of autonomic control in cardiovascular system: Summary of basic principles», *Medicinski podmladak*, vol. 67, n.o 1, pp. 14-18, oct. 2016, doi: 10.5937/MEDPODM1601014M.

[9] Y. Zhang, J. Cui, K. Ma, H. Chen, y J. Zhang, «A wristband device for detecting human pulse and motion based on the Internet of Things», *Measurement (Lond)*, vol. 163, oct. 2020, doi: 10.1016/J.MEASUREMENT.2020.108036.

[10] S. Sakphrom, T. Limpiti, K. Funsian, S. Chandhaket, R. Haiges, y K. Thinsurat, «Intelligent Medical System with Low-Cost Wearable Monitoring Devices to Measure Basic Vital Signals of Admitted Patients», *Micromachines 2021, Vol. 12, Page 918*, vol. 12, n.o 8, p. 918, jul. 2021, doi: 10.3390/MI12080918.

[11] D. Berwal, A. Kuruba, A. M. Shaikh, A. Udupa, y M. S. Baghini, «SpO2Measurement: Non-Idealities and Ways to Improve Estimation Accuracy in Wearable Pulse Oximeters», *IEEE Sens J*, vol. 22, n.o 12, pp. 11653-11664, jun. 2022, doi: 10.1109/JSEN.2022.3170069.

[12] E. Kałamajska, J. Misiurewicz, y J. Weremczuk, «Wearable Pulse Oximeter for Swimming Pool Safety», *Sensors*, vol. 22, n.o 10, may 2022, doi: 10.3390/S22103823.

[13] R. Saha *et al.*, «Internet of Things Framework for Oxygen Saturation Monitoring in COVID-19 Environment», *IEEE Internet Things J*, vol. 9, n.o 5, pp. 3631-3641, mar. 2022, doi: 10.1109/JIOT.2021.3098158.

[14] F. Luna-Perejón, L. Muñoz-Saavedra, J. M. Castellano-Domínguez, y M. Domínguez-Morales, «IoT garment for remote elderly care network», *Biomed Signal Process Control*, vol. 69, p. 102848, ago. 2021, doi: 10.1016/J.BSPC.2021.102848.

[15] G. Arfaoui, X. Bultel, P.-A. Fouque, A. Nedelcu, y C. Onete, «The privacy of the TLS 1.3 protocol», *Proceedings on Privacy Enhancing Technologies*, vol. 2019, n.o 4, pp. 190-210, 2019, doi: 10.2478/popets-2019-0065.

[16] A. Karimlou y M. Yavari, «A Low-Power Delta-Modulation-Based ADC for Wearable Electrocardiogram Sensors», *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, vol. 69, n.o 9, 2022, Accedido: nov. 01, 2022. [En línea]. Available: https://ieeexplore-ieee-org.ehu.idm.oclc.org/document/9790719/

[17] A. Ahmed, M. M. Khan, P. Singh, R. S. Batth, y M. Masud, «IoT-based real-time patients vital physiological parameters monitoring system using smart wearable sensors», *Neural Comput Appl*, 2022, doi: 10.1007/S00521-022-07090-Y/FULLTEXT.HTML.

[18] M. A. Akkaş, R. SOKULLU, y H. Ertürk Çetin, «Healthcare and patient monitoring using IoT», *Internet of Things (Netherlands)*, vol. 11, sep. 2020, doi: 10.1016/J.IOT.2020.100173.

[19] T. Triwiyanto *et al.*, «Embedded Machine Learning Using a Multi-Thread Algorithm on a Raspberry Pi Platform to Improve Prosthetic Hand Performance», *Micromachines (Basel)*, vol. 13, n.o 2, feb. 2022, doi: 10.3390/MI13020191.

[20] D. Ramegowda y M. Lin, «Energy efficient mixed task handling on real-time embedded systems using FreeRTOS», *Journal of Systems Architecture*, vol. 131, p. 102708, oct. 2022, doi: 10.1016/J.SYSARC.2022.102708.

[21] R. Erna Wagner *et al.*, «Validation of a Low-Cost Electrocardiography (ECG) System for Psychophysiological Research», *Sensors 2021, Vol. 21, Page 4485*, vol. 21, n.o 13, p. 4485, jun. 2021, doi: 10.3390/S21134485.

[22] N. Ahmed y Y. Zhu, «Early detection of atrial fibrillation based on ecg signals», *Bioengineering*, vol. 7, n.o 1, mar. 2020, doi: 10.3390/BIOENGINEERING7010016.

[23] S. Kumar *et al.*, «A Low‐Cost Multi‐Sensor Data Acquisition System for Fault Detection in Fused Deposition Modelling», *Sensors*, vol. 22, n.o 2, ene. 2022, doi: 10.3390/S22020517.

[24] G. Ehrmann, T. Blachowicz, S. V. Homburg, y A. Ehrmann, «Measuring Biosignals with Single Circuit Boards», *Bioengineering*, vol. 9, n.o 2. MDPI, feb. 01, 2022. doi: 10.3390/bioengineering9020084.

[25] O. Panagopoulos y A. A. Argiriou, «Low-Cost Data Acquisition System for Solar Thermal Collectors», *Electronics (Switzerland)*, vol. 11, n.o 6, mar. 2022, doi: 10.3390/ELECTRONICS11060934.

[26] M. J. A. Baig, M. T. Iqbal, M. Jamil, y J. Khan, «Design and implementation of an open-Source IoT and blockchain-based peer-to-peer energy trading platform using ESP32-S2, Node-Red and, MQTT protocol», *Energy Reports*, vol. 7, pp. 5733-5746, nov. 2021, doi: 10.1016/J.EGYR.2021.08.190.

[27] C. Pintavirooj, B. Ni, C. Chatkobkool, y K. Pinijkij, «Noninvasive portable hemoglobin concentration monitoring system using optical sensor for anemia disease», *Healthcare (Switzerland)*, vol. 9, n.o 6, jun. 2021, doi: 10.3390/healthcare9060647.

[28] S. R. Anan, M. A. Hossain, M. Z. Milky, M. M. Khan, M. Masud, y S. Aljahdali, «Research and Development of an IoT-Based Remote Asthma Patient Monitoring System», *J Healthc Eng*, vol. 2021, 2021, doi: 10.1155/2021/2192913.

[29] W. Romine, T. Banerjee, y G. Goodman, «Toward sensor-based sleep monitoring with electrodermal activity measures», *Sensors (Switzerland)*, vol. 19, n.o 6, mar. 2019, doi: 10.3390/S19061417.

[30] S. Briginets, A. Volkov, G. Martinov, y A. Veselkov, «Development of a mobile heart monitor based on the ECG module AD8232», *AIP Conf Proc*, vol. 2015, sep. 2018, doi: 10.1063/1.5055087.

[31] Aspiazu Ituarte. O, «Desarrollo de un sistema de apoyo a la diagnósis e identificación de patologías implementado con dispositivos de bajo coste, preciso, fiable y de uso en entornos domiciliarios residenciales y hospitalarios.», 2022.

*ANEXO I*

***TÍTULO DEL ANEXO***

*La incorporación de anexos a la Memoria del PFM es opcional y se justifica si su lectura no es indispensable para la correcta comprensión de la Memoria. Si lo considera conveniente puede incluir uno o varios, pero se recomienda no abusar en cuanto a número. Por ejemplo, puede ser conveniente incluir un Glosario, un Manual de Usuario, un Manual de Instalación, una Hoja de Especificaciones, Planos, Presupuesto, Normas…*

*En cualquier caso, y en función de la extensión, puede optar también por realizar un documento independiente de la Memoria si así lo considera oportuno.*

*Comience todos los capítulos en página impar. Si es preciso incluya una página en blanco. Borre este texto en la versión final del documento.*

# ANEXO I: TÍTULO DEL ANEXO 1

A-ECMS Adaptive Equivalent Consumption Minimization Strategy

ABS Active Braking System

IGBT Insulated Gate Bipolar Transistor

VSI-2LSS Two Level Soft Switching Voltage Source Inverter