

Telemetría inalámbrica para sensores utilizados en microrredes eléctricas

Ernesto A. Korpys^a, Fernando N. Krindges^{a*}, Juan P. Gross^b, Fernando Botterón^b,
Guillermo A. Fernández^b

^a Universidad Nacional de Misiones (UNaM). Facultad de Ingeniería. 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.

ernesto.korpys@gmail.com, krindgesfer@gmail.com, gross@fio.unam.edu.ar, botteron@fio.unam.edu.ar,
guillermo.fernandez@fio.unam.edu.ar

Resumen

El presente trabajo describe el desarrollo de un sistema electrónico dedicado a la medición remota de variables digitales y analógicas, el cual está orientado a la supervisión de microrredes eléctricas. El prototipo del sistema está compuesto por circuitos basados en el microcontrolador ESP8266, los cuales se comunican entre sí en forma inalámbrica a través del protocolo ESP-NOW. Inicialmente en este trabajo fueron seleccionados los componentes y se diseñaron los circuitos de interfaz para adecuar las señales correspondientes al ESP8266. Luego fueron hechos los ensayos experimentales de cada interfaz y también realizados los circuitos impresos correspondientes. Finalmente, se obtuvo un prototipo conformado por una unidad principal y una unidad remota de sensado, cuyos ensayos demostraron que estos dispositivos pudieron comunicarse en forma bidireccional, transmitiéndose las variables en forma inalámbrica desde la unidad remota a la unidad principal, a pedido de esta última. Por tal motivo, a través de un medio alternativo de comunicación de datos, el sistema desarrollado permitirá supervisar la operación de una microrred eléctrica conformada por fuentes y almacenadores de energía ubicados localmente.

Palabras Clave – ESP8266, ESP-NOW, Inalámbrico, Microrredes, Sensores, Telemetría.

1. Introducción

El presente trabajo es realizado como actividad integradora en la asignatura “Técnicas Digitales 2” de la carrera Ingeniería Electrónica, dictada en la Facultad de Ingeniería de la UNaM. También surge como parte del proyecto de investigación “Bombeo de agua con energías renovables, almacenamiento de energía y conexión a la red para pequeñas huertas rurales comunitarias: Estudio, diseño y puesta en funcionamiento”, relacionado con la implementación experimental de una microrred eléctrica. Dentro de la asignatura mencionada, el trabajo integrador tiene por objetivos aplicar los conocimientos adquiridos con el fin de diseñar un sistema embebido capaz de resolver una situación problemática particular, construir un prototipo del sistema a partir de ciertas especificaciones técnicas y verificar el funcionamiento del mismo de acuerdo a las especificaciones de operación requeridas. En el marco del proyecto de investigación, este trabajo tiene por objetivo contribuir al desarrollo de un sistema de supervisión y control para microrredes eléctricas, utilizando tecnologías de comunicación alternativas que proporcionen redundancia en la transmisión de datos y así el sistema mencionado pueda adaptarse a situaciones de falla en su línea de intercambio de datos principal.

Las microrredes eléctricas son instalaciones en las cuales distintas fuentes de energía y de almacenamiento operan de forma coordinada entre sí para abastecer a una serie de cargas, todo esto con o sin conexión a la red de distribución principal. Fuentes de energía renovables, tales como la solar y la eólica, son ampliamente utilizadas en las microrredes para la generación y el abastecimiento con energía eléctrica a las cargas locales. Sistemas de almacenamiento tales como los bancos de baterías, son requeridos en las microrredes para cubrir este abastecimiento ante la presencia intermitente y aleatoria que poseen fuentes de energía renovables tales como las mencionadas [1].

Las microrredes cuentan con un sistema de supervisión encargado de gestionar la operación de sus fuentes de energía, dispositivos de almacenamiento y la interconexión a la red de distribución (en caso de existir). Para ello mide distintas variables como ser: corrientes, tensiones, estado de carga de las baterías, temperaturas, radiación solar, velocidad del viento, entre otras, y a partir de esta información toma decisiones y ejecuta acciones de control correspondientes para garantizar la operación adecuada y eficiente de los componentes de la microrred [2].

El funcionamiento del sistema de supervisión mencionado, es posible gracias a las mediciones realizadas con una red de sensores ubicados estratégicamente en el circuito de la microrred. Atendiendo a esto, el presente trabajo propone un sistema embebido basado en microcontroladores, que permite la comunicación inalámbrica entre una unidad principal y unidades remotas de sensado, a fin de acceder a las variables requeridas por el sistema de supervisión, utilizando un medio alternativo de comunicación de datos. La Fig. 2 muestra un diagrama del sistema mencionado, donde las unidades están desarrolladas en base al microcontrolador ESP8266 y la intercomunicación entre las mismas es realizada mediante el protocolo de comunicación de datos “ESP-NOW”, cuyas características principales son: requiere poca energía para la comunicación inalámbrica, funciona en la banda de 2,4 GHz y para el emparejamiento cada dispositivo cuenta con un código MAC único [3]. Cabe aclarar que si bien el diagrama mostrado en la Fig. 2 muestra sólo una unidad remota, el sistema propuesto fue diseñado para que varias de estas unidades puedan interactuar con la unidad principal.

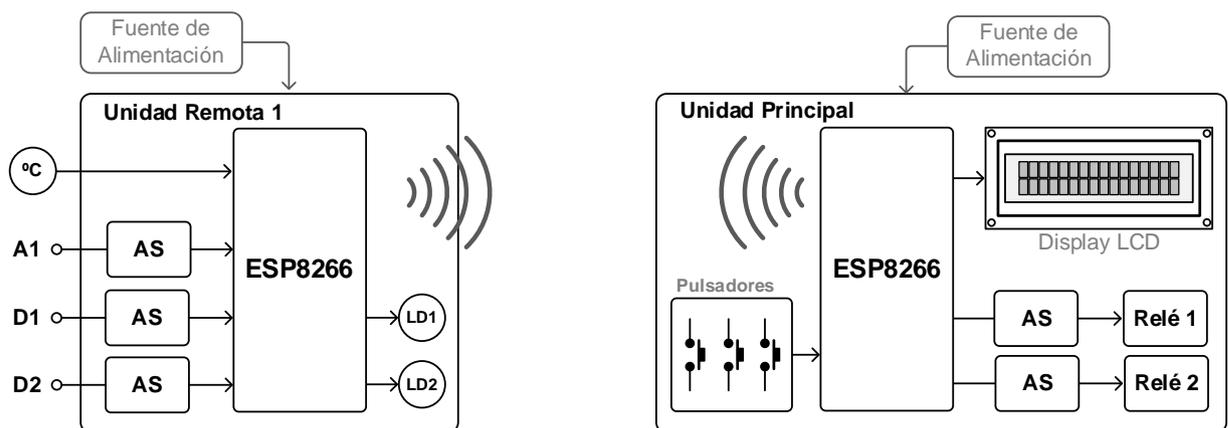


Fig. 1. Diagrama de bloques del sistema de telemetría para sensores.

En el prototipo del sistema propuesto, cada unidad remota cuenta con un sensor de temperatura, una entrada analógica de 0 a 5 V (para otros tipos de sensores) y dos entradas digitales optoacopladas. Los valores de estas variables se reportan a la unidad principal, quien encuesta periódicamente a las unidades remotas y en base a los resultados de las mediciones controla el estado de sus salidas tipo relé, accionándolas cuando el valor de la variable analógica en la unidad remota correspondiente supere cierto umbral establecido previamente. Además, la unidad principal posee una interfaz de usuario conformada por un display LCD y un conjunto de tres pulsadores con el fin de que el usuario pueda interactuar de forma sencilla con todo el sistema.

A partir de lo mencionado, este trabajo se encuentra organizado de la siguiente forma: Inicialmente presenta las características principales del microcontrolador y el sensor de temperatura utilizados; luego aborda el diseño del sistema propuesto, donde son explicadas cuestiones relacionadas con el protocolo de comunicación, el circuito y el programa de cada parte que conforma el sistema; Posteriormente se presentan los resultados, explicando la operación del sistema y mostrando las placas desarrolladas; Finalmente se expresan las conclusiones obtenidas con el desarrollo del trabajo.

2. Desarrollo

2.1. Microcontrolador ESP8266

Este dispositivo se trata de un chip integrado con conexión Wi-Fi y compatible con el protocolo TCP/IP, a través del cual el dispositivo puede otorgar acceso a una red de datos como la internet. El ESP8266 es fabricado por firma Espressif, una empresa China situada en Shangai [4].

Entre las especificaciones que posee el mencionado dispositivo, a nivel de hardware cuenta con una unidad central de proceso (CPU) Tensilica L106 de 32 bits que posee las siguientes condiciones de operación: un voltaje de alimentación entre 3 V y 3,6 V, consumo de corriente de 80 mA y una temperatura de operación entre -40 °C y 125 °C [5]. Para la conectividad a la red de datos, el ESP8266 soporta IPv4 y los protocolos TCP/UDP/HTTP/FTP sin embargo no soporta HTTPS en un principio, pero lo puede hacer mediante software tanto en cliente como en servidor TLS1.2.



Fig. 2. Placa de desarrollo NodeMCU [4].

En el mercado existen varios módulos que emplean el microcontrolador ESP8266. Dada su amplia divulgación y disponibilidad en el mercado nacional, para este trabajo se opta por utilizar la placa denominada NodeMCU, la cual se observa en la Fig. 2. Por otra parte, a diferencia de otros dispositivos, la placa mencionada incorpora el hardware necesario para la programación, incluyendo un conector serie USB para la programación/depuración, lo cual permite la carga de software de forma autónoma.

La placa NodeMCU está basada en el módulo ESP-12 el cual incorpora al microcontrolador ESP8266. Una característica importante de este módulo es que permite grabar en su memoria el firmware adecuado para programar el dispositivo en lenguajes tales como C, C++, LUA, Python, Basic o JavaScript. Para el sistema propuesto, el desarrollo de los programas de las unidades es realizado con Arduino IDE, dada la facilidad y versatilidad en la utilización que tiene este entorno de desarrollo.

2.2. *Sensor de Temperatura DS18B20*

La existencia de un sensor de temperatura en las unidades remotas del sistema propuesto, permite que el sistema de supervisión de la microrred pueda medir variables tales como la temperatura de las baterías y del ambiente, las cuales son importantes para tomar decisiones de control relacionadas al estado de carga de las baterías, las condiciones meteorológicas, entre otras.

Debido al rango de temperatura a medir y a su amplia disponibilidad en el mercado nacional, como sensor de temperatura se utiliza el DS18B20. Este dispositivo es un sensor de temperatura digital que proporciona mediciones como palabras de 9 a 12 bits (configurable) en el rango de -55 °C a +125 °C. Este sensor proporciona las mediciones mediante el protocolo de comunicación serie “1-Wire”, que como su nombre lo indica, tan solo requiere una línea de datos para la comunicación con un microprocesador o microcontrolador. De esta forma varios sensores pueden conectarse al mismo bus de datos, para lo cual cada dispositivo posee un código de identificación único de 24 bits [6].

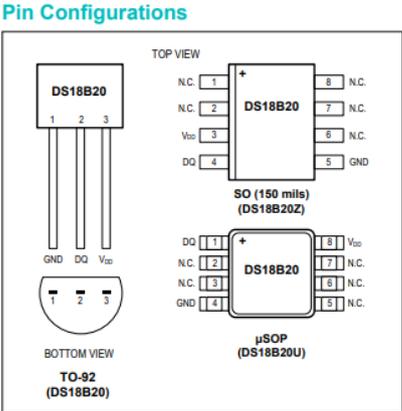


Fig. 3. Esquema de pines (según encapsulado) del sensor digital DS18B20 [6].

A partir de la Fig. 3 se observa que todos los encapsulados presentan tres pines útiles: V_{DD} y GND para la tensión de alimentación, la que puede ser de 3 V a 5,5 V y DQ para el bus de comunicación serie por donde se intercambian los datos bidireccionalmente con el protocolo 1-Wire.

El circuito interno que posee el DS18B20 para controlar el estado del bus de comunicación, requiere la utilización de una resistencia de *pull-up* en la línea de datos DQ. Esto es a modo que cuando los sensores conectados al bus 1-Wire no envíen datos, la línea permanece en estado de reposo con una tensión igual a la suministrada por la resistencia de *pull-up* mencionada. En el momento que algún dispositivo conectado al bus (sensor o NodeMCU) comienza a transmitir, la línea cambia de estado. La resistencia de *pull-up* recomendada por el fabricante es de 4,7 k Ω para una longitud de cable de hasta 5 m [7].

Para el desarrollo de aplicaciones donde la placa NodeMCU debe acceder a las mediciones del DS18B20, existen las librerías en C++ como lo pueden ser “OneWire.h” y “DallasTemperature.h” que facilitan la programación de dicha placa y el uso del sensor. En el uso de estas librerías resulta importante definir el pin (GPIO) de la placa NodeMCU que será utilizado como bus “1-Wire” y al cual se conecta la línea de datos DQ del sensor de temperatura. Esto se logra asignando el valor correspondiente del GPIO a la constante “oneWireBus”, que es utilizada por las librerías mencionadas y donde se declaran los objetos de las clases “OneWire” y “DallasTemperature”, siendo este último el utilizado para acceder a las mediciones de temperatura.

2.3. *Diseño del circuito*

2.3.1. *Conexiones del ESP8266 en las unidades del sistema*

El sistema desarrollado cuenta con una unidad principal que está comunicada en forma inalámbrica a una o más unidades remotas, estas diseñadas en base a los requerimientos indicados en secciones anteriores. Cabe mencionar que, si bien este trabajo presenta la construcción de una unidad remota, a los efectos de comprobar la operación de sistema propuesto, fueron implementadas dos unidades remotas en circuitos experimentales (*protoboard*).

La unidad principal está compuesta por un *display* para la visualización de variables, tres pulsadores para interactuar con el sistema y dos salidas tipo relé accionadas en función del valor medido en la entrada analógica de la unidad remota correspondiente en base a un umbral seteado por el usuario. De esta forma, de la placa NodeMCU se requiere utilizar un mínimo de tres pines como entrada y cuatro pines como salidas digitales.

Por el otro lado, la unidad remota cuenta con dos entradas digitales optoacopladas, una entrada analógica de voltaje y un sensor DS18B20. Requiriendo de esta forma de la placa NodeMCU tres pines como entradas digitales y un pin como entrada analógica.

La Fig. 4 muestra la disposición de pines la placa NodeMCU. A partir de la misma y prestando especial atención a los estados bases de los pines, que podrían llegar a generar inconvenientes durante la energización [8], para cada unidad del sistema se efectuó la siguiente asignación de pines: **A) Unidad Principal:** Pines D1 y D2, salidas para manejar en forma serial el display LCD; Pines D3 y D4, salidas para comandar los relés; Pines D5, D6 y D7, entradas para lectura de los pulsadores P1,

P2 y P3 respectivamente. **B) Unidad Remota:** Pin D1, línea de datos DQ para comunicación con el sensor de temperatura DS18B20; Pines D2 y D5, entradas para lectura del estado de entradas digitales optoacopladas; Pin A0, entrada analógica.

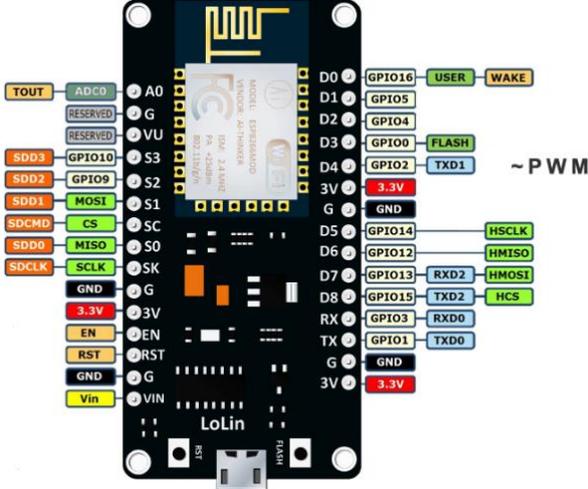


Fig. 4. Esquema de pines de la placa NodeMCU v3 [9].

Considerando la distribución de pines mencionada, seguidamente se presenta el diseño de los circuitos de interfaz asociados a cada uno de estos.

2.3.2. *Diseño de los circuitos de interfaz para la unidad remota*

Para las entradas digitales optoacopladas se plantea que las señales deben estar en el rango de 12 V a 24 V para que la unidad remota considere a la señal con un estado lógico ALTO (por debajo de esta se considera BAJO). Atendiendo a esto se propone el circuito de la Fig. 5, donde el diodo Zener 1N4739 (9,1V/1W) incrementa adecuadamente el voltaje umbral de conducción en la entrada del optoacoplador 4N26 y el diodo 1N4007 desempeña el rol de proteger al circuito de una eventual conexión con polaridad invertida en la señal de entrada.

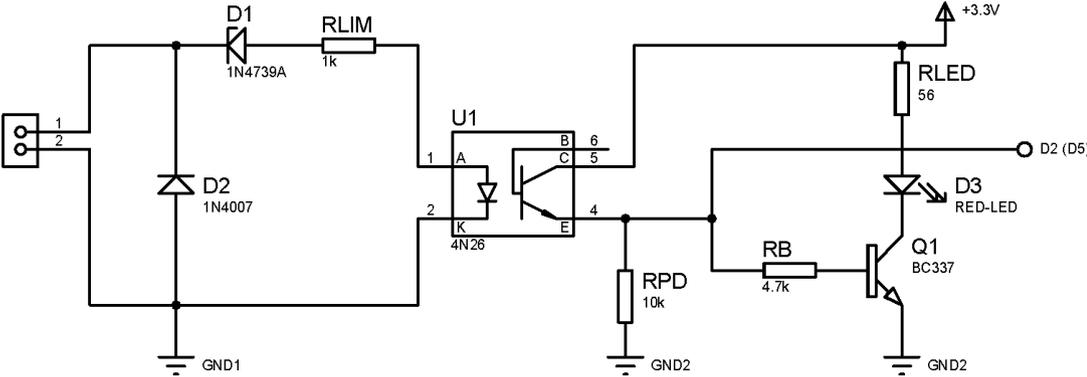


Fig. 5. Circuito de interfaz para entradas digitales optoacopladas en la unidad remota.

Considerando el voltaje de alimentación $V_{CC} = 3,3 \text{ V}$, las caídas de tensión en el LED $V_{LED} = 2 \text{ V}$ y de colector-emisor en saturación del transistor utilizado $V_{CE(sat)} = 0,7 \text{ V}$, la resistencia limitadora de corriente para el LED indicador R_{LED} puede dimensionarse con las ec. (1) y (2).

$$R_{LED} = \frac{V_{CC} - V_{LED} - V_{CE(sat)}}{I_{LED}} \quad (1)$$

$$P_{R_{LED}} = F_S \cdot (I_{LED})^2 \cdot R_{LED} \quad (2)$$

Siendo la corriente $I_{LED} = 15 \text{ mA}$ y considerando un factor de seguridad $F_S = 1,5$, la resistencia para el LED indicador resulta en un valor comercial $R_{LED}: 56 \Omega / 1/8 \text{ W}$.

Habiendo seleccionado la resistencia limitadora R_{LED} , la corriente de colector en el transistor Q1 de la Fig. 5, puede calcularse con la ec. (1). Para este caso el valor obtenido es $I_C = 14,3 \text{ mA}$. Considerando el valor de I_C obtenido y una ganancia $h_{FE(min)} = 100$, mediante la ec. (3) puede obtenerse la corriente de base I_B requerida para saturar al transistor Q1.

$$I_B = 3 \cdot \frac{I_C}{h_{FE(min)}} \quad (3)$$

$$R_B = \frac{V_{CC} - V_{CE(sat)} - V_{BE(on)}}{I_B} \quad (4)$$

$$P_{R_B} = F_S \cdot (I_B)^2 \cdot R_B \quad (5)$$

Teniendo en cuenta que en el optoacoplador 4N26 la caída de tensión colector-emisor con su transistor saturado es $V_{CE(sat)} = 0,7 \text{ V}$ y que Q1 de la Fig. 5 la caída de tensión base-emisor encendido es $V_{BE(on)} = 1,2 \text{ V}$, la resistencia de base R_B que permite el paso de la corriente I_B para la saturación de Q1 puede dimensionarse con las ec. (4) y (5). A partir de esto resulta $R_B: 4,7 \text{ k}\Omega / 1/8 \text{ W}$.

Para determinar la resistencia R_{PD} de la Fig. 5, la cual asegura que la entrada digital D2 (D5) de la placa NodeMCU permanezca en estado lógico BAJO cuando el transistor del 4N26 permanezca en estado de corte, se considera la ec. (6). Para utilizar la misma se tienen en cuenta el voltaje máximo considerado como estado lógico BAJO dado por $V_{IL(max)} = 0,83 \text{ V}$ y la corriente drenada a través de la entrada digital en dicho estado la cual es $I_L = 1 \mu\text{A}$. Ambos parámetros para el microcontrolador ESP8266 que incorpora la placa NodeMCU.

$$R_{PD(max)} = V_{IL(max)} / I_L \quad (6)$$

A partir de la ec. (6), con los valores mencionados se obtiene $R_{PD(max)} = 830 \text{ k}\Omega$. Por lo cual, para el circuito de la entrada digital optoacoplada es adoptado $R_{PD} = 10 \text{ k}\Omega$.

En el circuito de la Fig. 5, la corriente I_F requerida en el LED del 4N26 para saturar su transistor de salida, es obtenida mediante las ec. (7) y (8).

$$I_{Csat} = I_{R_{PD}} + I_B = \frac{V_{CC} - V_{CE(sat)}}{R_{PD}} + \frac{V_{CC} - V_{CE(sat)} - V_{BE(on)}}{R_B} \quad (7)$$

$$CTRL \cdot \alpha_{st} \cdot I_F > \frac{I_{C_{sat}}}{\alpha_E \cdot \alpha_{DISP}} \quad (8)$$

Siendo los coeficientes de degradación por envejecimiento y dispersión $\alpha_E = 0,8$ y $\alpha_{DISP} = 0,65$ respectivamente, el segundo miembro de la ec. (8) tiene un valor de 1,1 mA. Considerando una corriente $I_F = 5$ mA, con la gráfica de la Fig. 3 de la hoja de datos del optoacoplador [10] se obtiene una razón de transferencia de corriente $CTRL = 0,6$ y un coeficiente de saturación $\alpha_{st} = 0,68$. Mediante estos valores puede verificarse la desigualdad de la ec. (8) y con esto se confirma que el valor tomado de I_F es adecuado para saturar al transistor del 4N26 en las condiciones de operación del circuito.

El circuito de la entrada digital optoacoplada tiene que identificar un estado lógico ALTO cuando el voltaje de entrada se encuentre en un rango de 12 V a 24 V. Por tal motivo, es necesario garantizar $I_F = 5$ mA cuando en la entrada del circuito hay un voltaje $V_{IN} = V_{IN(min)} = 12$ V y determinar la potencia en R_{LIM} cuando $V_{IN} = V_{IN(max)} = 24$ V. A partir de esto, la resistencia limitadora R_{LIM} para la entrada del circuito de la Fig. 5 es dimensionada con las ec. (9) y (10).

$$R_{LIM} = \frac{V_{IN(min)} - V_Z - V_F}{I_F} \quad (9)$$

$$P_{R_{LIM}} = F_S \cdot \frac{(V_{IN(max)} - V_Z - V_F)^2}{R_{LIM}} \quad (10)$$

Considerando que el diodo Zener utilizado tiene una caída de tensión $V_Z = 9,1$ V y en el LED del optoacoplador la caída de tensión es $V_F = 1,3$ V, para $V_{IN(min)} = 12$ V, $I_{F(min)} = 5$ mA, $V_{IN(max)} = 24$ V, $I_{F(max)} = 41,2$ mA y $F_S = 1,5$ resulta una resistencia comercial R_{LIM} : 330 Ω / 1 W.

A través de las ec. (11) y (12) puede verificarse que la potencia de operación, tanto del LED como del transistor que posee el 4N26 están por debajo de los límites indicados por el fabricante.

$$P_{IN} = F_S \cdot I_{F(max)} \cdot V_F < P_{IN(max)} \quad (@T_{amb} = 50 \text{ }^\circ\text{C}) \quad (11)$$

$$P_{OUT} = F_S \cdot I_{C(sat)} \cdot V_{CE(sat)} < P_{OUT(max)} \quad (@T_{amb} = 50 \text{ }^\circ\text{C}) \quad (12)$$

Evaluando las ec. (11) y (12) resulta $P_{IN} = 80,3$ mW y $P_{OUT} = 466$ μ W respectivamente, siendo estos valores inferiores a los límites de potencia $P_{IN(max)} = 84,7$ mW y $P_{OUT(max)} = 107,2$ mW obtenidos a partir de la hoja de datos del optoacoplador para una temperatura ambiente $T_A = 50$ $^\circ$ C.

Para la entrada analógica de 0 a 5 V que posee la unidad remota, se requiere disminuir este voltaje al rango de 0 a 3,3 V, siendo estos los valores con los que operan las entradas asociadas al conversor analógico-digital (ADC) disponible en el microcontrolador de la placa NodeMCU de dicha unidad. El circuito de interfaz para las entradas analógicas posee un divisor de tensión resistivo como se indica en la Fig. 6, con un capacitor de pequeño valor para estabilizar el valor de la tensión. Además,

incorpora el diodo Schottky 1N5819 para brindar protección ante posibles sobrevoltajes en la entrada del circuito.

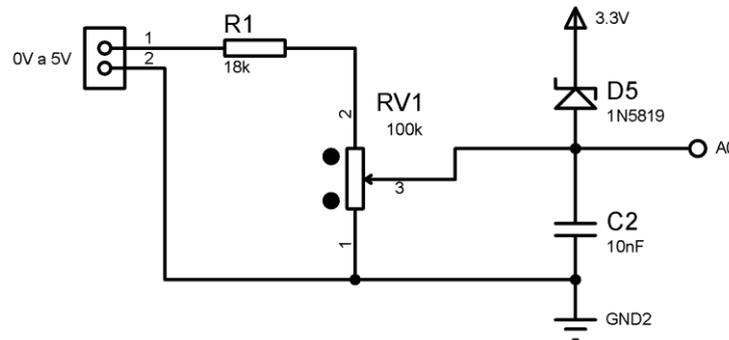


Fig. 6. Circuito de la interfaz para el voltaje en la entrada analógica en la unidad remota.

Para realizar un ajuste apropiado en el rango de medición (de 0 a 5 V), el circuito de la Fig. 6 posee un preset (RV1) el cual puede lograrse una mejor aproximación al nivel de tensión deseado.

2.3.3. Diseño de los circuitos de interfaz para la unidad principal

La unidad principal posee dos relés cuya operación puede relacionarse con el valor alcanzado por las variables analógicas en una unidad remota correspondiente. Para que el microcontrolador de la placa NodeMCU pueda comandar a estos relés, que se activan cuando el valor recibido de una unidad remota supera cierto umbral, es propuesto el circuito de interfaz presentado en la Fig. 7.

El circuito mencionado es diseñado en base a un relé ME-15M de la marca Massuse, el cual tiene una bobina que opera con 12 V y absorbe una corriente $I_R = 30 \text{ mA}$ [11].

Considerando que en paralelo a la bobina del relé existe un LED para indicar su estado y el mismo será polarizado con una corriente de 10 mA, el transistor Q3 de la Fig. 7 tiene que manejar en su colector una corriente $I_C = 40 \text{ mA}$. De esta forma, el transistor mencionado debe accionar una carga de $12 \text{ V} / 40 \text{ mA}$, por lo cual es seleccionado el transistor BC548 [12] que soporta una corriente de colector de hasta 100 mA, una tensión de colector emisor de 30 V y cuenta con una ganancia de corriente $h_{FE(min)} = 110$.

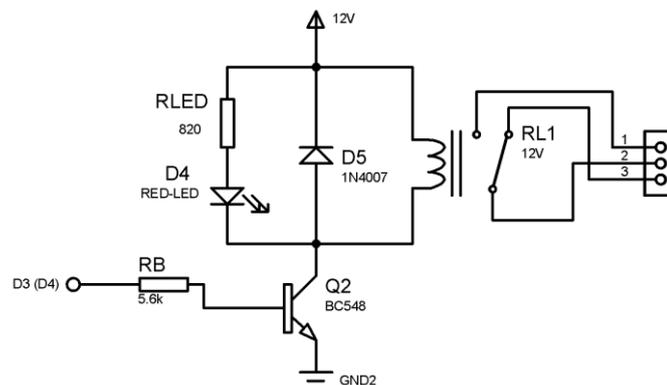


Fig. 7. Circuito de potencia para comando de los relés en la unidad principal.

La resistencia limitadora de corriente R_{LED} puede dimensionarse a través de las ec. (13) y (14), donde la caída de tensión en el LED es $V_{LED} = 2 \text{ V}$ y la caída de tensión colector-emisor en saturación por el transistor Q2 es $V_{CE(sat)} = 0,6 \text{ V}$.

$$R_{LED} = \frac{V_{cc} - V_{LED} - V_{CE(sat)}}{I_{LED}} \quad (13)$$

$$P_{R_{LED}} = F_S \cdot (I_{LED})^2 \cdot R_{LED} \quad (14)$$

Considerando una corriente $I_{LED} = 10 \text{ mA}$ y un factor de seguridad $F_S = 1,5$; resulta un valor comercial R_{LED} : $820 \Omega / 1/4 \text{ W}$. Con este valor de R_{LED} , a través de la ec. (13) puede recalcularse la corriente en el LED. Sumando a I_{LED} la corriente absorbida por la bobina del relé $I_R = 30 \text{ mA}$, puede obtenerse la corriente que manejará el colector de Q2, quedando la misma $I_C = 41,5 \text{ mA}$. A partir de esta última, con las ec. (3), (15) y (5) puede dimensionarse la resistencia de base R_B requerida para saturar al transistor.

$$R_B = \frac{V_{OH(min)} - V_{BE(on)}}{I_B} \quad (15)$$

Siendo para Q2 la caída de tensión colector-emisor en saturación $V_{CE(sat)} = 0,6 \text{ V}$, la caída de tensión base-emisor encendido en el mismo $V_{BE(on)} = 0,7 \text{ V}$ y el voltaje de salida en ALTO para el pin del ESP8266 que comanda al transistor es $V_{OH(min)} = 2,64 \text{ V}$, con un factor de seguridad $F_S = 1,5$ resulta una resistencia comercial R_B : $5,6 \text{ k}\Omega / 1/8 \text{ W}$.

A través de la ec. (16) puede verificarse que la potencia de operación del transistor se encuentre por debajo de los límites indicados por el fabricante.

$$P_D = P_B + P_C = F_S \cdot (I_B \cdot V_{BE(on)} + I_C \cdot V_{CE(sat)}) < P_{D(max)} \quad (@T_{amb} = 50 \text{ }^\circ\text{C}) \quad (16)$$

Evaluando la ec. (16) con un factor de seguridad $F_S = 1,5$; resulta la potencia de operación del transistor $P_D = 37,7 \text{ mW}$. Este valor es inferior al límite de $P_{D(max)} = 500 \text{ mW}$, obtenido de la hoja de datos de Q2 para una temperatura ambiente $T_A = 50 \text{ }^\circ\text{C}$.

2.4. Comunicación de datos entre las unidades

La comunicación inalámbrica entre las dos unidades del sistema desarrollado es realizada mediante ESP-NOW, el cual es un protocolo de comunicación entre varios dispositivos creado por Espressif, similar al utilizado en dispositivos de baja energía que funcionan en la banda de $2,4 \text{ GHz}$. Su funcionamiento el emparejamiento de los dispositivos es indispensable, pero una vez hecha la conexión esta será automática. Como limitación, a través de este protocolo pueden intercambiarse únicamente pequeños mensajes (con un máximo de 250 Bytes) [3].

En el programa desarrollado para las unidades, se establecen dos estructuras para el intercambio de información: **A) De datos**, con las variables: “int nombre”, permite identificar el dispositivo del que proviene la información; “float temp”, almacena el valor obtenido del sensor DS18B20; “bool

entrada_1”, contiene el estado de la entrada digital N°1 de la unidad remota; “bool entrada_2”, contiene el estado de la entrada digital N°2 de la unidad remota; “int adc_valor”, almacena el valor obtenido por el ADC de la entrada analógica; **B) Encuesta**, con la variable “bool enviar_datos” que es una bandera utilizada para solicitar los datos a los dispositivos remotos.

A partir de los programas desarrollados para las unidades del sistema, la comunicación entre las mismas opera de la siguiente forma: La unidad principal constantemente solicita información a las unidades remotas, enviando una encuesta y esperando la devolución de los datos; en el caso de no poder enviar, o que la recepción datos desde una de las unidades falle, la unidad principal pasa a encuestar a la siguiente unidad remota inmediatamente; al recibir la encuesta, las unidades remotas envían los datos que poseen; estos datos son almacenados en la unidad principal para procesarse y permitir la visualización de los mismos mediante el display.

2.5. Firmware (programa) de las unidades

La unidad principal posee tres pulsadores (P1, P2 y P3) y un display LCD con los cuales el usuario puede acceder a distintas funciones del sistema embebido desarrollado. La Fig. 8 muestra el acceso a estas funciones mediante los pulsadores y navegando en el display, donde es visualizada la información de interés.

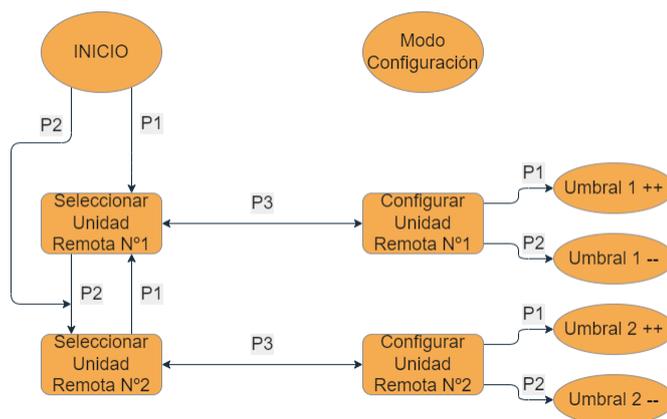


Fig. 8. Acción de los pulsadores.

La Fig. 9 presenta el diagrama de flujo del programa realizado para la unidad principal. En el mismo, luego de la configuración inicial de variables, puertos y protocolo de comunicación, es ejecutado el bucle principal donde en cada iteración la unidad principal realiza la encuesta a la unidad remota correspondiente. En caso de no poder enviar la encuesta, es incrementado un contador con el fin de poder detectar el caso en que una de las unidades remotas se haya desconectado. Adicionalmente, el programa de la unidad principal verifica si el valor medido superó el umbral seteado por el usuario, activando o desactivando la salida tipo relé correspondiente.

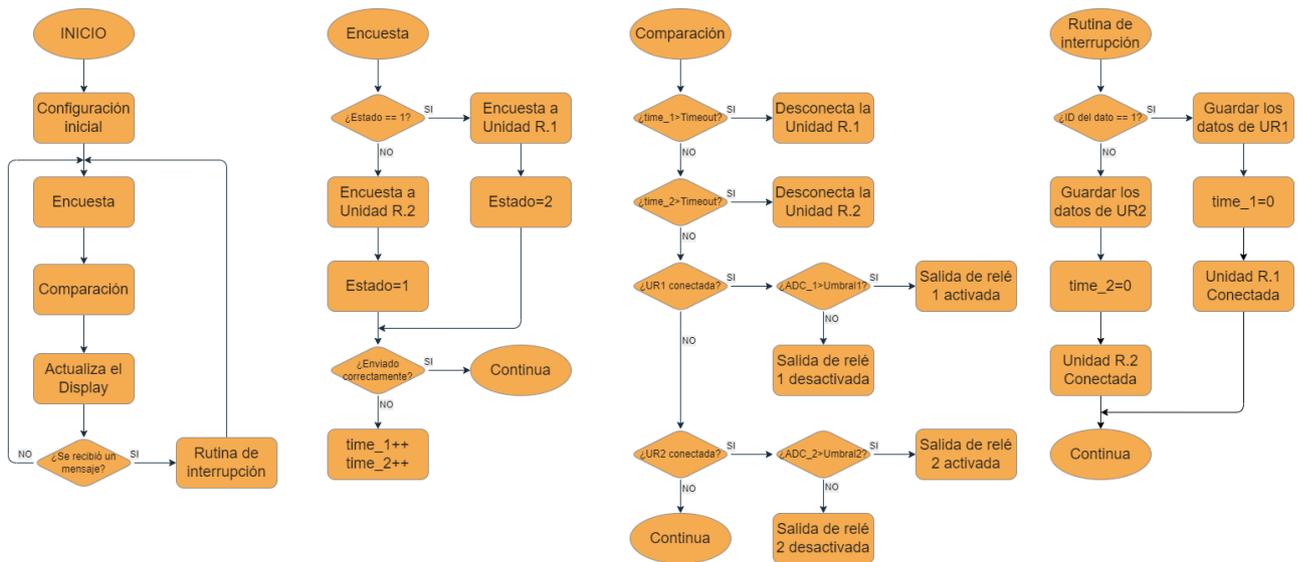


Fig. 9. Diagrama de flujo del firmware para la unidad principal.



Fig. 10. Diagrama de flujo del firmware para las unidades remotas.

La Fig. 10 muestra el diagrama de flujo del programa desarrollado para las unidades remotas. En el mismo, luego de la configuración inicial de variables, puertos y protocolo de comunicación, se ejecuta el bucle principal, donde permanentemente es leído el estado de las variables y envía las misma a la unidad principal al recibir una encuesta por parte de esta unidad.

3. Resultados

Como no se contaba con un software que permita simular el sistema en su totalidad, los diferentes circuitos de interfaz del mismo fueron simulados individualmente y para verificar su operación, con la placa NodeMCU correspondiente, se recurrió a la experimentación directa en un *protoboard*. Luego de comprobar el funcionamiento correcto de cada etapa por separado, la unidad principal y

dos unidades remotas fueron implementadas experimentalmente en *protoboard* para verificar la operación del sistema completo y realizar los ajustes correspondientes en los programas desarrollados para cada unidad. Obteniendo resultados exitosos a partir de las pruebas efectuadas con el sistema experimental, se prosiguió con el diseño y construcción de los circuitos impresos (PCB) correspondientes a cada unidad, los cuales pueden observarse en las Fig. 11 y Fig. 12.

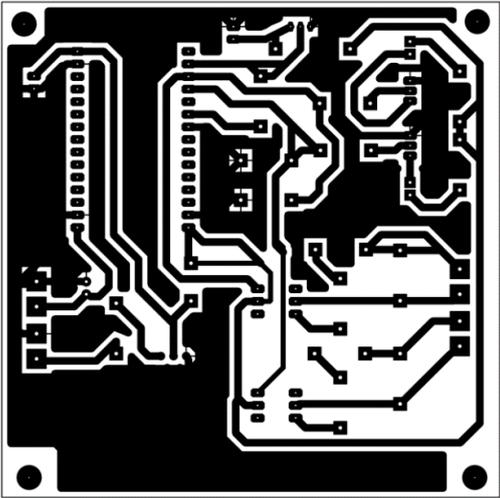


Fig. 11. Diseño del PCB para las unidades remotas.

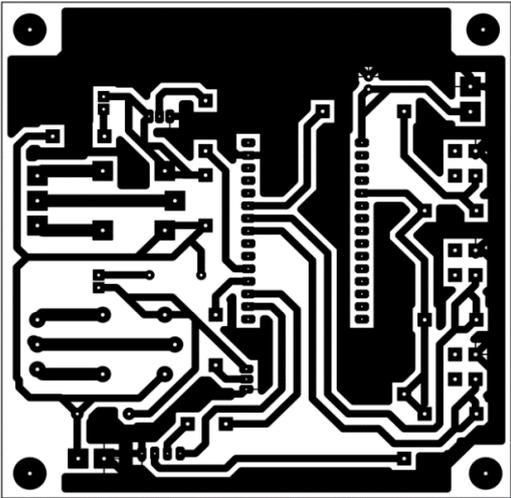
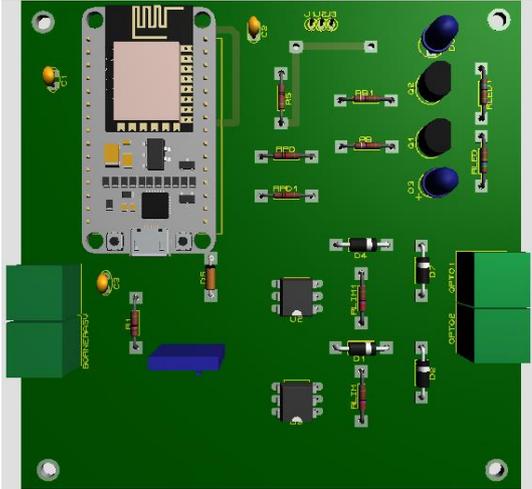
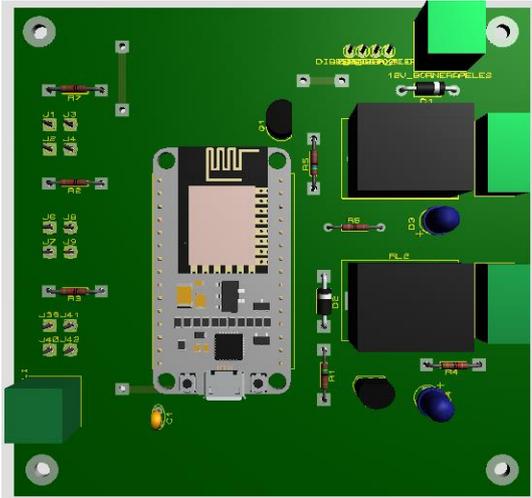


Fig. 12. Diseño del PCB para la unidad principal.



Luego del montaje y soldadura de los componentes en los circuitos impresos desarrollados, fue corroborado de manera práctica el funcionamiento del sistema embebido diseñado. Para esto se realizaron distintos ensayos con el PCB de cada unidad, efectuándose mediciones en diferentes partes del circuito para comprobar la presencia de las señales esperadas. La Fig. 13 muestra las unidades del sistema propuesto, durante los ensayos realizados.

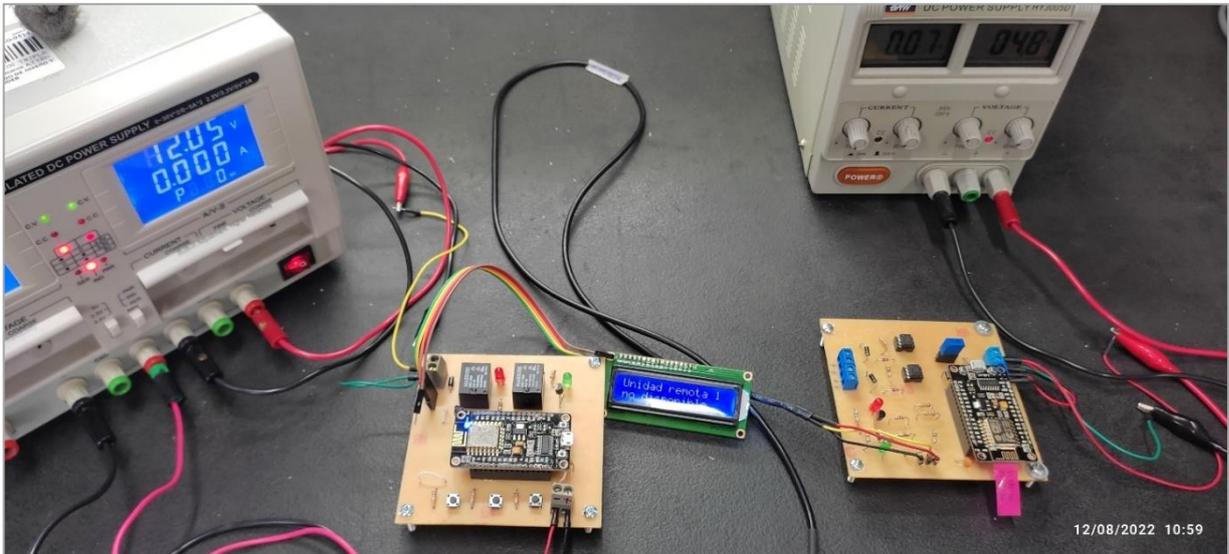


Fig. 13. Ensayo práctico del sistema embebido.

Para comprobar la operación del sistema completo, se hicieron pruebas verificando con esto que todas las variables medidas en la unidad remota, podían visualizarse correctamente en el display de la unidad principal. Por otra parte, también se comprobó el accionamiento correcto de los relés cuando cada variable analógica medida remotamente superaba los umbrales configurados por el usuario en la unidad principal. A través del siguiente enlace puede accederse a un video demostrativo del funcionamiento correspondiente al prototipo del sistema construido:

<https://drive.google.com/file/d/1uZ29TeGhMidGvJM3BmCl6XFyKo5GGwLw/view?usp=sharing>

4. Conclusiones

Este trabajo propone el desarrollo de un sistema electrónico orientado a la medición de variables remotas mediante la comunicación inalámbrica entre una unidad principal y unidades remotas. Los resultados de los ensayos han demostrado que es posible utilizar el protocolo ESP-NOW para esto, pudiéndose medir en forma remota variables digitales y analógicas, como así también tomar decisiones a partir de los valores de las mismas, recopilados por la unidad principal (al accionar sus relés). Por tal motivo, el sistema embebido propuesto cumple con los requerimientos planteados y constituye una opción alternativa para supervisar el estado de operación de los elementos que integran a una microrred eléctrica, permitiendo esto que el sistema desarrollado pueda utilizarse como un medio redundante para efectuar la tarea de supervisión mencionada.

Para alcanzar los resultados mencionados, en el desarrollo del trabajo fueron consideradas diversas precauciones y recomendaciones de diseño, perfeccionadas a lo largo de la carrera. Son ejemplos de esto: la utilización de capacitores junto a las entradas de alimentación de los circuitos integrados para estabilizar voltajes, realizar ensayos de manera aislada de las distintas partes que componen al sistema para garantizar su funcionamiento individual, desarrollar criterios para la toma de decisiones a la hora de diseñar circuitos y desenvolverse en la construcción de los mismos, entre otros.

Por otra parte, la interpretación correcta de la hoja de datos para seleccionar los pines de trabajo el NodeMCU, no puede pasar desapercibido para prevenir inconvenientes con estados lógicos transitorios en los mismos. Si bien los pines de la placa mencionada figuran como líneas digitales, algunos presentan características especiales al usarlos como entradas, salidas o durante el arranque del microcontrolador. En cuanto a la implementación de la comunicación de datos, la utilización de dispositivo que poseen un código de identificación, facilita el intercambio de información con los mismos.

En relación a la resolución de una situación problemática utilizando un dispositivo que no se había utilizado antes (NodeMCU), permitió adquirir nuevos conocimientos y también aplicar adecuadamente los saberes previos que fueron desarrollados en la asignatura donde se ha realizado el trabajo. Esto demuestra la destreza y correcta extrapolación de conocimientos, siendo esto muy importante para el desenvolvimiento como futuros profesionales en el área de la electrónica.

A modo de mejorar el sistema desarrollado, se propone a futuro realizar un programa para la unidad principal el cual permita una interacción sistema-usuario más amigable, indicando en todo momento a que unidad remota corresponden los datos recibidos.

Referencias

- [1] N. Hatziargyriou, *Microgrids: Architectures and Control*, Wiley, 2014.
- [2] Asian Development Bank, *Handbook on Microgrids for Power Quality and Connectivity*, 2020.
- [3] D. Carrasco, «Esp-Now conecta dos o mas ESP32-ESP8266,» [En línea]. Available: <https://acortar.link/Pc6xXw>. [Último acceso: 17 Noviembre 2022].
- [4] L. d. V. Hernández, «ESP8266 todo lo que necesitas saber del módulo WiFi para Arduino,» [En línea]. Available: <https://acortar.link/yiGAh1>. [Último acceso: 17 Noviembre 2022].
- [5] Espressif, «ESP8266EX Datasheet,» [En línea]. Available: <https://acortar.link/MqsI1>. [Último acceso: 17 Noviembre 2022].
- [6] Maxim Integrated, «DS18B20 Datasheet,» [En línea]. Available: <https://acortar.link/TxBM4j>. [Último acceso: 17 Noviembre 2022].
- [7] L. d. V. Hernández, «DS18B20 sensor de temperatura para líquidos con Arduino,» [En línea]. Available: <https://acortar.link/8PR22X>. [Último acceso: 17 Noviembre 2022].
- [8] «Detalles de Hardware y Pins del ESP8266,» [En línea]. Available: <https://acortar.link/8FxeSC>. [Último acceso: 17 Noviembre 2022].
- [9] «ESP8266 NodeMcu Pinout,» [En línea]. Available: <https://acortar.link/YIBInc>. [Último acceso: 17 Noviembre 2022].
- [10] Vishay Semiconductors, «4N26 Datasheet,» [En línea]. Available: <https://acortar.link/MqdVja>. [Último acceso: 17 Noviembre 2022].
- [11] «Massuse relay ME-15M Datasheet,» [En línea]. Available: <https://acortar.link/7oeJ4B>. [Último acceso: 18 Noviembre 2022].
- [12] Motorola, «BC548 Datasheet,» [En línea]. Available: <https://acortar.link/9r0Ks2>. [Último acceso: 17 Noviembre 2022].