

## Esclavo Modbus Serial para automatización industrial con entradas y salidas analógicas y digitales

Martin G. Fleita <sup>a</sup>, Gian Madera Nigra <sup>a</sup>, Ing. Korpys Ricardo <sup>a</sup>, Ing. Alejandro Maxit <sup>a</sup>, Ing. Iurinic Mathias <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Misiones (UNaM), Oberá, Misiones, Argentina.

<sup>b</sup> GID-IE, FI-UNaM, Oberá, Misiones, Argentina.

e-mails: [Martinfleita4@gmail.com](mailto:Martinfleita4@gmail.com), [giannigra97@gmail.com](mailto:giannigra97@gmail.com), [alejandro.maxit@fio.unam.edu.ar](mailto:alejandro.maxit@fio.unam.edu.ar), [korpys@fio.unam.edu.ar](mailto:korpys@fio.unam.edu.ar), [gerardo.iurinic@fio.unam.edu.ar](mailto:gerardo.iurinic@fio.unam.edu.ar)

---

### Resumen

Un módulo esclavo es un dispositivo electrónico ampliamente utilizados en sistemas de automatización industrial. Este dispositivo recibe comandos de parte de otro dispositivo que ocupa el rol de maestro para posteriormente procesar los datos recibidos, ejecutar el comando y responder al maestro. El módulo esclavo en cuestión se comunica mediante el protocolo industrial Modbus sobre RS485, para operar posee 4 entradas digitales, 4 entradas analógicas y 8 salidas digitales. En el presente informe se describe el desarrollo llevado a cabo para el diseño del módulo subdito. También se mencionan los criterios que se han tenido en cuenta para la elección de componentes y el diseño del circuito, haciendo especial enfoque en que el dispositivo está pensado para trabajar en la industria y deben tomarse las medidas correspondientes.

**Palabras Clave** – Automatización Industrial, Modbus, RS485, Redes de sensores, Protocolo de comunicación.

### 1 Introducción

En el contexto de la comunicación industrial, un "esclavo Modbus" hace referencia a un dispositivo que actúa como una unidad de control o adquirente de datos que responde a las solicitudes enviadas por un "maestro Modbus". Modbus es un protocolo de comunicación estándar utilizado comúnmente en sistemas de automatización y control para permitir la transferencia de datos entre dispositivos electrónicos.

El protocolo Modbus sobre línea serial sigue una estructura maestra/esclavo, donde un dispositivo maestro (por ejemplo, un PLC, SCADA o un computador) envía solicitudes a uno o varios dispositivos esclavos. Los dispositivos esclavos, por otro lado, reciben las solicitudes del maestro y responden proporcionando los datos solicitados o llevando a cabo las acciones requeridas [12].

El dispositivo esclavo Modbus presentado en el presente informe se desarrolla en el marco de la asignatura "Proyecto y Diseño Electrónico" (ET546), de la carrera ingeniería electrónica, dicha asignatura tiene como objetivo integrar los conocimientos y habilidades adquiridas durante la carrera y plasmarlas en un proyecto relacionado con esta área. Las condiciones principales para el dispositivo en desarrollo es que permita transacciones Modbus por medio de un puerto RS485, que contenga 4 entradas analógicas, 4 entradas y 8 salidas digitales. Además, el dispositivo debe contar con la capacidad de poder configurar la dirección del esclavo y los parámetros de comunicación desde el dispositivo maestro mediante Modbus.

Para llevar a cabo el desarrollo del proyecto se tuvieron en cuenta criterios respecto a la selección de componentes y diseño para que el dispositivo sea adecuado para realizar sus funciones en entornos industriales.

## 2 Diseño del sistema propuesto

A continuación, se describen cuestiones relacionadas a la selección de componentes, el diseño de los circuitos de las distintas etapas y la elaboración del programa.

### 2.1 Unidad central de Procesamiento

Esta unidad es la responsable de la gestión de todos los subsistemas que componen el sistema, tales como adquisición de las señales en las etapas de entrada, generación de las señales de control para las etapas de salida. También es la unidad encargada de la comunicación, debe interpretar y procesar las solicitudes recibidas de partes del maestro Modbus.

Respecto a los requisitos de “hardware” esta unidad debe contar con al menos 4 entradas analógicas, 14 pines E/S de propósito general y un procesador capaz de soportar el procesamiento que requiere el sistema. También debe contar con puertos de comunicación UART e  $I^2C$ .

Luego de una investigación de los microcontroladores disponibles en el mercado se optó por un SMT32F103C8T6 el cual es un microcontrolador de 32 bits basado en la arquitectura ARM Cortex-M3, fabricado por la empresa STMicroelectronics [7]. A continuación, se presenta el esquema del circuito de soporte del microcontrolador desarrollado en base a las recomendaciones de su hoja de datos.

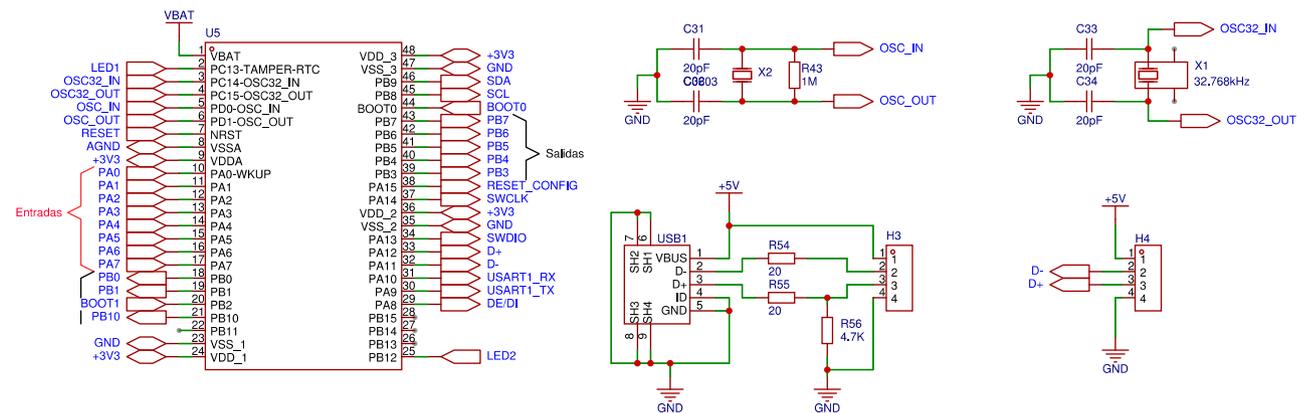


Figura 1: Circuito de soporte de Microcontrolador

## 2.2 Fuentes de alimentación

El dispositivo se alimenta con una fuente de 24 V de tensión continua, sin embargo, los componentes y etapas internas operan con niveles de tensión menores.

El microcontrolador debe alimentarse con una tensión de 3,3 V, la misma tensión con la cual se recomienda trabajar en sus pines de propósito general. Por otra parte, el ISO1540, el MAX485 y el puerto USB operan con tensiones de 5 V. Finalmente el circuito de acondicionamiento de las correspondientes entradas analógicas utiliza el amplificador operacional LM321 alimentado con una tensión de 12 V.

A partir de estos requerimientos se procede a diseñar el circuito de la etapa de alimentación, el primer lugar se utiliza un regulador conmutado para reducir la tensión de entrada de 24 V a 12 V, para dicha tarea se utilizó el integrado MP1584. Posteriormente para obtener tensiones de 5 V y 3,3 V se utilizaron los reguladores AMS1117 y RT9193 respectivamente, obteniendo así niveles de tensión estables y con bajo contenido de ruido. El resto de los componentes utilizados en adición a los reguladores fueron seleccionados y calculados en base a las recomendaciones de las hojas de datos [1][2][5].

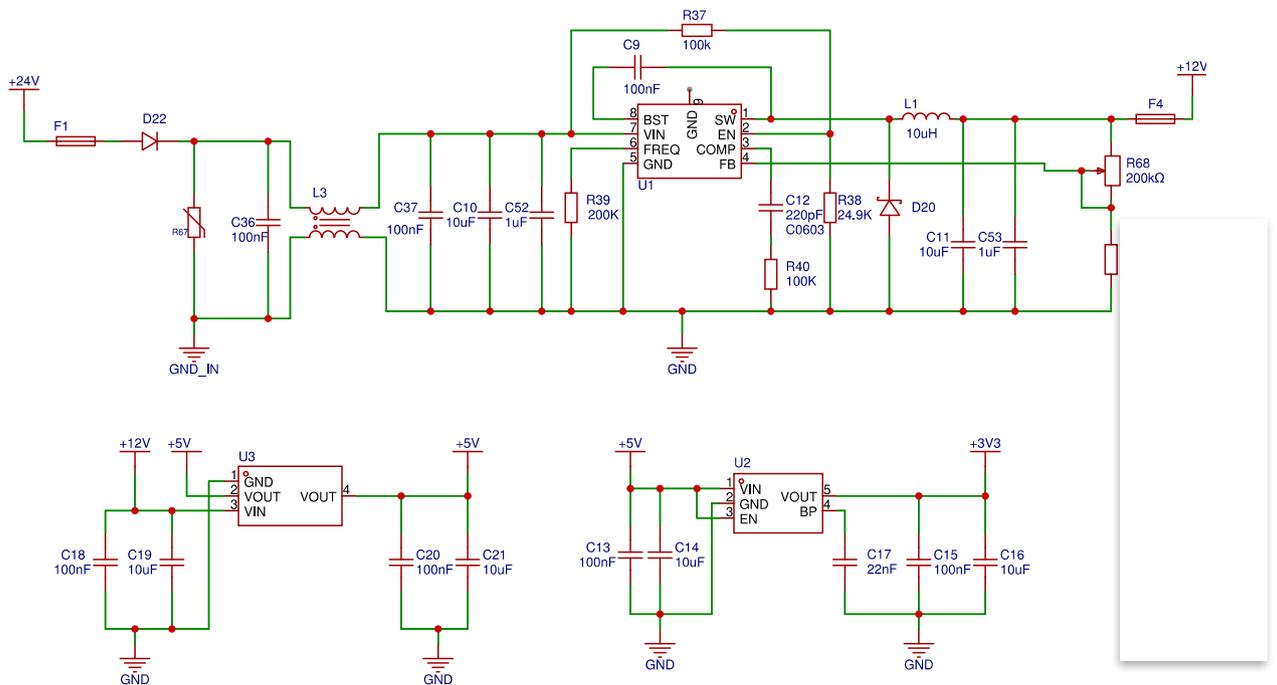


Figura 2: Esquemático etapa de alimentación.

Por otra parte, para proteger dichos reguladores de tensiones anómalas de la alimentación se adicionados componentes de protección como un diodo para proteger contra tensiones inversas, un varistor para proteger contra sobretensiones y un fusible térmico rearmarble (PPTC) para cortar la circulación de corriente en caso de sobrecarga.

### 2.3 Entradas analógicas

Estas entradas están pensadas para ser conectadas a sensores analógicos que emiten una señal que varía en función de la magnitud física que se encuentren midiendo, dicha señal opera dentro del rango de tensiones directas de 0 V a 10 V. En la entrada en cuestión se utilizó un amplificador operacional LM321 en configuración seguidor de tensión [11], el cual evita que el circuito de acondicionamiento y adquisición actúen como carga para el sensor. Para proteger la entrada contra sobre tensiones y tensiones inversas se utiliza un diodo Zener en antiparalelo a los bornes de entrada, junto con una resistencia limitadora de corriente cuya función es proteger al diodo Zener en caso de ser activado. Luego del seguidor de tensión hay un divisor resistivo conformador por los resistores R1 y R2 para acondicionar la señal de entrada a valores admisibles por el ADC del microcontrolador, finalmente se incorpora un filtro pasa bajos conformado por el resistor R1 y el capacitor conectado al pin del ADC y GND.

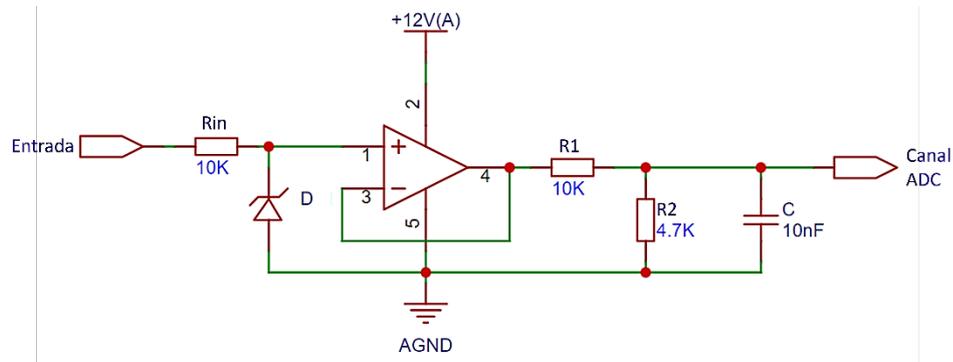


Figura 3: Circuito de entrada analógica.

### 2.4 Entradas digitales

En este tipo de entradas se suelen conectar detectores, pulsadores, paros de carrera, entre otros, los cuales trabajan con una tensión de 24 V de corriente continua, es por este motivo que las entradas deben soportar tensiones de hasta +/-30 V sin dañarse, además a cada una de estas entradas se incorpora aislación galvánica mediante un optoacoplador PC123 [10], en la entrada se sitúa una resistencia limitadora y un diodo en antiparalelo para desviar la corriente en caso de tensión inversa. A la salida del optoacoplador se ubica un LED con resistor *pull-up* al colector del foto-transistor en este mismo punto se conecta un pin de propósito general del microcontrolador.

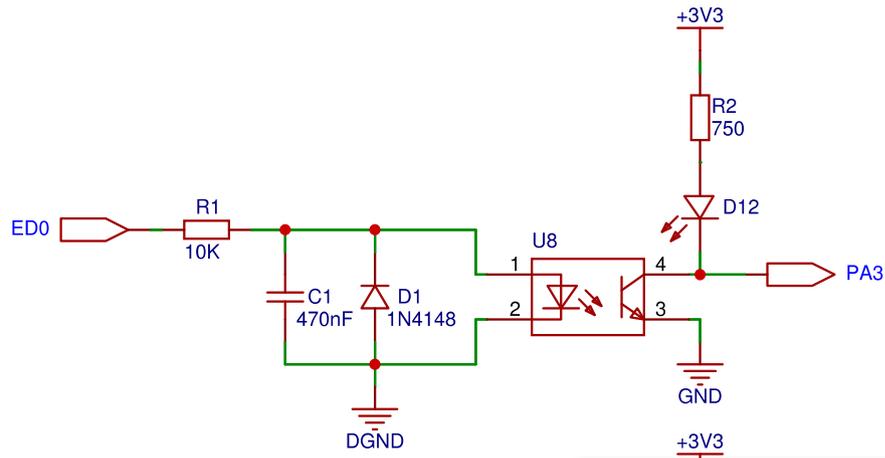


Figura 4: Esquemático entrada digital.

## 2.5 Salidas digitales.

Las salidas digitales son del tipo colector abierto, deben ser aptas para operar con cargas de 24 V y soportar el consumo que puedan imponer dichas cargas, las cuales en su mayoría son relés, electroválvulas, indicadores lumínicos, bocinas, entre otros. Es importante destacar que las cargas se conectan de la siguiente manera: el terminal positivo se conecta a +24 V, mientras que el terminal negativo se conecta con el borne de la salida correspondiente. Realizando un análisis de las posibles cargas se determinó que estas pueden tener un consumo de hasta 350 mA. Por eso se optó por utilizar el transistor BC817 en formato *SMD* ya que tolera corrientes de hasta 500 mA [9]. Aparte la salida debe estar separada galvánicamente del resto del sistema, es por esto que se utilizan optoacopladores PC123. Para asegurar la saturación de los transistores de salida se utilizan los mismos en configuración *Darlington*. Como medidas de protección se utiliza una fuente externa para el control de las cargas, con el fin de mantener la aislación galvánica y evitar que las perturbaciones en la carga afecten a la fuente principal. Además, en antiparalelo a la carga, se utiliza un diodo en configuración “FreeWheel” para proteger el circuito de salida de los picos de tensión que pueden generar las cargas inductivas como las bobinas.

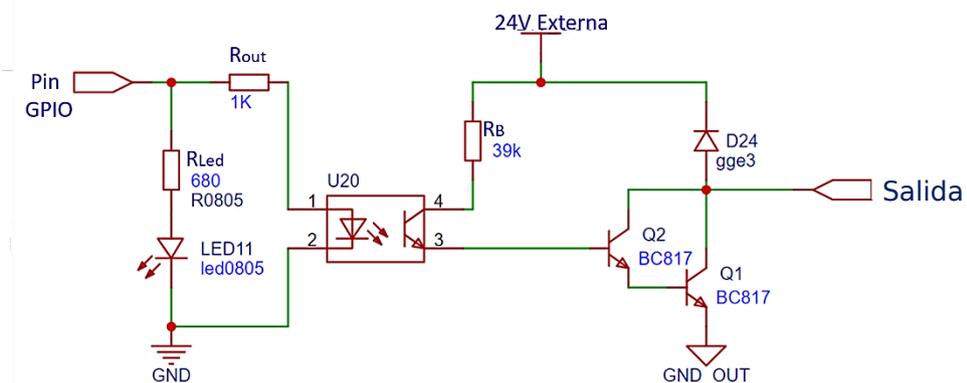


Figura 5: Esquemático circuito de salida digital.

## 2.6 Interfaz de comunicación RS485.

Como el microcontrolador no posee de forma nativa una interfaz RS485 se utiliza un transceptor MAX485 el cual convierte los niveles de tensión TTL del puerto UART a los niveles de tensión diferencial utilizados en RS485 [6]. Además, uno de los requisitos del proyecto es que el puerto RS485 del dispositivo se encuentre aislado galvánicamente del resto del sistema, debido a que los optoacopladores comunes no tienen la capacidad de operar a las frecuencias requeridas para el trabajo se decidió por usar un dispositivo de aislamiento dedicado para interfaces de comunicación, entre las opciones disponible se utilizó el ISO1540, este dispositivo cuenta con “*buffers*” de entrada y salida lógicos que están separados por la tecnología de aislamiento capacitivo de Texas Instruments mediante una barrera de dióxido de silicio (SiO<sub>2</sub>) [3]. Cuando se utilizan con fuentes de alimentación aisladas, estos dispositivos bloquean los altos voltajes, aíslan las tierras y evitan que las corrientes de ruido entren e interfieran o dañen los circuitos sensibles. Se procede a utilizar un convertidor DC-DC con separación galvánica B0505s-1W [4] para aislar galvánicamente la alimentación tanto del MAX485 como del ISO1540.

Los componentes que completan el circuito del puerto RS485 fueron elegidos en base a las recomendaciones que proveen las hojas de los dispositivos principales mencionados.

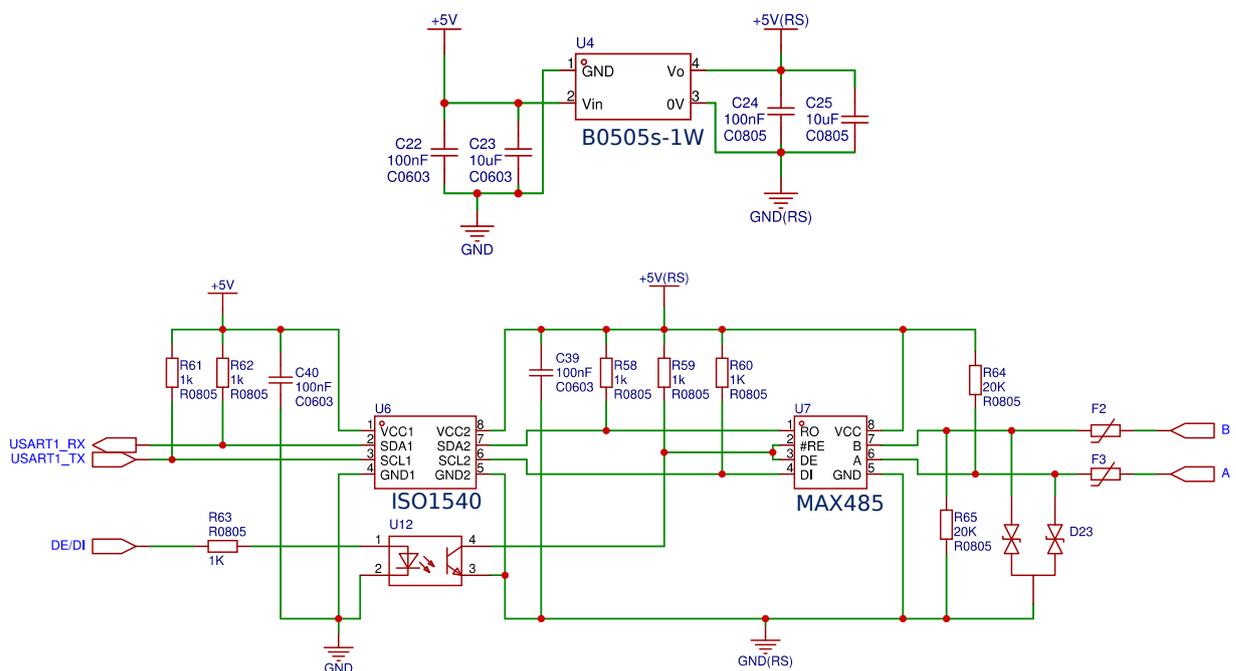


Figura 6 : Esquemático circuito puerto RS485.

Como puede apreciarse en la figura anterior una medida extra de seguridad que se tomo es incorporar fusibles y diodos supresores de transitorios (TVS) para proteger al circuito de cualquier perturbación eléctrica que pueda introducirse en la línea.

## *2.7 Programa de control para dispositivo esclavo Modbus.*

En primer lugar, el código se encarga de gestionar la comunicación con el maestro Modbus. Esto implica recibir, procesar, ejecutar la acción y responder a las solicitudes enviadas por el maestro, enviando códigos de error en caso de que corresponda. Asegurando una comunicación efectiva y confiable entre ambos dispositivos. La correcta interpretación de los comandos Modbus es esencial para un intercambio de datos fluido y preciso.

En segundo lugar, el código se encarga de procesar los datos obtenidos de las entradas analógicas y digitales del dispositivo. Además, las lecturas obtenidas de las entradas analógicas y digitales se almacenan en registros y bobinas Modbus. Esto permite que el maestro Modbus acceda a estas lecturas y las utilice para llevar a cabo tareas de monitoreo, control o análisis del proceso en cuestión.

Por último, el código es responsable de emitir señales de control para las salidas digitales. El código establece que las salidas se activen o desactiven adecuadamente en función de las instrucciones Modbus recibidas y almacenadas en los registros Modbus correspondientes.

Para detallar de forma sencilla el funcionamiento del programa se incluyeron los siguientes diagramas de flujo.

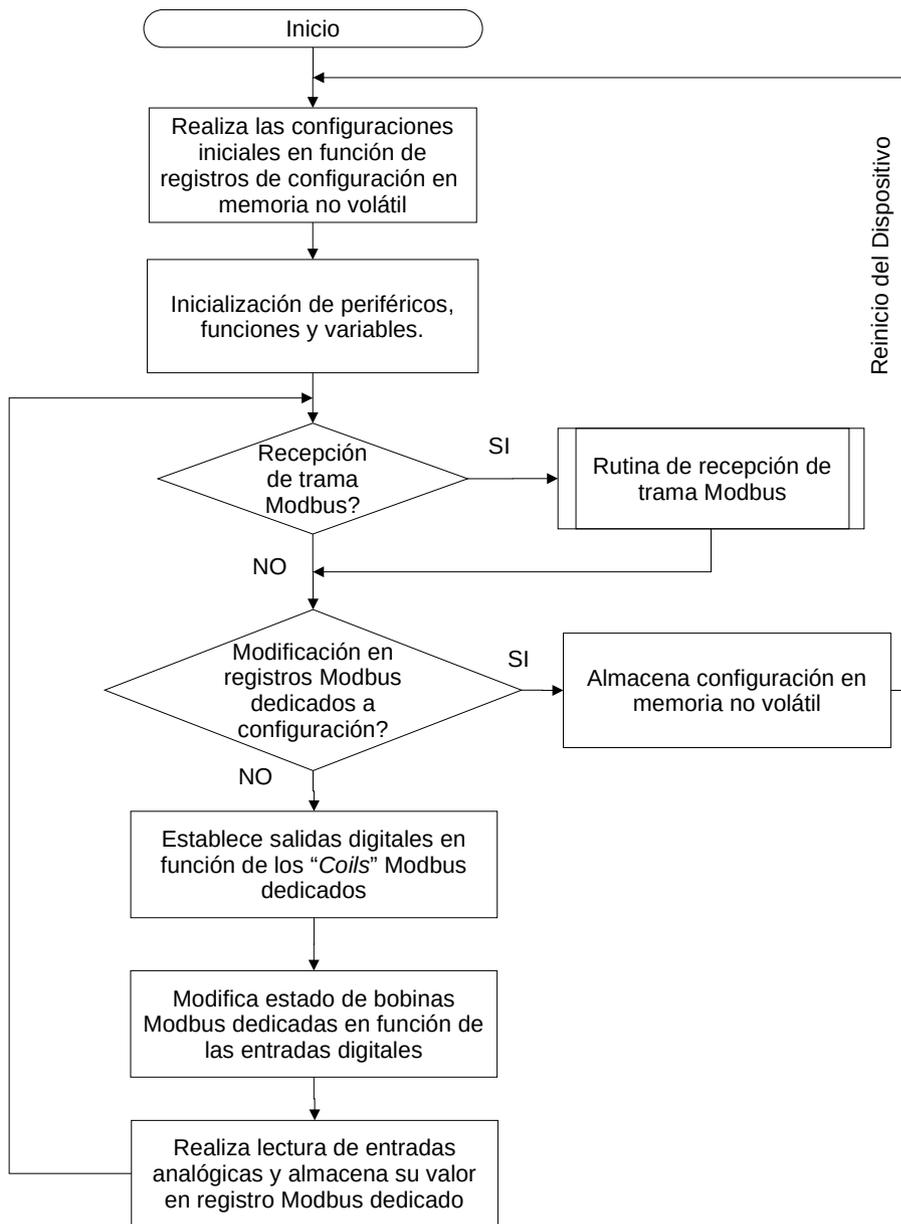


Figura 7: Rutina principal del Módulo Esclavo.

La subrutina de recepción de trama procesa el mensaje, lo que implica decodificar e interpretar cada byte recibido. Dependiendo de la información de la trama recibida, esta subrutina lleva a cabo las acciones solicitadas por el dispositivo maestro. Posteriormente, se encarga de enviar una respuesta al maestro que contiene la información solicitada o, en caso de que surja algún error, se envía un código de error el cual indica la naturaleza del problema.

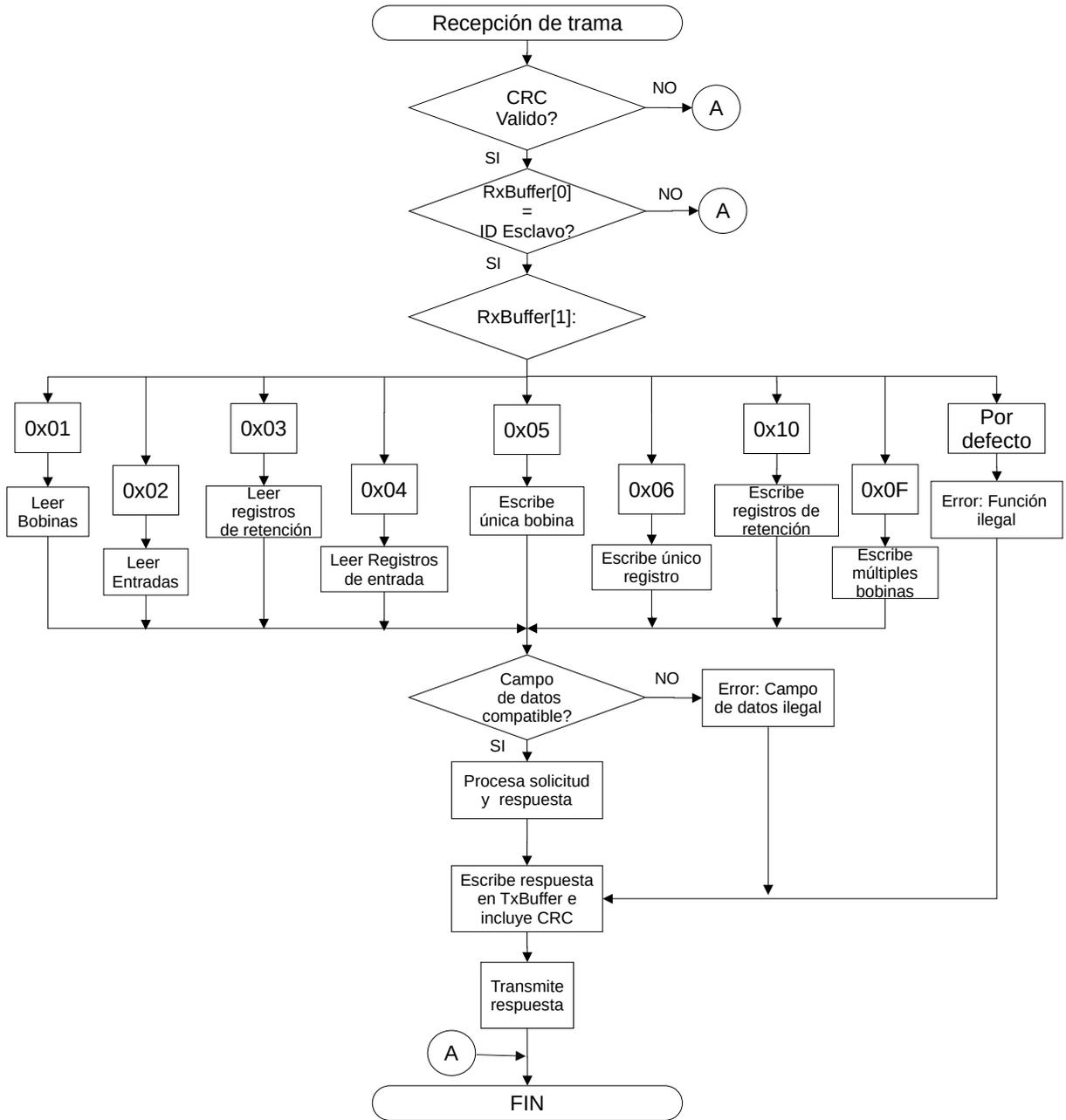
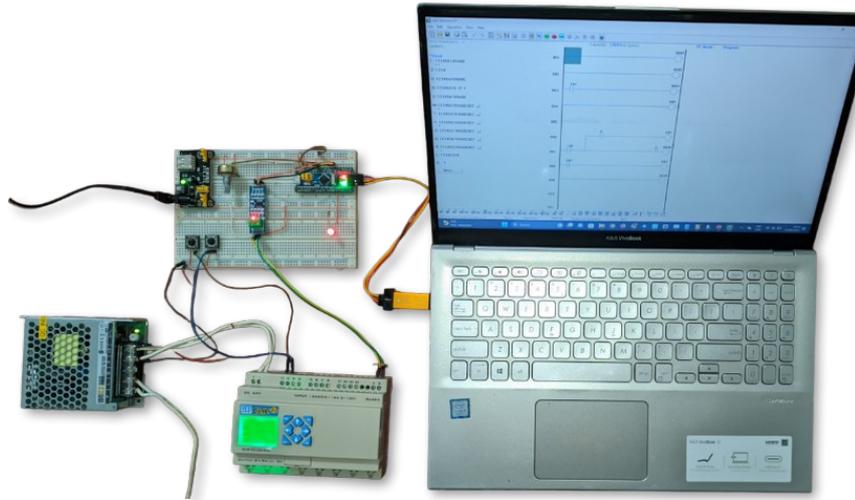


Figura 8: Rutina de recepción de trama Modbus.

### 3 Pruebas realizadas.

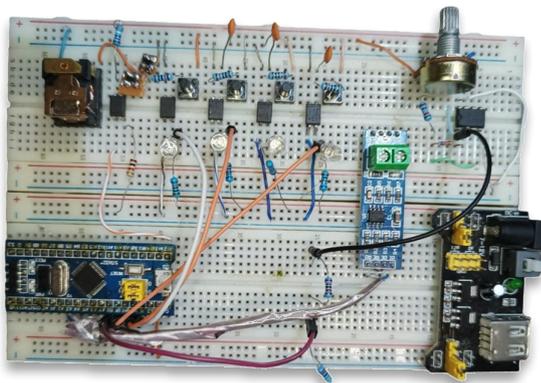
Para comprobar el funcionamiento de desarrollo de las distintas etapas, la comunicación y la correcta ejecución del programa se procedió a realizar ensayos armando circuitos basados en los esquemático sobre una placa de prototipado o “*Protoboard*”. Como dispositivo maestro se utilizó un *PLC CLIC02* modelo CLW-02/20VR-D de la marca WEG, este por medio de su puerto RS485 transmitía las solicitudes Modbus al dispositivo esclavo.

En la figura 9, se puede observar el montaje realizado, en el mismo el *PLC Clic02* cumplía el rol de maestro, todas las variables implicadas tanto en la comunicación como en funcionamiento del modulo eran visibles desde el computador.



*Figura 9: Prototipo y sistema utilizado para ensayos.*

En la figura 10 se ve a detalle el prototipo utilizado en el ensayo, donde se pueden observar en la parte superior las entradas digitales con sus respectivos optoacopladores, a la derecha una entrada analógica en la cual se comprueba su funcionamiento con ayuda de un potenciómetro, en el centro se encuentra el convertor MAX485, y en la parte inferior se encuentra la fuente, salida digital y una placa de desarrollo *Bluepill*.



*Figura 10: Detalle del prototipo montado en la placa de prueba.*

En la figura 11 se puede muestra un fragmento de la comunicación obtenido post aislador ISO1540, se puede observar como la trama no presenta atenuaciones debido al sistema de aislamiento.

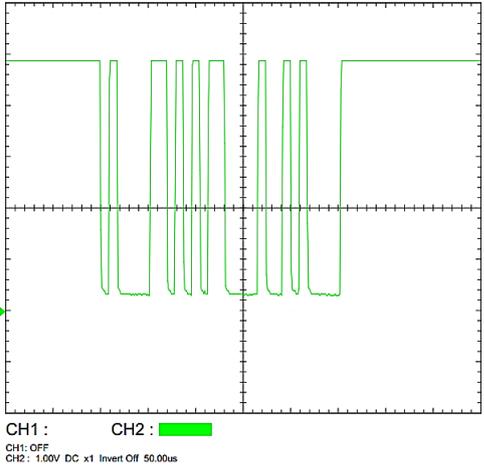


Figura 11: Captura de fragmento de comunicación serie.

## 4 Conclusiones

El desarrollo de este módulo esclavo Modbus implicó la aplicación exhaustiva de conocimientos adquiridos a lo largo de la carrera de ingeniería electrónica. Durante el proceso, se utilizaron conceptos relacionados con el cálculo de componentes y circuitos básicos, así como el diseño de filtros y el análisis de señales tanto en el dominio temporal como en el dominio de frecuencia. Además, se aplicaron técnicas que requirieron el manejo de registros y periféricos de microcontroladores, especialmente aquellos utilizados para la comunicación serial, manejo de interrupciones y control de puerto E/S incluyendo canales ADC.

El estudio detallado del protocolo Modbus sobre línea serial fue un componente esencial del desarrollo. Se logró comprender el funcionamiento del protocolo y cómo el módulo esclavo debe interpretar y procesar las diferentes tramas dependiendo del código de función que contengan. Esta comprensión permitió implementar de manera efectiva la funcionalidad de comunicación del dispositivo.

En los ensayos realizados sobre el circuito de prototipo se estableció exitosamente la comunicación entre dispositivos los dispositivos maestro y esclavo, también se logró una correcta configuración de los parámetros del módulo esclavo por parte del maestro y se observó el correcto funcionamiento de las etapas de entradas y salidas con sus respectivas protecciones. Los próximos pasos a realizar consisten en finalizar el diseño del circuito impreso, diseño de la carcasa y proceder con la fabricación del dispositivo, lo que conducirá a la culminación del proyecto.

En definitiva, este proyecto ha fortalecido las habilidades del ingeniero electrónico en áreas clave como diseño de circuitos, programación, protocolos de comunicación y ensayos experimentales, y representa una valiosa experiencia para futuros proyectos en el campo de la electrónica y la automatización.

## Referencias

- [1] RT9193, Datasheet. (2022, junio) | Mouser Electronics. [https://ar.mouser.com/datasheet/2/1458/DS9193\\_18-3104722.pdf](https://ar.mouser.com/datasheet/2/1458/DS9193_18-3104722.pdf)
- [2] AMS1117 Datasheet - 1A Adjustable/Fixed Low Dropout Linear regulator. | (s. f.). <http://www.datasheet.es/PDF/183955/AMS1117-pdf.html>
- [3] ISO1540 Data Sheet, product information and support | TI.com. (s. f.). <https://www.ti.com/product/ISO1540>
- [4] B0505s-1W Datasheet (2009) | MORNSUN Power. <https://pdf1.alldatasheet.es/datasheet-pdf/view/274909/MORNSUN/B0505S/D-1W.html>
- [5] MP1584EN - Data Sheet , product information and support | Monolithic Power Systems <https://www.monolithicpower.com/en/mp1584.html>
- [6] MAX485 – Data Sheer | Maxim Integrated. <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/MAX1487-MAX491.pdf>
- [7] STM32F103x8 – Data Sheet | ST Electronics. (February, 2021). <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32f103c8.pdf>
- [8] STM32F103x8 – Reference Manual | ST Electronics. (March, 2022). [https://www.st.com/resource/en/reference\\_manual/rm0008-stm32f101xx-stm32f102xx-stm32f103xx-stm32f105xx-and-stm32f107xx-advanced-armbased-32bit-mcus-stmicroelectronics.pdf](https://www.st.com/resource/en/reference_manual/rm0008-stm32f101xx-stm32f102xx-stm32f103xx-stm32f105xx-and-stm32f107xx-advanced-armbased-32bit-mcus-stmicroelectronics.pdf)
- [9] BC817 – Datasheet | On Semiconductor. (May, 2016). <https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/bc817-40w-d.pdf>

- [10] PC123 – Data Sheet | Global SHARP. (Jan. 15. 2018).  
[https://global.sharp/products/device/lineup/data/pdf/datasheet/PC123XxYSZ1B\\_e.pdf](https://global.sharp/products/device/lineup/data/pdf/datasheet/PC123XxYSZ1B_e.pdf)
- [11] LM358 – Data Sheet, product information and support | TI.com. ( 22 Mar 2022).  
[https://www.ti.com/product/LM358?utm\\_source=google&utm\\_medium=cpc&utm\\_campaign=asc-null-null-GPN\\_EN-cpc-evm-google-wwc\\_cons&utm\\_content=LM358&ds\\_k=LM358+Datasheet&DCM=yes&gclid=CjwKCAjwzo2mBhAUEi wAf7wjkv1yCN9BXZrF69SJWqaHZZukHUnrFc5qaIF3VdK3K2waNC5lF4Jr7hoC3vAQAvD\\_BwE&gclid=aw.ds](https://www.ti.com/product/LM358?utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=asc-null-null-GPN_EN-cpc-evm-google-wwc_cons&utm_content=LM358&ds_k=LM358+Datasheet&DCM=yes&gclid=CjwKCAjwzo2mBhAUEi wAf7wjkv1yCN9BXZrF69SJWqaHZZukHUnrFc5qaIF3VdK3K2waNC5lF4Jr7hoC3vAQAvD_BwE&gclid=aw.ds)
- [12] Modbus Over Serial Line V1.2 – Specification and Implementation Guide | Modbus.org (Dec 20, 2006)