

Sistema de control por radioenlace para bomba de agua

Juan J. Berger ^{a*}, Martín A. Berger ^{a,b}, Gerardo M. Iurinic ^{a,b}, Guillermo A. Fernández ^{a,b}

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

juanjoseberger1999@gmail.com, bergermartin090@gmail.com, gerardo_m_iurinic@hotmail.com,
guillermo.fernandez@fio.unam.edu.ar

Resumen

Este trabajo presenta el desarrollo de un sistema embebido para el control a distancia de una bomba de agua, haciendo uso de un enlace de radiofrecuencia. Para ello se construyó un prototipo conformado por dos unidades (circuitos) capaces de intercambiar información entre sí mediante un enlace de radio, en el cual una unidad envía los comandos necesarios para controlar el funcionamiento de la bomba de agua, la cual está conectada a una unidad remota del sistema de control. El prototipo obtenido, también puede informar a los usuarios sobre errores de comunicación y fallas en el accionamiento de la bomba. El sistema fue realizado como trabajo integrador de una asignatura de la carrera Ingeniería Electrónica, con el fin de aplicar los saberes adquiridos en la misma e integrar conocimientos de asignaturas previas. Este artículo presenta el desarrollo del prototipo del sistema mencionado, explicando sus partes y el funcionamiento mediante un diagrama de bloques, describe el diseño de los circuitos electrónicos y la operación de los programas realizados para las unidades y muestra los resultados obtenidos. Estos últimos exponen los circuitos impresos del sistema y los resultados de los ensayos realizados, los cuales demostraron que es posible realizar el control de la bomba de agua utilizando el sistema embebido obtenido.

Palabras Clave – Bomba de agua, Comunicación, Control, Microcontrolador, Radioenlace, Sistema de control.

1. Introducción

Existen procesos industriales donde surge la necesidad de comandar el accionamiento de una bomba de agua, la cual se encuentra ubicada en un lugar distante y/o de difícil acceso, en relación al nivel de agua de correspondiente depósito. En estas situaciones, el tendido de cables para sensores de nivel y accionamientos de llaves eléctricas puede resultar costoso, debido a las largas distancias y/o complejas instalaciones, como en el caso de que las mismas deban hacerse en forma subterránea para mayor seguridad de la instalación. Estas situaciones conllevan a un encarecimiento en los costos del cableado entre la bomba y el comando de la misma en el depósito.

Atendiendo a lo mencionado, el presente trabajo propone una solución a la necesidad de comandar una bomba de agua alejada en forma remota y de manera inalámbrica, utilizando un sistema electrónico conformado por dos circuitos electrónicos encargados de gestionar señales y comandar el estado de la bomba. El desarrollo del sistema mencionado, es realizado como trabajo integrador de la asignatura Técnicas Digitales 2 de la carrera Ingeniería Electrónica, donde se estudia el diseño e

implementación de circuitos electrónicos basados en microcontroladores (sistemas embebidos), mediante la integración de saberes relacionados a la programación y el diseño de circuitos electrónicos.

Este artículo es desarrollado de la siguiente forma: Inicialmente se explica el funcionamiento del sistema construido, indicando cuestiones relacionadas con protocolo de comunicación utilizado; luego el diseño de las diferentes etapas de los circuitos y el programa de cada parte del sistema; posteriormente se expresan los resultados y las conclusiones obtenidas con el desarrollo del trabajo.

2. Desarrollo

2.1. Operación del sistema

La Fig. 1 muestra el diagrama de bloques del sistema embebido desarrollado. En el mismo puede observarse la existencia de dos unidades conectadas en forma inalámbrica, a través de un enlace de radiofrecuencia. La unidad del depósito posee un circuito encargado de verificar el estado del sensor de nivel del depósito y según esto, enviar las señales adecuadas para comandar el encendido/apagado de la bomba de agua. Esta última puede actuar en consecuencia gracias a la interpretación de los comandos efectuada por la unidad de la bomba mostrada en la figura mencionada. Ambas unidades fueron desarrolladas en base al microcontrolador ATMEGA 2560 [7], haciendo uso de la placa de desarrollo Arduino Mega. Para efectuar la transferencia de datos en forma inalámbrica entre las unidades mencionadas, el prototipo del sistema desarrollado utiliza un módulo comercial basado en el transceptor NRF24L01.

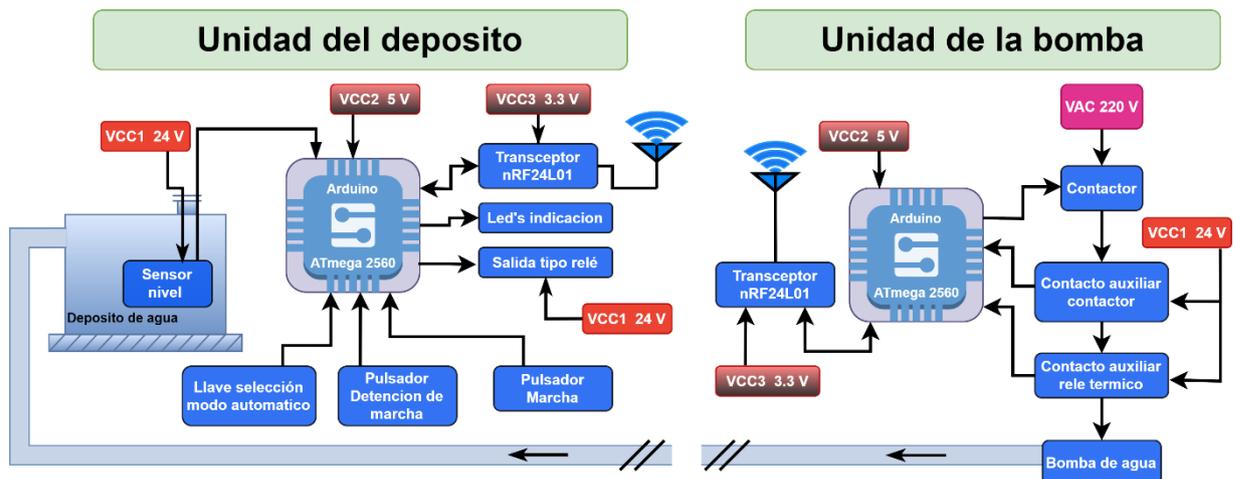


Fig. 1. Diagrama de bloques del sistema de control por radioenlace para bomba de agua.

Las órdenes de comando transmitidos por la unidad de depósito, dependen del estado lógico que toman sus entradas, siendo estas: A) Sensor de nivel de agua, con histéresis mecánica (entrega un 1 ó 0 lógico si el nivel de agua es alto o bajo respectivamente); B) Pulsador marcha, para encender la bomba; C) Pulsador de detención, para apagar la bomba; D) Llave de selección de modo automático,

para que las ordenes de encendido/apagado de la bomba sean gobernadas por el estado del sensor de nivel. En el modo automático de operación, la acción de los pulsadores de marcha y detención no se inhibe y el usuario puede manipular el estado de la bomba con los mismos. Cuando el sistema no opera en modo automático, las ordenes de comando de la bomba quedan dependientes de los pulsadores dedicados y por ende de la acción del usuario sobre estos.

El nivel de agua, es sensado a través de un flotador el cual entrega los niveles lógicos (bajo, alto) por medio de un contacto mecánico en función del nivel de agua, este se aprecia en la Fig. 3.

La unidad de depósito (UD) posee dos LEDs indicadores para que el usuario pueda disponer de información acerca del estado del enlace de comunicación (establecida o caída) y del estado de la bomba (marcha/detención y falla). La UD también cuenta con una salida tipo relé, la cual sirve para activar una señal luminosa o auditiva, cuando el sistema detecta algún tipo de falla.

La unidad de la bomba (UB) posee una salida tipo relé para comandar la bomba con un contactor y también dispone de dos entradas digitales optoacopladas para registrar los estados del contacto auxiliar del contactor y del relé térmico de la bomba y así detectar una posible falla en la misma.

2.2. Diseño del circuito

2.2.1. Salida optoacoplada tipo relé

La UB posee una salida que maneja el estado del contactor encargado de accionar a la bomba. La Fig. 2 muestra el circuito propuesto para esta salida, donde el ATMEGA 2560 [1] emplea el puerto digital PC2 para actuar sobre la bobina del contactor que es conectada a la bornera TBLOCK-M3 del circuito. De esta forma, cuando la UB debe encender la bomba, la salida PC2 pasa al estado lógico "1" y provoca la saturación de QS2, del transistor de U2 y también de QS1; con lo cual la bobina del relé R1 es energizada, conmutando sus contactos y por ende permitiendo que contactor sea energizado, cambie de estado y encienda la bomba. Cuando la UB tiene que detener a la bomba, la salida PC2 pasa a un estado lógico "0" y los transistores quedan en estado de corte, haciendo que la bobina de R1 y el contactor retornen a su estado de reposo y la bomba se apague.

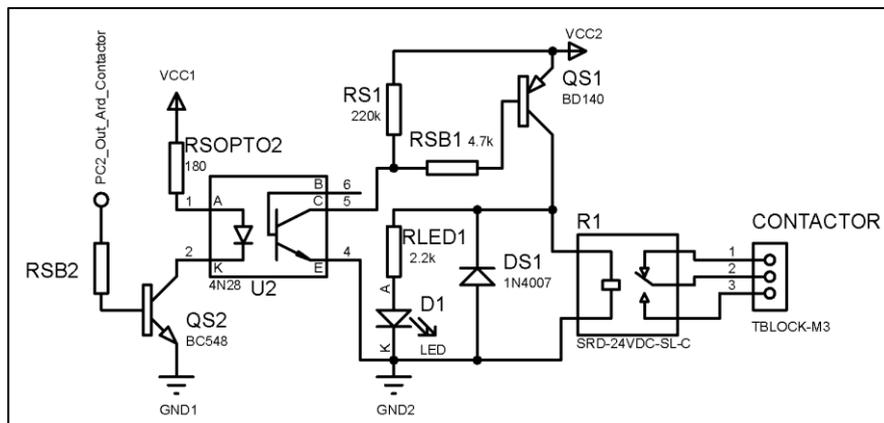


Fig. 2. Circuito de salida optoacoplada tipo relé.



Fig. 3. Funcionamiento del sensor de nivel flotador.

El circuito de la Fig. 2 utiliza un optoacoplador para aislar eléctricamente al circuito de potencia (relé y contactor) de la salida PC2 del microcontrolador, impidiendo que la misma se dañe ante eventuales fallas en el mencionado circuito de potencia [2].

En base a los voltajes de alimentación $V_{CC1} = 5 \text{ V}$, $V_{CC2} = 24 \text{ V}$ y los valores de corriente que debe manejar el circuito de la Fig. 2, se seleccionaron el transistor BC548 [3], el optoacoplador 4N28 [4], el transistor BD140 [6] y el relé SRD-24VDC-SL-C [6]. En dicho circuito el LED D1 permite indicar el estado del relé R1, mientras que el diodo volante DS1 es para proteger al transistor QS1 permitiendo que la bobina del relé se descargue y no se produzca una sobretensión en dicho transistor durante la conmutación del mismo. Una vez seleccionados los componentes anteriores, seguidamente se dimensionan las resistencias limitadoras de corriente correspondientes.

La resistencia R_{LED1} que limita la corriente a través del LED (D1), es dimensionada a partir de las ec. (1) y (2).

$$R_{LED1} = \frac{V_{cc2} - V_{ce_sat_QS1} - V_{led}}{I_{led}} \quad (1)$$

$$P_R = F_S \cdot (I_R)^2 \cdot R \quad (2)$$

Siendo $V_{ce_sat_QS1} = 0,5 \text{ V}$ la caída de tensión colector-emisor en saturación para el transistor QS1, $V_{led} = 2 \text{ V}$ la caída de tensión en el LED D1, considerando una corriente en el LED $I_{led} = I_R = 10 \text{ mA}$ y un factor de seguridad $F_S = 1,5$, con las ec. (1) y (2) resulta el valor comercial de la resistencia limitadora $R = R_{LED1}$: $2,2 \text{ k}\Omega / 1/2 \text{ W}$.

Con R_{LED1} y la ec. (1), la corriente a través del LED es $I_{led} = 9,5 \text{ mA}$. Sumando este valor a la corriente $I_l = 15 \text{ mA}$ absorbida por la bobina del relé, el transistor QS1 debe conmutar una corriente $I_{c_QS1} = 24,5 \text{ mA}$. Con este valor y la ec. (3) se determina la corriente de base para saturar a QS1.

$$I_b = 5 \frac{I_{c_QS1}}{\beta_{min_QS1}} \quad (3)$$

Siendo $\beta_{min_QS1} = 40$ la ganancia de corriente mínima para QS1, mediante la ec. (3) resulta $I_b = 3 \text{ mA}$. Con este valor de corriente y las ec. (4) y (2), se procede a dimensionar la resistencia limitadora de corriente R_{SB1} .

$$R_{SB1} = \frac{V_{cc2} - V_{be_sat_QS1} - V_{ce_QS2}}{I_b} \quad (4)$$

Considerando $V_{be_sat_QS1} = 1 \text{ V}$ la caída de tensión base-emisor de saturación de QS1 y $V_{ce_QS2} = 0,5 \text{ V}$, para un factor de seguridad $F_S = 1,5$ resulta el valor comercial de la resistencia limitadora R_{SB1} : $4,7 \text{ k}\Omega / 1/4 \text{ W}$.

La resistencia R_{S1} es determinada de manera que no aporte más de $0,1 \text{ mA}$ al transistor del optoacoplador U2. Esta resistencia es dimensionada con las (5) y (2), resultando con un valor comercial R_{S1} : $220 \text{ k}\Omega / 1/4 \text{ W}$.

$$R_{S1} = \frac{V_{cc2} - V_{ce_QS2}}{0,1 \text{ mA}} \quad (5)$$

La corriente del transistor del optoacoplador U2 que posee el circuito de la Fig. 2, en estado de saturación puede obtenerse mediante la suma de la corriente de base de QS1 y de la corriente a través de R_{S1} , con lo cual resulta un valor $I_{c_Q2} = 4,9 \text{ mA}$. Con esta corriente, para cumplir con la condición indicada en la ec. (6), para la corriente requerida por el diodo LED del optoacoplador U2 es seleccionada $I_F = 20 \text{ mA}$.

$$CTR_L \alpha_{ST} I_F \geq \frac{I_{c_Q2}}{\alpha_E \alpha_{DISP}} \quad (6)$$

Siendo $\alpha_E = 0,8$ y $\alpha_{DISP} = 0,65$ los coeficientes de degradación por envejecimiento y dispersión respectivamente, y la razón de transferencia de corriente CTR_L y el coeficiente de saturación α_{ST} , valores obtenidos con $I_F = 20 \text{ mA}$ de la hoja de datos del optoacoplador 4N26 utilizado en el circuito.

A partir del valor de I_F se dimensiona la resistencia limitadora de corriente R_{SOPTO2} utilizando las ec. (7) y (2).

$$R_{SOPTO2} = \frac{V_{CC1} - V_F - V_{ce_sat_QS2}}{I_F} \quad (7)$$

Considerando $V_F = 1,5 \text{ V}$ la caída de tensión en el LED del optoacoplador y $V_{ce_sat_QS2} = 0,25 \text{ V}$, para un factor de seguridad $F_S = 1,5$ se obtiene el valor comercial de la resistencia limitadora de corriente R_{SOPTO2} : $180 \Omega / 1/4 \text{ W}$.

A continuación, mediante una expresión análoga a la ec. (3) y considerando $\beta_{min_QS2} = 110$, es calculada la corriente de base para saturar al transistor QS2, obteniéndose $I_{b_QS2} = 0,75 \text{ mA}$. A través de esta corriente y las ec. (8) y (2) puede dimensionarse la resistencia de base R_{SB2} del transistor QS2 mostrado en la Fig. 2.

$$R_{SB2} = \frac{V_{OHmin} - V_{be_sat_QS2}}{I_{b_QS2}} \quad (8)$$

Siendo $V_{be_sat_QS2} = 0,7 \text{ V}$ la caída de tensión base-emisor de saturación de QS2 y $V_{OHmin} = 4,5 \text{ V}$ la tensión de salida de estado alto mínima para la salida PC2 del microcontrolador ATMEGA 2560, considerando un factor de seguridad $F_S = 1,5$ resulta el valor comercial R_{SB2} : $3,3 \text{ k}\Omega / 1/4 \text{ W}$.

Para finalizar el diseño del circuito de salida de la Fig. 2, con las ec. (9) y (10), se calcula la potencia de operación en los transistores y el optoacoplador. Luego, se verifica que estas potencias no excedan los valores máximos obtenidos mediante las ec. (11) y (12), con $T_{amb} = 50 \text{ }^\circ\text{C}$.

$$P_Q = I_b V_{be} + I_c V_{ce} \quad (9)$$

$$P_{OPTO} = I_F V_F + I_C V_{ce} \quad (10)$$

$$P_{Qmax} = \frac{T_{Jmax} - T_{amb}}{\theta_{ja}} \quad (11)$$

$$P_{OPTOmax} = 250 \text{ mW} - 2,94 \frac{\text{mW}}{^\circ\text{C}} (T_{amb} - 25^\circ\text{C}) \quad (12)$$

2.2.2. Entradas digitales optoacopladas.

El circuito mostrado en la Fig. 4, corresponde a las entradas digitales optoacopladas que poseen ambas unidades del sistema desarrollado. La UD dispone de un circuito de entrada digital para conectar al sensor de nivel de agua del depósito; mientras que la UB posee dos circuitos de este tipo, una para el contacto auxiliar del contactor y otra para el contacto auxiliar del relé térmico de la bomba.

La bornera TBLOCK-M2 de la Fig. 4, permite la conexión del sensor de nivel o de los contactos auxiliares mencionados, según corresponda. Estos contactos funcionan como llaves, que al cerrarse permiten el paso de corriente por la resistencia R11, el diodo Zener D2 y el diodo LED del optoacoplador U4. Cuando esto sucede, el transistor de U4 pasa al estado de saturación, proporcionando un estado lógico “0” a la entrada digital “PCx” correspondiente del ATMEGA 2560. El diodo Zener del circuito, establece un umbral de tensión que debe superarse cuando se cierran las llaves mencionadas, esto permite reducir falsas lecturas de los estados lógicos en las entradas “PCx” correspondientes.

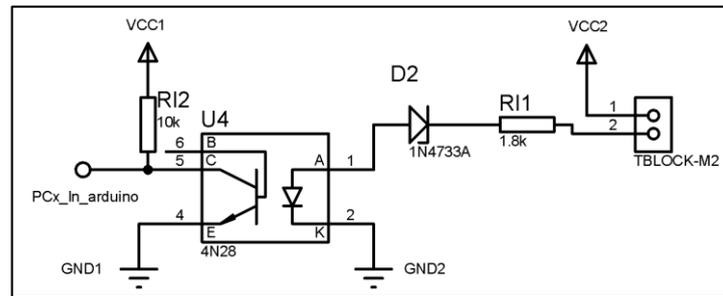


Fig. 4. Circuito de las entradas digitales optoacopladas.

Para la resistencia *pull-up* en el transistor del optoacoplador de la Fig. 4, se adopta R_{I2} : 10 k Ω / 1/4 W. Con este valor se asegura el estado lógico “1” en la entrada “PCx” del ATMEGA 2560, cuando el LED de U4 no está energizado.

Para dimensionar la resistencia limitadora de corriente R_{I1} de la Fig. 4 a la entrada de U4, se considera una corriente $I_F = 10$ mA. Esto asegura una corriente de trabajo adecuada en el diodo 1N4733A [7] y cumple con la condición de la ec. (6), aplicada a este circuito. Considerando esto, a través de las ec. (13) y (2) puede dimensionarse la resistencia R_{I1} .

$$R_{I1} = \frac{V_{CC2} - V_Z - V_F}{I_F} \quad (13)$$

Siendo $V_{CC2} = 24 \text{ V}$ la tensión de alimentación, $V_Z = 5,1 \text{ V}$ la caída de tensión de D2 y $V_F = 1,5 \text{ V}$ la caída de tensión en el LED del optoacoplador, considerando un factor de seguridad $F_S = 1,5$ resulta el valor comercial para la resistencia limitadora R_{I1} : $1,8 \text{ k}\Omega / 1/2 \text{ W}$.

Recalculando la corriente I_F mediante la ec. (13), se verifica que la potencia de operación del diodo D2 obtenida con la ec. (14) es inferior al límite de operación dado por la ec. (15), considerando para este diodo la temperatura de juntura máxima T_{jmax} y la resistencia térmica juntura-ambiente θ_{ja} dadas por el fabricante en su hoja de datos, con una temperatura ambiente $T_{amb} = 50 \text{ }^\circ\text{C}$.

$$P_Z = I_Z V_Z \quad (14)$$

$$P_{Zmax} = \frac{T_{jmax} - T_{amb}}{\theta_{ja}} \quad (15)$$

Finalmente, en el diseño del circuito de la Fig. 4, con la ec. (10) se calcula la potencia de operación del optoacoplador y luego es verificada que esta no exceda el límite indicado por la ec. (12).

2.2.3. Entradas para el usuario en la UD.

La UD dispone de tres entradas digitales que están conectadas a una llave y dos pulsadores respectivamente. Estas entradas permiten al usuario la interacción con el sistema desarrollado, el circuito de las mismas es indicado en la Fig. 5. Las borneras mostradas en este circuito, permiten conectar al sistema la llave y los pulsadores, a modo tal que al accionar alguno de estos dispositivos, el microcontrolador ATMEGA 2560 detecte un nivel lógico “0” o “1” por medio del puerto de entrada “PCx” correspondiente.

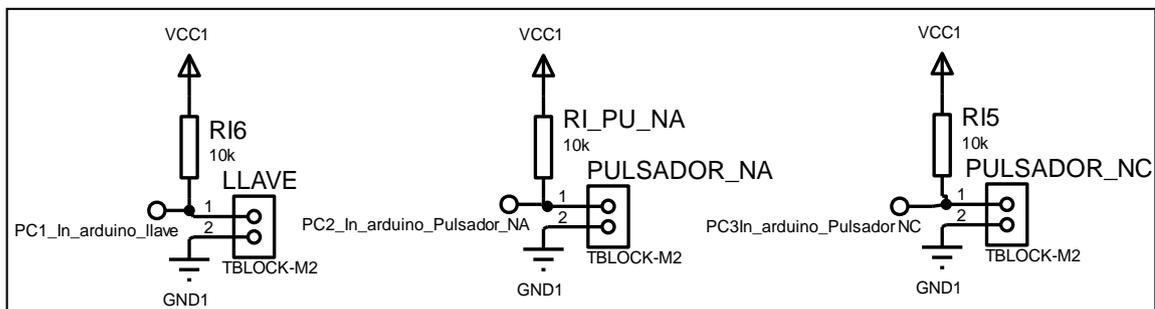


Fig. 5. Circuito para entradas del usuario.

Las resistencias que aparecen en la Fig. 5, son utilizadas para mantener en estado lógico “1” a las entradas digitales del microcontrolador cuando la salida del sensor de nivel de agua en el depósito o los pulsadores no están cerrados. Para estas resistencias *pull-up* se adopta R_{IX} : $10 \text{ k}\Omega / 1/4 \text{ W}$, para asegurar el estado lógico “1” en las entradas “PCx” en las condiciones mencionadas.

2.2.4. Módulo transceptor

Ambas unidades del sistema propuesto, utilizan un módulo de radiofrecuencia comercial para comunicarse. Para energizar a este módulo se requiere una tensión de 3,3 V. Por lo cual, en cada unidad del sistema, esta tensión es obtenida a través de un circuito comercial que incorpora un regulador de voltaje *step-down* a través del circuito integrado LM2596S [8]. La Fig. 6 muestra el módulo regulador mencionado. El mismo puede alimentarse con un rango de 4 V a 40 V de corriente continua y su salida puede ajustarse en el rango de 1,23 V a 37 V [9].



Fig. 6. Módulo regulador de voltaje *step-down*.



Fig. 7. Módulo transceptor nRF24L01.

Según se ha mencionado, para lograr la comunicación entre la UD y la UB se utiliza un módulo transceptor comercial, la Fig. 7 muestra el mismo. En cada unidad del sistema, el módulo nRF24L01 se comunica con el microcontrolador mediante el protocolo serie SPI, donde el microcontrolador es configurado como maestro y el módulo transceptor como esclavo. El transceptor utilizado se basa en el circuito integrado nRF24L01 [10], el cual efectúa la comunicación de datos utilizando modulación por desplazamiento de frecuencia gaussiana (*Gaussian Frequency Shift Keying*, GFSK). En este tipo de modulación “1” lógico es representado mediante una desviación positiva (incremento) de la frecuencia de la onda portadora, y un “0” con una desviación negativa (decremento) de la misma [11].

2.3. Firmware (programa) de las unidades

El *firmware* que ejecutan las unidades del depósito y de la bomba fue desarrollado en lenguaje C, utilizando el entorno de desarrollo integrado (IDE) Microchip Studio. El mismo permite escribir y depurar programas para microcontroladores AVR, dentro de los cuales está el ATMEGA 2560 utilizado en este trabajo. Este IDE facilita la integración de librerías para el uso de diferentes herramientas como también, para el manejo del módulo nRF24L01. Dentro de los recursos utilizados del microcontrolador para ambas unidades, se destaca el uso del módulo de comunicación SPI y los módulos temporizadores (Timers). Estos últimos fueron configurados en el modo por comparación (CTC), donde el registro de comparación OCR_n del temporizador “n” es cargado con el valor obtenido mediante la ec. (16) para que se produzca una interrupción cada T_{OCR_n} segundos.

$$OCR_{rx} = \frac{T_{OCR_{rx}} \cdot f_{CLK_{I/O}}}{N} - 1; \quad T_{CLK_{I/O}} = 16 \text{ MHz} \quad (16)$$

En relación al transceptor, en el programa de cada unidad, este módulo es configurado con el identificador (ID) del módulo con el cual establecerá comunicación. De esta forma, ambas unidades saben a quién mandan la información y de quién la reciben. Para el transceptor también se setea la frecuencia del canal de comunicación, siendo para ambas unidades la misma. La frecuencia del canal es determinada con la ec. (17).

$$F_0 = 2400 + RF_CH \text{ [MHz]} \quad (17)$$

En la ec. (17) el término RF_CH corresponde al valor a cargar en un registro de 8 bits del transceptor, mediante del cual puede seleccionarse la frecuencia del canal de comunicación. Esta frecuencia está en el rango de 2,4 GHz a 2,5 GHz, para RF_CH de 01 a 7C (en hexadecimal). En este trabajo, para ambas unidades se selecciona el canal 70h = 112, siendo F0 = 2,512 GHz.

2.3.1. Firmware de la Unidad de Depósito

La Fig. 8 muestra el diagrama de flujo de la rutina principal correspondiente al programa realizado para el microcontrolador que posee la unidad del depósito (UD).

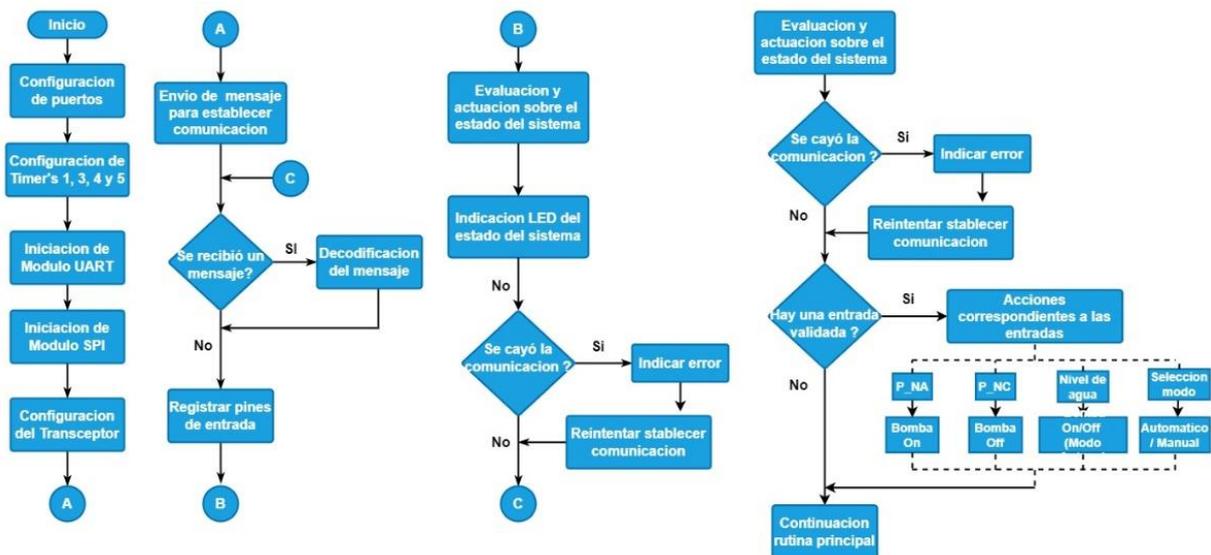


Fig. 8. Diagrama de flujo de la rutina principal del programa de la unidad de depósito.

Inicialmente en la rutina de la Fig. 8 son configurados los temporizadores en modo CTC. El Timer 1 es utilizado para reenviar el mensaje de prueba cada 1 segundo, a modo de constatar que el enlace de comunicación con la otra unidad sigue presente. En caso de no tener una respuesta de confirmación de recepción del mensaje, luego de 4 intentos el programa de la UD acusa una falla de comunicación, indicando esto con un centelleo del LED 1 y el accionamiento del relé de alarma que posee el circuito

de esta unidad. En caso de reestablecerse la comunicación, estas indicaciones de alarma cesan. El Timer 3 es usado para los intentos de envío de mensajes de comando, siendo estos los de marcha o detención de la bomba, con una cantidad de ocho reintentos aceptados antes de acusar una falla de comunicación. El Timer 4 está dedicado a realizar la encuesta para validación y registro de una entrada, como ser el estado del sensor de nivel, la llave y los pulsadores asociados a las entradas para el usuario que posee el circuito de la UD. El Timer 5 es empleado para el centelleo de los LED's (con periodo de 100 ms), cuando acusen una falla de comunicación o de motor.

Mediante la ec. (16) se definen los valores correspondientes para el periodo de temporización deseado en cada Timer mencionado. Los resultados están en la Tabla 1, donde la primera columna es el *prescaler* utilizado en el timer, la segunda y tercera columna indican el periodo deseado y el valor calculado para el registro de comparación, respectivamente.

Tabla 1: Valores para configuración de los Timers en la Unidad de Deposito.

Timer	N	T _{OCRnA} [ms]	OCRnA
1	256	1000	62499
3		100	6249
4		20	1249
5		100	6249

En la rutina principal de la Fig. 8, antes de ejecutarse el bucle principal, el programa envía el primer mensaje para establecer la comunicación y a partir de este momento, aproximadamente cada 1 segundo se hará la prueba de enlace de comunicación. Dentro del bucle principal son ejecutadas las etapas: decodificación de mensaje si el transceptor acusa un dato recibido, registro y evaluación de las entradas del sistema, para posteriormente evaluarlos y tomar acción sobre el sistema.

Para indicar el estado del sistema, el programa desarrollado para UD comanda el estado de dos LEDs disponibles en su circuito, uno azul (LED1) y otro rojo (LED2). La Tabla 2 muestra los distintos estados de estos indicadores. El relé alarma de error que dispone la UD indica una falla en comunicación o de bomba, para discernir entre estas dos hay que observar los leds de indicación: centelleo LED1 error en comunicación, centelleo en LED2 error en la bomba.

Tabla 2: Estados (E) del sistema (0: apagado, 1: encendido).

E	Falla Motor	Motor	Comunicación	LED1	LED2	Relé Alarma de Error
0	0	0	0	Togglea	0	1
1	0	0	1	1	0	0
2	0	1	0	Togglea	0	1
3	0	1	1	1	1	0
4	1	0	0	Togglea	Togglea	1
5	1	0	1	1	Togglea	1
6	1	1	0	Togglea	Togglea	1
7	1	1	1	1	Togglea	1

La Tabla 2 muestra que el relé alarma de error se enciende ante cualquier falla, el LED1 permite indicar el estado de la comunicación (enlace caído o establecido) y el LED2 indica el estado del motor (marcha, detención, falla).

2.3.2. Firmware de la Unidad de la Bomba

La Fig. 9 muestra un diagrama de flujo simplificado del programa para la unidad de comando sobre la bomba.

Tabla 3: Valores para configuración de los Timers en la Unidad de la Bomba.

Timer	N	T _{OCRnA} [ms]	OCRnA
1	1024	4000	62499
3	256	100	6249
4	1024	1000	15624

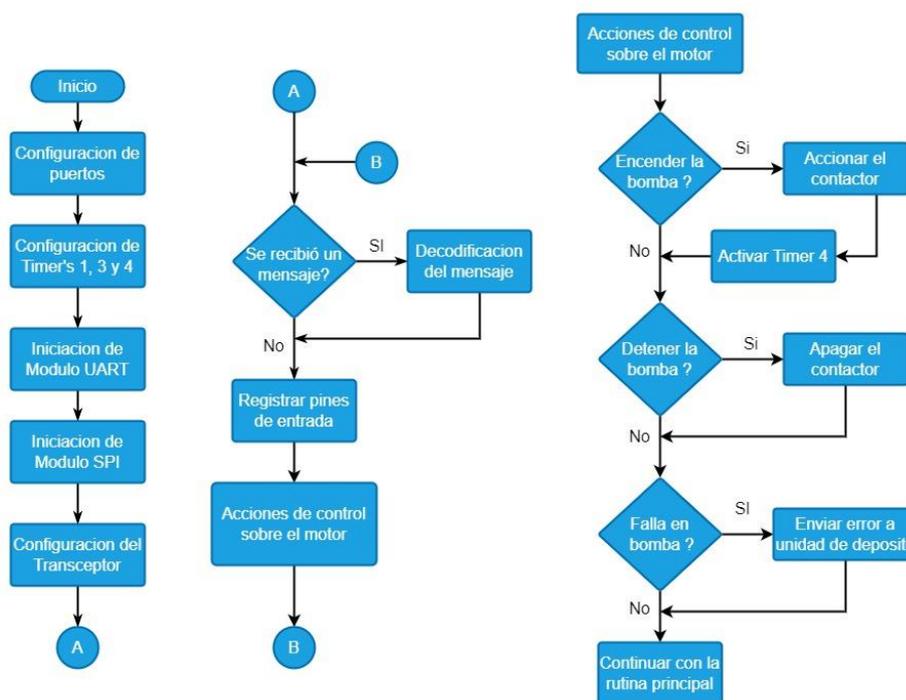


Fig. 9. Diagrama de flujo de la rutina principal del programa de la unidad de la bomba.

Según puede observarse en la Fig. 9, al inicio del programa se configuran los temporizadores en modo CTC. El Timer 1 está encargado de proporcionar la ventana de tiempo máxima de espera de recepción del mensaje de prueba de comunicación. El Timer 3 se utiliza para los intentos de reenvío de mensajes de comando, sean estos los de marcha o detención de la bomba, en los cuales la cantidad de reintentos aceptada antes de acusar una falla de comunicación es de ocho. El Timer 4 tiene la función de establecer la ventana de tiempo entre que se acciona la salida para encendido de la bomba

y se cierra el contacto auxiliar del relé, en caso de sobrepasarse esta ventana de tiempo, el programa de la UB acusa una falla en motor. La Tabla 3 resume de los valores correspondientes para el periodo de temporización deseado en cada Timer mencionado.

2.3.3. Comunicación de datos

La Unidad de Depósito (UD) es la encargada de establecer el enlace de comunicación y también de comprobar periódicamente la existencia de la misma entre las unidades del sistema propuesto. Una vez establecida la comunicación, la comprobación del estado de comunicación es realizada por la UD enviando un mensaje de prueba (cada 1 segundo) y esperando la respuesta de confirmación de recepción por parte de la Unidad de la Bomba (UB), en caso de acumularse un máximo de reintentos de comprobación en la UD, el programa acusa una falla de comunicación.

La UB detecta que la comunicación esta caída, si no recibió el mensaje de prueba por un tiempo límite de 4 segundos. Ante esta situación, la UB acusa una falla de comunicación y mantiene el estado actual de la bomba. En caso de detectar una falla de la bomba, la UB envía un mensaje de falla con la misma lógica de reenvíos explicada anteriormente.

3. Resultados

En cuanto al circuito impreso (PCB) de las placas, las dos unidades del sistema fueron diseñadas con el software Proteus. Una vez obtenido el diseño de cada PCB, el mismo fue impreso sobre papel fotográfico, luego transferida térmicamente la tinta del papel a la placa de cobre virgen (con plancha), seguidamente se grabaron las pistas del PCB introduciendo las placas en cloruro férrico, finalmente cada placa fue perforada y se realizó el montaje y soldadura de los componentes de los circuitos. La Fig. 10 muestra las dos placas obtenidas para el sistema de control propuesto.

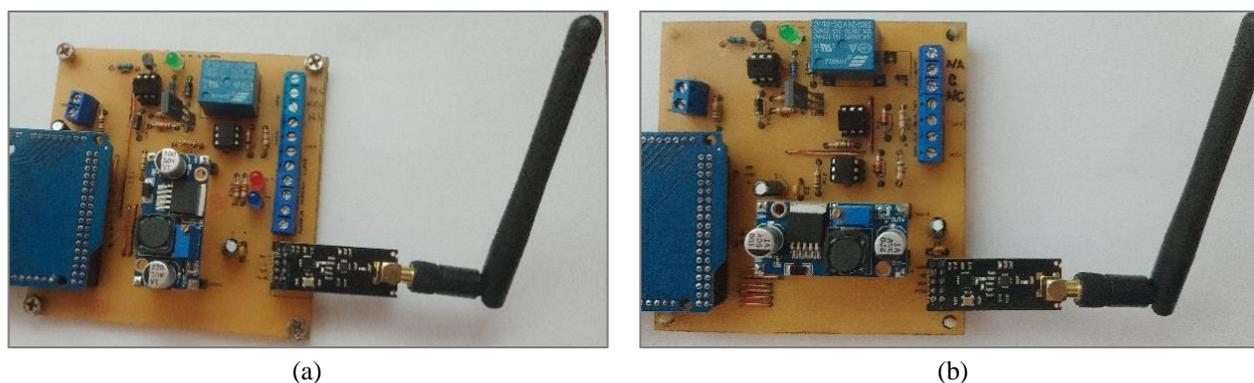


Fig. 10. Sistema de control por radioenlace para bomba de agua: (a) Unidad del Depósito; (b) Unidad de la Bomba.

Una vez finalizada la programación y construcción de las placas mostradas en la Fig. 10, a las unidades obtenidas se le conectaron las llaves y los pulsadores correspondientes, el contactor y el relé térmico como puede observarse en la Fig. 11. A partir de esto, conectando cada placa a una fuente de alimentación de laboratorio, se realizaron diversas ensayos para comprobar el funcionamiento según

la operación indicada en los diagramas de flujo de las Fig. 8 y 9. También se hicieron ensayos para verificar el establecimiento de la comunicación entre las unidades, considerando diversas circunstancias, el envío y recepción de diferentes comandos, la señalización correcta de los estados del sistema por medio de los LEDs, como así también de los errores, observando el cumplimiento de estados posibles que figuran en la Tabla 2.

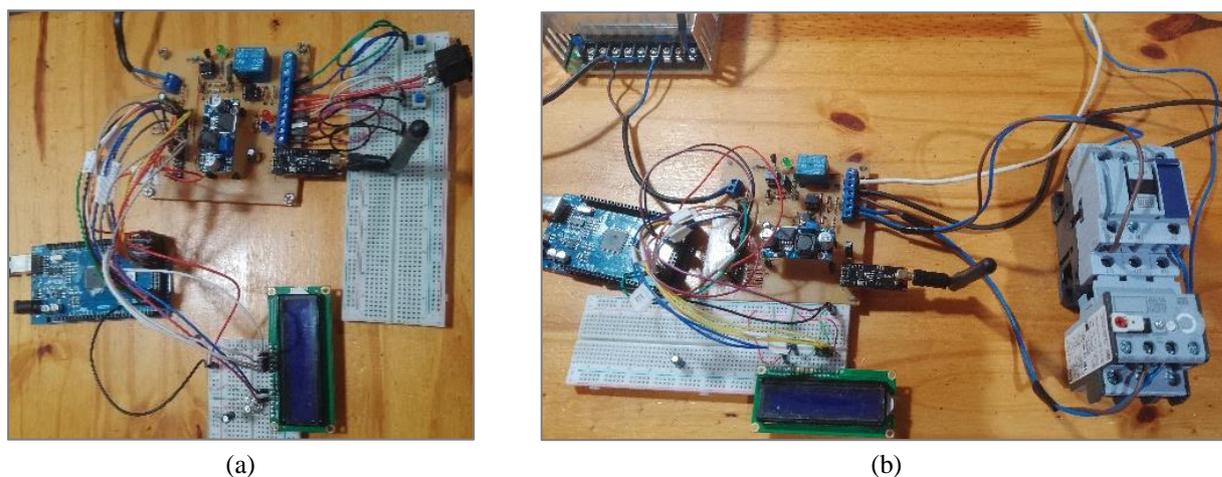


Fig. 11. Ensayos del sistema: (a) Unidad del Depósito; (b) Unidad de la Bomba.

Con los ensayos realizados fue comprobado el funcionamiento propuesto para el sistema de control. La comunicación se estableció, el envío y recepción de comandos de accionamiento y detención del contactor pudo lograrse. Los errores fueron indicados cuando una de las unidades era desconectada de la energía, mostrándose la falla correspondiente en forma adecuada.

4. Conclusiones

En este trabajo se muestra el desarrollado de un sistema de control de bomba de agua mediante la comunicación por radiofrecuencia establecida entre dos unidades. Una de ellas diseñada para conectarse al sensor de nivel del depósito de agua y la otra unidad a la bomba de agua. El propósito de esto es que el sistema obtenido pueda utilizarse en situaciones donde el depósito de agua está alejado de la bomba y resulta oneroso realizar el cableado correspondiente entre ambos. A partir de los resultados obtenidos, se alcanzaron los objetivos propuestos, el sistema embebido resuelve la situación problemática indicada, permitiendo poner en marcha y detener la bomba a través de su contactor, cumpliendo esto con las especificaciones técnicas y de funcionamiento requeridas.

En el desarrollo de este trabajo se ha logrado integrar distintos conocimientos adquiridos en las asignaturas de la carrera, tales como el desarrollo de programas en lenguaje C, diseño y construcción de circuitos con transistores para interfaces de potencia, diseño de circuitos impresos, configuración de antenas, manejo de elementos de accionamiento y protección para motores, uso y programación de microcontroladores, entre otros. La realización de este trabajo no sólo permitió aplicar e integrar conocimientos previos y propios de la asignatura Técnicas Digitales 2, sino que también permitió

adquirir nuevos conocimientos como los relacionados a la utilización del módulo de comunicación utilizado en cada unidad del sistema propuesto. Tomando los conocimientos mencionados como herramientas, se ha ejercitado el ingenio al comprender y desarrollar una solución para el problema propuesto.

Referencias

- [1] Hoja de datos del microcontrolador ATMEGA 2560. Disponible en: https://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/atmel-2549-8-bit-avr-microcontroller-atmega640-1280-1281-2560-2561_datasheet.pdf
- [2] R. L. Boylestad, L. Nashelsky, “Electrónica: Teoría de circuitos y dispositivos electrónicos” 10ma ed, Pearson Educación, Prentice Hall, México 2009, pp:858
- [3] Hoja de datos del transistor BC548. Disponible en: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/11552/ONSEMI/BC548.html>
- [4] Hoja de datos del optoacoplador 4N26. Disponible en: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/2849/MOTOROLA/4N28.html>
- [5] Hoja de datos del transistor BD140. Disponible en: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/2921/MOTOROLA/BD140.html>
- [6] Hoja de datos del relé SRD-24VDC. Disponible en: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/1132032/SONGLERELAY/SRD-24VDC-SL-C.html>
- [7] Hoja de datos del diodo 1N4733A. Disponible en: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/15031/PHILIPS/1N4733A.html>
- [8] Hoja de datos del regulador LM2596. Disponible en: <https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/lm2596-d.pdf>
- [9] Convertidor step-down basado en el LM2596. Disponible en: <https://naylorlampmechatronics.com/conversores-dc-dc/196-convertidor-voltaje-dc-dc-step-down-3a-lm2596.html>
- [10] Hoja de datos del circuito integrado NRF24L01. Disponible en: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/1243924/ETC1/NRF24L01.html>
- [11] Gerez, Sabih H. Implementation of Digital Signal Processing: Some Background on GFSK Modulation. University of Twente, Department of Electrical Engineering. [Online]. Available: <http://wwwhome.ewi.utwente.nl/~gerezsh/sendfile/sendfile.php/gfsk-intro.pdf?sendfile=gfsk-intro.pdf>