

REDES INALÁMBRICAS PARA EL CONTROL DE PROCESOS INDUSTRIALES EN TIEMPO REAL

Juan Felipe Monsalve Posada ¹, Alexander Arias Londoño ²

¹Ingeniero Electrónico, Estudiante de Maestría en Automatización y Control Industrial del Instituto Tecnológico Metropolitano ITM, Integrante del Grupo en Automática, Electrónica y Ciencias Computacionales y Docente Investigador del programa de Ingeniería Electrónica del Instituto Tecnológico Metropolitano, Calle 73 No 76A -354 Vía al Volador Medellín – Colombia. juanmonsalve@itm.edu.co

²Ingeniero Electrónico, MSc. Grupo de Investigación A&E. Profesor Investigador. Instituto Tecnológico Metropolitano, Calle 73 No 76A -354 Vía al Volador Medellín – Colombia. profeitm@gmail.com

RESUMEN

Las redes inalámbricas están siendo usadas, cada vez con mayor frecuencia, en aplicaciones de control para ambientes industriales, en este artículo de revisión se presentan las ventajas y desventajas de las redes inalámbricas sobre las cableadas, se analizan y comparan los protocolos inalámbricos más usados para estas aplicaciones, se muestran las investigaciones más relevantes y recientes acerca del tema, y a partir de esto se establece que falta por hacer en el tema

Palabras clave: redes inalámbricas, ambientes industriales, control, tiempo real.

Recibido: 11 de julio de 2013.
Received: July 11th, 2013.

Aceptado: 26 de noviembre de 2013.
Accepted: November 26th, 2013.

WIRELESS NETWORKS FOR INDUSTRIAL PROCESS CONTROL IN REAL TIME

ABSTRACT

Wireless networks are used increasingly more often in control applications for industrial environments. The advantages and disadvantages of wireless networking over wired networks are presented in this review. The most widely used wireless protocols for these applications are analyzed and compared, as well as the most relevant and recent research on the subject. From this, some needs in this field are stated.

Keywords: *Wireless networks, industrial environment, control, real time.*

1. INTRODUCCIÓN

Las redes inalámbricas han sido ampliamente utilizadas en todo el mundo, en aplicaciones comerciales y domésticas para transmitir datos, audio y video, esto potenciado por la masificación en el uso del internet, caracterizado por la trasmisión de grandes cantidades de datos de forma cableada e inalámbrica, siendo la tecnología inalámbrica IEEE 802.11 la más popular [1]. A nivel industrial, donde las redes inalámbricas (WN) también tienen las aplicaciones antes mencionadas, están siendo, cada vez más usadas en las partes inferiores de la pirámide de automatización, donde las características de comunicación son más estrictas en lo referente a fiabilidad y retardos necesarios para el buen desempeño de controladores. En la actualidad los sistemas de control afrontan cambios y retos ocasionados por varios motivos, entre ellos la complejidad en los procesos de control en busca de una mejor calidad a menor precio en la producción, y otra no tan evidente pero que ha sido muy importante, la seguridad de los procesos productivos de tal forma que no represente riesgos para los operarios presentes en dicho procesos [2, 3]. En este contexto y de cierta forma buscando lograr estos objetivos las WN han atraído la atención en los procesos de control, de tal forma que la industria de la automatización ha centrado sus mayores esfuerzos en el desarrollo de nuevos WN [4].

Hay un gran interés en la investigación y el desarrollo de WN [5]. En los sistemas de control en red, por ejemplo, hay un gran interés en el desarrollo de la tecnología WN como un reemplazo potencial para la actual generación de redes cableadas industriales [6]. Estas redes cableadas presentan grandes inconvenientes y desventajas que pretenden ser solucionadas mediante el uso de otras tecnologías como las comunicaciones inalámbricas. Las tecnologías cableadas actuales presentan dificultades en ciertos ambientes industriales como la industria petroquímica [7, 8] y donde se usen dispositivos móviles y portátiles. La necesidad continua de reemplazar los cables y la implementación de dispositivos móviles en la industria conduce a una activa investigación en la utilización de WN. Estas deben ofrecer la fiabilidad necesaria de los sistemas cableados y servir para procesos en tiempo real. Aplicaciones en lo militar, la industria, medicina y sectores comerciales son las que más motivan la solución de problemas

cruciales asociados con los retardos y la pérdida de datos comunes en WN, la última meta aquí es aplicar redes para lograr control realimentado en tiempo real comparable al control cableado punto a punto [9].

Los 55 artículos referenciados en esta revisión mencionan de alguna u otra forma, los dos principales problemas de las WN utilizadas para control en ambientes industriales, que son, la poca fiabilidad del medio de trasmisión, causado por el comportamiento no determinístico, especialmente en IEEE802.11 que utiliza CSMA/CA como protocolo de acceso al medio, y los altos retardos causados por interferencia y la trayectoria multicaminos [10]. Para solucionar esto se han propuesto varias metodologías a través de modelos predictivos, [11, 12, 13] y el desarrollo de nuevos protocolos, los tres con mejores resultados son WirelessHART, [14, 15, 16, 17], ISA100.11a, [18, 19] y Wireless Networks for Industrial Automation-ProcessAutomation (WIA-PA), [20, 21, 22].

En este artículo se presenta una panorámica de los protocolos de redes industriales más utilizadas, analizando específicamente el protocolo IEEE802.11 que cuenta con dispositivos diseñados para aplicaciones industriales como los SCALANCE W744-1 Pro y W788-1Pro de Siemens.

El artículo se presenta de la siguiente forma: en la sección dos se presenta un vistazo de las redes inalámbricas utilizadas para el control en procesos industriales, en la sección tres se describen los estándares de comunicación inalámbrica para la industria, en la sección cuatro se presenta una descripción corta de los artículos más relevantes en el tema de redes inalámbricas utilizadas para el control de procesos industriales en tiempo real, la sección cinco describe lo que falta en redes WLAN y WPAN y en la sección seis las conclusiones.

2. VISTAZO A LAS REDES INALÁMBRICAS

La tecnología WN puede ser dividida en tres principales clases, de estas tres dos se utilizan como medio de comunicación para el control en procesos industriales, a continuación se muestra el mapa conceptual de estas redes y posteriormente se menciona su integración en la pirámide de automatización.

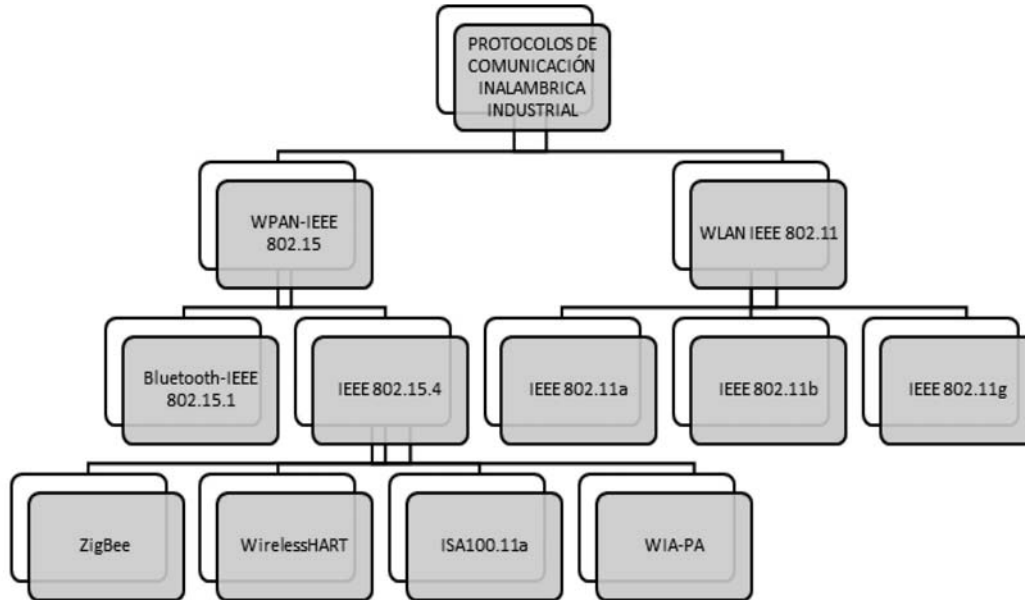


Figura 1. Estándares de comunicación Inalámbrica utilizadas a nivel industrial. (Fuente: Autor)

2.2. Mapa conceptual de las redes inalámbricas más utilizadas para control en procesos industriales

Inicialmente las WN fueron aplicadas a la industria para la comunicación sensor/actuador ya que muchos de estos sensores estaban ubicados en sistemas móviles con muy buenos resultados [23, 24, 25], en vista de esto se extendió esta aplicación a sistemas de control en la comunicación actuador/controlador, para ello se propusieron y desarrollaron nuevos protocolos.

En la Fig. 1 se muestran los Diferentes tipos de estándar de comunicación que han sido propuestos para el control de procesos industriales en tiempo real de manera inalámbrica, los más utilizados son Bluetooth (IEEE 802.15.1) y ZigBee (IEEE 802.15.4) [26, 27, 28, 29, 30] que permiten conexiones entre puntos de acceso a corta distancia y WLAN (IEEE 802.11) con un rango de 100m [31], este último al utilizar Ethernet como base de comunicación permite realizar un monitoreo del sistema por medio de Internet. Con el objetivo de lograr alta fiabilidad y determinismo en la trasmisión, recientemente han surgido nuevos protocolos, como el bus de campo inalámbrico llamado R-Fieldbus basado en el protocolo IEEE 802.11 [32], WirelessHART, establecido en 2006 por Hartfoundation, el estándar ISA100.11a desarrollado por ISA WirelessCommitteeterminado en 2009 [33] y en 2009 se creó Wireless Networks

for Industrial Automation-ProcessAutomation (WIA-PA) [34], todos basados en el IEEE802.15.4.

2.3. Integración de Redes Inalámbricas en la Pirámide de Automatización

En la Fig. 2 se presenta la pirámide de automatización con los protocolos de comunicación alamburada más utilizados a nivel industrial, entre paréntesis se muestran los protocolos más utilizados para sustituir la red cableada en el nivel de gestión, ha habido una gran acogida del protocolo 802.11 también llamado WiFi para sustituir el cableado cumpliendo satisfactoriamente, con los requerimientos característicos de este nivel como son, las grandes cantidades de información (WiFi 54Mbps), grandes distancias (WiFi 100m) y alta seguridad, a nivel de control son de mayor importancia características como la fiabilidad y los bajos tiempos de retardos típicos en el diseño de controladores y cumplidos satisfactoriamente por las redes cableadas como Profibus, desde este nivel y hasta el nivel de E/S se han realizado pruebas, principalmente con los protocolos IEEE.802.11 y IEEE802.15, sustituyendo el sistema de comunicación cableado, en algunos se reportan resultados muy buenos, mientras en otros no, todo depende de las características de la planta donde se aplique, igual todos menciona las debilidades y ventajas de las redes WN sobre las cableadas, también se han diseñado nuevos protocolos inalámbricos basados en el IEEE802.15 que utiliza

multiplexación TDMA con mejores resultados en los tiempos de retardo que el utilizado por el IEEE802.11 CSMA/CA, estos protocolos son WirelessHART, ISA100.11a y WIA-PA con muy buenos resultados en aplicaciones industriales, pero aún no tan comunes.

3. ESTÁNDARES DE COMUNICACIÓN INALÁMBRICA PARA LA INDUSTRIA

A continuación se da una descripción de los dos protocolos más utilizados para control en tiempo real en la industria.

3.1 WPAN

Redes inalámbricas personales o WPAN (Wireless Personal Area Network) son usadas como comunicación punto a punto, sin embargo también es posible utilizarlo en comunicaciones punto-multipunto con protocolos como PicoNET (basado en Bluetooth) o ZigBee (basado en IEEE 802.15.4b) [29].

En la Tabla 1 se presentan las características de los dos estándares WPAN más utilizados para el control en procesos industriales, el rango de desempeño va, desde un metro a unas pocas docenas de metros, estas fueron diseñadas para bajas tasas de transmisión, entre 100 y 200 kbps. Las tecnologías WPAN, en el pasado, han sido muy usadas comercialmente pero muy poco en ambientes industriales, recientemente se ha masificado su uso en ambientes industriales, específicamente el IEEE802.15.4 ha conseguido muy buenos resultados en este campo, los tres protocolos creados, WirelessHART, ISA100.11a Y WIA-PA son basados en este.

3.2. WLAN

Redes inalámbricas de área local o WLAN (Wireless Local Area Networks) es el protocolo con más aplicaciones utilizado para interconectar dispositivos con alta velocidad de datos.

En la Tabla 2 se muestran las características de los protocolos WLAN más comunes, el rango de operaciones están entre unas docenas de metros en interiores, hasta unos cientos de metros en exteriores, fue diseñado para alta transmisión de datos, usualmente entre 1 a 54 Mbps con un alto consumo de energía que lo desfavorece comparado con WPAN.

4. APLICACIONES Y EXPERIMENTOS CON REDES WPAN Y WLAN

El uso de conexiones inalámbricas en procesos industriales nace como necesidad en algunos campos de aplicación en donde el cableado se hace costoso, no solo en la instalación sino también en el mantenimiento del mismo [35], igualmente puede ser útil para reemplazar el cable en lugares donde este puede representar peligro, por ejemplo en la industria química donde chispas o cortos ocasionados por cables pueden causar incendios o explosiones [8], y por último, para establecer comunicación en dispositivos móviles donde es imposible la utilización de cables [2].

En [36] se presenta una visión sobre el desempeño de IEEE 802.11b para una aplicación de control en tiempo real sobre un carro con péndulo invertido, todas la pruebas fueron realizadas con herramientas de simulación con interesantes resultados, como la gran influencia del ancho de banda y el periodo de muestreo en los retardos de la señal.

En [37] se puede encontrar una revisión del estado del arte en reemplazo de cables, describiendo los protocolos inalámbricos que pueden servir de comunicación entre sistemas de control en tiempo real, igualmente se presentan brevemente 5 casos exitosos de reemplazo de cables por redes inalámbricas en aplicaciones industriales, también se mencionan los principales problemas que afrontan las WLAN, y en algunos se muestran sus posibles soluciones, como el caso de la robustez, donde propone una adecuada ubicación de antenas.

[6] da una descripción detallada de los 3 protocolos inalámbricos más usados WiFi, Bluetooth y ZigBee, sus ventajas y desventajas como medio de comunicación para control en tiempo real, además se ofrecen posibles soluciones a algunos problemas, como el caso de la pérdida de paquetes y la interferencia en radio frecuencia (RF), donde sugiere instalar nodos redundantes en la banda de los 5 GHz, también menciona la necesidad de generar sistemas de comunicación cableada que permita ofrecer soluciones a través de extensiones de estas pero inalámbricas y donde ya hay casos exitosos, como el sistema de comunicación PROFINET de Siemens aplicado a casos reales en la industria.

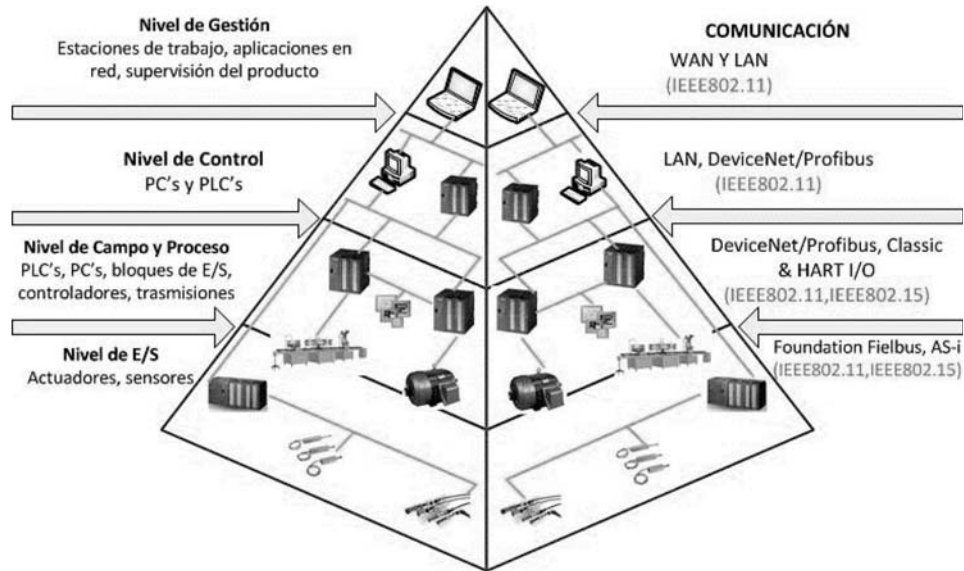


Figura 2. Pirámide de automatización con los protocolos de comunicación alámbrica más utilizados a nivel industrial. (Fuente: Autor)

Tabla 1. Características WPAN

	Bluetooth	ZigBee
Estándar IEEE	802.15.1	802.15.4
Velocidad de Transferencia Máxima	723.2 kbps	20 kbps (868 MHz) 40 kbps (915 MHz) 250 kbps (2.4 GHz)
Rango de Frecuencias	2402-2480 MHz	2.4-2.4835 MHz (US) 902-928 MHz (US) 868.3 MHz (Eu)
Ancho de Banda	1 MHz	5 MHz
Multiplexación	TDMA o CDMA	CSMA/CA con FDMA y TDMA
Modulación	GFSK	BPSK (868/915 MHz) OQPSK (2.4 GHz)
Consumo de Energía	+++	+
Rango de desempeño	+	++
Seguridad	++	+++

Tabla 2. Características WLAN

	WiFi		
	802.11a	802.11b	802.11g
Estándar IEEE	802.11a	802.11b	802.11g
Velocidad de Transferencia Máxima	54 Mbps	11 Mbps	54 Mbps
Rango de Frecuencias	5.15-5.35 GHz (US) 5.470-5.725 GHz (Eu)	2.4-2.4835 GHz (US/Eu)	2.4-2.4835 GHz
Ancho de Banda	20 MHz	20 MHz	1.728 MHz
Multiplicación	CSMA/CA	CSMA/CA	CSMA/CA
Modulación	BPSK QPSK 16QAM 64QAM	BPSK DQPSK BPSK QPSK	BPQK QPSK 16-64 QAM
Consumo de Energía	++	++	++
Rango de desempeño	+++	++	++
Seguridad	++	++	++

[38] menciona los principales problemas a resolver en redes inalámbricas utilizadas para procesos de control, estos son la seguridad, la robustez y el consumo de energía. En [39] se puede encontrar un estudio más detallado de las redes inalámbricas empleadas en procesos industriales debido a que en el diseño inicial de las mismas no se considera el ambiente industrial y sus requerimientos. [40] presenta un interesante modelo para medir el retardo RTT de las WN que puede ser útil para determinar si estos retardos, introducidos por la red, no deterioran el sistema control.

En [41, 42] investigan los efectos del ruido y la interferencia electromagnética en las comunicaciones inalámbricas industriales en una fábrica de papel y una fábrica de acero, en esta investigación se hizo una caracterización electromagnética del entorno de la planta de proceso, posteriormente se analizó la vulnerabilidad de las tecnologías inalámbricas ante este ruido, y se mencionó las principales fuentes de interferencia electromagnética y que frecuencias afectan, esto dará lugar a las directrices para la elección de las tecnologías inalámbricas. En [43] se analizan los problemas que presenta la comunicación no determinística en redes WLAN aplicada al control industrial, luego se prueba una solución efectiva a este problema dando en detalle el correspondiente mecanismo determinístico, por último se analiza los resultados obtenidos con el mecanismo de comunicación determinística con el WLAN comercial mostrando una significativa mejora.

[44] menciona que la comunicación inalámbrica se caracteriza por su alta probabilidad de error, con el riesgo de causar graves problemas de fiabilidad para aplicaciones con estrictos requisitos de tiempo y propone una estructura con esquema de retransmisión y análisis de tiempo para mejorar estos problemas.

[45] se presenta el diseño de una red para la comunicación híbrida inalámbrico – cable basada en modelos dinámicos, para la implementación de esta red se usa una la tarjeta SIEMENS PCI card CP1616 y 4 módulos WIFI USB MIMO 2x2 Tx/Rx, adicionalmente se presenta una simulación usando la herramienta Simulink de Matlab. En [46, 47] se define un conjunto de indicadores de rendimiento para dos casos de utilización de redes WN en la industria, una es basado en el estándar IEEE 802.11 y la otra por un protocolo maestro-esclavo implementado en la parte superior de la capa MAC

(Control de Acceso al Medio) de la IEEE 802.15.4, posteriormente se presenta algunos ejemplos de su evaluación en diferentes condiciones de funcionamiento, también se menciona la poca disponibilidad de dispositivos inalámbricos -puntos de acceso- para aplicaciones industriales, y para los pocos que existen no es posible encontrar, en literatura científica, los análisis de desempeño. En [48] se compara, a través de simulación, el protocolo IEEE802.11 con una modificación de este mismo utilizando SpatialMultiplexing (SM) in MIMO-enabled WLAN, en las conclusiones se mencionan unas significativas mejoras en el promedio y máximo retraso del segundo sobre el primero.

[49] escribe que en el campo de los sistemas de comunicaciones inalámbricas industriales no se ha caracterizado los dispositivos, que en realidad con sus retrasos internos influye en los resultados de los muchos experimentos hechos para estudiar las redes WN para control industrial, específicamente se refiere a los puntos de acceso comercialmente disponibles en el protocolo IEEE802.11 muy usados en estas aplicaciones, el artículo proporciona un ejemplo de caracterización de un punto de acceso 3Com Office Connectcommercially, y utiliza los resultados obtenidos para evaluar el desempeño de los sistemas de comunicación industriales que emplean el mismo dispositivo. [50] muestra una mejora a la fiabilidad del protocolo IEEE802.11 a través de retransmisión en la capa de transporte, el experimentos se lleva a cabo, también, en el protocolo IEEE802.15.4, los autores nombran dos inconformidades de este protocolo, primero, aunque ofrece mejores técnicas en ahorro de energía y mejores resultado en cuanto a fiabilidad, es menos robusto a la interferencia y al ruido que el IEEE802.11 [35], segundo, aunque hay muchas aplicaciones industriales con menos de 10 nodos transmitiendo datos por debajo de los 80 bytes, también hay aplicaciones que utilizan cientos de nodos transmitiendo por encima de 80 bytes, para estas el IEEE802.15.4 presenta problemas.

En [51] describen la implementación y configuración del control de una tanque de agua utilizando PLC Siemens S7300 y módulos de redes inalámbricas industriales Siemens SCALANCE W744-1Pro y W788-1Pro, concluye que la red inalámbrica funciona perfectamente con los PLC's y que el sistema cumple con los requerimientos establecidos en el diseño del controlador. En [52]

se presenta un modelado basado en cadenas de Markov para el protocolo IEEE802.11b, posteriormente se propone una nueva metodología de programación del controlador, se evalúa matemáticamente la estabilidad y por último se simula para verificar con los datos obtenidos. [53] realiza un test de desempeño para redes híbridas cable/inalámbrico, propone una metodología para adquirir un conjunto de indicadores de redes inalámbricas, luego se diseña un experimento de prueba para verificar lo propuesto y analiza la pérdida de paquetes variando las distancias.

En [4, 54] desarrollan una plataforma con Software llamada WiNC (Wireless Network Control) basada en el protocolo IEEE 802.11, para lograr una transmisión de datos determinística se diseña un nuevo protocolo en la capa MAC, la plataforma se prueba con dos plantas, una de tres tanques y otra con un péndulo invertido obteniendo excelentes resultados

5. LO QUE FALTA EN REDES WLAN Y WPAN

Para los procesos de control en tiempo real es crucial contar con un medio de transmisión que cumpla con los requerimientos determinados por la baja pérdida de información, pequeños retardos en la transmisión y la seguridad. El mayor problema de las redes inalámbricas es la poca confiabilidad del medio inalámbrico, causada por la reflexión, pérdidas por efecto multicamino y la interferencia crucial con otros dispositivos que utilizan la misma banda de frecuencia de 2.4 GHz [5, 36].

En varios trabajos se ha realizado análisis del desempeño de una conexión inalámbrica en el control de un proceso industrial simulado [36], pero no se muestra la dependencia del desempeño de la transmisión variando la distancia entre los dispositivos inalámbricos y posibles cambios en el medio de comunicación, se simulan los procesos a controlar, pero no se muestra como se afecta la salida del sistema en lazo cerrado.

En [37] se presentan brevemente 5 casos exitosos de reemplazo de cables por redes inalámbricas en aplicaciones industriales, sin embargo no establece bajo qué condiciones las redes cableadas pueden ser reemplazadas por redes inalámbricas. [55] desarrolla una herramienta de simulación para la comunicación en tiempo real de los protocolos WLAN, Bluetooth y Zigbee implementados

especialmente para comunicación entre robots móviles, se tienen en cuenta parámetros como la distancia y las baterías, pero no mencionada nada sobre el desempeño de estos en ambientes hostiles como los industriales.

[6] menciona la necesidad de generar sistemas de comunicación cableada que permita ofrecer soluciones a través de extensiones de estas pero inalámbricas, y donde ya hay casos exitosos como el sistema de comunicación PROFINET de Siemens aplicado a casos reales en la industria, pero no describe cuales son los límites de estas, dadas los requerimientos de retardos y niveles de ruido e interferencia. En [41, 42] investigan las fuentes de ruido y la interferencia electromagnética en las comunicaciones inalámbricas industriales, se mencionan las principales fuentes de ruido electromagnético y en que frecuencias se manifiesta pero no muestran a fondo como este ruido afecta las comunicaciones inalámbricas utilizadas en procesos de control en tiempo real. En [43] se analizan los problemas que presenta la comunicación no determinística en WLAN aplicada al control industrial, sin embargo no establece cual es el límite de funcionamiento de estas de acuerdo al número de nodos de control en la red. [46, 47] se define un conjunto de indicadores de rendimiento para dos casos de utilización de WN en la industria, IEEE 802.11 y IEEE 802.15.4, pero en las conclusiones mencionan que para los dispositivos IEEE 802.11, no fue posible hacer modificaciones a sus parámetros con el fin de lograr mejores resultados, describen que las pruebas se hicieron con dispositivos Lynksys WAP54G y 3Com Office Connect, que son puntos de acceso de uso comercial y por ende no están adaptados para el trabajo en uso industrial, por ejemplo con carcasa de protección contra altas y bajas temperaturas, alta humedad y el alto ruido electromagnético, esto sin duda influye desfavorablemente, el resultado de las pruebas realizadas, Los SCALANCE W744 y W788 de SIEMENS, son especialmente diseñados para el trabajo en ambientes industriales, además es posible modificar sus parámetros permitiendo tener en cuenta variables adicionales en los indicadores de rendimientos.

[49] presenta un ejemplo de caracterización de un punto de acceso 3Com Office Connectcommercially, y utiliza los resultados obtenidos para evaluar el desempeño de los sistemas de comunicación industriales que emplean el mismo dispositivo, hay que destacar

que en las conclusiones mencionan el interés de caracterizar los puntos de acceso que son intencionalmente diseñados para aplicaciones industriales, tales como, la familia Scalance de productos suministrados por Siemens.

En [51] describe la implementación y configuración del control de una tanque de agua utilizando PLC Siemens S7300 y módulos WN industriales Siemens SCALANCE W744-1Pro y W788-1Pro, destaca las ventajas de las redes inalámbricas sobre el cableado, pero en el experimento no se tiene en cuenta los hostiles ambientes industriales y la variación de parámetros como la distancia con el objetivo evaluar adecuadamente el sistema.

6. CONCLUSIONES

Los 55 artículos, mencionan de alguna u otra forma, los dos principales problemas de las redes inalámbricas utilizadas para control en ambientes industriales, que son, la poca fiabilidad del medio de transmisión, causado por el comportamiento no determinístico, especialmente en IEEE802.11 que utiliza CSMA/CA como método de acceso al medio, y los altos retardos causados por interferencia y la trayectoria multicaminos.

Para solucionar esto se han propuesto varias metodologías a través de modelos predictivos, modificación y creación de métodos de acceso en la capa MAC, y el desarrollo de nuevos protocolos, los tres con mejores resultados son WirelessHART, ISA100.11a, y WIA-PA. A pesar de esto las redes inalámbricas WiFi en la actualidad se siguen investigando para aplicaciones industriales, y esto por tres razones fundamentales, la primera, aunque IEEE802.15 ofrece mejores técnicas en ahorro de energía y mejores resultados en cuanto a fiabilidad, es menos robusto a la interferencia y al ruido que el IEEE802.11, segundo, aunque hay aplicaciones industriales con menos de 10 nodos transmitiendo datos por debajo de los 80 bytes, también hay aplicaciones que utilizan cientos de nodos transmitiendo por encima de 80 bytes, para estas el IEEE802.15.4 presenta problemas, y tercero, es el posicionamiento en el mercado de dispositivos inalámbricos diseñados para ambientes industriales como los SCALANCE W744-1Pro y W788-1Pro de Siemens ambos trabajando con el protocolo IEEE802.11.

Existe la necesidad de caracterizar y evaluar el comportamiento de estos dispositivos inalámbricos diseñados especialmente para ambientes industriales, igualmente se debe seguir implementando estrategias, basadas en herramientas como el control predictivo, redes neuronales, lógica borrosa, cadenas de Markov, etc., que permitan seguir mejorando las debilidades de las WN utilizadas para estos ambientes.

7. REFERENCIAS

- [1] G. Cena, L. Seno, A. Valenzano y C. Zunino, «On the Performance of IEEE 802.11e Wireless Infrastructures for Soft-Real-Time Industrial Applications» *Industrial Informatics, IEEE Transactions on.*, vol. 6, p. 425 – 437., Aug. 2010.
- [2] J. Taylor, J. Akerberg, I. H.M.S y M. Gidlund, «Safe and Secure Wireless Networked Control Systems» *2012 IEEE International Conference on Control Applications (CCA) Part of 2012 IEEE Multi-Conference on Systems and Control*, 3-5 October 2012.
- [3] B. Chejerla y S. Madria, «Securing a wireless networked control system using information fusion» *2012 31st International Symposium on Reliable Distributed Systems*, 2012.
- [4] Ding, Steven X., Zhang, Ping; Yin, Shen Ding, Eve L., «An Integrated Design Framework of Fault-Tolerant Wireless Networked Control Systems for Industrial Automatic Control Applications,» vol. 9, nº 1, 2013 FEBRUARY .
- [5] J. Song, A. Mok y D. Chen, «Challenges of wireless control in process industry,» *Proceedings of Workshop on Research Directions for Security and Networking in Critical Real-Time and Embedded Systems*, 2006.
- [6] G. W. Irwin, J. Colandairaj y W. G. Scanlon, «An Overview of Wireless Networks in Control and Monitoring.,» *ICIC*, pp. 1061-1072, 2006.
- [7] S. Savazzi, S. Guardianio y U. Spagnolinil, «Wireless Critical Process Control in oil and gas refinery plants» *Industrial Technology (ICIT), 2012 IEEE International Conference on.*, 2012.

- [8] M. Li, P. Zeng, F. Zhang, H. Wang y R. Zhong, «Structure and Protocols of Wireless Industrial Control Network.» *2010 International Conference on Computer Application and System Modeling (ICCASM 2010)*., vol. 6, pp. 140-143, 2010.
- [9] C. Chen, P. Hsiao, H. Kung y D. Vlah, «Performance Measurement of 802.11a Wireless Links from UAV to Ground Nodes with Various Antenna Orientations.» *Proc. 15th International Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN 2006)*, 9-10 October 2006.
- [10] M. Collotta, L. Bello, E. Toscano y O. Mirabella, «Dynamic load balancing techniques for flexible wireless industrial networks.» *IECON 2010 - 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society.*, p. 1329 – 1334, 7-10 Nov 2010.
- [11] J. Chen, G. Irwin, A. McKernan y W. Scanlon, «A Model Predictive Approach to Wireless Networked Control.» 2009.
- [12] D. Feng, D. Wencai y L. Zhi, «New Smith Predictor and Generalized Predictive Control for Wireless Networked Control Systems» *Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists*, vol. II, 18-20 March 2009.
- [13] A. Ulusoy, A. Onat y O. Gurbuz, «Wireless Model Based Predictive Networked Control System.» *Industrial and Embedded Systems*, 2009.
- [14] X. Zhu, W. Dong, A. Mok, S. Han, J. Song, D. Chen y M. Nixon, «A Location-determination Application in WirelessHART.» *2009 15th IEEE International Conference on Embedded and Real-Time Computing Systems and Applications.* , pp. 263-270, 2009.
- [15] Z. Zand, A. Dilo y P. Havinga, «Implementation of WirelessHART in NS-2 simulator.» *Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA), 2012 IEEE 17th Conference on*, 2012.
- [16] P. Ferrari, A. Flammini, S. Rinaldi y E. Sisinni, «Performance Assessment of a WirelessHART network in a real-world testbed» *Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), 2012 IEEE International*, 2012.
- [17] I. Müller, J. M. Winter, C. E. Pereira y J. C. Netto, «WirelessHART Fast Collect: a Decentralized Approach for Intermittent Field Devices.» 2013.
- [18] T. Zhong, M. Zhan y W. Hong, «Congestion Control for Industrial Wireless Communication Gateway.» *2010 International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation.*, pp. 1019-1022, 11-12 May 2010b.
- [19] T. I. Standards, « Overview and Status.» [En línea]. Available: <http://www.isa.org>.
- [20] P. Wang, Q. Pan, H. Wang, M. Xiang y Y. Kim, «An improved adaptive channel hopping scheme for WIA-PA industrial Wireless networks. Advanced Computer Theory and Engineering (ICACTE), 2010 3rd International Conference on. 20-22 Aug. 2010. V1-596.» *Advanced Computer Theory and Engineering (ICACTE), 2010 3rd International Conference on.*, pp. V1-596, 20-22 Aug 2010.
- [21] M. Wei, K. Kim, P. Wang y J. Choe, «Research and Implementation on the Security Scheme of Industrial Wireless Network. Information Networking (ICOIN), 2011 International Conference on Issue. 26-28 Jan. 2011. 37 – 42.» (2011). *Research and Implementation on the Security Scheme of Industrial Wireless Network. Information Networking (ICOIN), 2011 International Conference on Issue.*, pp. 37- 42, 26-28 Jan 2011.
- [22] T. Zhong, M. Zhan, Z. Peng y W. Hong, «Industrial Wireless Communication Protocol WIA-PA and Its Interoperation with Foundation Fieldbus.» *Computer Design and Applications (ICDDA), 2010 International Conference on.*, pp. 370-374, 25-27 June 2010a.
- [23] F. Xia, Y. Tian, Y. Li y Y. Sun, «Wireless Sensor/Actuator Network Design for Mobile Control Applications.» *Sensors 2007*, 7, pp. 2157-2173, 2007.
- [24] F. Xia y W. Zhao, «Flexible Time-Triggered Sampling in Smart Sensor-Based Wireless Control Systems.» *Sensors 2007*, 7, pp. 2548-2564, 2007.

- [25] Kwantae, C.; Minho, Jo; K., Taekyoung; H.L., Hsiao-Hwa C.; Dong, «Classification and Experimental Analysis for Clone Detection Approaches in Wireless Sensor Networks.,» *IEEE SYSTEMS JOURNAL*, vol. 7, n° 1, 2013.
- [26] K. Rathod, N. Parikh, A. Parikh y V. Shah, «Wireless Automation using ZigBee protocols.,» *Wireless and Optical Communications Networks (WOCN), 2012 Ninth International Conference on*, 2012.
- [27] E. Paciencia, F. Scorzoni y J. V. Vieira, «Evaluating Serial ZigBee Devices for Application in Wireless Networked Control Systems.,» *IECON 2012 - 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, 2012.
- [28] D. Kim, S. Park, K. Kang y D. Lee, «Time-triggered wireless sensor network for feedback control.,» *IEICE Electronics Express*, vol. 4, n° 21, pp. 644-649., 2007.
- [29] Deepak Karia, Jaypal Baviskar, Raj Makwana and Niraj Panchal, «Performance Analysis of ZigBee based Load Control and Power Monitoring System.,» 2013.
- [30] Y. D. Hong y S. Ho, «CFP Scheduling for Real-Time Service and Energy Efficiency in the Industrial Applications of IEEE 802.15.4.,» vol. 15, n° 1, 2013.
- [31] A. Yao, S. Strombeck y J. Chi, «Development of a mobile manufacturing system with PDA and PLC.,» *International Journal of Advanced Manufacturing Technology.*, pp. 723-729, 2005.
- [32] D. Choi y D. Kim, «Wireless Fieldbus for Networked Control Systems using LR-WPAN.,» *International Journal of Control, Automation, and Systems.*, vol. 6, n° 1, pp. 119-125, February 2008.
- [33] N. Dinh y D. Kim, «Performance evaluation of priority CSMA-CA mechanism on ISA100.11a wireless network.,» *Computer Standards & Interfaces*, 2011.
- [34] H. Wang, G. Ge, J. Chen y P. Wang, «A Reliable Routing Protocol based on Deterministic Schedule for Wireless Industrial Networks.,» *Computer Science and Information Technology (ICCSIT), 2010 3rd IEEE International Conference on.*, p. 368 – 372, 9-11 July 2010.
- [35] A. Sheikh y Y. Al-Moallem, «On the Design of a Wireless Network in an Industrial Environment.,» *Communication Systems (ICCS), 2010 IEEE International Conference on.*, p. 756 – 760, 17-19 Nov 2010.
- [36] J. Coladairaj, G. W. Irwin y W. G. Scanlon, «Analysis of an IEEE 802.11b wireless networked control system.,» *ICIC*, pp. 1061-1072, 2007.
- [37] K. Koumpis, H. L., M. Andersson y M. Johansson, «Wireless Industrial Control and Monitoring beyond Cable Replacement.,» *PROFIBUS International Conference Coombe Abbey*, pp. 1-7, June 2005.
- [38] J. Song, S. Han, A. K. Mok, D. Chen, M. Lucas y M. Nixon, «WirelessHART: Applying Wireless Technology in Real-Time Industrial Process Control.,» *IEEE Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium 2008*, pp. 377-386, 2008.
- [39] X. D. Carcelle y C. T. Devic, «Wireless Networks in industrial environments: State of the art and Issues.,» *International federation for information processing -publications- IFIP.*, pp. 141-156., 2006.
- [40] R. C. Lozoya, P. Martí, M. Velasco y J. M. Fuertes, «Wireless Network Delay Estimation for Time-Sensitive Applications.,» *Research report ESAII RR-06-12*, 2006.
- [41] Chilo, J.; Karlsson C.; Ängskog P. & Stenumgaard P. , «EMI Disruptive Effect on Wireless Industrial Communication Systems in a Paper Plant. Electromagnetic Compatibility.,» *EMC 2009. IEEE International Symposium on.*, p. 221 – 224, 17-21 Aug. 2009.
- [42] P. Ängskog, C. Karlsson, J. Ferrer, J. Chilo y P. Stenumgaard, «Sources of Disturbances on Wireless Communication in Industrial and Factory Environments.,» *Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, pp. 281-284, 12-16 April 2010.
- [43] Y. Zheng, A. Xu, Y. Song, W. Zhao y M. Liu, «Industrial wireless deterministic communication based on wlan: design, implementation and analysis» *ICCTA 2009*, pp. 974-278, 2009.

- [44] M. Jonsson y K. K., «Towards Reliable Wireless Industrial Communication With Real-Time Guarantees» *IEEE Transactions on Industrial Informatics.*, vol. 5, n° 4, pp. 429-442, november 2009.
- [45] V. Srovnal y Z. Machacek, «Industrial Communication Network for Wire and Wireless Data Transfer» *Applied Electronics (AE), 2010 International Conference on.*, pp. 1-4, 8-9 Sept. 2010.
- [46] G. Gamba, L. Seno y S. Vitturi, «Performance Indicators for Wireless Industrial Communication Networks» *Factory Communication Systems (WFCS), 2010 8th IEEE International Workshop on.*, pp. 1-10, 2010a.
- [47] G. Gamba, L. Seno y S. Vitturi, «Theoretical and experimental evaluation of polling times for wireless industrial networks using commercially available components.» *Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA) 2010 IEEE Conference on.*, pp. 1-8, 2010b.
- [48] M. A. S. Maadani y M. Mohammadi, «Delay Analysis and Improvement of IEEE 802.11e- Based Soft-Real-Time Wireless Industrial Networks» *2011 International Symposium on Computer Networks and Distributed Systems (CNDS)*, 23-24 February 2011.
- [49] L. Seno, S. Vitturi y F. Tramarin, «Influence of Real Components Behavior on the Performance of Wireless Industrial Communication Systems.» *Industrial Electronics (ISIE), 2011 IEEE International Symposium on*, pp. 1224 - 1229, 27-30 June 2011.
- [50] K. Kunert, E. Uhlemann y M. Jonsson, «Enhancing Reliability in IEEE 802.11 Based Real-Time Networks through Transport Layer Retransmissions.» *Industrial Embedded Systems (SIES), 2010 International Symposium on.*, pp. 146 - 155., 7-9 July 2010.
- [51] R. Bayindir y Y. Cetinceviz, «A water pumping control system with a programmable logic controller (PLC) and industrial wireless modules for industrial plants—An experimental setup.» *ISA Transactions*, 2011.
- [52] C. Hua, Y. Zheng y X. Guan, «Modeling and Control for Wireless Networked Control System.» *International Journal of Automation and Computing* 8(3), pp. 357-363, August 2011.
- [53] D. Jiang, M. Fei, H. Wang y T. Li, «Wireless Network Performance Test in Hybrid Wired/ Wireless Network System» *Proceedings of the 8th World Congress on Intelligent Control and Automation.*, 21-25 June 2011.
- [54] Y. Wang, H. Ye, S. X. Ding, G. Wang, and D. Zhou, «Residual generation and evaluation of networked control systems subject to random packet dropout.» Vols. 1 de 245, pp. 2427–2434, 2009.
- [55] M. Andersson, D. Henriksson, A. Cervin y K. Erik, «Simulation of Wireless Networked Control Systems» *Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control, and the European Control Conference 2005*, pp. 12-15, December 2005.