



Sistema de control y supervisión de proceso a través de plataforma de mensajería instantánea

Eduardo J. Matijak ^{a*}, Carlos A. Goyechea ^a, Juan P. Gross ^b, Guillermo A. Fernández ^b

^a *Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Misiones (UNaM), Oberá, Misiones, Argentina.*

^b *Universidad Nacional de Misiones (UNaM)-CONICET. Facultad de Ingeniería. Instituto de Materiales de Misiones (IMAM). Grupo de Investigación y Desarrollo en Electrónica (GIDE). Misiones, Argentina.*

e-mails: edu.matijak@gmail.com, goyecheaagustin@gmail.com, gross@fio.unam.edu.ar, guillermo.fernandez@fio.unam.edu.ar

Resumen

Con el objetivo de supervisar e interactuar de forma remota con diferentes procedimientos, se implementa un sistema de control y supervisión de proceso a través de plataforma de mensajería instantánea. Para esto se diseñó un circuito basado en el microcontrolador ESP32, el cual envía y recibe información mediante mensajes con un bot de Telegram. Una vez diseñado el circuito, se realizó el esquemático en el software *Proteus*, con el cual se efectuó las respectivas simulaciones. Luego, se implementó el circuito de forma preliminar en una protoboard para corroborar tanto el funcionamiento del circuito diseñado como la programación del microcontrolador. Una vez confirmado que los resultados experimentales cumplían con la especificaciones del problema, se procedió a diseñar la placa de circuito impreso con el mismo software utilizado para la simulación del sistema. Por último, para la programación del bot y del microcontrolador se utilizó *Visual Studio Code*, con la extensión para el entorno Arduino denominada *PlatFormIO* con la inclusión de diversas librerías.

Palabras Clave: *Sistemas embebidos, microcontroladores, programación, “Internet de las cosas”, control remoto.*

1. Introducción

El siguiente trabajo se realizó durante el cursado de la materia Técnicas Digitales 2, el cual se trata de un sistema de control y supervisión con dos entradas discretas, dos analógicas y dos salidas mediante relés, como así también la implementación de un bot en la plataforma «Telegram» el mismo funciona de intermediario entre el usuario y el sistema, brindando información del estado actual del mismo mediante mensajes permitiendo también, activar las diferentes salidas comandadas por relés. El bot se denomina “Moore” y notifica a los usuarios autorizados cuando se activa las diferentes entradas discretas así también, cuando las entradas analógicas superan cierta tensión de umbral.

2. Circuito propuesto

El diagrama de bloques de la Fig. 1 corresponde al esquema del circuito propuesto e implementado. El mismo funciona de la siguiente manera: en primera instancia, tenemos dos entradas discretas que pueden variar de 10 V a 25 V que como se aprecia en la Fig. 2 presentan un sistema de protección

contra inversión de polaridad (R_4 y D_2) y contra sobre-tensión (D_1 , C_1 y C_2), además de una aislación entre la etapa de potencia y la digital a través de un optoacoplador 4N28 (U_1). Por otro lado, las entradas analógicas presentan un adaptador de impedancia con un amplificador operacional $LM358$ (U_2) según apreciamos en la Fig. 3 y un sistema de protección contra sobre-tensión mediante dos diodos Schottky (D_8 y D_9).

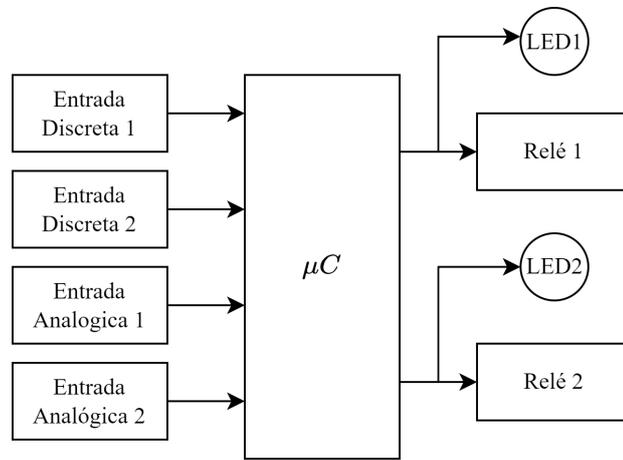


Fig 1. Diagrama de bloques del circuito.

Finalmente, mediante un programa cargado en el microcontrolador (μC) ESP32, podemos manejar dos relés con sus correspondientes LEDs indicadores de estado según se aprecia en la Fig. 4, además de poder interactuar con el sistema a través de un bot empleado en una plataforma de mensajería instantánea (Telegram).

3. Diseño del circuito

Primeramente se llevó a cabo el diseño del circuito para la entrada discreta, el cual se muestra a continuación en la Fig. 2.

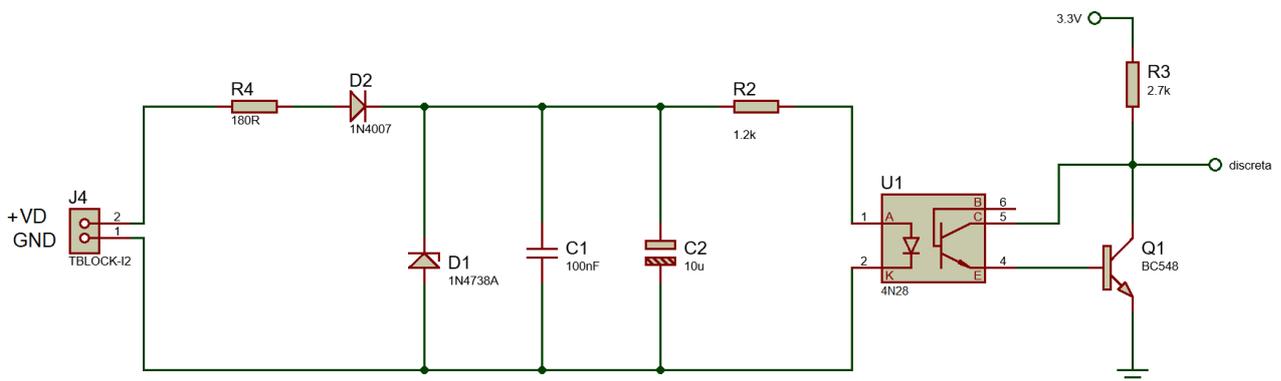


Fig 2. Circuito para la entrada discreta ($10\text{ V} \leq V_D \leq 25\text{ V}$).

Puesto que la entrada del ESP32 soporta hasta $V_{IH(max)} = 3,6\text{ V}$, se trabajó con una tensión de alimentación de $V_{esp} = 3,3\text{ V}$ provista por el pin 1 de la placa del ESP32, con lo cual de la Fig. 2

$$R_3 = \frac{V_{esp} - V_{CE1(sat)}}{I} \quad (1)$$

$$I = I_{C1} + I_{C2} - I_{IL} \quad (2)$$

donde I_{C1} es la corriente de colector del transistor Q_1 , $I_{C2} = I_{B1}$ la corriente de colector del optotransistor 4N28 correspondiente a la corriente de base de Q_1 , y I_{IL} la corriente en el pin 26 del ESP32 cuando la entrada se encuentra en estado bajo. De la hoja de datos del BC548 que se muestra en [5], se obtuvo que $V_{CE1(sat)} = 0,2V$ con un $h_{FE} = 110$, mientras que de la hoja de datos del ESP32 según [3] $I_{IL} = 50 nA$, con lo cual se adoptó una corriente de colector de Q_1 de $I_{C1} = 1 mA$ y una corriente de base

$$I_{B1} = 5 \cdot I_{B1(min)} = 5 \cdot \frac{I_{C1}}{h_{FE}} \quad (3)$$

de $I_{B1} \cong 45,45 \mu A$ se obtuvo, con la expresión (2), que $R_3 = 2965 \Omega$. De la serie E12 se adoptó $R_3 = 2,7 k\Omega$ con lo cual al recalculer la corriente I con la expresión (2), resultó $I' = 1,148 mA$.

Para el cálculo de la potencia de las resistencias se consideró la expresión (4)

$$P_R \geq I_R^2 \cdot R \cdot 1,5 \quad (4)$$

Al calcular la potencia de R_3 se obtuvo $P_{R3} \geq 5,34 mW$, con lo que se seleccionó entonces $R_3 = 2,7 k\Omega$ $1/8 W$. Seguidamente se determinó la corriente I_F que circularía por el LED infrarojo del optoacoplador a partir de las curvas proporcionadas por el fabricante que se muestran en [4]. Para una $I_F = 6 mA$, se obtuvo que $NCTR(SAT) = 0,55$ y $NCTR = 0,7$, y al considerar las degradaciones del CTR debido al envejecimiento $\alpha_E = 0,8$ y debido a la dispersión en el valor de $NCTR$ cuyo valor adopta aproximadamente $\alpha_{DISP} = 0,75$, se verificó la correcta selección de I_F al cumplirse la inecuación planteada en la expresión (5)

$$NCTR \cdot NCTR(SAT) \cdot I_F > \frac{I_{C2}}{\alpha_E \cdot \alpha_{DISP}} \quad (5)$$

Reemplazando valores, se obtuvo $0,00231 > 0,00007575$. Con la corriente I_F adoptada, se determinó la resistencia limitadora R_2 sabiendo de la hoja de datos del 4N28 que $V_F = 1,3 V$ y seleccionando un diodo Zener de $V_Z = 8,2 V$, con lo cual

$$R_2 = \frac{V_Z - V_F}{I_F} \quad (6)$$

obteniendo $R_2 = 1150 \Omega$. Seleccionándose de la serie E12 $R_2 = 1,2 k\Omega$ y recalculándose la corriente con la expresión (6), resultó en $I'_F = 5,75 mA$. El cálculo de su potencia mediante la expresión (4) se obtuvo $P_{R2} \geq 59,51 mW$, adoptándose $R_2 = 1,2 k\Omega$ $1/8 W$. Se consideró un diodo Zener de $8,2 V/1 W$, el cual corresponde al 1N4738 [10]. Sin embargo, se tuvo que tener en cuenta que la potencia del Zener varía con la temperatura, con lo cual para una temperatura ambiente de $T_a = 25^\circ C$ y una temperatura de trabajo $T = 50^\circ C$, la potencia variaría con un factor de depreciación de potencia $FDP = 6,67 mW/^\circ C$ según lo observado en la hoja de datos del fabricante, con lo cual

$$P_Z = P_{ZM} - (T - T_a) \cdot FDP \quad (7)$$

$P_Z = 833,25 \text{ mW}$, la corriente máxima sería entonces de $I_{ZM} = P_Z/V_Z \cong 101,62 \text{ mA}$.

Considerando una potencia de trabajo del Zener de $P'_Z = 0,8 \cdot P_Z = 666,6 \text{ mW}$ cuando la tensión en la entrada discreta sea de $V_D = 25 \text{ V}$, se obtuvo que la corriente por el mismo sería de

$$I_{Z(max)} = \frac{P'_Z}{V_Z} = \frac{0,6666 \text{ W}}{8,2 \text{ V}} \cong 81,29 \text{ mA} \quad (8)$$

Por lo tanto, la resistencia limitadora R_4 para el peor caso, con una tensión $V_{D2} = 0,93 \text{ V}$ correspondiente al diodo 1N4007 según se aprecia en la hoja de datos [9], sería

$$R_4 = \frac{V_{D(max)} - V_{D2} - V_Z}{I_{Z(max)} + I'_F} \quad (9)$$

resultando en 182Ω , con lo cual de la serie E12 se seleccionó una resistencia $R_4 = 180 \Omega$. Para una tensión de entrada de $V_{D(min)} = 10 \text{ V}$ la corriente por la resistencia R_4 sería de $I_{in} = 4,83 \text{ mA}$ con lo cual el Zener no estaría regulando a $8,2 \text{ V}$. Sin embargo, puesto que en la industria se trabajan con tensiones V_D de 12 V a 24 V , se calculó la corriente por el Zener a $V_D = 12 \text{ V}$ para verificar su regulación como

$$I_Z = \frac{V_D - V_{D2} - V_Z}{R_4} - I'_F \quad (10)$$

obteniendo $I_Z = 10,194 \text{ mA}$. Se aprecia que $I_Z > 0,1 \cdot I_{ZM}$ con lo cual el Zener regularía sin problemas a $V_D = 12 \text{ V}$. Luego, se calculó la potencia de R_4 cuando $V_D = 25 \text{ V}$ empleando la expresión (4), y para ello primero se calculó la corriente de Zener para este estado de trabajo despejando $I_{Z(max)}$ de la expresión (9) resultando $I_{Z(max)} = 82,42 \text{ mA}$, con lo cual $P_{R4} \geq 1,83 \text{ W}$ de tal manera que se seleccionó una resistencia de $R_4 = 180 \Omega \text{ } 2 \text{ W}$.

Se verificó la disipación del BJT Q_1 cuya hoja de datos nos brinda la potencia de colector $P_C = 500 \text{ mW}$.

$$I = I_{C1} + I_{C2} - I_{IL} \quad (11)$$

$$I + I_{IL} = I_{C1} + 5 \cdot \frac{I_{C1}}{h_{FE}} \quad (12)$$

$$I_{C1} = \frac{I + I_{IL}}{\left(1 + \frac{5}{h_{FE}}\right)} \quad (13)$$

Se obtuvo $I_{C1} \cong 1,1 \text{ mA}$, entonces

$$P_{Q1} = V_{CE1(sat)} \cdot I_{C1} \quad (14)$$

obteniendo $P_{Q1} = 220 \mu\text{W}$, donde se aprecia que se cumple que $P_{Q1} < P_C$. Seguidamente se llevó a cabo el diseño del circuito para una entrada analógica, cuyo circuito se muestra en la Fig. 3

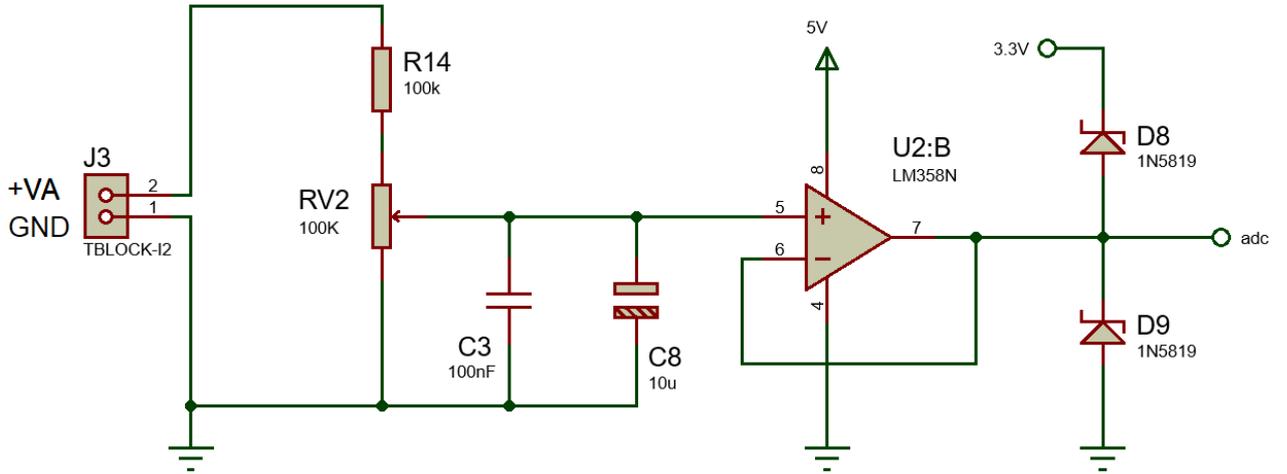


Fig 3. Circuito para la entrada analógica ($0 V \leq V_A \leq 10 V$).

En el circuito de la Fig. 3 existe una entrada analógica que puede variar de $0 V$ a $10 V$, seguido de un divisor resistivo y una etapa de adaptación de impedancia con un amplificador operacional (AO) para evitar el efecto de carga a la salida. A continuación de este último se aprecia una protección contra sobretensión conformado por dos diodos Schottky referenciados a $3,3 V$ obtenidos del ESP32. Para esta configuración, cuando $V_A = 10 V$ la tensión en la entrada no inversora del AO debe ser de $V_{NI} = 3,3 V$, por lo tanto definiendo un potenciómetro $RV_2 = n \cdot RV_2 + (1 - n) \cdot RV_2$ tenemos

$$\frac{V_A \cdot n \cdot RV_2}{R_{14} + RV_2} = V_{NI} \quad (15)$$

$$n = \frac{V_{NI}}{V_A} \cdot \frac{R_{14} + RV_2}{RV_2} \quad (16)$$

Seleccionando $R_{14} = 100 k\Omega$ y $RV_2 = 100 k\Omega$ se obtuvo $n = 0,66$, lo que implica que el cursor del potenciómetro debería ubicarse al 66 % del total del mismo. Se calculó la potencia de R_{14} con la expresión (4) resultando en $P_{R14} \geq 375 \mu W$, con lo cual se seleccionó una resistencia $R_{14} = 100 k\Omega$ $1/8 W$. Los diodos Schottky seleccionados son los 1N5819 que soportan una tensión en inversa de $40 V$ y una corriente en directa de $1 A$. El AO seleccionado es el LM358 con alimentación simple de $5 V$.

A continuación se llevó a cabo el diseño del circuito de salida el cual se encarga de manejar los relés. Para esta etapa se utilizó un BJT BC337 (Q_2) que presenta $V_{CE2(sat)} = 0,7 V$, $V_{BE2(on)} = 1,2 V$, $h'_{FE} = 100$, $P_D = 625 mW$ y $I_{C(max)} = 800 mA$, datos que se muestran en [6]. Además, se trabajó con un relé MASSURE ME-15 de $12 V$ y $30 mA$ cuya hoja de datos se presenta en [8], y el mismo con un diodo 1N4007 en anti-paralelo a su bobina para evitar el pico de sobre-tensión. Para indicar el estado de la salida se agregó un LED rojo cuya polarización puede realizarse considerando que $V_{LED} = 2 V$ y $I_{LED} = 10 mA$. Primeramente se calculó R_9 con $V_{in} = 12 V$ como

$$R_9 = \frac{V_{in} - V_{LED} - V_{CE2(sat)}}{I_{LED}} \quad (17)$$

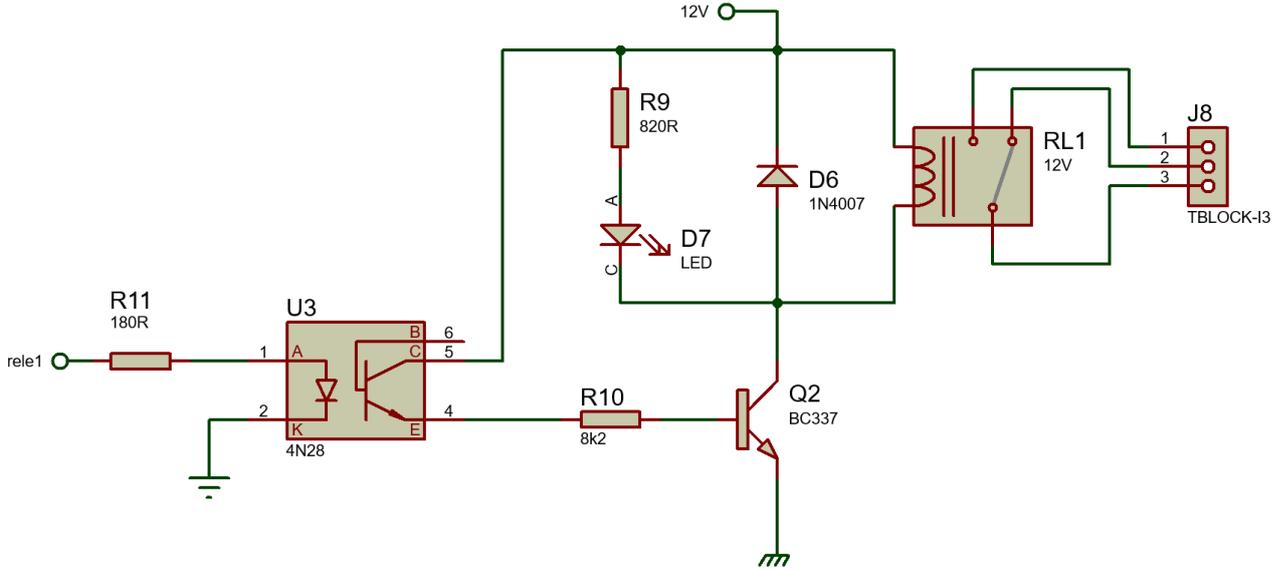


Fig 4. Circuito de salida.

obteniendo $R_9 = 930 \Omega$, con lo cual de la serie E12 se seleccionó $R_9 = 820 \Omega$, resultando que $I'_{LED} = 11,34 \text{ mA}$. Se calculó la potencia de R_9 con (4) resultando en $P_{R9} \geq 158 \text{ mW}$ con lo que se seleccionó una resistencia $R_9 = 820 \Omega \text{ } 1/4 \text{ W}$. Luego, siendo $I_{C1} = I'_{LED} + I_L$ la corriente de colector del transistor Q_2 e I_L la corriente del relé, resulta $I_{C1} = 41,34 \text{ mA}$. De la hoja de datos del 4N28 se tiene que $V'_{CE(sat)} = 0,5 \text{ V}$, con lo cual procedió a calcular R_{10} como

$$R_{10} = \frac{V_{in} - V'_{CE(sat)} - V_{BE2(on)}}{3 \cdot \left(\frac{I_{C1}}{h'_{FE}} \right)} \quad (18)$$

resultando en $R_{10} \cong 8305 \Omega$, y se seleccionó de la serie E12 $R_{10} = 8,2 \text{ k}\Omega$. La corriente de base resultó de $I'_{B1} = I_{C2} \cong 1,26 \text{ mA}$, siendo I_{C2} la corriente del colector del 4N28, con lo cual de la expresión (4) se concluyó que debía ser seleccionado una resistencia de $R_{10} = 8,2 \text{ k}\Omega \text{ } 1/8 \text{ W}$. Siguiendo la misma metodología explicada para la entrada discreta, se determinó que la corriente del LED del 4N28 debía ser de $I_F = 7 \text{ mA}$. De la hoja de datos del ESP32, se tiene que $V_{OH(min)} = 0,8 \cdot V_{DD} = 2,64 \text{ V}$, con lo cual la resistencia R_{11} se calculó como

$$R_{11} = \frac{V_{OH(min)} - V_F}{I_F} \quad (19)$$

resultando en $R_{11} \cong 191 \Omega$, con lo que se seleccionó de la serie E12 $R_{11} = 180 \Omega$. Sabiendo que $I_F = 7,44 \text{ mA}$, la potencia de R_{11} debió cumplir $P_{R11} \geq 15 \text{ mW}$ con lo que se seleccionó entonces una resistencia de $R_{11} = 180 \Omega \text{ } 1/8 \text{ W}$. Se calculó la potencia total de disipación del BJT BC337 como

$$P_{Q2} = I_{C1} \cdot V_{CE2(sat)} + I'_{B1} \cdot V_{BE2(on)} \quad (20)$$

resultando en $P_{Q2} = 30,45 \text{ mW}$, donde se observa que se cumple que $P_{Q2} < P_D$.

A continuación, se presenta el esquema completo del circuito, seguido de las conexiones correspondientes al ESP32.

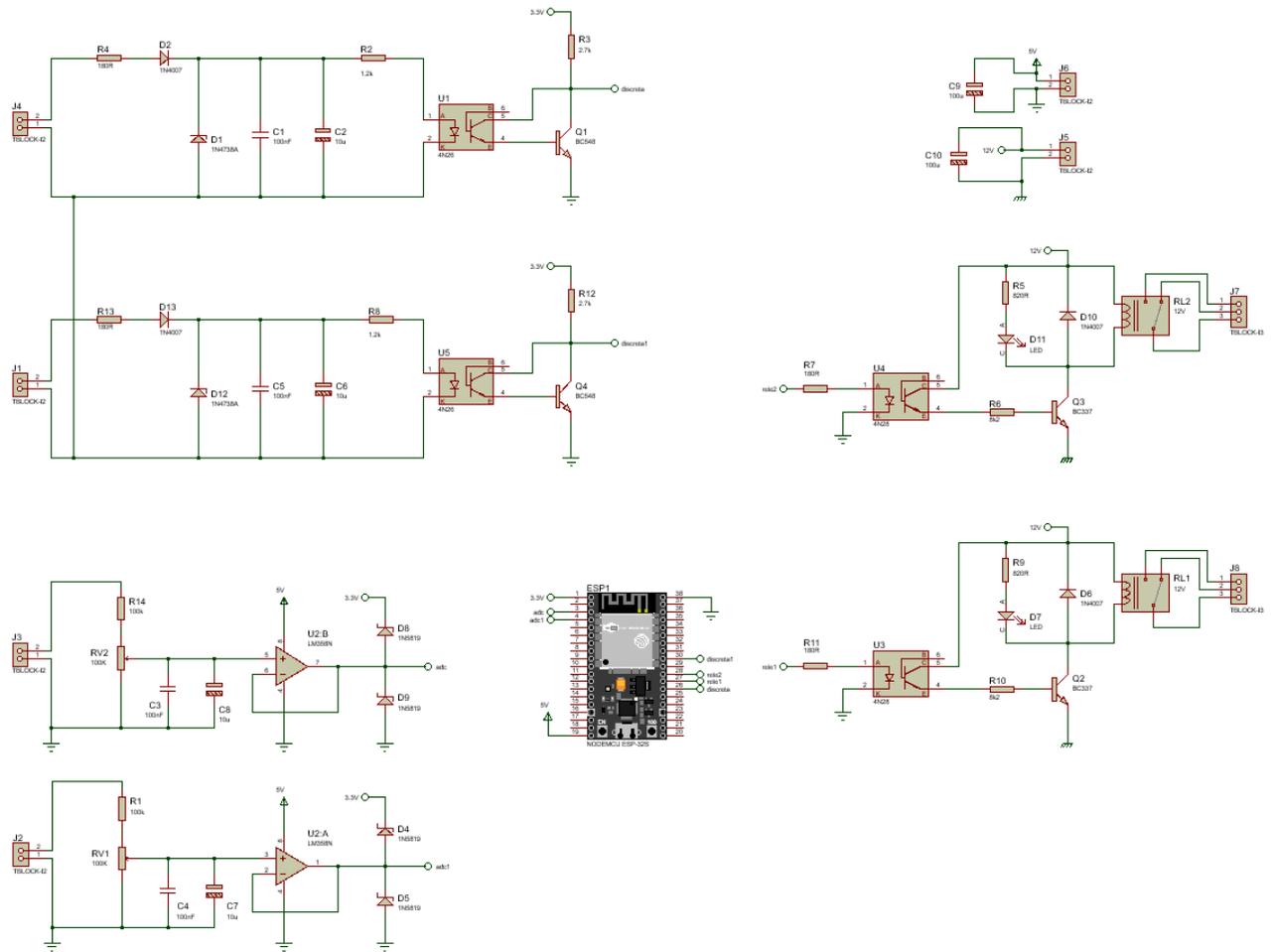


Fig 5. Esquema del circuito.

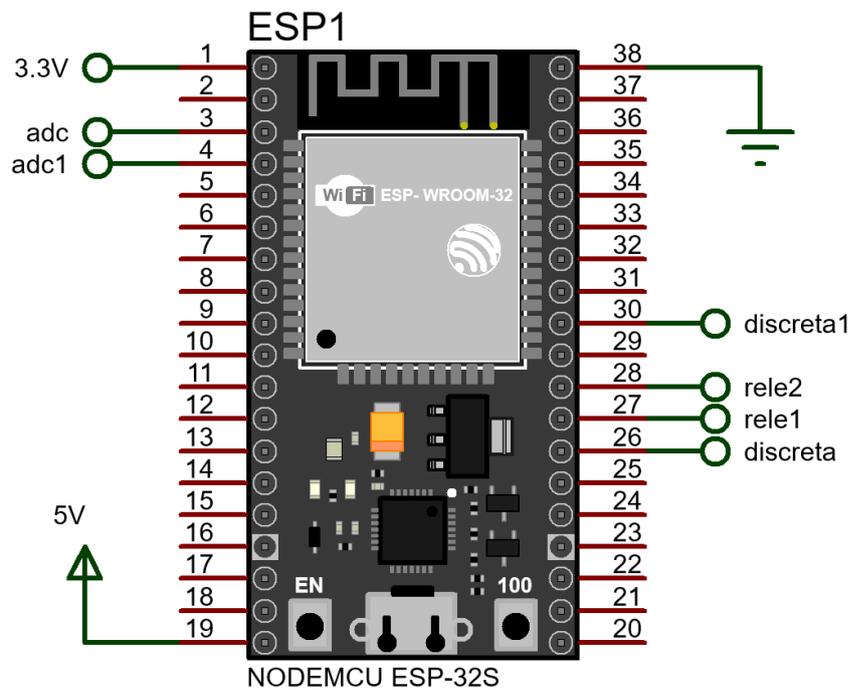


Fig 6. Conexiones al ESP32.

4. Diseño de firmware

Primeramente, se confeccionó un diagrama de flujo del sistema y su funcionamiento para luego tener mayor facilidad a la hora de programar en C++.

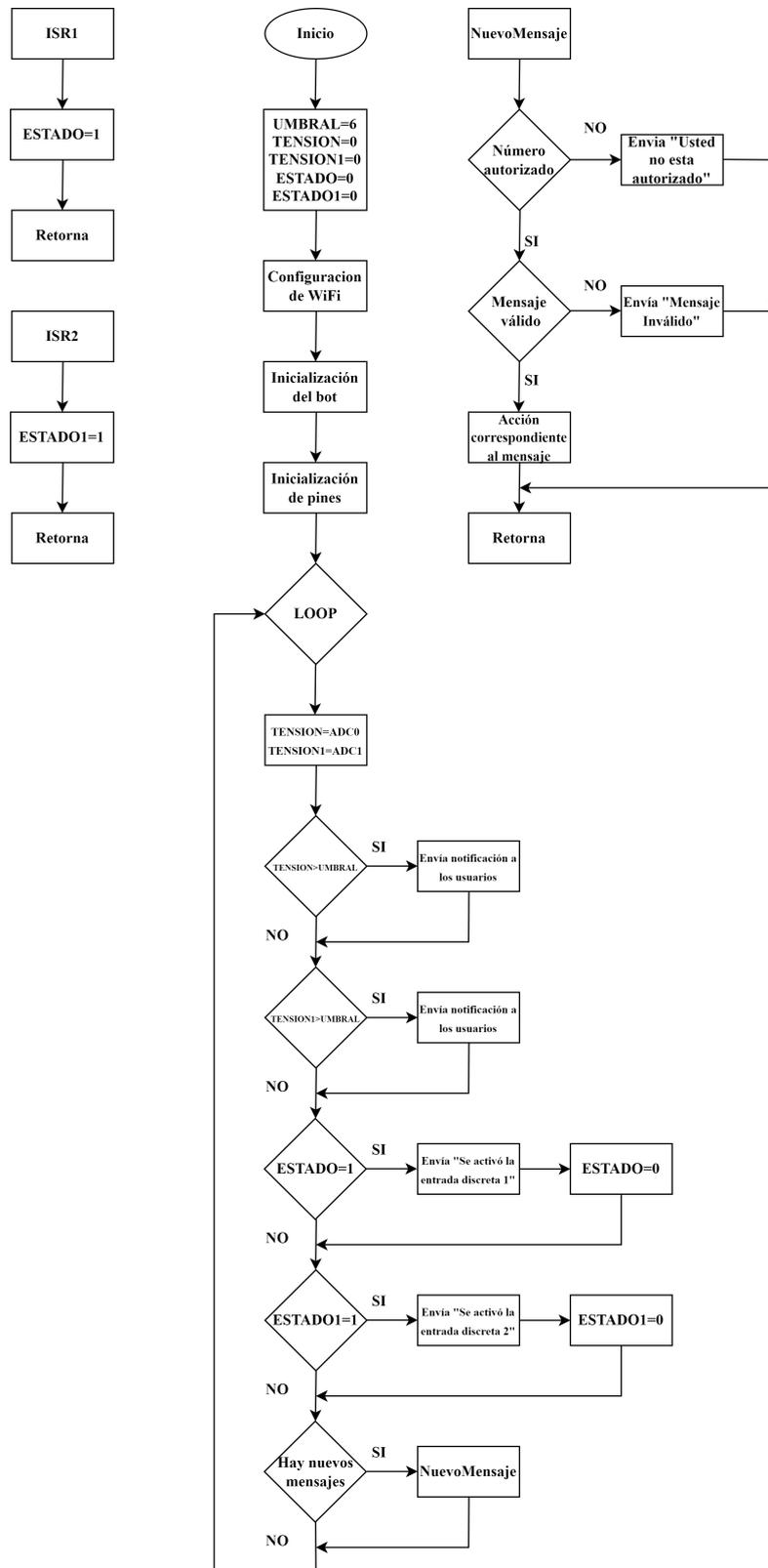


Fig 7. Diagrama de flujo del programa.

El programa comienza configurando la red WiFi a la cual va a estar conectado el ESP32. Seguidamente, se inicializa el bot con un *Token* que nos brinda la misma aplicación de Telegram y una librería denominada “UniversalTelegramBot” la cual nos facilita, con diversas funciones, la interacción del bot con la información recibida a través de la aplicación. Luego se configura los pines de microcontrolador que vamos a utilizar, para esto se tuvo en cuenta el *datasheet* del microcontrolador [3], en nuestro caso se utilizaron dos pines en modo ADC (Conversor analógico-digital), otros dos como interrupciones detectando flancos descendentes y otros dos pines como salidas.

Una vez hecha toda la configuración, el programa ingresa al bucle principal realizando la conversión de las tensiones analógicas y guardando ambas en diferentes variables, las cuales son testeadas de forma que, si alguna de las dos supera el umbral configurado por el usuario, el bot envía un mensaje notificando el hecho. Las interrupciones anteriormente mencionadas, lo único que hacen es cambiar los valores de diferentes variables que se verifican para luego enviar la notificaciones. Finalmente, se corrobora si Moore recibió algún mensaje, si el usuario envió el mensaje “/start”, Moore responde con un mensaje con las diferentes acciones que puede realizar como se observa en la Fig. 8, en caso contrario el bot le notifica al usuario que no está autorizado.

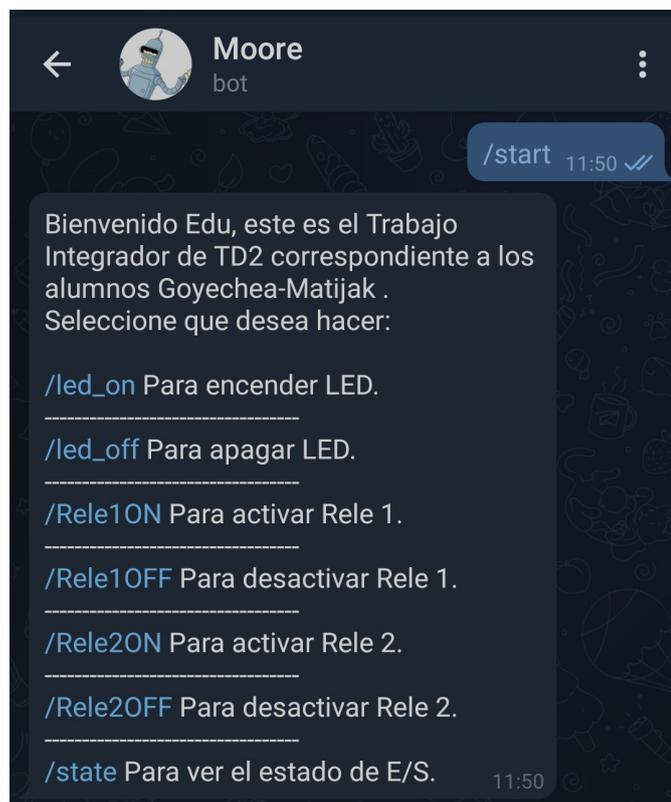


Fig 8. Captura de pantalla del chat con el bot.

Las diferentes acciones que puede realizar el Moore son:

- /led_on: Enciende el led (GPIO2) de la placa NodeMCU.
- /led_off: Apaga el led (GPIO2) de la placa NodeMCU.
- /Rele1ON: Activa el relé 1.

- /Rele1OFF: Desactiva el relé 1.
- /Rele2ON: Activa el relé 2.
- /Rele2OFF: Desactiva el relé 2.
- /state: Muestra el estado del led, de las 4 entradas y de las 2 dos salidas.

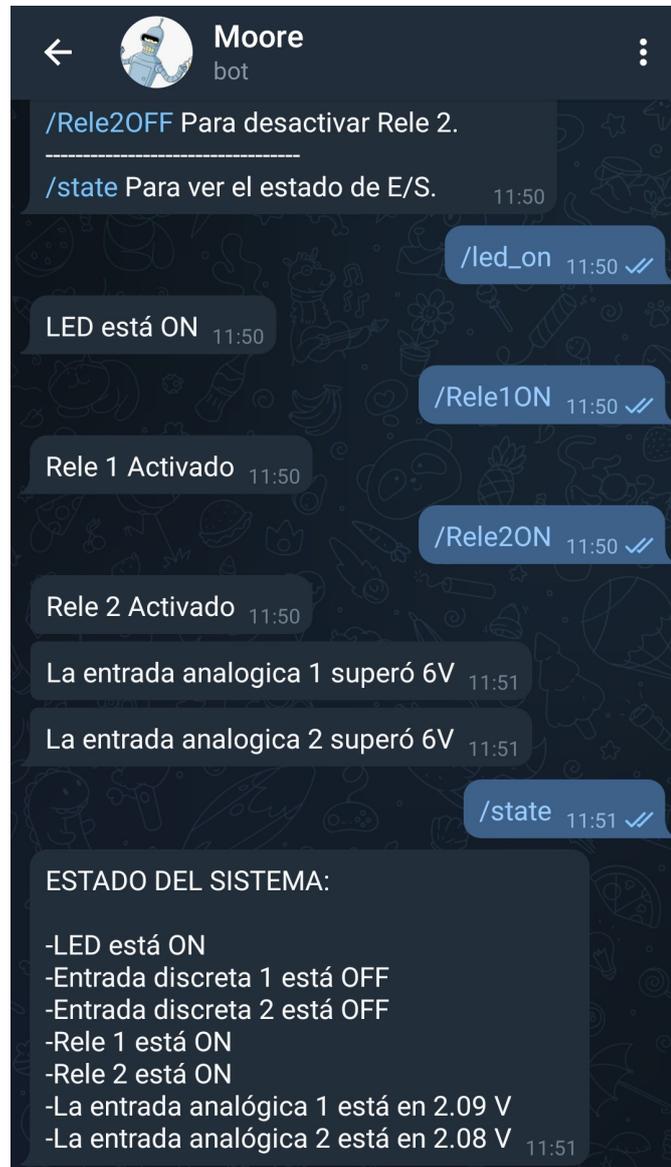


Fig 9. Captura de pantalla del chat con el bot con diferentes instrucciones.

5. Resultados

En esta sección se exponen los resultados obtenidos, primeramente se muestra el diseño de la placa de circuito impreso (PCB) realizado en software *Proteus 8.9*, Fig. 10. Utilizando papel acetato y la técnica del planchado, se pudo transferir el circuito a la placa de cobre, también se optó por imprimir la máscara de componentes del circuito (Top Silk) en papel autoadhesivo para saber donde colocar los componentes de manera rápida y efectiva a la hora de soldar. La distribución de los componentes se observa en la Fig. 11.

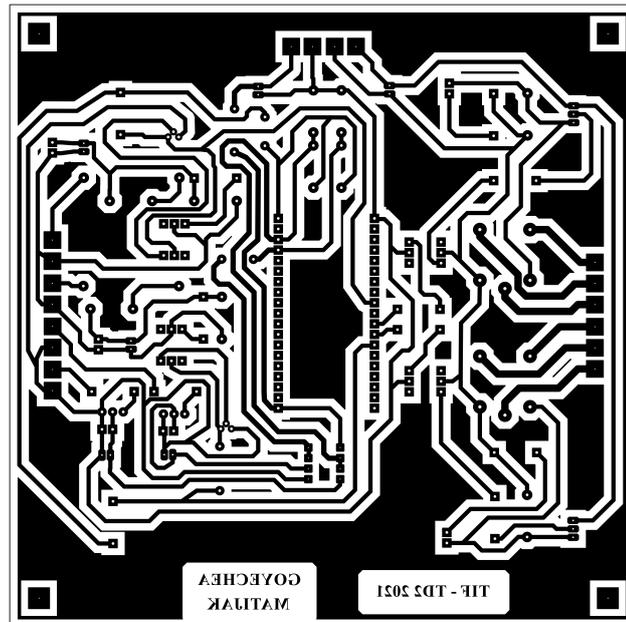


Fig 10. PCB del sistema diseñado.

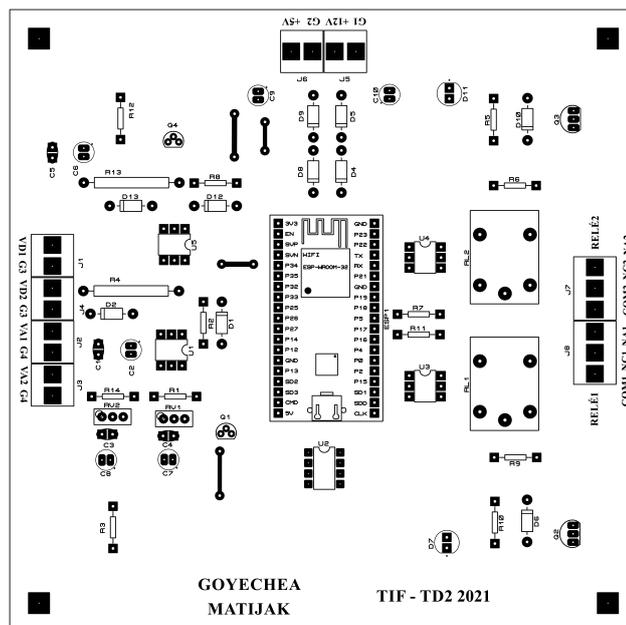


Fig 11. Máscara de componentes (Top Silk).

A continuación, se muestra una imagen del circuito ya armado y en funcionamiento, con las cuatro entradas conectadas y las salidas activadas, lo que evidencia esto último son los leds encendidos de color rojo.

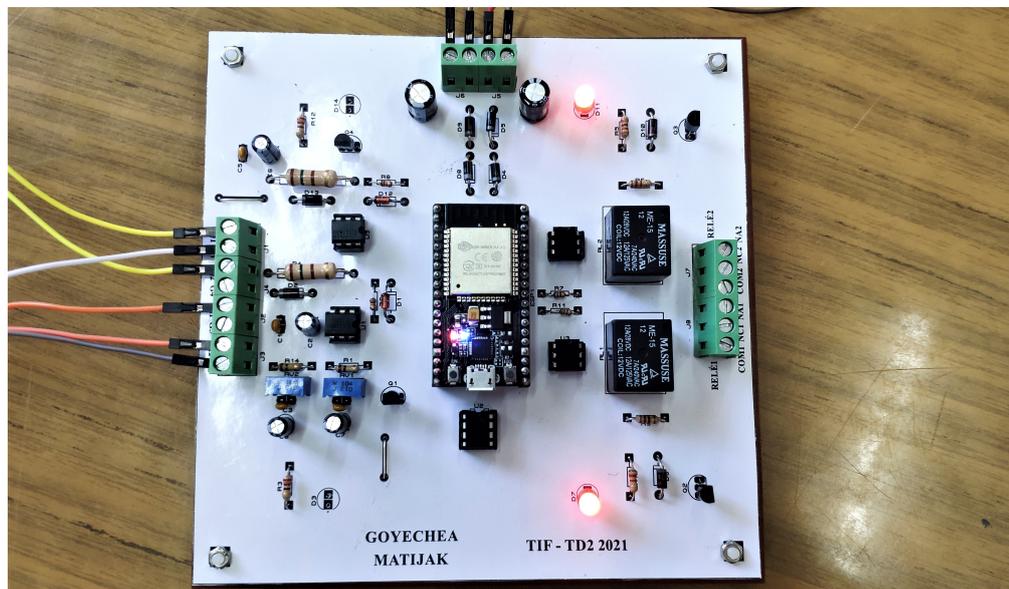


Fig 12. Circuito final en funcionamiento.

Luego se corroboró el funcionamiento del bot, el mismo respondió de la manera esperada, indicando el estado del sistema ante el mensaje “/state” y mostrando el menú de opciones con el mensaje “/start”. Como se observa en la Fig. 13, vemos que los leds ligados a la salida se encuentran apagados, el led de color azul (GPIO2) de la placa NodeMCU se encuentra encendido y el mensaje de Moore evidencia lo anteriormente mencionado, corroborando así su correcto funcionamiento. También se grabó un vídeo del sistema funcionando, se subió a la plataforma YouTube y lo podemos ver en [14].



Fig 13. Circuito final en funcionamiento junto al chat del bot.

6. Conclusiones

En el desarrollo de este trabajo se pudo poner en práctica los conocimientos adquiridos en las cátedras Técnicas Digitales 1 y 2, así también adquirir experiencia a la hora de diseñar y armar circuitos con componentes fáciles de conseguir en el sector y programar microcontroladores para un fin en específico. Además se pudo observar la versatilidad de estos tipos de circuitos, ya que los mismos con un simple cambio en el esquema o en la programación se puede extrapolar a diferentes áreas de la industria. Algo importante a destacar es que, la elaboración de este sistema nos abre la puerta a un sector de la electrónica y la programación que está en pleno auge como el de IoT (Internet de las cosas) que va a ser, si no lo es ya, un factor fundamental para las organizaciones que quieran ser líderes, prácticamente en cualquier sector. Su uso ofrece un gran valor, en especial en relación con los costes o el aumento de la productividad.

Referencias

- [1] Thomas L. Floyd. *Dispositivos Electrónicos*. Editorial Pearson Educación, México, 2008.
- [2] Gestión remota de dispositivos IOT mediante técnicas de mensajería instantánea empleando Bots (Link).
- [3] Datasheet del ESP32-WROOM-32 (Link).
- [4] Datasheet del optoacoplador 4N28 - Vishay (Link).
- [5] Datasheet del transistor BJT BC548 - Fairchild (Link).
- [6] Datasheet del transistor BJT BC337 - ON Semiconductor (Link).
- [7] Datasheet del Amplificador Operacional LM358N - Texas Instruments (Link).
- [8] Datasheet del relé de ME-15 - MASSURE (Link).
- [9] Datasheet del diodo 1N4007 - ON Semiconductor (Link).
- [10] Datasheet del diodo Zener 1N4738A - ON Semiconductor (Link).
- [11] Datasheet del diodo Schottky 1N5819 - Vishay (Link).
- [12] Overleaf - LaTeX Documentation: Counters (Link).
- [13] <https://tex.stackexchange.com/questions/111504/setting-section-counter>
- [14] Video del “sistema de control y supervisión de proceso a través de plataforma de mensajería instantánea” funcionando (Link).