



CARRERA DE ESPECIALIZACIÓN EN SISTEMAS EMBEBIDOS

MEMORIA DEL TRABAJO FINAL

Robot de exploración ambiental

Autor:

Ing. Gonzalo Carreño

Director:

Esp. Ing. Sergio Alberino (UTN.BA)

Jurados:

Nombre del jurado 1 (pertenencia)

Nombre del jurado 2 (pertenencia)

Nombre del jurado 3 (pertenencia)

*Este trabajo fue realizado en la Ciudad Autónoma de Buenos Aires,
entre marzo de 2023 y noviembre de 2023.*

Resumen

El presente trabajo describe un emprendimiento personal en el que se desarrolla un dispositivo robótico de exploración ambiental, controlable a distancia con las funciones básicas de desplazamiento, medición y reporte de parámetros ambientales tales como presión, temperatura, humedad y luminosidad.

El sistema cuenta con una arquitectura base robusta y flexible sobre la cual otros sensores y actuadores pueden ser adaptados para poder interactuar con el medio ambiente, y logra por tanto brindar una solución que ayuda a incrementar la oferta de robots exploradores en la industria argentina pudiendo ser utilizados en casos de uso de IoT, como por ejemplo en aplicaciones de explotación de petróleo, Smart Mining, Smart Farming, etc.

Para su implementación se utilizaron conceptos y herramientas tales como buenas prácticas en el diseño y desarrollo de firmware, la utilización de sistemas operativos de tiempo real como plataforma de ejecución base, protocolos de comunicaciones para sistemas embebidos, y técnicas y frameworks de testing para asegurar la calidad del producto final.

Agradecimientos

Esta sección es para agradecimientos personales y es totalmente **OPCIONAL**.

Índice general

Resumen	I
1. Introducción general	1
1.1. Motivación	1
1.2. Estado del arte	1
1.3. Alcance y objetivos	2
1.4. Requerimientos	2
2. Introducción específica	5
2.1. Tecnologías de hardware utilizadas	5
2.1.1. Espressif ESP32	5
2.1.2. Sensor de temperatura y humedad DHT11	5
2.1.3. Sensor de presión BMP280	6
2.1.4. Fotorresistor como sensor de luminosidad	6
2.1.5. Joystick analógico	7
2.1.6. Display LCM1602A	7
2.1.7. Motores de corriente continua	7
2.1.8. Módulos L298N	8
2.1.9. Baterías de Li-Ion 3.7 V	8
2.1.10. Baterías AA 1.5 V	8
2.1.11. Plaquetas genéricas	8
2.1.12. Cables de conexión DuPont	8
2.1.13. Board Pin Headers para montaje de componentes y cables	8
2.1.14. Interruptores de On-Off	8
2.1.15. Porta-pilas de On-Off	8
2.1.16. Ruedas	8
2.2. Tecnologías de software utilizadas	8
2.2.1. Marco de trabajo ESP-IDF	8
2.2.2. Plataforma Docker	9
2.2.3. Visual Studio Code	9
2.2.4. Sistema operativo Ubuntu	9
3. Diseño e implementación	11
3.1. Arquitectura de software del sistema	11
3.1.1. Arquitectura y diseño de componentes en la versión v1.0	11
3.1.2. Arquitectura y diseño de componentes en la versión v2.0	13
3.2. Implementación de los módulos	15
3.2.1. Control de la red WIFI	16
3.2.2. Control del joystick analógico	16
3.2.3. Medición de valor de luminosidad	17
3.2.4. Medición de temperatura y humedad	17
3.2.5. Medición de presión	18

3.2.6.	Control de motores DC	19
3.2.7.	Control del display	19
3.3.	Arquitectura de hardware	20
3.3.1.	Conexionado logico	20
3.3.2.	Conexionado fisico del robot	21
3.4.	Ciclo de desarrollo	21
4.	Ensayos y resultados	23
4.1.	Proceso de desarrollo y aseguramiento de calidad	23
4.2.	Verificacion tecnica de los diferentes modulos	23
4.2.1.	Verificacion del modulo de joystick	23
4.2.2.	Verificacion del modulo de control del display	24
4.2.3.	Verificacion del modulo de control de motores	24
4.2.4.	Verificacion del modulo de medicion de temperatura y hu- medad	24
4.2.5.	Verificacion del modulo de medicion de presion atmosferica	24
4.2.6.	Verificacion del modulo de medicion de luminosidad	24
4.2.7.	Verificacion del modulo de comunicacion UTP sobre WiFi	24
4.3.	Pruebas funcionales del producto	24
4.3.1.	Prueba del modulo de medición de temperatura y humedad	24
4.3.2.	Prueba del modulo de medición de presión	25
4.3.3.	Prueba del modulo de medición de luminosidad ambiental	25
4.3.4.	Prueba del control y desplazamiento del robot	25
4.3.5.	Prueba del modulo de visualización de display	25
4.4.	Reportes de testing	25
4.5.	Documentacion del producto	26
5.	Conclusiones	27
5.1.	Próximos pasos	27
	Bibliografía	29

Índice de figuras

2.1. Microcontrolador ESP32-WROOM-32D.	5
2.2. Sensor DHT11.	6
2.3. Sensor BMP280.	6
2.4. Fotorresistor.	6
2.5. Joystick analógico.	7
2.6. Display LCM1602A.	7
2.7. Motor de corriente continua.	7
2.8. Proceso de desarrollo utilizando ESP-IDF ¹	9
3.1. Arquitectura global.	12
3.2. Arquitectura global.	14
3.3. Conexión joystick.	17
3.4. Conexión fotorresistor.	17
3.5. Circuito del conexión DHT11.	18
3.6. Conexión BMP280.	18
3.7. Conexión motores.	19
3.8. Conexión display.	19
3.9. Conexión del robot.	20
3.10. Conexión del joystick.	20
3.11. Conexión físico del robot.	21

Índice de tablas

3.1. Configuración de AP WiFi	16
3.2. Conexión de joystick	16
3.3. Conexión de fototransistor	17

Dedicado a mi familia y mis amigos.

Capítulo 1

Introducción general

Esta sección presenta la motivación, alcance, objetivos y requerimientos del producto en el marco del estado del arte y su importancia en la industria.

1.1. Motivación

La motivación del presente trabajo fue primeramente volcar y unificar en un emprendimiento personal los conceptos aprendidos en la especialización de Sistemas Embebidos, con una arquitectura robusta que pueda ser extrapolada a otros casos de uso de valor en la industria como por ejemplo la exploración de suelos en el agro, la exploración submarina para la perforación de pozos de petróleo, o los mencionados más adelante en el estado del arte. Por otra parte, se buscó desarrollar un producto que pueda contribuir a aumentar la oferta de dispositivos robóticos exploradores en Argentina.

1.2. Estado del arte

Los robots exploradores son dispositivos robotizados capaces de moverse de forma autónoma, y/o controlados a distancia, que han sido creados con el fin de reconocer y explorar un lugar o entorno donde una persona no pueda o deba acceder ya sea por motivos de capacidad, practicidad o seguridad. Por este motivo, en función de las necesidades de desplazamiento, existen diferentes sistemas de motricidad, como son por ejemplo, los bípedos, cuadrúpedos, con ruedas, tracción oruga, acuáticos/sumergibles, aéreos, etc. En cuanto a la forma de control, los hay manejados por control remoto cableado o inalámbrico, habiendo equipos más sofisticados, que gracias a aplicaciones de Inteligencia Artificial, están preparados para desplazarse y tomar decisiones de forma autónoma. Algunos de los tipos de robots exploradores más conocidos son los espaciales, de minas, de rescate en catástrofes, de tuberías, submarinos, y de suelos.

Tanto en el ámbito académico como en la industria existen trabajos, proyectos, e implementaciones comerciales similares al presente trabajo, como por ejemplo:

- El prototipo robótico de exploración minera publicado en varios artículos [1], [2], e impulsado por el Instituto de Automática de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de San Juan en el marco de un convenio con la Comisión Nacional de Energía Atómica y el Gobierno argentino [3].
- El robot de exploración terrestre denominado Geobot [4] desarrollado por los ingenieros Nelson Dario García Hurtado y Melvin Andrés González

Pino, de la universidad de Pamplona, capaz de realizar reconocimiento de zonas y manipulación de muestras de manera autónoma o asistida.

- El robot minero MIN-SIS 1.0 SDG-STR [5] desarrollado por los ingenieros Hernán L. Helguero Velásquez y Rubén Medinaceli Tórrez de la Universidad Técnica de Oruro, capaz de detectar gases, almacenar datos locales y enviar video e imágenes al puesto de mando.
- Spot [6], desarrollado por Boston Dynamics, un robot explorador cuadrupedo de propósito general capaz de explorar, almacenar y enviar información en tiempo real.
- BIKE [7], desarrollado por Waygate Technologies, un robot con ruedas magnéticas, muy utilizado en la industria de petróleo y gas entre otras, capaz de desplazarse por el interior de tuberías para poder realizar inspecciones y comunicar hallazgos.

1.3. Alcance y objetivos

A continuación se detallan las funcionalidades incluidas en el alcance del trabajo.

- Sistema de desplazamiento terrestre.
- Operaciones de exploración
 - Medición de humedad ambiental.
 - Medición de temperatura ambiental.
 - Medición de presión ambiental.
 - Medición de luminosidad ambiental.
- Visualización de estado de exploración (lecturas de los sensores).
- Sistema de control por medio de un joystick cableado.

Queda fuera del alcance:

- Locomoción por cualquier otro medio que no sea terrestre.
- Cualquier otra función no contemplada en este alcance.

1.4. Requerimientos

A continuación se listan los requerimientos del producto:

1. Requerimientos funcionales

- a) El sistema debe contar con funciones de desplazamiento para poder moverse hacia adelante y atrás, y poder girar radialmente un ángulo de 360 grados.
- b) El sistema debe ser capaz de realizar las siguientes operaciones de exploración:
 - Medición de humedad ambiental.
 - Medición de temperatura ambiental.

- Medición de luminosidad ambiental.
 - Medición de presión ambiental.
 - c) El sistema debe poder ser controlado a distancia mediante un joystick para que el dispositivo pueda realizar sus movimientos. En caso de que alguna de sus operaciones de exploración requiera algún otro mecanismo de control, el mismo también será integrado en el joystick.
 - d) El sistema debe proveer un mecanismo de visualización de las operaciones de exploración al usuario que controla el dispositivo para poder ver el estado y lectura de las operaciones de exploración.
 - La interfaz de usuario debe permitir visualizar las lecturas de cada uno de los sensores.
 - Debe haber una pequeña leyenda de la magnitud que se está midiendo y la unidad utilizada junto con el valor.
2. Requerimientos no funcionales
- a) La arquitectura del producto debe ser robusta y tolerante a fallas.
 - b) A fin de maximizar la mantenibilidad, la arquitectura del producto debe estar modularizada para permitir que los diferentes módulos puedan ser integrados y orquestados separadamente.

Capítulo 2

Introducción específica

Esta sección presenta una breve introducción técnica a las herramientas hardware y software utilizadas en el trabajo.

2.1. Tecnologías de hardware utilizadas

2.1.1. Espressif ESP32

ESP32 [8] es una serie de microcontroladores embebidos en un chip con Wi-Fi y Bluetooth integrados, de bajo costo y consumo, desarrollado por *Espressif Systems*. Emplea dos cores Xtensa® 32-bit LX6 CPU, incluye interruptores de antena, amplificador de potencia, amplificador de recepción de bajo ruido, un co-procesador ULP (Ultra Low Power), módulos de administración de energía y varios periféricos. En la siguiente imagen (2.1) se puede apreciar la placa ESP32-WROOM-32D [9] utilizada para el desarrollo del presente trabajo.



FIGURA 2.1. Microcontrolador ESP32-WROOM-32D.

2.1.2. Sensor de temperatura y humedad DHT11

El DHT11 [10] es un sensor digital de temperatura y humedad relativa de bajo costo y fácil uso. Integra un sensor capacitivo de humedad y un termistor para medir el aire circundante, y muestra los datos mediante una señal digital en el pin de datos (no posee salida analógica). Entre otras aplicaciones se lo suele utilizar principalmente en aplicaciones relacionadas al control automático de temperatura, aire acondicionado y monitoreo ambiental en agricultura. En la figura 2.2 se puede apreciar una imagen del componente.

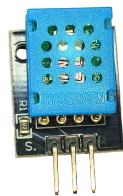


FIGURA 2.2. Sensor DHT11.

2.1.3. Sensor de presión BMP280

El BMP280 [11] es un sensor de presión barométrica absoluta, especialmente factible para aplicaciones móviles que puede ser utilizado con I2C o SPI. Permite alta precisión y linealidad, estabilidad a largo plazo, alta robustez a un muy bajo consumo. En la figura 2.3 se puede apreciar una imagen del componente.



FIGURA 2.3. Sensor BMP280.

2.1.4. Fotorresistor como sensor de luminosidad

El fotorresistor es una resistencia eléctrica que varía su valor en función de la cantidad de luz que incide sobre su superficie. Cuando el fotorresistor no está expuesto a radiaciones luminosas, los electrones están firmemente unidos en los átomos que lo conforman, por lo que alcanza su máxima resistencia eléctrica, y cuando sobre él inciden radiaciones luminosas, esta energía libera los electrones con lo cual el material se vuelve más conductor, y se disminuye su resistencia. En la figura 2.4 se puede apreciar una imagen del componente.

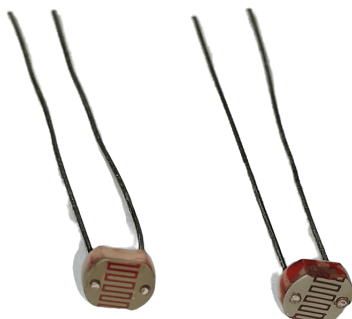


FIGURA 2.4. Fotorresistor.

2.1.5. Joystick analógico

El módulo de joystick analógico [12] está construido sobre el montaje de dos potenciómetros en un ángulo de 90 grados. Los potenciómetros están conectados a una palanca corta centrada por resortes. Este módulo produce una salida de alrededor de 2,5 Volts cuando la palanca se encuentra en reposo (en el centro), mientras que al desplazarse hará que la salida varíe de 0 a 5 Volts dependiendo de su posición. La obtención de los valores en Volts se obtiene tras convertir las lecturas en niveles lógicos mediante el módulo ADC (conversor analógico digital) [13] del microcontrolador ESP32. En la figura 2.5 se puede apreciar una imagen del componente.



FIGURA 2.5. Joystick analógico.

2.1.6. Display LCM1602A

El display LCM1602A [14] consta de una pantalla de cristal líquido que permite representar dos filas con hasta 16 caracteres alfanuméricos en cada una y dado que se encuentra integrada a una interfaz adaptadora I2C puede ser controlada por este protocolo. En la figura 2.6 se puede apreciar una imagen del componente.

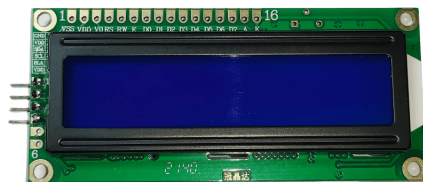


FIGURA 2.6. Display LCM1602A.

2.1.7. Motores de corriente continua

El motor DC (corriente continua) [15] es un electromotor que transforma energía eléctrica en energía mecánica. Estos motores operan con un voltaje entre 3 y 6 Volts, corriente de 150 mA, permiten una velocidad de entre 90 y 200 RPM y un torque de entre 0,15 Nm y 0,60 Nm. En la figura 2.7 se puede apreciar una imagen del componente.



FIGURA 2.7. Motor de corriente continua.

2.1.8. Módulos L298N

...

2.1.9. Baterías de Li-Ion 3.7 V

...

2.1.10. Baterías AA 1.5 V

...

2.1.11. Plaquetas genericas

...

2.1.12. Cables de conexion DuPont

...

2.1.13. Board Pin Headers para montaje de componentes y cables

...

2.1.14. Interruptores de On-Off

...

2.1.15. Porta-pilas de On-Off

...

2.1.16. Ruedas

...

2.2. Tecnologías de software utilizadas**2.2.1. Marco de trabajo ESP-IDF**

Espressif Systems proporciona recursos básicos de hardware y software para ayudar a los desarrolladores de aplicaciones a realizar sus ideas utilizando el hardware de la serie ESP32. El framework de software de Espressif está destinado al desarrollo de aplicaciones de IoT (Internet de las cosas) con Wi-Fi, Bluetooth, administración de energía y varias otras características del sistema. Sus componentes son:

1. Toolchain, utilizado para compilar el código para ESP32.
2. Build tools, que provee utilidades como CMake [16] y Ninja [17] para construir la aplicación completa para ESP32.
3. ESP-IDF [18], que brinda la API de desarrollo para ESP32 y scripts para ejecutar Toolchain.

Además de las herramientas mencionadas se utilizó el conjunto de bibliotecas y drivers provistos por el proyecto ESP-IDF-Lib [19] basados en el framework ESP-IDF.

En la figura 2.8 se puede apreciar una imagen del proceso de desarrollo y despliegue usando el framework ESP-IDF.

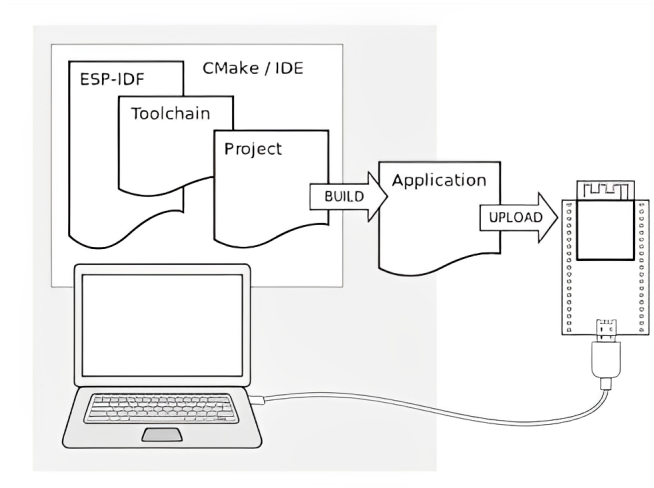


FIGURA 2.8. Proceso de desarrollo utilizando ESP-IDF¹.

2.2.2. Plataforma Docker

Docker [21] es un proyecto de código abierto que automatiza el despliegue de aplicaciones dentro de contenedores de software, proporcionando una capa adicional de abstracción y automatización de virtualización de aplicaciones en múltiples sistemas operativos. Docker utiliza características de aislamiento de recursos del kernel Linux, tales como cgroups y espacios de nombres (namespaces) para permitir que contenedores livianos independientes se ejecuten en paralelo de manera aislada evitando la sobrecarga de iniciar y mantener máquinas virtuales.

2.2.3. Visual Studio Code

Visual Studio Code [22] es un editor de código fuente desarrollado por Microsoft para Windows, Linux, macOS y Web. Incluye soporte para la depuración, control integrado de Git, resaltado de sintaxis, finalización inteligente de código, fragmentos y refactorización de código.

2.2.4. Sistema operativo Ubuntu

Ubuntu [23] es una distribución Linux basada en Debian GNU/Linux y patrocinado por Canonical, que incluye principalmente software libre y de código abierto. Puede utilizarse en ordenadores y servidores, está orientado al usuario promedio, con un fuerte enfoque en la facilidad de uso y en mejorar la experiencia del usuario.

¹Imagen tomada de [20]

Capítulo 3

Diseño e implementación

Esta sección presenta los detalles técnicos del diseño e implementación de las diferentes funcionalidades del producto, la arquitectura hardware y software, y finalmente la interfaz de usuario para el control y reporte de las operaciones del robot.

El proyecto fue realizado siguiendo una metodología basada en crear un prototipo funcional con una arquitectura escalable que cumpla con alcance básico especificado en el plan de proyecto, y una vez conseguido agregar en lo posible y de acuerdo a la capacidad, funcionalidades adicionales. De esta forma, una vez que se logró el alcance básico, considerado como la versión v1.0 del producto, se continuó con el desarrollo y se agregó la funcionalidad adicional de control inalámbrico por medio de un joystick, en lo que se considera la versión v2.0 del mismo.

En las siguientes subsecciones se detallan los detalles del diseño e implementación realizados para ambas versiones.

3.1. Arquitectura de software del sistema

Con el fin de poder lograr una arquitectura de software modular, se implementaron diferentes componentes software y servicios que abstraen el acceso a los módulos de hardware (explicados en la siguiente sección) y permitieron un escalamiento fácil de funcionalidades en la expansión de las funcionalidades del robot entre su versión v1.0 y la v2.0.

3.1.1. Arquitectura y diseño de componentes en la versión v1.0

A continuación podemos apreciar la arquitectura de software del sistema en su versión v1.0 y el detalle de sus componentes y servicios.

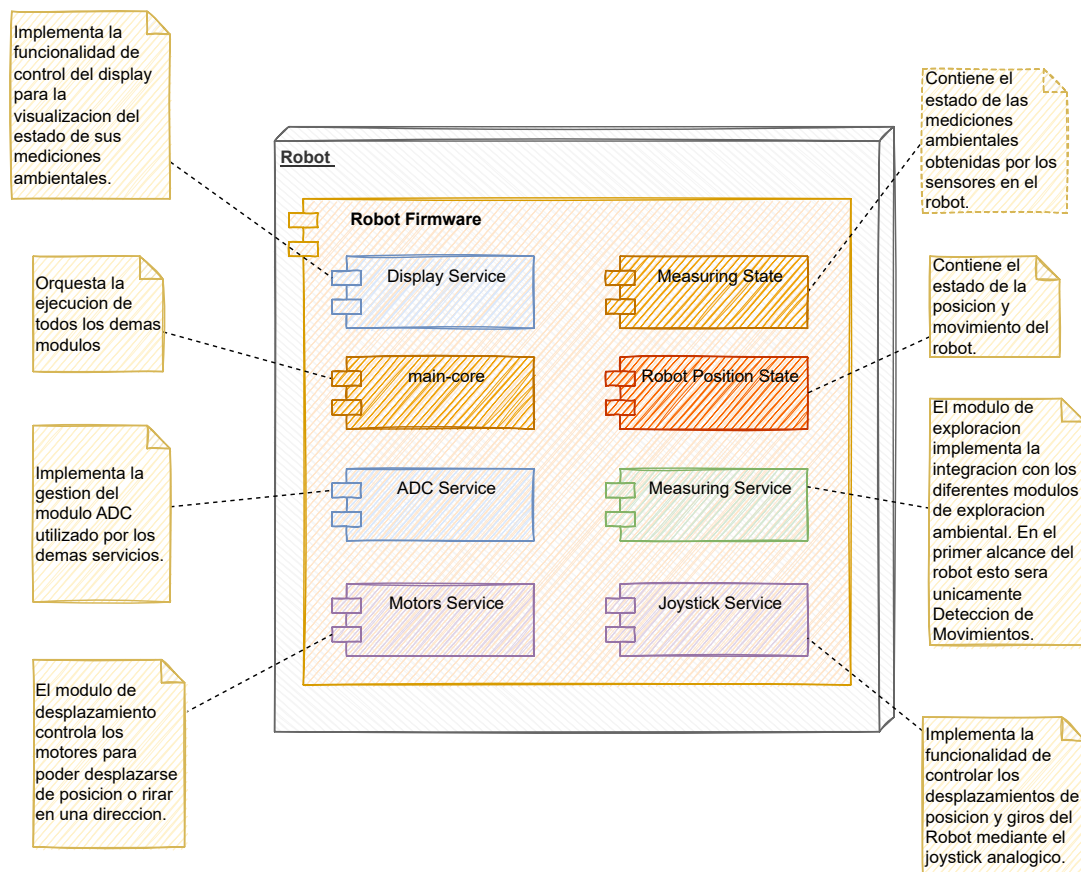


FIGURA 3.1. Arquitectura global.

Los componentes y servicios de software del Robot en la versión v1 son los siguientes:

1. Componentes de software

- a) main-core: orquesta las diferentes tareas desde las que se invocan los demás componentes de software.
- b) Measuring Service: abstrae el acceso a los módulos de medición de temperatura, humedad, presión y luminosidad.
- c) Measuring State: mantiene el estado de cada uno de los parámetros ambientales medidos.
- d) Robot Position State: mantiene el estado del movimiento actual del robot.
- e) ADC Service: abstrae el acceso a los módulos que hacen uso de los canales que requieren conversiones ADC (Analógico/Digital), como el joystick analógico y el fotoresistor.
- f) Motors Service: abstrae el acceso al módulo de control de motores.
- g) Display Service: abstrae el acceso al módulo de control del display mediante I2C.
- h) Joystick Service: abstrae el acceso al módulo de control del joystick.

2. Servicios (tareas)

- a) Display Task
- b) Measuring Task
- c) Joystick Task
- d) Motors Task

3.1.2. Arquitectura y diseño de componentes en la version v2.0

Luego de expandir su funcionalidad, los componentes y servicios de software se separaron físicamente en el hardware del robot y el del joystick, agregándose además los necesarios para la comunicación inalámbrica. A continuación podemos apreciar la arquitectura de software del sistema en su versión v2.0 y el detalle de sus componentes y servicios.

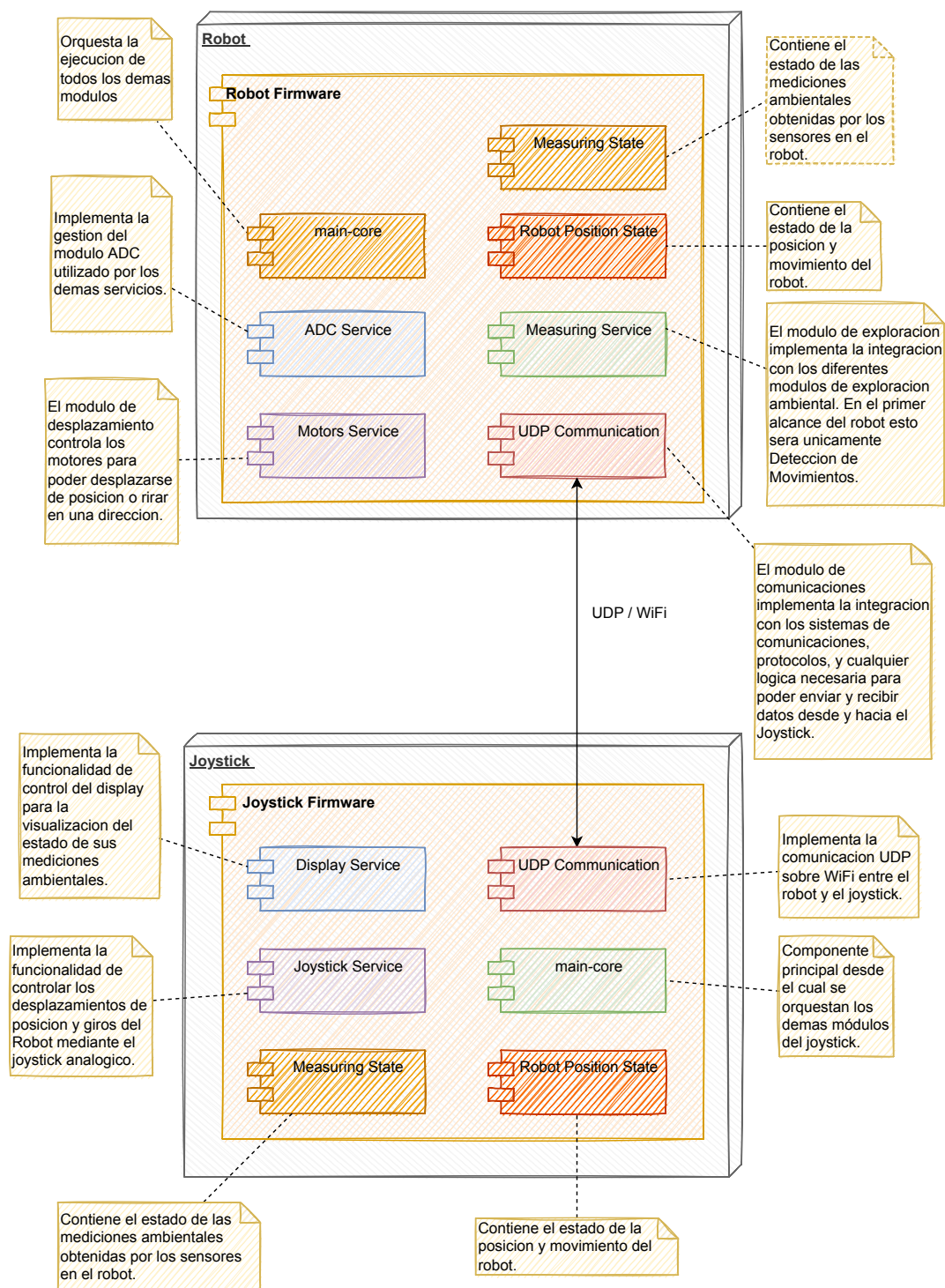


FIGURA 3.2. Arquitectura global.

Los componentes de software y servicios del robot son:

1. Componentes de software
 - a) main-core
 - b) Measuring Service
 - c) Measuring State

- d) Robot Position State
- e) ADC Service
- f) Motors Service
- g) WIFI Service
- h) UDP Service

2. Servicios (tareas)

- a) Measuring Task
- b) Motors Task
- c) UDP Server Task

Los componentes de software y servicios del joystick son:

1. Componentes de software

- a) main-core
- b) Measuring State
- c) Robot Position State
- d) UDP Service

2. Servicios (tareas)

- a) Display Task
- b) Joystick Task
- c) UDP Server Task

3.2. Implementacion de los modulos

Los macro componentes de hardware presentes en la arquitectura de la version v2.0 son el robot y el joystick, los cuales constituyen dos sistemas embebidos independientes implementados con dos microcontroladores ESP32, integrados entre si por medio de una red WiFi y una comunicacion UDP. Los modulos hardware desarrollados son los siguientes. La arquitectura de hardware del sistema esta compuesta por los siguientes modulos:

- En el robot:
 - Control de los motores DC.
 - Control de los sensores de medicion (DHT11, BMP280 y fotoresistor).
 - Gestion de la comunicacion inalambrica via WIFI (en la version v2.0).
- En el joystick:
 - Control del display.
 - Control del joystick.
 - Gestion de la comunicacion inalambrica via WIFI (en la version v2.0).

La integración de los mismos se realizó mediante el diseño y construcción de una placa integradora central, que conecta los dispositivos hardware con el microcontrolador ESP-32.

3.2.1. Control de la red WIFI

El módulo de red WiFi está integrado en el chip ESP32 en el cual se soportan múltiples features [24] por lo cual a nivel hardware no fue necesario realizar ningún conexionado. A nivel software, la gestión del módulo WiFi se encuentra incluida en el SDK ESP-IDF, y el acceso al mismo se realiza desde el módulo ADC 2 [13]. Por este motivo, cuando el sistema embebido utiliza el módulo WiFi, el uso del ADC2 queda restringido a esta funcionalidad por lo cual cualquier otro dispositivo que deba hacer uso del ADC debe ser configurado para utilizar el ADC1, como por ejemplo los módulos de joystick y detección de luminosidad, explicados en las siguientes secciones.

El desarrollo del prototipo se basó en el siguiente código de ejemplo [25] provisto por ESP-IDF y la configuración del *soft access point WiFi* se realizó en base a los parámetros de red detallados en la siguiente tabla 3.1:

TABLA 3.1. Configuración de AP WiFi

Parametro	Valor
SSID	Robot
password	Robot

3.2.2. Control del joystick analogico

Para el desarrollo de este prototipo se utilizó el SDK ESP-IDF y se configuró el módulo ADC1 de acuerdo a los siguientes detalles en la tabla 3.3:

TABLA 3.2. Conexionado joystick

Channel	Unit	Pin GPIO
6	1	34
7	1	35

A continuación se puede apreciar el conexionado físico en la figura 3.3.

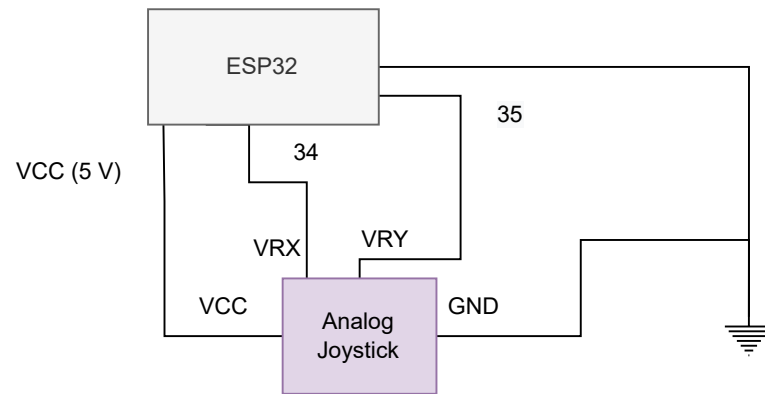


FIGURA 3.3. Conexionado joystick.

3.2.3. Medición de valor de luminosidad

Para el desarrollo de este prototipo se utilizó el SDK de ESP-IDF y se configuro el modulo ADC1 de acuerdo a los detalles provistos en la siguiente tabla 3.3

TABLA 3.3. Conexionado fotoresistor

Channel	Unit	Pin GPIO
0	1	36

A continuacion se puede apreciar un diagrama de su conexionado fisico en la figura 3.4.

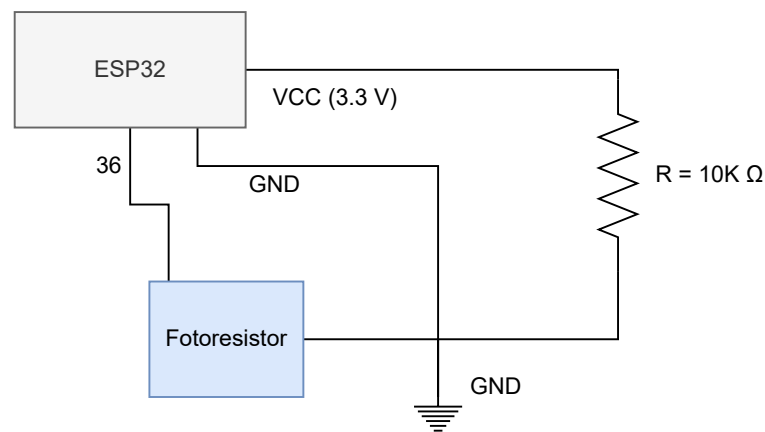


FIGURA 3.4. Conexionado fotorresistor.

3.2.4. Medición de temperatura y humedad

Para el desarrollo de este modulo se utilizó la biblioteca de código ESP-IDF-Lib Components Library [19] que provee el soporte para gestionar el DHT11. Para acceder a las lecturas del dispositivo se abstrajo el mismo mediante el componente Measuring Service, el cual es invocado por la tarea Measuring Task y el estado de la lectura es almacenado en el componente Measuring State. A continuación se puede apreciar el conexionado del prototipo en la figura 3.5.

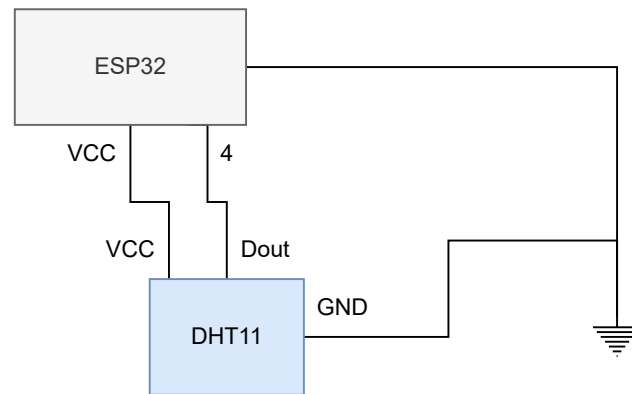


FIGURA 3.5. Circuito del conexionado DHT11.

3.2.5. Medición de presión

Para el desarrollo de este modulo se utilizó el framework ESP-IDF y la biblioteca de código ESP-IDF Components que provee el soporte para gestionar el dispositivo BMP280 por medio del protocolo I2C. El driver es inicializado en el componente main-core para ser posteriormente invocado desde el Measuring Service en la tarea Measuring Task. Sus lecturas son guardadas en el Measuring State. A continuación se puede apreciar el conexionado del prototipo en la figura 3.6.

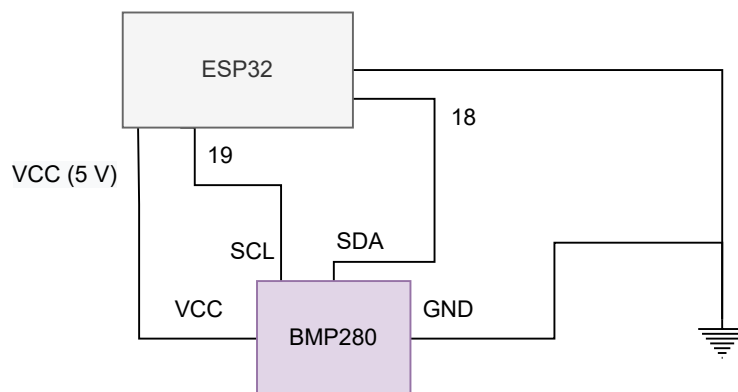


FIGURA 3.6. Conexionado BMP280.

3.2.6. Control de motores DC

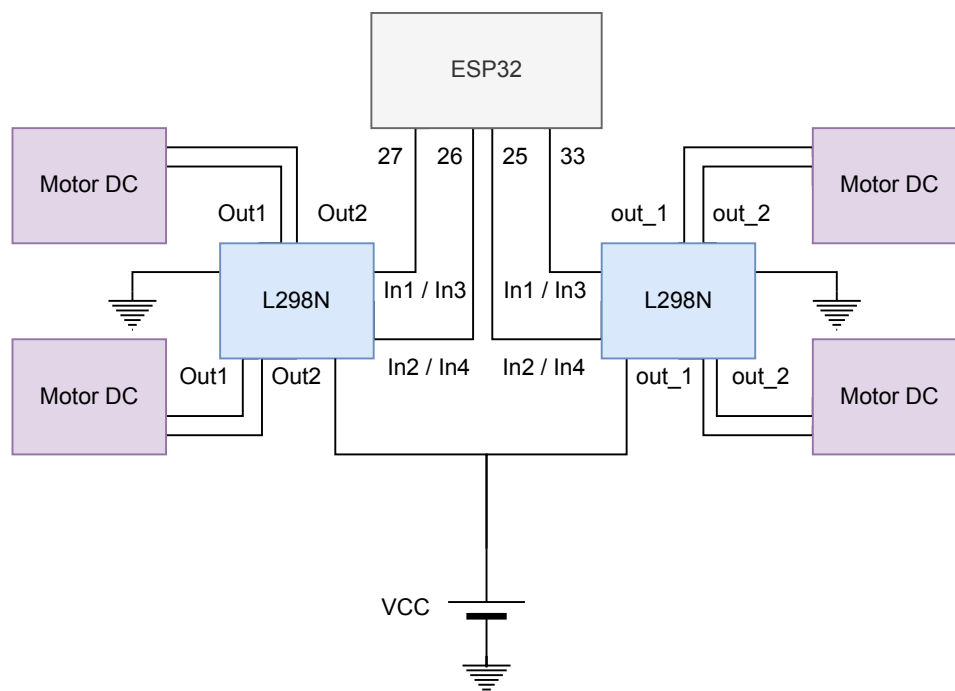


FIGURA 3.7. Conexionado motores.

3.2.7. Control del display

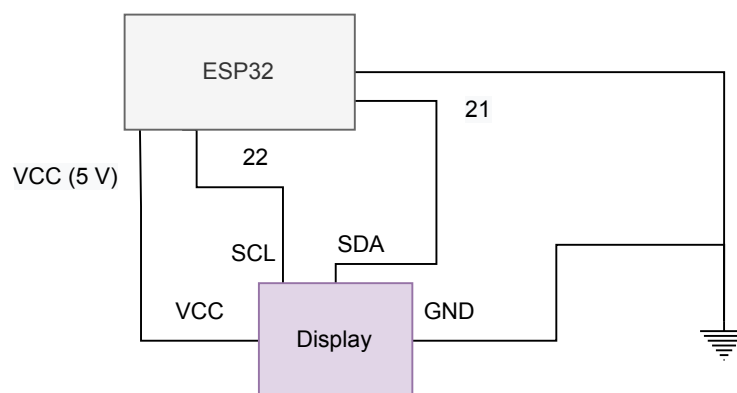


FIGURA 3.8. Conexionado display.

3.3. Arquitectura de hardware

3.3.1. Conexionado logico

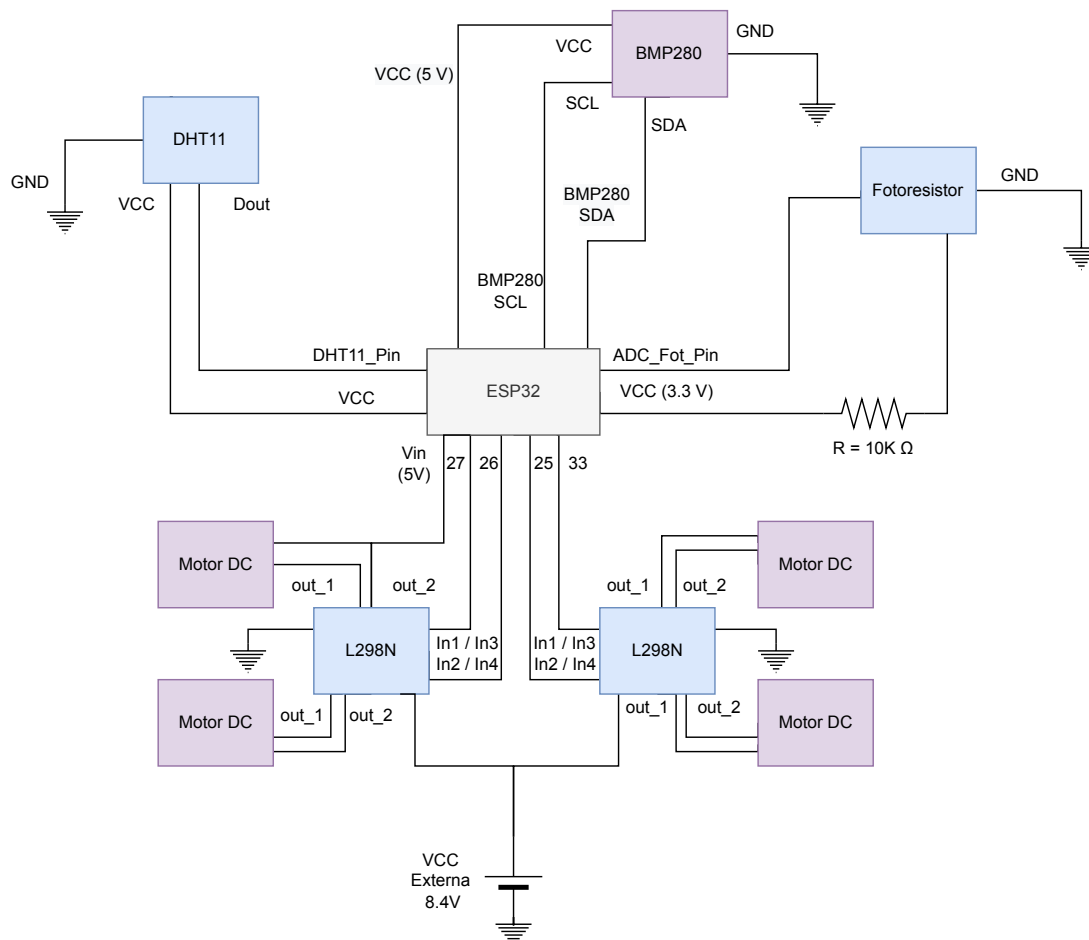


FIGURA 3.9. Conexionado del robot.

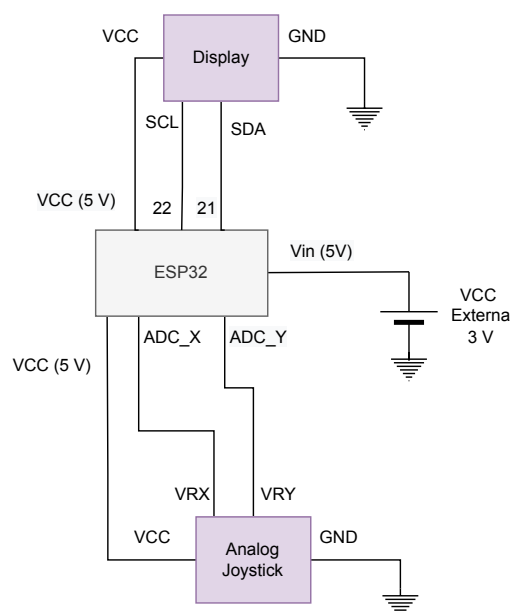


FIGURA 3.10. Conexionado del joystick.

3.3.2. Conexionado físico del robot

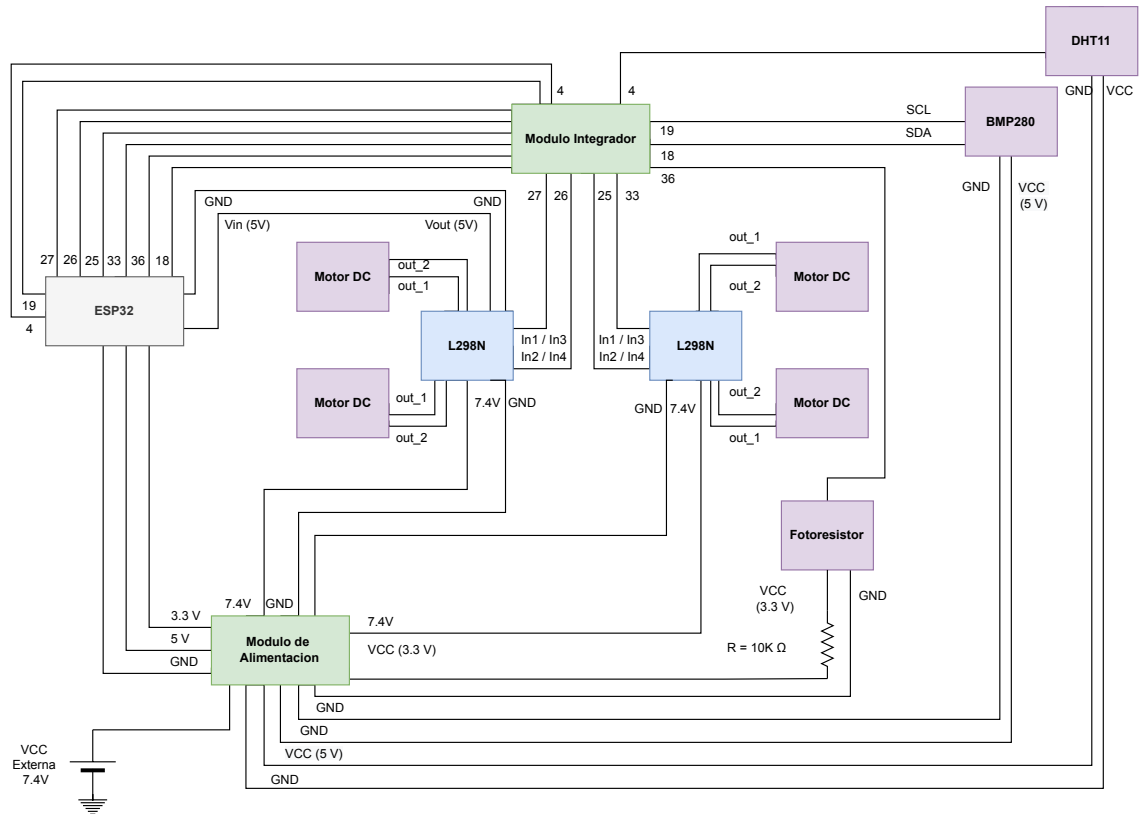


FIGURA 3.11. Conexionado físico del robot.

3.4. Ciclo de desarrollo

Durante el ciclo de desarrollo se utilizaron las herramientas explicadas en el capítulo anterior, y se creó por cada prototipo una imagen Docker extendiendo la de espressif/idf [26]. El proceso de compilación y despliegue está explicado en la documentación técnica del producto [27].

Capítulo 4

Ensayos y resultados

Esta sección presenta los diferentes prototipos realizados para determinar la viabilidad de cada una de las funcionalidades provistas, la metodología de desarrollo, testing, y finalmente los entregables finales del trabajo.

4.1. Proceso de desarrollo y aseguramiento de calidad

Para el proceso de desarrollo se realizaron pruebas de concepto de las diferentes funcionalidades utilizando como materiales la bibliografía encontrada en internet, las hojas de datos y los ejemplos de código provistos por el SDK y librerías empleadas. Una vez logrado el objetivo funcional de componente se optimizó y encapsuló cada módulo para ser integrado de manera individual a un prototipo integrador sin afectar el funcionamiento de cualquier otro módulo. De esta manera se desarrolló un prototipo integrador como la sumatoria de todos los módulos de forma incremental, probándose por regresión que los módulos ya integrados previamente siguieran funcionando de forma óptima.

Una vez logrado el prototipo integrador con todas las funcionalidades de la versión v1.0 se prosiguió a la expansión en hardware del mismo para crear la versión v2.0 extrayendo los módulos de joystick y display -que serían posteriormente agregados al sistema embebido del joystick- e incorporando los módulos de conectividad UDP sobre WiFi.

Tras lograr la versión v2.0 se repitió el proceso de control de calidad de los diferentes módulos ya integrados.

A continuación se detallan las diferentes pruebas realizadas

4.2. Verificación técnica de los diferentes módulos

Todos los módulos fueron probados mediante una inspección visual durante el proceso de pruebas de concepto.

4.2.1. Verificación del módulo de joystick

Se verificó visualmente que los valores del joystick analógico puedan ser leídos apropiadamente, y que sean representativos y relevantes con la dirección del movimiento de la palanca sobre sus coordenadas X e Y.

4.2.2. Verificacion del modulo de control del display

Se verifico visualmente que el display represente los caracteres programados en la prueba de concepto con una intensidad de luz aceptable para poder leerlos apropiadamente.

4.2.3. Verificacion del modulo de control de motores

Se verifico visualmente que individualmente el motor pudiera girar en ambos sentidos. Luego, al implementarse los cuatro motores con sus ruedas, se probó que se pueda realizar los giros en todas las direcciones.

4.2.4. Verificacion del modulo de medicion de temperatura y humedad

Se verifico visualmente que los valores obtenidos por el sensor DHT11 fueran cercanos a lo esperado en relacion a la temperatura en el interior del lugar de experimentacion y la humedad en un valor cercano a lo reportado en Google.

4.2.5. Verificacion del modulo de medicion de presion atmosferica

Se verifico visualmente que el valor obtenido por el sensor BMP280 fuera cercano a lo esperado en relacion al valor reportado por Google.

4.2.6. Verificacion del modulo de medicion de luminosidad

Se verifico visualmente que los valores obtenidos del fotorresistor, tras ser transformados a valores absolutos porcentuales, guarden relacion con el nivel de luminosidad ambiental del interior de lugar de experimentacion.

4.2.7. Verificacion del modulo de comunicacion UTP sobre WiFi

Por medio de un dos programas UDP, uno cliente y uno servidor, se probó el establecimiento de la comunicacion UDP entre dos ESP32. Luego se incorpore el servicio de comunicaciones UDP en el robot y mientras que desde el programa cliente se enviaban las acciones representando las direcciones del movimiento a realizar (FORWARD, BACKWARD, LEFT, RIGHT) y se observo visualmente como el robot giraba sus ruedas en funcion de los comandos enviados. Finalmente se incorpore el modulo de comunicaciones en el joystick para enviar los comandos al robot cuando se realizaba dicho

4.3. Pruebas funcionales del producto

4.3.1. Prueba del modulo de medición de temperatura y humedad

Se compararon los valores medidos por el modulo de medicion de temperatura y humedad basado en el sendor DHT11 con los obtenidos a traves de un dispositivo de medicion de temperatura y humedad. Se realizo la medicion en diferentes contextos:

- En el interior de una vivienda.
- En el exterior un dia calido.
- En el exterior un dia frio.

4.3.2. Prueba del modulo de medición de presión

Se compararon los valores medidos por el modulo de medicion de presion basado en el sensor BMP280 con los obtenidos a traves de un dispositivo de medicion de temperatura y humedad. Se realizo la medicion en un solo lugar con la misma altitud a nivel del mar.

4.3.3. Prueba del modulo de medición de luminosidad ambiental

Se compararon los valores medidos por el modulo de medicion de luminosidad basado en un fotoresistor percibidos por el ojo humano sin utilizar ningun dispositivo de medicion. Se realizo la medicion en diferentes escenarios

- En interiores con luz concentrada sobre el sensor.
- En interiores con luz ambiental no concentrada.
- En interiores con a oscuras
- En el exterior un dia calido.
- En el exterior un dia frio.

Los resultados mostraron que los valores porcentuales indicados por el modulo de medicion de luminosidad son consistentes con los niveles de luz detectados por el ojo humano.

4.3.4. Prueba del control y desplazamiento del robot

Se verifico el control y desplazamiento del robot de forma visual por medio de accionar el joystick en las diferentes coordenadas (X;Y) y controlar que la direccion del movimiento del robot sea acorde a las mismas.

4.3.5. Prueba del modulo de visualización de display

Se verifico el funcionamiento del display visualizando las lecturas de los valores sensados y transmitidos por el robot. Se verifico que

- las lecturas sean nitidas y entendibles
- las unidades de medida esten presentes
- haya un detalle de lo que se esta midiendo acompaniando las lecturas y la unidad de medida
- el nivel de luminosidad sea optimo para permitir la lectura independiente de la iluminacion ambiental
- se presenten las lecturas de todos los valores observados

4.4. Reportes de testing

...

4.5. Documentacion del producto

Se desarrollo la documentacion del producto compuesta de los siguientes entregables

- Documentacion tecnica [27].
- Manual de usuario [28].

Capítulo 5

Conclusiones

Conclusiones del trabajo...

- ¿Cuál es el grado de cumplimiento de los requerimientos?
- ¿Cuán fielmente se pudo seguir la planificación original (cronograma incluido)?
- ¿Se manifestó algunos de los riesgos identificados en la planificación? ¿Fue efectivo el plan de mitigación? ¿Se debió aplicar alguna otra acción no contemplada previamente?
- Si se debieron hacer modificaciones a lo planificado ¿Cuáles fueron las causas y los efectos?
- ¿Qué técnicas resultaron útiles para el desarrollo del proyecto y cuáles no tanto?

5.1. Próximos pasos

Acá se indica cómo se podría continuar el trabajo más adelante.

Bibliografía

- [1] Latam Mining. *Robots y minería: Gobierno argentino quiere implementarlos*. URL: <https://www.latam-mining.com/robots-y-mineria-gobierno-argentino-quiere-implementarlos/>.
- [2] Diario de Cuyo. *Gobierno pone la mira en el desarrollo de robots para la actividad minera*. URL: <https://www.diariodecuyo.com.ar/politica/Gobierno-pone-la-mira-en-el-desarrollo-de-robots-para-la-actividad-minera-20200202-0052.html>.
- [3] Universidad Nacional de San Juan. *Robots en la minería*. URL: http://www.unsj.edu.ar/home/noticias_detalle/4810/1.
- [4] Ing. Nelson Dario García Hurtado e Ing. Melvin Andrés González Pino. *Robot de exploración terrestre Geobot*. URL: https://www.unipamplona.edu.co/unipamplona/portallG/home_40/recursos/01_general/revista_1/09102011/v01_09.pdf.
- [5] Ing. Hernán L. Helguero Velásquez1 e Ing. Rubén Medinaceli Tórrez. *Robot Minero: Sistema Detector de Gases utilizando Sensores en Tiempo Real MIN – SIS 1.0 SDG-STR*. URL: http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2519-53522020000100003.
- [6] Boston Dynamics. *Spot*. URL: <https://www.bostondynamics.com/products/spot>.
- [7] Waygate Technologies. *BIKE - An advanced crawler robot for remote visual inspection*. URL: <https://www.bakerhughes.com/waygate-technologies/robotic-inspection/bike>.
- [8] Espressif. *ESP32*. URL: <https://www.espressif.com/en/products/socs/esp32>.
- [9] Espressif. *ESP32-WROOM-32D Datasheet*. URL: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wroom-32d_esp32-wroom-32u_datasheet_en.pdf.
- [10] Mouser. *DHT11 datasheet*. URL: <https://www.mouser.com/datasheet/2/758/DHT11-Technical-Data-Sheet-Translated-Version-1143054.pdf>.
- [11] Bosch. *BMP280 datasheet*. URL: <https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/BST-BMP280-DS001-11.pdf>.
- [12] Handson Technology. *PS2 Joy Stick for Arduino/Raspberry*. URL: <http://www.handsontec.com/dataspecs/accessory/PS2-Joystick.pdf>.
- [13] Espressif. *Analog to Digital Converter (ADC)*. URL: <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/v4.4/esp32/api-reference/peripherals/adc.html>.
- [14] Handson Technology. *I2C Serial Interface 1602 LCD Module*. URL: http://www.handsontec.com/dataspecs/module/I2C_1602_LCD.pdf.
- [15] Adafruit. *DC Gearbox Motor - TT Motor -200RPM - 3 to 6VDC*. URL: https://media.digikey.com/pdf/Data%20Sheets/Adafruit%20PDFs/3777_Web.pdf.

- [16] CMake. *CMake*. URL: <https://cmake.org/>.
- [17] CMake. *Ninja*. URL: <https://cmake.org/cmake/help/latest/generator/Ninja.html>.
- [18] Espressif. *ESP-IDF Programming Guide | Get Started*. URL: <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/esp32/get-started/>.
- [19] Readthedocs by Ruslan V. Uss. *ESP-IDF Components library*. URL: <https://esp-idf-lib.readthedocs.io/en/latest/>.
- [20] Espressif Programing Guide. *ESP-IDF Get Started*. URL: <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/esp32/get-started/index.html>.
- [21] Docker. *Docker*. URL: <https://docker.com/>.
- [22] Visualstudio. *Visualstudio Code*. URL: <https://code.visualstudio.com/>.
- [23] Ubuntu. *Ubuntu*. URL: <https://ubuntu.com/>.
- [24] Espressif. *ESP-IDF WiFi*. URL: <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/stable/esp32/api-guides/wifi.html>.
- [25] Espressif. *ESP-IDF WiFi Sample Code*. URL: https://github.com/espressif/esp-idf/tree/v5.2.1/examples/wifi/getting_started/softAP.
- [26] Espressif. *Espressif Docker Image*. URL: <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/stable/esp32/api-guides/tools/idf-docker-image.html>.
- [27] Gonzalo Carreno. *Robot de exploracion ambiental - Documentacion Tecnica*. URL: https://github.com/kronleuchter85/cese_proyecto_especializacion/blob/main/docs/Documentacion-Tecnica.pdf.
- [28] Gonzalo Carreno. *Robot de exploracion ambiental - Manual de usuario*. URL: https://github.com/kronleuchter85/cese_proyecto_especializacion/blob/main/docs/Manual-De-Usuario-vFinal.pdf.