



Control inalámbrico de plataformas pesadas basado en Arduino y módulos XBee

Wireless control of heavy rotating platforms based on Arduino and XBee modules

Ing. Jorge H. Vázquez Leiva^{1*}, MSc. Yordany Vélez Rodríguez¹,
Ing. Randy Mustelier Rivero¹, Ing. Michel Buzón Tur²

Recibido: 07/2025 Aceptado: 07/2025 Publicado: 08/2025

Resumen

En este trabajo se presenta una estructura basada en sistemas embebidos para realizar control inalámbrico de plataformas pesadas giratorias con dos grados de libertad. Se propone el diseño de un controlador que permite el acceso remoto de los operadores a través de un sistema de comunicación basado en módulos XBee, facilitando el ajuste automático de los parámetros de control en tiempo real. Mediante una placa Arduino Leonardo, se establece la conexión inalámbrica que permite la interacción entre el controlador y la plataforma sin depender de redes wifi o protocolos TCP/IP, lo que mejora la robustez del sistema en entornos industriales. Los resultados obtenidos en un entorno de laboratorio evidencian que es posible controlar la plataforma a una distancia máxima de 50 metros. Además, se puede aumentar el alcance del enlace mediante la adición de antenas

^{1*}Centro de Investigación y Desarrollo de Electrónica y Mecánica "CID MCATRONICS", dir: Calle 15 y 86A, Playa, La Habana, Cuba. Correo electrónico: cid3@reduim.cu

² Empresa de Informática, Automática y Comunicaciones TECNOMÁTICA, dir: Árbol Seco 56 e/ Estrella y Maloja, Centro Habana, La Habana, Cuba. Correo electrónico: michelbt@tm.cupet.cu

direccionales compatibles con el hardware del sistema, lo que optimiza el rendimiento y la confiabilidad del control remoto.

Palabras clave: Control remoto; Arduino; XBee; plataformas giratorias

Abstract

This paper presents a structure based on embedded systems for wireless control of heavy dual-degree-of-freedom rotating platforms. The design of a controller is proposed to allow remote access operator via an XBee-based communication system, facilitating real-time automatic parameter adjustments. The wireless connection between the controller and the platform is established using an Arduino Leonardo board, eliminating dependence on Wi-Fi or TCP/IP protocols to enhance the system robustness in industrial environments. The results obtained in lab environment prove a reliable platform control at distances up to 50 meters. Additionally, the link range can be increased by adding hardware compatible directional antennas with the system hardware, optimizing remote control performance and reliability.

Keywords: *Remote control; Arduino; XBee; Rotating platforms*

Introducción

Las plataformas giratorias son utilizadas en una variedad de aplicaciones tales como las comunicaciones, manipulación de materiales y transporte de cargas. Estos sistemas se ven limitados en la actualidad por dificultades en su operación relacionadas con el soporte cableado, dado por los elevados costos de instalación, fragilidad del medio e incapacidad de adaptación a cambios en el entorno. Con el surgimiento de nuevas tecnologías y el desarrollo de dispositivos inalámbricos, resulta relativamente sencillo su despliegue, en entornos donde las líneas físicas constituyen una barrera potencial. Una solución viable para garantizar el control a distancia es la transmisión de la señal de control mediante radiofrecuencia (RF) (Bernabé et al., 2024), siendo una variante asequible, las basadas en XBee del fabricante Digi International.

Novedosas investigaciones aplican los mencionados módulos en este campo, algunas de ellas lo emplean en el monitoreo de parámetros en locales de almacenamiento mediante chip RF inalámbrico y pila de protocolos Zigbee (Wang, 2011). Ambikabhuwaneswari (2018) realiza el seguimiento de las bicicletas eléctricas y la recuperación de la información mediante el uso de LoRa y el módulo XBee. Otra investigación (Adewasti et al., 2018) trata el desarrollo de una interfaz hombre-máquina en LabVIEW para control de un robot y observar los resultados de varios factores ambientales, como la medición de la temperatura, la presencia de gases tóxicos, la detección de la presencia de seres humanos y también puede transmitir video en tiempo real de ese lugar en particular de forma inalámbrica. El desarrollo del diseño de un sistema de control de robot para monitorear la ubicación de los terremotos utilizando Arduino basado en Xbee Pro se evidencia en (Shahzad et al., 2017).

El análisis de latencia de XBee con buenos resultados en el control de máquinas montadas en drones a través de canales a distancia se desarrolla en *XBee latency analysis for drone mounted machine control over wireless communication channels* (Sit et al., 2021). Otro estudio que evidencia la fiabilidad de XBee es (Gavra et al., 2023), donde se propone un análisis de las características de la topología de la red en malla para verificar la extensión del alcance y cómo afecta el indicador de intensidad de la señal y el rendimiento. La implementación de un sistema de vehículos no tripulados basados en esta tecnología es tratado en (Karyemsetty et al., 2015) y demuestra que es posible monitorear la ruta de viaje del vehículo en el mapa de Google utilizando la latitud y la longitud transmitidas por el receptor GPS. En los sistemas de posicionamiento marítimo (San Filippo, 2015) se aplican algoritmos de posicionamiento de nodos para rastrear e identificar los movimientos operativos a bordo del buque. El control de motores y observación de sus parámetros se constata en (Floriduz et al., 2015) con la descripción de un sistema inalámbrico de medición de temperatura, destinado al análisis térmico de partes rotativas de máquinas eléctricas. El dispositivo fue diseñado y fabricado para instalaciones en máquinas con consumo inferior a 15 kW.

Las investigaciones anteriormente citadas corroboran que XBee en combinación con un dispositivo lógico programable puede garantizar buena calidad en el enlace inalámbrico. Por otra parte, en los estudios consultados se evidencia la ventaja de implementar soluciones de control a distancia en zonas o sistemas donde es complicado el despliegue de líneas físicas. En este trabajo se propone una solución que emplea como soporte técnico una placa de Arduino Leonardo y un módulo XBee S1 (Hongyim, 2017). La misma consiste en desarrollar un controlador inalámbrico para aumentar el alcance en el control de las plataformas. La ventaja radica en la obtención de un sistema con posibilidad de mejorar el rendimiento de la planta en cuanto a los parámetros que se les comprueban y la posibilidad de acceso sin necesidad de soporte cableado. El empleo del protocolo TCP/IP ofrece escalabilidad, estabilidad, seguridad e interconexión entre diferentes redes y dispositivos (Hongyim, 2019). Por su principio de funcionamiento, el control inalámbrico propuesto es una opción para aplicaciones IoT.

Materiales y métodos

Para lograr los objetivos establecidos se llevó a cabo un análisis de mercado centrado en identificar las tecnologías más accesibles desde una perspectiva económica y documental. Se aplicó un método analítico sistemático para extraer los elementos clave de la literatura revisada, con el fin de formular una propuesta que se ajusta a las necesidades del sistema. Ante las restricciones tecnológicas existentes en el país, particularmente en la fabricación de circuitos impresos y la importación de componentes electrónicos, se decidió optar por la utilización de hardware y software libre en la mayor medida posible. Esta elección no solo disminuye los costos asociados, sino que también promueve la sostenibilidad y la adaptabilidad del sistema propuesto.

Estructura general del sistema

El presente trabajo propone la implementación de un sistema con la estructura mostrada en la figura 1. Para su definición se parte de la necesidad de lograr una comunicación remota entre el centro de control y la plataforma. Como se puede apreciar el mecanismo

actuador es dotado con un elemento de control externo compuesto por una placa de Arduino Leonardo y un módulo XBee, para garantizar la conexión inalámbrica. La placa de control es conectada a través de un enlace por radiofrecuencia en la banda de 2.4 GHz al servidor de gestión y control, este último puede ser un equipo de escritorio o terminal móvil.

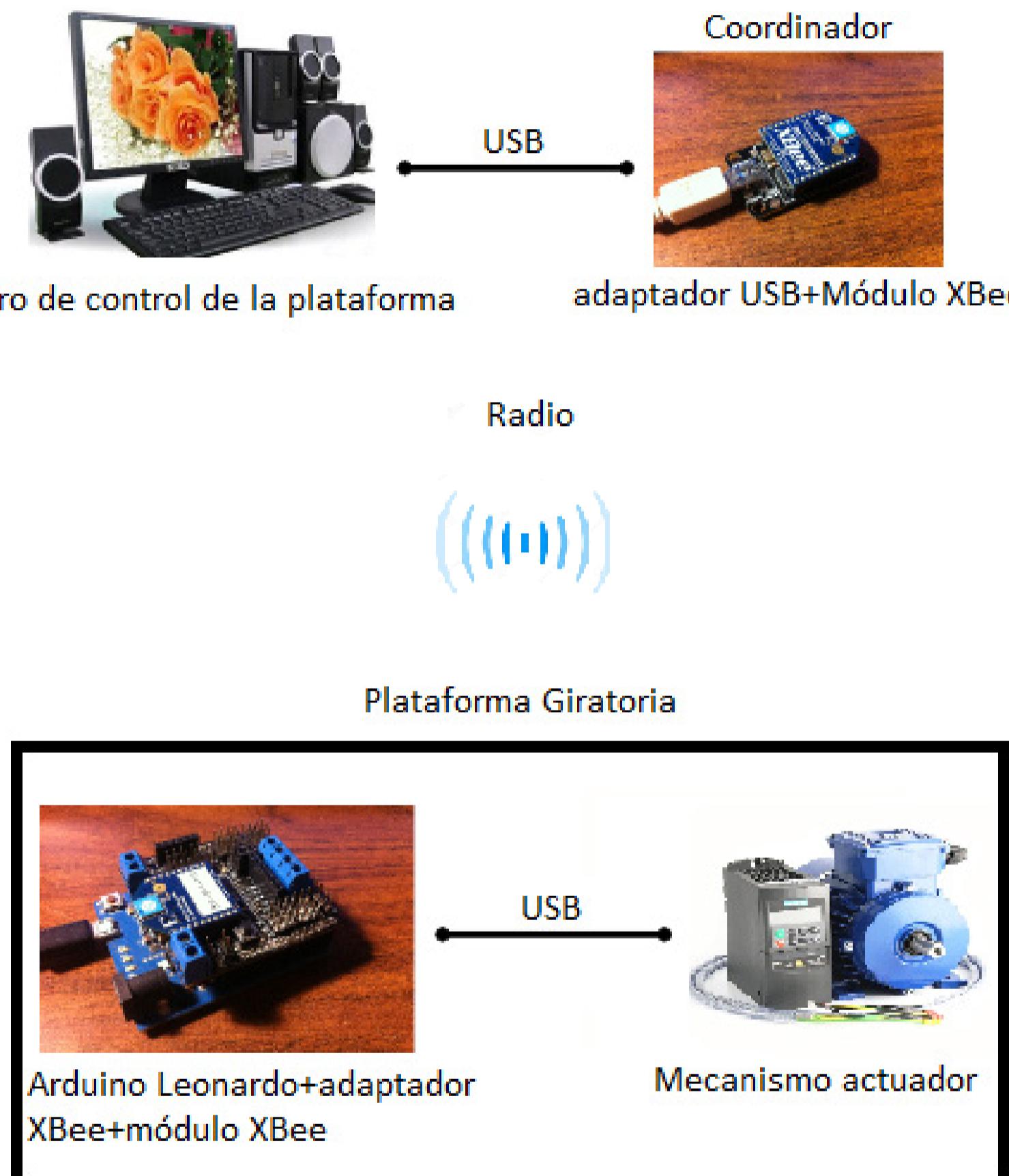


Figura 1. Diagrama en bloques del sistema de control propuesto

El controlador programable se desarrolla bajo la premisa de utilizar hardware libre, lo cual implica que los diseños y especificaciones son accesibles públicamente. Esta característica permite la generalización del sistema a un costo reducido y promueve la colaboración e innovación en el diseño de sistemas automatizados. Para garantizar su

funcionalidad, el controlador debe incluir interfaces de entrada que permitan la conexión de dispositivos externos, así como la capacidad de integrar módulos inalámbricos. Los elementos de acoplamiento son fundamentales para adaptar el controlador a diversas aplicaciones industriales y facilitar su interacción con otros sistemas.

En cuanto al mecanismo actuador de la plataforma giratoria, se compone de un variador de frecuencia (VF/V). Este dispositivo es crucial para llevar a cabo la conversión entre la señal de control (0 V - 10 V) y los niveles de tensión/corriente requeridos por el motor de corriente alterna (MCA), este se equipa con un codificador. El uso del VF/V permite un control preciso sobre la velocidad y el par del motor, optimizando así el rendimiento del sistema (Matondang y Adityawarman, 2018).

Hardware seleccionado

Durante el proceso de selección de los componentes del diseño, se consideraron las exigencias establecidas en la estructura general del sistema. El uso de Arduino como dispositivo principal es determinado por los costos de adquisición competitivos, su facilidad de programación y versatilidad en las interfaces de entrada, en comparación con otras alternativas como FPGA, PIC u otros microcontroladores. Esta elección es fundamentada en la necesidad de un entorno de desarrollo accesible y adaptable que satisfaga los requisitos específicos del proyecto.

Placa de desarrollo Arduino Leonardo

El Arduino Leonardo, mostrado en la figura 2, es una placa de desarrollo que se distingue por integrar un micro controlador ATmega32U4, el cual cuenta con capacidades USB nativas. Esta característica permite que el Leonardo se comunique directamente con una computadora, lo que facilita la emulación de dispositivos como teclados u periféricos a través del protocolo USB-HID (Penttinен, 2013). La placa dispone de 20 pines de entrada/salida digital, de los cuales 7 se utilizan como salidas PWM y 12 como entradas analógicas. Su oscilador de cristal opera a una frecuencia de 16 MHz, lo que asegura un rendimiento adecuado para diversas aplicaciones. Además, posee 32 KB de memoria flash para almacenamiento de programas, así como un

conector micro USB que simplifica la conexión y alimentación.

Módulo XBee S1

El módulo XBee S1, mostrado en la figura 3, es un dispositivo de comunicación inalámbrica diseñado para aplicaciones que requieren conectividad en redes de área personal. Opera en la banda de frecuencia ISM de 2.4 GHz y utiliza el protocolo 802.15.4 (Weatley, 2018), lo que permite establecer conexiones de bajo consumo energético y baja latencia. Este ofrece una potencia de transmisión de 1 mW (0 dBm), logrando un alcance de hasta 100 metros en condiciones de visibilidad directa, esto lo hace adecuado para aplicaciones en entornos industriales y urbanos. Se caracteriza por su capacidad de operar en un rango de temperatura industrial, desde -40 °C hasta 85 °C, lo que garantiza su funcionalidad en diversas condiciones ambientales. La interfaz del módulo permite una tasa de datos de hasta 115.2 Kbps, facilitando la transmisión eficiente de información entre dispositivos.

Además, su diseño compacto y la variedad de opciones de antena, incluyendo antenas integradas y conectores para antenas externas, proporcionan flexibilidad en la implementación del sistema.

Programación del controlador inalámbrico

La programación del enlace se realizó utilizando el entorno de desarrollo integrado (IDE)

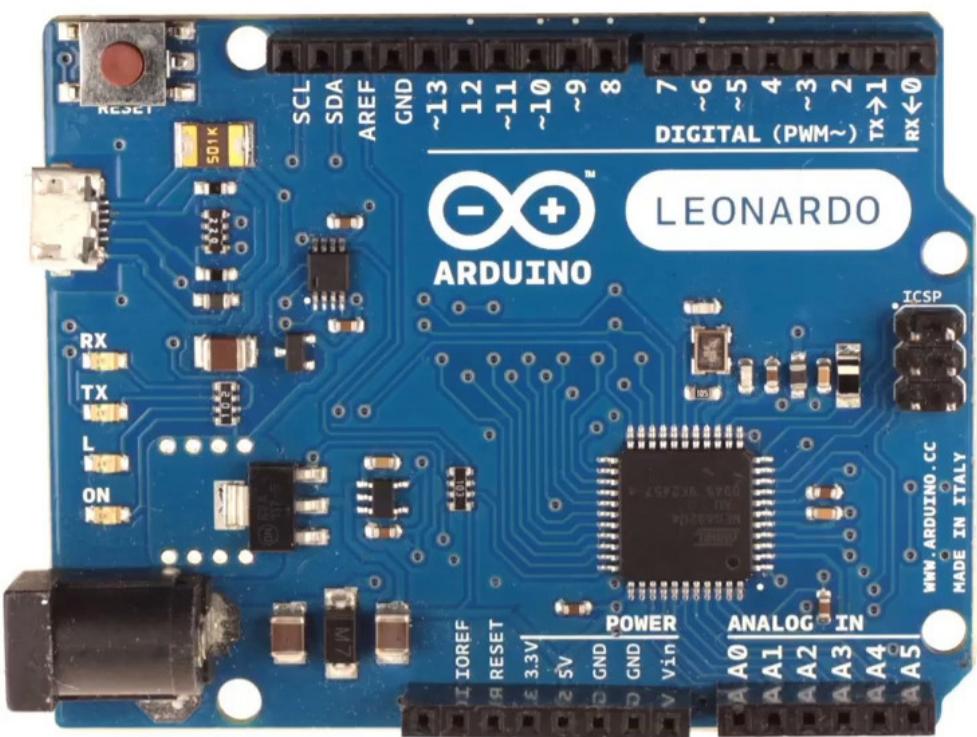


Figura 2. Placa de desarrollo Arduino Leonardo

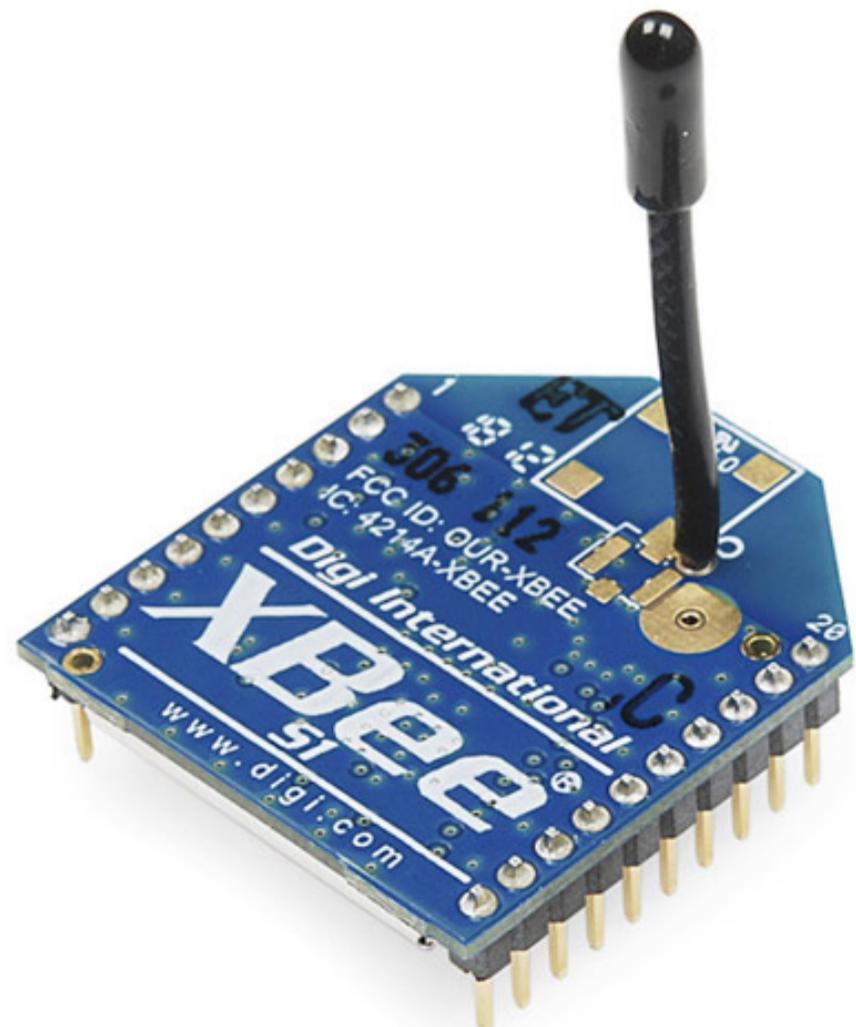


Figura 3. Módulo inalámbrico empleado

de Arduino en su versión 1.8.2, que proporciona un entorno accesible y versátil en el desarrollo de aplicaciones basadas en microcontroladores. El establecimiento de la conexión de red, es llevado a cabo con las bibliotecas XBee y XBee Arduino Library, que son fundamentales para simplificar la implementación de automatizaciones remotas, el control a distancia y la recopilación de datos relevantes sobre el entorno circundante.

La biblioteca XBee proporciona soporte para el modo API, lo que facilita la transmisión de datos estructurados y el manejo de comandos AT (Wang & Tang, 2011), además de permitir la configuración dinámica de los parámetros del módulo. Esto es particularmente útil en aplicaciones donde se requiere un control preciso sobre los dispositivos conectados y una gestión efectiva de la red. Por otra parte, es simplificada la programación del enlace inalámbrico, sino que también permite a los usuarios implementar características avanzadas como la gestión de energía en dispositivos alimentados por batería, lo que es crucial para prolongar la vida útil del sistema. En la figura 4 se presenta el algoritmo de programación del enlace inalámbrico.

Aplicación de gestión y control

En el desarrollo de la aplicación de gestión y control se tuvo en cuenta la posibilidad de conexión inalámbrica vía WiFi o cableada a través de Ethernet, así como la multiplataforma con el objetivo de instalarla tanto desde una computadora de escritorio con sistema operativo Windows® o Linux, como en

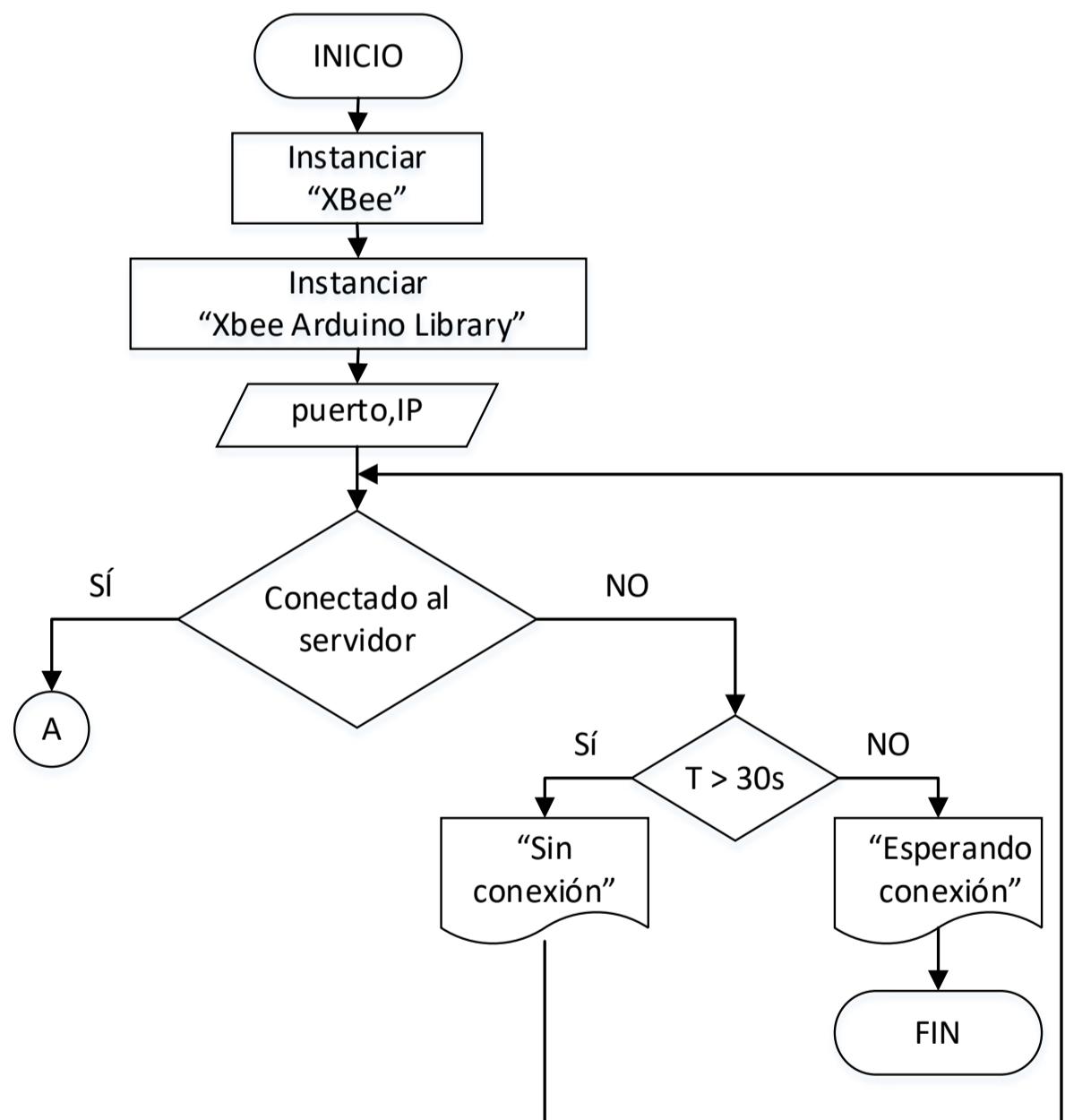


Figura 4. Algoritmo de programación del enlace inalámbrico

dispositivos móviles con sistema operativo Android. Por tal motivo, fue seleccionado el *framework* QtCreator5.7 (Qt Creator, n.d.). La presente investigación se limita a describir solo el proceso de desarrollo de la aplicación en Windows ® y Android, diferenciándose solamente por la inclusión de las herramientas de compilación correspondientes. En (Touil et al., 2020) se explican las configuraciones pertinentes en las opciones del framework para realizar la compilación para el sistema operativo Android.

Considerando la arquitectura de hardware, para realizar la programación de la aplicación se empleó el modelo cliente–servidor, donde la tarjeta Arduino Leonardo opera como cliente y el software de gestión y control es el servidor. El protocolo empleado en la capa de transporte de la arquitectura fue TCP, pues al ser orientado a conexión, proporciona un medio fiable para el flujo de bits entre aplicaciones (Penttinен, 2013). Teniendo en cuenta que no se transmitirán grandes volúmenes de datos, la entrega de paquetes no implicará una demora significativa. Para el desarrollo del servidor fue utilizada la biblioteca QTcpServer y QTcpSocket. El algoritmo de programación propuesto se muestra en la figura 5.

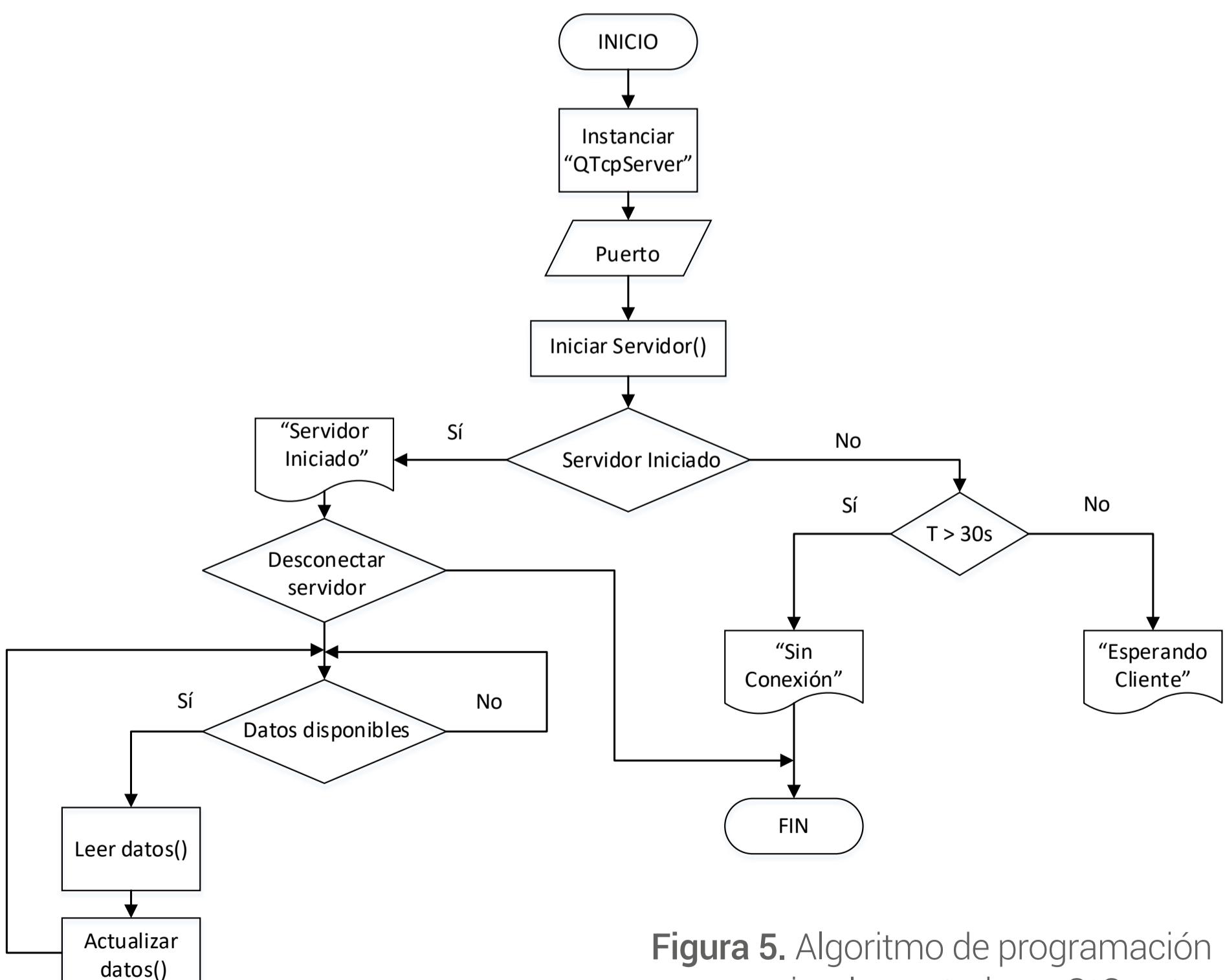


Figura 5. Algoritmo de programación implementado en QtCreator

Implementación de la técnica de control

La técnica de control implementada es un controlador PID —Proporcional, Integral y Derivativo—, que se basa en la regulación de los parámetros proporcionales, integrales y derivativos para gestionar la dinámica del sistema. Este enfoque permite una respuesta efectiva a las variaciones en la señal de referencia, asegurando un control preciso sobre el proceso. El diseño digital del sistema se lleva a cabo utilizando la plataforma de simulación multidominio Simulink, propia de MATLAB. Esta herramienta ofrece un conjunto de bibliotecas que permiten la exportación del modelo a lenguaje C, facilitando su implementación en entornos embebidos. El esquema resultante para la validación se muestra en la figura 6.

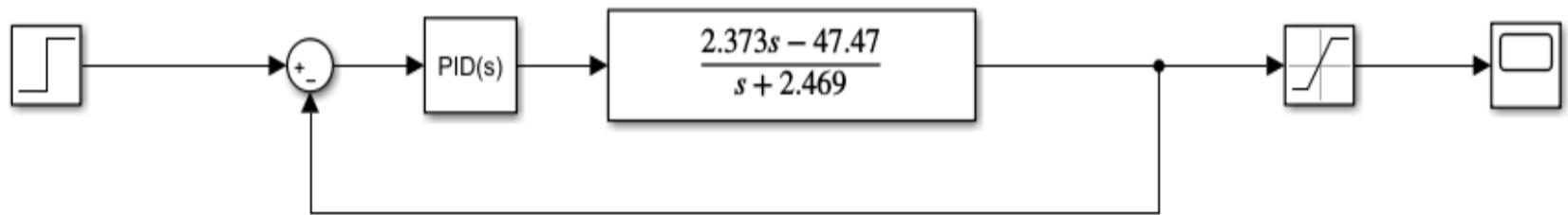
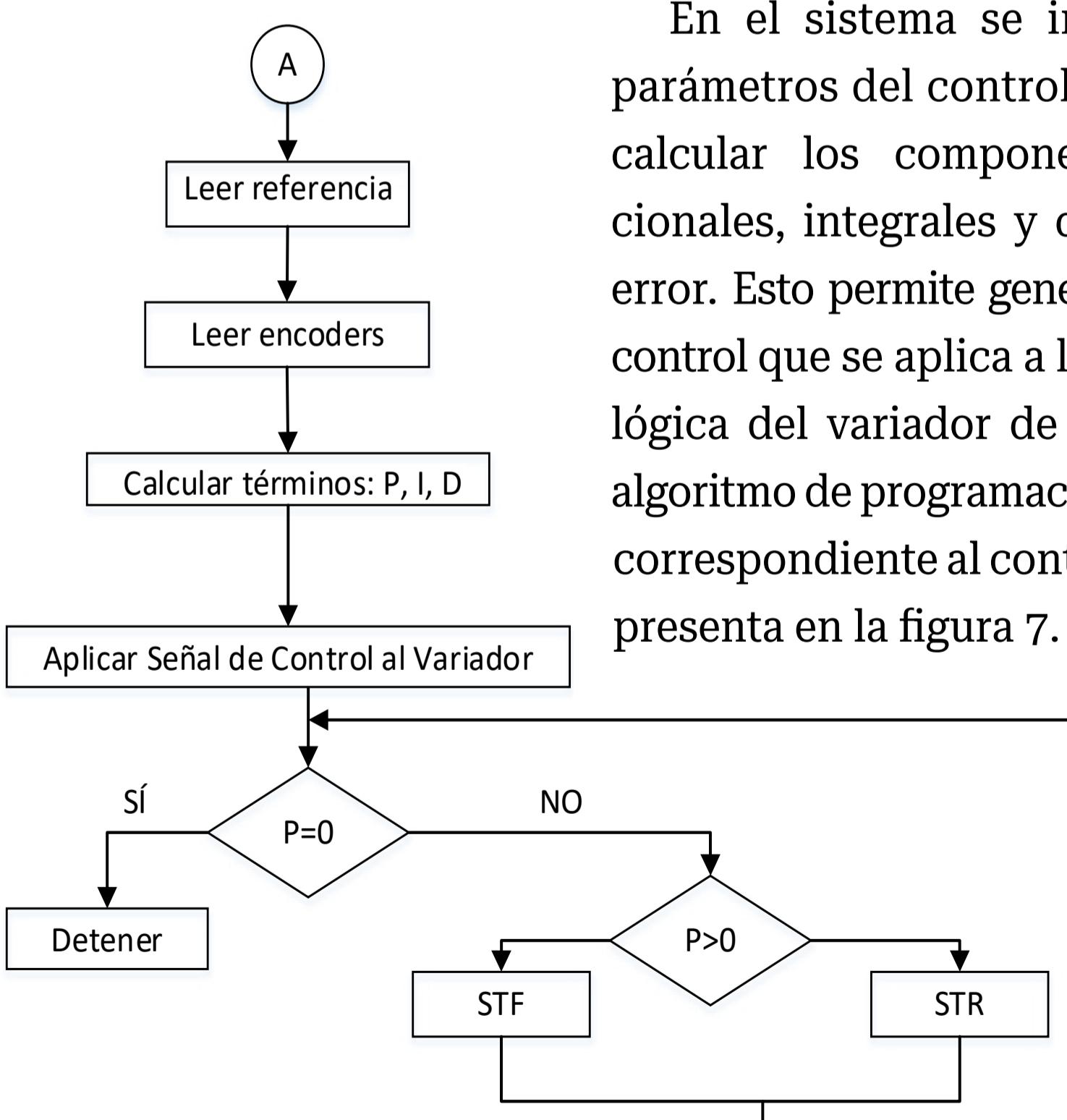


Figura 6. Esquema en Simulink del controlador PID



En el sistema se introducen los parámetros del controlador PID para calcular los componentes proporcionales, integrales y derivativos del error. Esto permite generar la señal de control que se aplica a la entrada analógica del variador de frecuencia. El algoritmo de programación en Arduino correspondiente al controlador PID se presenta en la figura 7.

Figura 7. Algoritmo de programación del controlador PID

Resultados y discusión

Para el desarrollo de las pruebas experimentales fue diseñado el esquema mostrado en la figura 8. El envío de la trama de datos proveniente del servidor de gestión y control se realiza a una frecuencia de 2.4 GHz. Para la conversión digital analógica de la señal de error se utilizó un conversor AD 5626 con comunicación por interfaz periférica en serie (SPI- por sus siglas en inglés) y 12 bits de resolución.

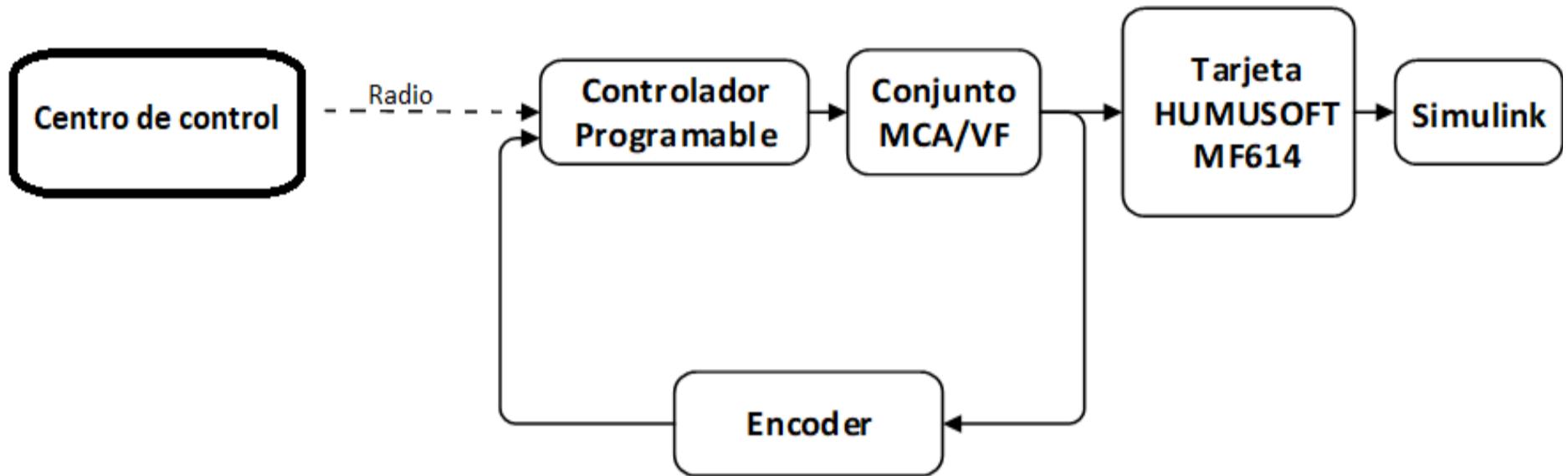


Figura 8. Esquema de verificación del controlador inalámbrico

Los equipos empleados, además del controlador implementado, se relacionan a continuación:

- Variador de frecuencia marca Mitsubishi y referencia FR-A722.
- Motor de inducción trifásico marca ECCHOP con 3 caballos de fuerza con velocidad nominal de 1500 rpm.
- Encoder de tipo incremental marca DENMARK con 12 bits de resolución.
- Tarjeta de adquisición HUMUSOFT MF614 (Touil et al., 2020) para, mediante el *toolbox Real Time Target* de MATLAB, observar en Simulink la señal a la salida del sistema.
- PC con procesador AMD E-300 DualCore CPU 1.30 GHz, sistema operativo WINDOWS 10 PRO de 64 bits, 6 GB de memoria RAM.

En la conexión inalámbrica resultan parámetros claves en la caracterización del enlace: la potencia recibida, la ganancia de la antena y el nivel de ruido ambiental (Hongyim, 2019). Por lo que se valoró el desempeño del sistema frente a diferentes distancias, con empleo de la antena integrada en el módulo inalámbrico. En la tabla 1 se muestra la dependencia de la potencia recibida contra la distancia al punto de acceso del servidor.

Se puede apreciar que para distancias superiores a los 50 metros la potencia recibida se reduce significativamente haciendo inestable la conexión. Esta medición permite determinar la distancia máxima a la que se puede ubicar el punto de control con el empleo del punto de acceso embebido. Para mejorar los resultados obtenidos puede emplearse una versión superior de módulo inalámbrico o adicionar antenas con un mayor aprovechamiento de la potencia transmitida.

Se realizó una comparación de los resultados alcanzados en la plataforma con PID incorporado con los valores establecidos por el fabricante en el manual del sistema original. Los instrumentos de medición empleados son los propios indicadores de parámetros del equipo. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 2.

Distancia (m)	Potencia (dBm)	Frecuencia (GHz)	Ganancia (dBi)
1	-35	2.4	10
5	-40	2.4	9
10	-45	2.4	7
20	-50	2.4	6
30	-55	2.4	5
40	-60	2.4	3
50	-70	2.4	2
55	-75	2.4	1

Tabla 1. Dependencia de la potencia recibida respecto a la distancia

Parámetro	Sistema	Plano de medición	
		Horizontal	Vertical
Potencia de carga (W)	Original	1200 ± 500	1100 ± 500
	Con control inalámbrico	1150	970
Error Dinámico (min)	Original	20 ± 2	15 ± 2
	Con control inalámbrico	18	13
Velocidad máxima (rpm)	Original	1500 ± 200	500 ± 100
	Con control inalámbrico	1400	450
Tiempo de vuelta completa(s)	Original	20 ± 5	12 ± 5
	Con control inalámbrico	18	10

Tabla 2. Resultados obtenidos

Con el valor calculado se obtuvo un promedio de 1050 W de potencia necesaria para el motor asincrónico de inducción, lo cual demuestra la capacidad de soporte del conjunto formado por el motor de corriente alterna y el variador de frecuencia empleado, puesto que

sobrepasan esa cifra. Se evaluó el desempeño de la plataforma pesada obteniéndose una mejora en el cumplimiento de los parámetros establecidos por el fabricante del sistema original lo que corrobora que la sustitución de la conexión cableada no afecta el control de la plataforma y aumenta la capacidad del sistema.

Conclusiones

Los resultados obtenidos evidencian el cumplimiento del objetivo de la investigación al lograrse la implementación de un sistema de control inalámbrico para garantizar el control de una plataforma pesada giratoria basado en XBee. A través del empleo del hardware y software libre se logra una elevada independencia tecnológica abaratando los costos de fabricación. La configuración adoptada permite sobre todo flexibilidad y escalabilidad siendo posible su despliegue en zonas donde resulta imposible una conexión cableada, así como la adición de nuevos nodos sin que repercuta significativamente en el diseño original.

Aun cuando las pruebas son satisfactorias, sí requieren distancias de control superiores a 50 metros es preciso emplear otro módulo de XBee como es el caso de la versión PRO o adicionar una antena direccional en el conector de radiofrecuencia presente en la placa.

Referencias bibliográficas

- Adewasti, R., Febriani, R., Sholihin, E., Susanti, E., & Hesti, E. (2018). XBee Pro module application in organizing and monitoring earthquake disaster location with the robot control system. *International Conference on Information and Communications Technology (ICOIACT)* (pp. 651-655). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICOIACT.2018.8350811>
- Ambikabhuwaneswari, C., & Muthumari, M. (2018). Design and realization of radio communication using LoRa & XBee module for an e-Bike. *IEEE International Conference on Computational Intelligence and Computing Research (ICCIC)* (pp. 1-4). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICCIC.2018.8782420>
- Bernabé, P., Gotlieb, A., Legeard, B., Marijan, D., Sem-Jacobsen, F. O., & Spieker, H. (2024). Detecting intentional AIS shutdown in open sea maritime surveillance using self-supervised deep learning. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 25(2), 1166-1177. <https://doi.org/10.1109/TITS.2023.3322690>

Floriduz, A., Bassi, E., Benzi, F., Secondo, G., & Termini, P. S. (2015). Wireless temperature sensing in electrical motors with XBee modules. *IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis (WEMDCD)* (pp. 304-308). IEEE. <https://doi.org/10.1109/WEMDCD.2015.7194544>

Gavra, V.-D., Pop, O. A., & Dobra, I.-M. (2023). Performance analysis of XBee modules in a mesh network. *46th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE)* (pp. 1-4). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ISSE57496.2023.10168505>

Hongyim, N. (2019). Designing and implementation wildlife tracking system using APRS protocol. *5th International Conference on Engineering, Applied Sciences and Technology (ICEAST)* (pp. 1-4). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICEAST.2019.8802541>

Hongyim, N., & Mithata, S. (2017). Designing and implementation exploration vehicle remote controller using APRS protocol. *21st International Computer Science and Engineering Conference (ICSEC)* (pp. 1-5). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICSEC.2017.8443845>

Karyemsetty, N., Samatha, B., & Rao, K. H. (2015). Diseño e implementación de un sistema de seguimiento de vehículos en VANETs utilizando XBee Pro: Modelo prototípico. *Conferencia Internacional sobre Redes de Comunicación (ICCN)* (pp. 97-100). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICCN.2015.20>

Matondang, J., & Adityawarman, Y. (2018). Implementation of APRS network using LoRa modulation based KISS TNC. *International Conference on Radar, Antenna, Microwave, Electronics, and Telecommunications (ICRAMET)* (pp. 37-40). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICRAMET.2018.8683928>

Penttinен, J. T. J. (2013). Modulation and demodulation. En J. T. J. Penttinен (Ed.), *The telecommunications handbook: Engineering guidelines for fixed, mobile and satellite systems* (pp. 261-280). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781118678916.ch10>

Qt Creator (Versión 5.7) [Software]. (s. f.). *The Qt Company*. <https://www.qt.io/download-qt-installer>

Sanfilippo, F., & Pettersen, K. Y. (2015). XBee positioning system with embedded haptic feedback for dangerous offshore operations: A preliminary study. *OCEANS 2015-Genova* (pp. 1-6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/OCEANS-Genova.2015.7271241>

Shahzad, M. U., Khan, A. Q., Bukhari, S. M. R., Aslam, A., & Zaib, M. O. (2017). Wireless control robot using XBee module with multiple sensor

acknowledgment on HMI. *International Symposium on Recent Advances in Electrical Engineering* (RAEE) (pp. 1-4). IEEE. <https://doi.org/10.1109/RAEE.2017.8246034>

Si, D., Edwards, R. M., & Geng, Y. (2021). XBee latency analysis for drone mounted machine control over wireless communication channels. *15th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)* (pp. 1-4). IEEE. <https://doi.org/10.23919/EuCAP51087.2021.9411478>

Touil, H., Akkad, N. E., & Satori, K. (2020). Text encryption: Hybrid cryptographic method using Vigenere and Hill ciphers. *International Conference on Intelligent Systems and Computer Vision (ISCV)* (pp. 1-6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ISCV49265.2020.9204095>

Wang, J., & Tang, J. (2011). Design and implementation of WSN monitoring system for grain depot based on XBee/XBee Pro. *International Conference on Electric Information and Control Engineering* (pp. 4872-4874). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICEICE.2011.5777512>

Weatley, M. (2018). *PSKCore.DLL software specification and technical guide* (Ver. 1.41) [Manual de software].

