



INSTITUTO
TECNOLÓGICO
METROPOLITANO

**Análisis del desempeño de una
comunicación inalámbrica sobre PLC para el
control de procesos industriales en tiempo
real**

Juan Felipe Monsalve Posada

Instituto Tecnológico Metropolitano | Institución Universitaria
Facultad de Ingenierías
Calle 73 No 76A -354 Vía al Volador - Medellín - Colombia | Tel: (574) 440 5100
Fax: (574) 440 5103
2015

Análisis del desempeño de una comunicación
inalámbrica sobre PLC para el control de procesos
industriales en tiempo real

Juan Felipe Monsalve Posada

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:
Master en Automatización y Control Industrial

Director:

MSc. Alexander Arias Londoño

Línea de Investigación:

Sistemas de control y robótica.

Grupo de Investigación:

Automática, Electrónica y Ciencias Computacionales

Instituto Tecnológico Metropolitano | Institución Universitaria
Facultad de Ingeniería
Calle 73 No 76A -354 Vía al Volador - Medellín - Colombia | Tel: (574) 440 5100
Fax: (574) 440 5103
2014

DEDICATORIA

“A mi familia, en especial a mi tía y madre de crianza Luz Elena Posada Arango que falleció en el año 2011 y a la que le debo todo lo que soy”

AGRADECIMIENTOS

A mi familia por su respaldo incondicional

A mi asesor MSc. Alexander Arias por su ayuda y paciencia

Al Instituto Tecnológico Metropolitano por brindarme una formación integral

A mis amigos por su paciencia y apoyo

Resumen

Los dos principales problemas de las redes inalámbricas utilizadas para control en ambientes industriales 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. A pesar esto, las redes inalámbricas WiFi en la actualidad se siguen investigando para aplicaciones industriales 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 PLC's con comunicación Ethernet y dispositivos inalámbricos diseñados para ambientes industriales como los SCALANCE W744-1Pro y W788-1Pro de Siemens, ambos trabajando con el protocolo IEEE802.11. En este proyecto se diseña una metodología de medición para redes inalámbricas WiFi usadas para comunicar procesos de control en ambientes industriales que permite establecer el comportamiento de los retardos bajo cuatro parámetros que son, relación señal a ruido, cantidad de datos de información, distancia y numero de paquetes perdidos. A partir de los resultados, se presenta las características necesarias para que estas redes operen bajo un umbral establecido en los retardos de 50 ms. Para validar los resultados, se diseña una aplicación de control industrial muy común, control de motores de inducción, concluyendo que los resultados de la metodología son muy cercanos a los medidos en el proceso de control.

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

Abstract

The main two issues found in the wireless networks used by the control of industrial environments are the few reliability of the Wireless transmission channel, caused by the non-deterministic behavior, specially the IEEE 802.11x protocol, which uses like media access the method CSMA/CA, and the high delay due to signal interference and signal multipath. Despite, wireless networks running IEEE802.11x standard applied to industrial environments have been object of intensive research mainly by tree reasons. First one, IEEE802.15 offer better energy saver techniques and better results respect to reliability, is lees strong respect to signal interference and noise than IEEE802.11x; second one, IEEE802.15.4 presents some troubles for industrial applications with more than 10 nodes transmitting data rates below to 80 bytes; third one, market positioning of the PLC's with Ethernet communication and wireless devices designed by industrial environment applications, like the Siemens SCALANCE W744-1Pro and the Siemens W788-1Pro, both with capabilities to work with IEEE802.11x. The aim of this project was to design a measurement framework for wireles networks used to communicate industrial control processes under industrial environments, to allow establishing the delay behavior under four parameters: signal to noise ratio, throughput capacity, distance and number of loosed packets. From the results, it's presented the main characteristics to these networks operate under a specified delay threshold of 50 ms. In order to test the results, it was designed a typical industrial common application, like is the control of the industrial induction motor, concluding the results obtained using the framework are very closed to the measured from the control process.

Keywords: Wireless networks, industrial environment, delay, real time.

Contenido

Introducción	1
1 Marco teórico y estado del arte	4
1.1 Comunicaciones industriales	4
1.1.1 Profibus.....	6
1.1.2 Ethernet.....	8
1.1.3 Industrial Ethernet.....	9
1.2 Redes inalámbricas IEEE 802.11 WLAN	13
1.3 Métricas de desempeño en redes inalámbricas.....	16
1.3.1 Relación señal a ruido SNR	16
1.3.2 Distancia	18
1.3.3 Numero de Bytes	18
1.3.4 RTT (Round Trip delay Time)	19
1.4 Estado del arte	19
1.4.1 Retardos.....	23
1.4.2 Pérdida de paquetes.....	23
1.4.3 Interferencia	24
1.4.4 Fiabilidad.....	25
1.4.5 Seguridad y consumo de energía	25

1.4.6	Redes Híbridas Cable/Inalámbrico	26
1.4.7	Control Lógico Programable PLC	26
1.4.8	Dispositivos inalámbricos especialmente diseñados para ambientes industriales	27
2	Problema	28
2.1	Retardos.....	28
2.2	Interferencia	29
2.3	Fiabilidad.....	29
2.4	Redes Híbridas Cable/Inalámbrico.....	30
2.5	Dispositivos inalámbricos especialmente diseñados para ambientes industriales	30
2.6	Síntesis del problema.....	32
2.7	Hipótesis:	32
2.8	Objetivos	32
2.8.1	Objetivo General:	32
2.8.2	Objetivos específicos:	32
3	Metodología para la medición del desempeño de una conexión inalámbrica para el control de un proceso industrial en tiempo real.....	34
3.1	Caracterización de los protocolos de conexión inalámbrica empleados para el control y monitoreo de procesos industriales.	34
3.1.1	Protocolo IEEE 802.11 a.....	35

3.1.2	Protocolo IEEE 802.11 h	38
3.1.3	Protocolo IEEE 802.11 b	39
3.1.4	Protocolo IEEE 802.11 g.....	41
3.1.5	Protocolo IEEE 802.11 g Turbo	42
3.2	Escenarios de prueba para la caracterización y validación del sistema de control 43	
3.2.1	Comunicaciones cableadas.....	44
3.2.2	Comunicaciones Inalámbricas	45
3.2.3	Pruebas en un proceso de control en tiempo real.....	47
3.2.4	Características de los equipos usados en las pruebas.....	50
3.3	Metodología de evaluación del desempeño de la conexión inalámbrica	51
3.3.1	Medición del RTT	52
3.3.2	Medición del SNR	54
3.3.3	Medición del PER.....	56
3.3.4	Metodología de medición	57
3.4	Resultados obtenidos con la metodología de medición.....	60
3.4.1	Resultados y análisis para redes cableadas.....	61
3.4.2	Resultados y análisis para redes inalámbricas	64
3.5	Condiciones de uso óptimo de la conexión inalámbrica WiFi empleada	76

3.6	Evaluación de la metodología	78
4	Conclusiones y trabajo futuro	85
A.	Anexo: Producción científica	91
B.	Anexo: Software en el PLC para medir el RTT	97
C.	Anexo: Interfaz de control	106
D.	Anexo: Características de los equipos usados en el desarrollo del proyecto	118
5	Bibliografía	123

Lista de Figuras

Figura 1-1. Perfiles y estructura de Profibus.	7
Figura 1-2. Velocidades de Ethernet.	9
Figura 1-3. Canales de frecuencias usados por IEEE 802.11b/g.	15
Figura 1-4. Comparación de SNR, ruido del canal N, factor de ruido NF y piso de ruido en receptor RNF en el receptor RX.	17
Figura 1-5. Estándares de comunicación Inalámbrica utilizadas a nivel industrial.	21
Figura 1-6. Pirámide de Automatización, protocolos alámbricos más utilizados y remplazo o integración con redes inalámbricas.	22
Figura 3-1. Experimento para la caracterización de los protocolos.	35
Figura 3-2. Espectro para IEEE 802.11 a canal 36.	36
Figura 3-3. Trafico para 802.11 a.	37
Figura 3-4. Espectro y velocidad máxima de transmisión para 802.11 h canal 36.	38
Figura 3-5. Espectro y velocidad máxima de transmisión para 802.11 b canal 6.	40
Figura 3-6. Espectro y velocidad máxima de transmisión para 802.11 g canal 6.	41
Figura 3-7. Espectro y velocidad máxima de transmisión para 802.11 g Turbo canal 6.	42
Figura 3-8. Lugares de prueba.	44
Figura 3-9. Esquema propuesto para medir el RTT para Profibus.	45

Figura 3-10. Esquema propuesto para la prueba de comunicación industrial Ethernet inalámbrica.	46
Figura 3-11. Escenario para las pruebas en un proceso de control en tiempo real.....	47
Figura 3-12. Interfaz de control de motor de inducción.	48
Figura 3-13. Resultados exportados a Excel.	49
Figura 3-14. Diagrama de flujo de la metodología de evaluación.....	52
Figura 3-15. Algoritmo diseñado para medir el RTT entre dos PLC's con comunicación Ethernet.	53
Figura 3-16. Medidas de SNR sin fuente de ruido para 2437 MHz correspondiente al canal 6 de IEEE 802.11 g.	54
Figura 3-17. Medidas de SNR con fuente de ruido para 2437 MHz correspondiente al canal 6 de IEEE 802.11 g.....	56
Figura 3-18. Imagen con los datos de tráfico tomados de los módulos Scalance.	57
Figura 3-19. Medidas del ruido emitido por los hornos microondas.....	58
Figura 3-20. Esquema sobre la metodología de medición.	59
Figura 3-21. Resultados Profibus.....	61
Figura 3-22. Resultados Ethernet cableado.	62
Figura 3-23. PDF para datos de Ethernet y Profibus.	63
Figura 3-24. Resultados para 802.11 a y h.	65
Figura 3-25. Resultados para 802.11 b y g.	66

Figura 3-26. Resultados para 802.11 g Turbo.....	67
Figura 3-27. PDF para resultados de redes inalámbricas con SNR=29.54 dBm.	68
Figura 3-28. Resultados para 802.11 b y g.	69
Figura 3-29. Resultados para 802.11 g Turbo.....	70
Figura 3-30. PDF para resultados de redes inalámbricas con SNR=10.985 dBm.	71
Figura 3-31. Resultados para 802.11 b y g.	72
Figura 3-32. Resultados para 802.11 g Turbo.....	73
Figura 3-33. PDF para resultados de redes inalámbricas con SNR=0.66 dBm.	74
Figura 3-34. SNR Vs PER para distancia de 10 metros y 8, 32, 64 y 128 bytes de datos.....	75
Figura 3-35. Resultados para 802.11 g Turbo con 256 bytes.	78
Figura 3-36. Bloque en el PLC para establecer el Set Point en el motor.....	79
Figura 3-37. Prueba de control con Profibus.....	80
Figura 3-38. Repuesta del controlador usando comunicación Profibus con un distancia de 2 metros.....	81
Figura 3-39. Respuesta Controlador para IEEE 802.11g con SNR=30 dBm y 30 m.	82
Figura 3-40. Respuesta Controlador para IEEE 802.11 b con SNR=0.5 dBm y 30 m.	84
Figura A-1. Portada de la revista Politécnica donde se publicó el artículo.	91
Figura A-2. Primera página del artículo publicado en la revista Politécnica.	92
Figura A-3. Confirmación de aprobación del artículo enviado a la revista Tecnológicas.	94

Figura B-1. Bloque SFC15 para la configuración de la comunicación Profibus PLC maestro.	97
Figura B-2. Bloque FC80 usado para medir el RTT en el PLC maestro.	98
Figura B-3. Leer datos del esclavo y parar el contador en el PLC maestro.	98
Figura B-4. Segmento para resetear la prueba.	99
Figura B-5. Configuración de bloques en el PLC esclavo.	100
Figura B-6. Segmentos del esclavo para enviar datos al maestro y reiniciar los bloques de comunicación.....	101
Figura B-7. Configuración del Hardware del maestro y bloque de datos de información de 8 bytes.	101
Figura B-8. Segmentos creados en el servidor para reiniciar la comunicación y configurar el bloque FC5 para comunicación Ethernet.	102
Figura B-9. Configuración del bloque FC6 para recibir datos desde el cliente y segmento que para el Timer.....	103
Figura B-10. Segmentos creados en el cliente para reiniciar la comunicación y configurar el bloque FC5 para comunicación Ethernet.	104
Figura B-11. Configuración del bloque FC6 para recibir datos desde el servidor y segmento que activa el envío de datos al servidor.	104
Figura B-12. Configuración del Hardware del servidor para la comunicación Ethernet....	105
Figura C-1. Vista del bloque OB1.	106
Figura C-2. Descripción general del bloque FC1.....	107

Figura C-3. Reinicio del Micromaster 440.	107
Figura C-4. Configuración rápida y unidad de potencia del motor.	108
Figura C-5. Configuración del voltaje y la corriente nominal del motor.	109
Figura C-6. Configuración de potencia y velocidad nominal del motor.	109
Figura C-7. Selección de consigna de frecuencia y tipo de control del variador.	110
Figura C-8. Fin de puesta en servicio rápido.	110
Figura C-9. Reset para los registros del variador y configuración OK.	111
Figura C-10. Bloque de función FC2.	112
Figura C-11. Lectura de Par y voltaje en el motor.	112
Figura C-12. Lectura de la corriente que consume el motor.	113
Figura C-13. Configuración del Hardware.	113
Figura C-14. Banco de variables de lectura y escritura del PLC al OPC.	114
Figura C-15. Configuración inicial de las variables del PLC en LabView.	114
Figura C-16. Vista en LabView para la configuración del Micromaster 440.	115
Figura C-17. Secuencia para establecer el arranque, paro, sentido de giro y Set Point al motor.	115
Figura C-18. Secuencia de programación para la respuesta al escalón.	116
Figura C-19. Estructura para leer la velocidad real del motor y graficarla en la interfaz de control.	116

Figura C-20. Lectura de las variables del motor.	117
Figura C-21. Exportar datos a Excel y borrar la gráfica de velocidad.	117
Figura D-1. Datos técnicos del PLC S7-300 con CPU 314. Tomado de [57].	118
Figura D-2. Datos técnicos de la CPU 314C-2DP. Tomado de [57].	119
Figura D-3. Datos técnicos 2 para la CPU 314C-2DP. Tomado de [57].	120
Figura D-4. Características del Switch X100 de Siemens. Tomado de [58].	121
Figura D-5. Características de los analizadores de espectro R&H FSC3 y R&H FSH3.	121
Figura D-6. Características del motor de inducción trifásico 1LA7070-4YC60 de Siemens. Tomado de [59].	121
Figura D-7. Características del Micromaster 440. Tomado de [56].	122

Lista de Tablas

Tabla 1-1. Características de acuerdo al nivel en la pirámide de automatización.....	4
Tabla 1-2. Algunas normas importantes en comunicaciones industriales.....	5
Tabla 1-3. Características de Profibus DP.....	8
Tabla 1-4. Consideraciones para el diseño de redes Industrial Ethernet de alta fiabilidad.	13
Tabla 1-5. Estándares para comunicaciones inalámbricas.....	13
Tabla 1-6. Características importantes en 802.11.....	14
Tabla 1-7. Canales de comunicación para 802.11a.	14
Tabla 3-1. Parámetros medidos y teóricos para 802.11 a.....	37
Tabla 3-2. Parámetros medidos y teóricos para 802.11 h.	39
Tabla 3-3. Parámetros medidos y teóricos para 802.11 b.	40
Tabla 3-4. Parámetros medidos y teóricos para 802.11 g.....	41
Tabla 3-5. Parámetros medidos y teóricos para 802.11 g Turbo.	43
Tabla 3-6. Características de los módulos inalámbricos Scalance.	50
Tabla 3-7. Condición de uso óptimo para 802.11 b, g y g Turbo.....	77
Tabla 3-8. Medición del tiempo Tf.	81
Tabla 3-9. Comparación de los resultados de la metodología con los resultados del proceso de control.	83

Introducción

Las redes inalámbricas han sido ampliamente utilizadas en todo el mundo, en aplicaciones comerciales y domésticas para transmitir datos, audio y video. Además, su uso se ha incrementado por factores como la masificación en el uso del internet caracterizado por la transmisión de grandes cantidades de datos y la gran venta de dispositivos portables como los computadores portátiles, los teléfonos móviles y recientemente las tabletas. A nivel industrial, donde las redes inalámbricas también tienen las aplicaciones antes mencionadas, están siendo cada vez más introducidas 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 la seguridad de los procesos productivos de tal forma que no represente riesgos para los operarios presentes en dicho procesos [1]. Bajo estas características, las redes inalámbricas han atraído la atención para ser aplicadas en los procesos de control.

La utilización de conexiones inalámbricas en procesos industriales nace como necesidad en campos de aplicación donde el cableado se hace costoso, no solo en la instalación sino también en el mantenimiento del mismo [2]. Igualmente puede ser útil para remplazar el cable en lugares donde este puede representar peligro, por ejemplo en la industria química donde chispas o cortos ocasionados por el cableado, pueden causar incendios o explosiones, y por último, para establecer comunicación en dispositivos móviles donde es imposible la utilización de cables [3], por ejemplo los vagones del Metro de Medellín. Actualmente también se obtienen beneficios en la gestión y la eficiencia de los procesos industriales [4]. Debido al incremento en el uso de las conexiones inalámbricas en la industria, se debe examinar si cumple con los requerimientos en un ambiente industrial en el control y monitoreo de procesos [5].

Todos los artículos referenciados en el estado del arte 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 (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) 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, [6], [7] y [8], nuevas técnicas de multiplexación de datos [9], y el desarrollo de nuevos protocolos basados en el estándar IEEE 802.15.4, los tres con mejores resultados son: WirelessHART (Highway Addressable Remote Transducer Protocol) [10] y [11], ISA100.11a [12] y [13], y Wireless Networks for Industrial Automation-ProcessAutomation (WIA-PA), [14], [15] y [16]. A pesar de esto las redes inalámbricas que operan en IEEE802.11 en la actualidad se siguen investigando para aplicaciones industriales, como se puede evidenciar en [17], [18] y [19]. Esto por tres razones fundamentales, la primera, aunque IEEE802.15 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. Segundo, aunque hay muchas aplicaciones industriales con menos de 10 nodos transmitiendo datos por debajo de los 80 bytes, también hay muchas aplicaciones que utilizan cientos de nodos transmitiendo por encima de 80 bytes, para estas el IEEE802.15.4 presenta problemas [20]. El último, 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. En [19] mencionan el interés de caracterizar los puntos de acceso que son intencionalmente diseñados para aplicaciones industriales, tales como, los pertenecientes a la familia Scalance de productos suministrados por Siemens, que son, precisamente los utilizados en esta investigación. En [21] describe la implementación y configuración del control de un tanque de agua utilizando PLC Siemens S7300 y módulos de redes inalámbricas industriales Siemens SCALANCE W744-1Pro y W788-1Pro.

Fundamentado en lo anterior y teniendo en cuenta que se identificó un vacío en el estado del arte, ya que no existe una metodología para la medición del desempeño de una conexión inalámbrica IEEE802.11x para el control de un proceso industrial en tiempo real, usando PLC y dispositivos inalámbricos especialmente diseñados para trabajar en ambientes industriales, y que el ITM cuenta con todos los elementos necesarios para desarrollar la investigación, se justificó la realización del proyecto. La pertinencia del mismo está basada en todas las ventajas económicas que ofrecen las redes inalámbricas sobre las redes cableadas, ya que la investigación permitirá a las empresas locales, basado en la metodología planteada, determinar hasta donde, o en qué casos es posible remplazar y/o combinar este tipo de redes. En la ciudad de Medellín hay 315 empresas en el sector químico, [22], donde el uso de redes inalámbricas puede ser una mejor alternativa sobre las redes cableadas.

El presente documento está estructurado de la siguiente forma: en el capítulo uno se encuentra el marco teórico y el estado del arte, en el capítulo dos se presenta la descripción del problema, en el capítulo tres se desarrolla la metodología de medición y se presentan los resultados, por último, en el capítulo cuatro están las conclusiones y trabajo futuro . Para ver la producción científica del proyecto, consulte al Anexo A.

1 Marco teórico y estado del arte

En este capítulo se realiza una presentación breve de los conceptos teóricos que enmarcan el desarrollo del proyecto, considerando sus aspectos generales y algunos detalles necesarios para la comprensión de la tesis. En la Sección 1.1 se presentan algunas definiciones sobre las comunicaciones industriales, haciendo énfasis en Profibus y Ethernet. En la Sección 1.2 se mencionan los aspectos más importantes de las redes inalámbricas que operan en IEEE802.11. En la Sección 1.3 se describen las métricas de desempeño usadas para caracterizar y evaluar las redes inalámbricas. En la Sección 1.4 se presenta los resultados encontrados en el estado del arte, pero, en el Capítulo 2 se describe lo que falta por hacer, a partir del estado del arte, y se enlaza con la problemática a resolver.

1.1 Comunicaciones industriales

La Tabla 1-1 muestra las diferencias básicas que hay entre las redes a nivel de gestión y a nivel de control. En gestión son importantes parámetros como la velocidad de transmisión y el volumen de datos, mientras que a nivel de control uno de los parámetros más críticos es la velocidad de respuestas o retardo. A partir de estos requerimientos, se desprenden una variedad de protocolos de comunicaciones.

Tabla 1-1. Características de acuerdo al nivel en la pirámide de automatización.

<i>Nivel</i>	<i>Velocidad de transmisión</i>	<i>Velocidad de respuesta</i>	<i>Volumen de datos</i>
Gestión	Alto	Bajo	Alto
Control, campo y sensores	Bajo	Muy alto	Muy bajo

Fuente: Autor.

En la Tabla 1-2 se muestran algunas de las normas importantes en las comunicaciones industriales establecidas por grandes organizaciones [23].

Tabla 1-2. Algunas normas importantes en comunicaciones industriales.

<i>Organización</i>	<i>Norma</i>	<i>Contenido</i>
IEEE	802	Redes de área local (LAN)
IEEE	802.3	Métodos de acceso al medio (MAC)
EIA	RS-232C	Norma física de comunicación serial
EIA/TIA	RS-422	Norma física de comunicación serial
CENELEC	EN 50170	Buses de campo de propósito general
CENELEC	EN 61131-5	Comunicaciones en los PLC's
CENELEC	EN 61158-2	Vía de datos en los sistemas de control industrial
IEC	IEC 61158	Buses de campo industriales

Fuente: [24].

Los protocolos de buses de campo son los que mejor desempeño presentan en aplicaciones en el piso de control por sus bajos retardos, también se conocen como protocolos determinísticos. Pese a contar con esta características, los buses de campo están siendo sustituidos en gran parte de los procesos por Ethernet, que es un protocolo no determinístico. Los sistemas determinísticos y probabilísticos están definidos, únicamente por el tiempo en la transmisión/recepción así [23]:

- *Determinístico:* Cuando el tiempo que tarda el envío o recepción de un dato es fijo, como por ejemplo un sistema de comunicación AS-i (Actuator Sensor Interface), que tarda 5ms en realizar la emisión/recepción de 31 esclavos y 10 ms para 62 esclavos. Otros ejemplos son la red Profibus y Profinet.

- *Probabilístico*: Cuando el tiempo que tarda el envío o recepción de un dato no es fijo y por tanto no conocido. Es típico de las redes que usan CSMA (Carrier sense multiple access) como por ejemplo Ethernet.

Estos conceptos son importantes ya que en las redes industriales, la comunicación en su mayoría debe ser determinista de tal forma que se garantice un tiempo máximo de retardo en la información y así asegurar una respuesta adecuada del controlador. Por tal motivo, en el desarrollo del proyecto se usó el protocolo de bus de campo Profibus como punto de comparación o patrón de medida con respecto a los demás protocolos investigados, como Ethernet y protocolos inalámbricos.

A continuación se presenta algunos conceptos básicos sobre los protocolos cableados investigados en el proyecto: Profibus y Ethernet.

1.1.1 Profibus

Profibus nació para dar solución a un problema industrial dado por la imposibilidad de interconexión en un sistema de control con elementos de diferentes fabricantes. Lo que se buscó fue crear un bus de campo abierto y transparente para que los fabricantes lo implementaran como medio de comunicación [25].

Profibus posee tres perfiles de aplicación, ver Figura 1-1, estos son, [25]:

- *Profibus FMS (Fieldbus Message Specification)*: Esta implementado sobre el nivel 7 del modelo OSI, se usa para la transferencia de gran volumen de datos en una estructura Cliente-Servidor, aunque su uso ha quedado relegado por el Ethernet.
- *Profibus DP (Distributed Peripheral)*: Se usa para el intercambio de bajos volúmenes de datos a gran velocidad entre controlador, generalmente un PLC, que actúa como maestro y múltiples controladores o actuadores como variadores de velocidad,

sistemas de visualización, PLC's, modulos E/S, etc., distribuidos por la planta y conectamos por la misma red de comunicación. Profibus DP se encuentra en las capas 1 y 2 del modelo OSI y se basa en la norma RS-485.

- *Profibus PA (Process Automation)*: Es la solución PROFIBUS que satisface las exigencias de la automatización de procesos, donde hay la conexión de sistemas de automatización y los sistemas de control de proceso con equipos de campo, como: transmisores de presión, temperatura, convertidores, posicionadores, etc. Puede usarse para reemplazar el estándar 4 a 20 mA. Se basa en la norma IEC 1158-2.

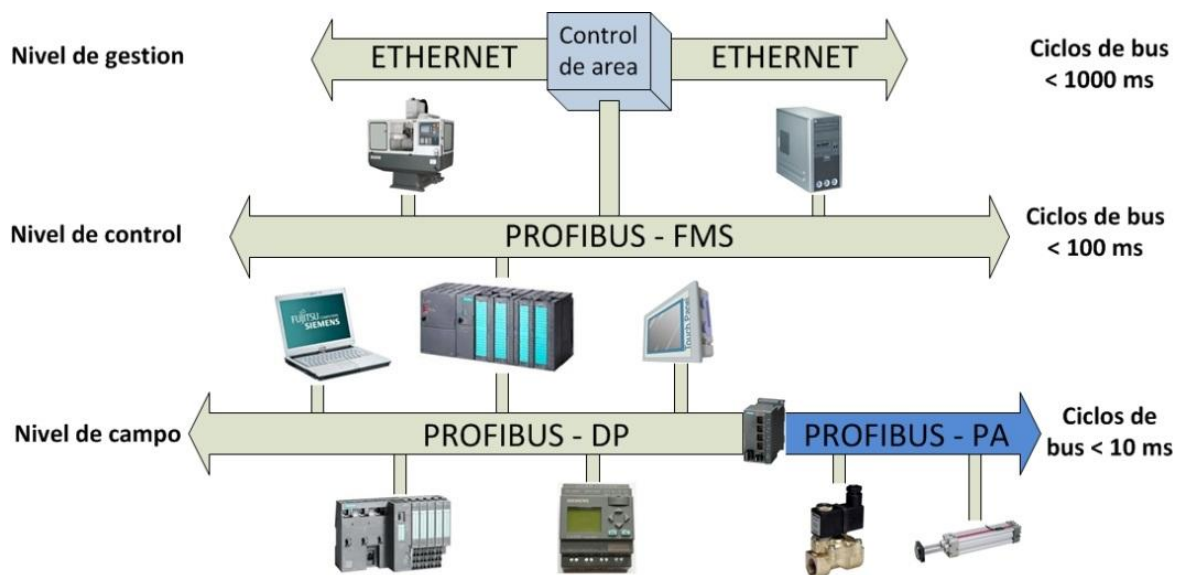


Figura 1-1. Perfiles y estructura de Profibus.

Fuente: Autor.

De los tres perfiles de Profibus, el más implementado en aplicaciones de control es el Profibus DP. En la Tabla 1-3 se presenta sus principales características.

Tabla 1-3. Características de Profibus DP

Estándar		Profibus según EN 50 170
Método de acceso		Paso por testigo con maestro-esclavo
Velocidad de transmisión		9.6 kbit/s – 12 Mbit/s
Tiempo de ciclo		5 ms – 10 ms
Volumen de datos		Hasta 246 bytes
Máximo número de nodos		32 o reduciendo la velocidad hasta 127
Medio de transmisión	Eléctrico:	Cables de dos hilos apantallado
	Óptico:	Cables fibra óptica
	Sin hilos:	Infrarroja
Tamaño de la red	Eléctrica	Máximo 9.6 Km (depende de la velocidad)
	Óptica	150 Km (depende de la velocidad)
Topologías		Bus, árbol, estrella, anillo, anillo redundante
Aplicaciones		Comunicación de procesos, campo o datos

Fuente: [25].

1.1.2 Ethernet

Ethernet es la tecnología LAN más usada en el mundo para interconectar PC's, esta puede funcionar en cable de par trenzado, fibra óptica o de modo inalámbrico. Es un protocolo para la comunicación de estaciones de área local estandarizado en IEEE 802.3, que usa como protocolo de acceso al medio CSMA/CD (Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection) y define las características de cableado y señalización de nivel físico y los formatos de tramas de datos del nivel de enlace de datos del modelo OSI. Con los años, Ethernet ha evolucionado de forma gradual para proporcionar inteligencia a la red y a su vez, una mayor fiabilidad. Esta mejora continua ha hecho de Ethernet una solución excelente para aplicaciones industriales. En la actualidad, la tecnología puede proporcionar cuatro velocidades de datos, Figura 1-2. 10 Base T opera sobre par trenzado de cobre. Fast

Ethernet conserva muchas de las características de 10 Base T pero con una velocidad 10 veces mayor. Gigabit Ethernet extiende el protocolo Ethernet aún más, aumentando la velocidad de Fast Ethernet 10 veces. 10 Gigabit Ethernet es una versión aún más rápida de Ethernet. Debido a que 10 Gigabit Ethernet es un tipo de Ethernet, se puede apoyar a los servicios de red basados en Ethernet inteligentes, inter-operar con las arquitecturas existentes, y reducir al mínimo las curvas de aprendizaje de los usuarios, [26]. Su alta velocidad de datos de 10 Gbps hace que sea una buena solución para ofrecer un alto ancho de banda en las redes WAN y redes de área metropolitana (MAN).

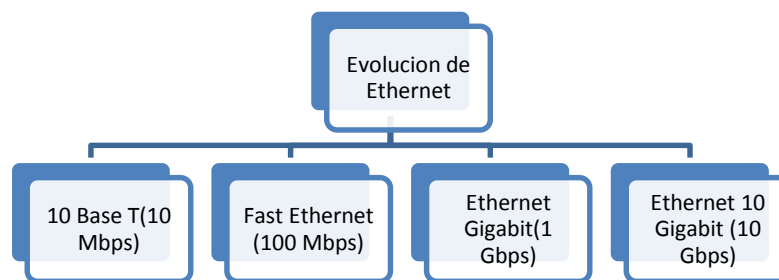


Figura 1-2. Velocidades de Ethernet.

Fuente: Tomado de [27].

La tecnología Ethernet tiene una gran aceptación, ya que es fácil de entender, implementar, administrar y mantener. Ethernet es flexible, de bajo costo, y es compatible con una variedad de topologías de red. En comparación con las soluciones industriales tradicionales no basadas en Ethernet, que tienen una velocidad de datos de entre 500 Kbps a 12 Mbps, la tecnología Ethernet puede proporcionar sustancialmente más alto rendimiento.

1.1.3 Industrial Ethernet

Ya que Ethernet es el líder en soluciones de redes, muchas empresas están migrando la tradicional arquitectura de bus de campo a Industrial Ethernet [28]. Este usa los estándares Ethernet desarrollados para comunicación de datos en redes de control industrial. En otras

palabras, es la combinación de Ethernet con componentes especialmente diseñados para soportar ambientes pesados y hostiles como los industriales, estos componentes pueden ser conectores, cables, switch, etc., con buen blindaje para reducir los efectos del ruido, chasis metálicos para trabajar a altas temperaturas y humedades, redundantes y robustos para disminuir los efectos de las fallas. Usando los equipos basados en los protocolos IEEE, las empresas pueden migrar toda su red a un entorno Ethernet. Industrial Ethernet brinda a los dispositivos de fábrica una comunicación más rápida, mejor conectividad y transparencia. A continuación se describen algunas de las características más importantes de Industrial Ethernet.

- *Dispositivos diseñados para ambientes industriales:* Aunque Industrial Ethernet se basa en los mismos estándares que el Ethernet tradicional, hay diferencias claramente marcadas. Industrial Ethernet, requiere de equipos especialmente diseñados para soportar los ambientes industriales más hostiles, flexibilidad en el número de nodos, capacidad de medición, tráfico de datos en tiempo real muy estable y predecible, y mayor nivel de segmentación. Los equipos de Industrial Ethernet incluyen componentes de carácter industrial (refrigeración por convección, salidas con relé, alimentación 24 V DC, etc.) que le permiten funcionar a temperaturas y vibraciones extremas, cuentan con funciones de tolerancia a fallos y fuentes de alimentación redundante. El equipo también es modular con el fin de ser fácilmente adaptado al último piso de la pirámide de automatización. Otra diferencia importante es que en Industrial Ethernet, los protocolos de control tienen diferencias significativas si se comparan con el Ethernet tradicional, por ejemplo, en la mayoría de las aplicaciones de automatización y control, el 80% del tráfico de la red es local, un dispositivo local hablando con otro dispositivo local a través de paquetes multicast (un emisor muchos receptores) [28]. Esto afecta considerablemente el desempeño de la red ya que en aplicaciones de control y automatización se necesitan sistemas de comunicación en tiempo real determinísticos. En el diseño de redes industriales estas diferencias deben ser tenidas en cuenta. Ethernet y el conjunto de protocolos IP han desarrollado una serie de tecnologías y características que tienen en

cuenta estos requisitos. Para ayudar a optimizar el acceso a datos sincrónicos, los equipos de Industrial Ethernet deben incluir la capacidad para admitir características como control multicast (IGMP Snooping), QoS y redes de área local virtuales (VLAN).

- *Arquitectura Switchheada Ethernet*: En los comienzos de Ethernet se usaban los Hub para interconectar varios dispositivos a una red, estos operan en la capa física del modelo OSI y de forma básica funcionan como repetidores para equipos que comparten el mismo medio. Cuando varios dispositivos quieren acceder a la red al mismo tiempo, el Hub puede ocasionar colisiones que para redes industriales significan serios problemas. El uso de los Hub estigmatizó a Ethernet, pero en la actualidad ya no se usan más, en su lugar se usan switches inteligentes que operan en la capa 2 de OSI. En una red con switches, los datos de entrada y salida se envían por diferente cable a cada uno de los equipos de la red, reduciendo por completo la probabilidad de colisión. Algunas de las características más importantes de estas redes son [29]:

1. *Desempeño predecible*: Tienen la capacidad de asegurar que la transmisión y recepción de un paquete tiene un periodo de tiempo específico. Es importante mencionar que para que se cumpla esta característica, el diseño de la red debe ser lo más simple posible.
2. *Latencia*: la latencia es el tiempo que tarda un paquete de datos para ir de una fuente a un objetivo y volver nuevamente a la fuente, normalmente los switches tienen baja latencia. La mayoría de los procesos de control en aplicaciones industriales pueden tolerar latencias entre 10 – 50 ms. Ya que en aplicaciones industriales, el tráfico de paquetes no superan los 500 bytes, la latencia introducida por un switch que opera a 100 Mbps esta alrededor de los 30 microsegundos, y en el menor de los casos puede subir hasta los 100 microsegundos, es decir 100 veces menos que lo requerido.
3. *Estandarización*: debido a que muchos fabricantes están incluyendo en sus equipos el estándar Ethernet, este se está volviendo una solución económica para comunicar los diferentes elementos de un proceso de control industrial donde se usan equipos de diferentes fabricantes.

4. *Priorización del tráfico de datos:* Hoy día los swiches inteligentes poseen características de QoS que permiten establecer niveles de prioridad para tráfico de datos críticos, de esta forma se puede garantizar el envío oportuno e integral de los datos de control en aplicaciones industriales.
5. *Broadcasts y multicast:* Los switches inteligentes permiten configurar tablas dinámicas para establecer que datos en particular se deben enviar a puertos o nodos específicos. Esta característica reduce considerablemente la carga de tráfico que pasa por la red disminuyendo la cantidad de frames innecesarios que deben ser procesados por los dispositivos en aplicaciones de control.
6. *Analizador de red:* Los switches inteligentes permiten monitorear y analizar la red remotamente, de esta forma se pueden tomar medidas para tratar de optimizar aún más el tráfico de datos en la red.
7. *Seguridad:* En este tipo de redes se puede aplicar VLAN's y listas de control de acceso (ACLs) para aumentar el nivel de seguridad.
8. *Diagnóstico:* Un factor importante, a la hora de resolver problemas en la base de la pirámide de automatización, es contar con la información correcta. Los switches inteligentes cuentan con características que permiten leer datos de diagnóstico.
9. *Fiabilidad:* Ya que las aplicaciones de control requieren que los datos se comuniquen en tiempo real, la fiabilidad se convierte en factor de mucha importancia a la hora de interconectar estos dispositivos.

La fiabilidad necesita ser tomada en cuenta en, al menos, las tres primeras capas del modelo OSI, de tal forma que para cada nivel se tengan en cuenta algunas consideraciones, ver Tabla 1 4.

Tabla 1-4. Consideraciones para el diseño de redes Industrial Ethernet de alta fiabilidad.

<i>Capa OSI</i>	<i>Consideraciones</i>
Física	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Componentes redundantes (fuentes de alimentación, supervisores, etc.) ➤ Dispositivos redundantes (switch, routers y APs)
Capa de enlace	Topología de red: <ul style="list-style-type: none"> ➤ Enlaces redundantes ➤ Caminos redundantes
Red	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Ruteo IP

Fuente: [28].

1.2 Redes inalámbricas IEEE 802.11 WLAN

La metodología diseñada en el desarrollo del proyecto opera sobre el protocolo IEEE 802.11x, a continuación se presentan algunas de sus más importantes características. El estándar IEEE 802.11 se desarrolló, y sigue desarrollando, las especificaciones para las redes WLANs. En la Tabla 1-5 se muestran los estándares más importantes desarrollados por IEEE 802.11.

Tabla 1-5. Estándares para comunicaciones inalámbricas.

<i>Estándar</i>	<i>Campo de aplicación</i>
802.11a	Comunicaciones
802.11ac	Comunicaciones
802.11ad	Comunicaciones
802.11b	Comunicaciones
802.11e	Calidad de servicio QoS
802.11g	Comunicaciones
802.11h	Comunicaciones (reducir la interferencia)
802.11i	Seguridad de datos
802.11n	Comunicaciones
802.1X	Seguridad de datos

Fuente: [24].

En la Tabla 1-6 se muestran algunas características importantes de los protocolos más comunes de 802.11.

Tabla 1-6. Características importantes en 802.11.

<i>Estándar</i>	<i>802.11a/h</i>	<i>802.11b</i>	<i>802.11g</i>	<i>802.11n</i>	<i>802.11 ac</i>	<i>802.11ad</i>
Banda de frecuencia	5 GHz	2.4 GHz	2.4 GHz	2.4 GHz y 5 GHz	5 GHz	60 GHz
Máxima velocidad de transmisión	54 Mbps	11 Mbps	54 Mbps	600 Mbps	7 Mbps	7 Mbps
Modulación	OFDM	DSSS	OFDM	MIMO y OFDM	MIMO y OFDM	

Fuente: [30].

A continuación se describen los estándares caracterizados en este proyecto:

- *IEEE 802.11a*: Es un estándar desarrollado en 1999 que usa la banda de frecuencia de 5 GHz, utiliza 52 subportadoras OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) con una velocidad máxima de 54 Mbit/s, [31]. Tiene 12 canales sin solapa, 8 para red inalámbrica y 4 para conexiones punto a punto, ver Tabla 1-7.

Tabla 1-7. Canales de comunicación para 802.11a.

<i>Canal</i>	34	36	38	40	42	44	46	48	52	56	60	64
Frecuencia [MHz]	5170	5180	5190	5200	5210	5220	5230	5240	5260	5280	5300	5320

Fuente: [31].

Pese a que el ensanchado de espectro y la modulación son diferentes, en la banda de 5GHz se mantiene un ancho de banda cercano a los 20MHz, de manera que el requerimiento de separación de 5 canales de la banda de 2,4GHz se mantiene.

- *IEEE 802.11b*: Desarrollado en 1999 para operar en la banda de frecuencia de 2.5 GHz. En este se usan los métodos de modulación: Espectro Ensanchado por Secuencia Directa (DSSS) y tecnología SISO (Single Input, Single Output), para lograr velocidades de hasta 11 Mbps, [24].

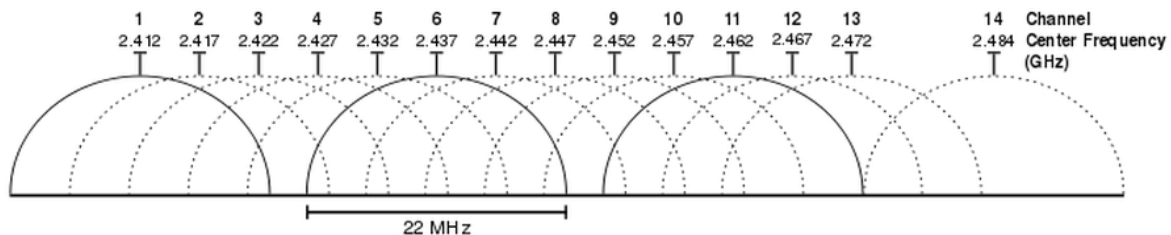


Figura 1-3. Canales de frecuencias usados por IEEE 802.11b/g.
Fuente: [24].

En la Figura 1-3 se muestran los canales de frecuencias disponibles para transmitir información, cada canal tiene un ancho de banda de 22 MHz y como se puede apreciar, los canales se superponen.

- *IEEE 802.11g*: Es una extensión del IEEE 802.11b que también opera en los 2.4 GHz. Trabaja con la modulación OFDM y la tecnología SISO que le permiten una máxima velocidad de 54 Mbps. IEEE 802.11g es compatible con IEEE 802.11b, si ambos operan en la misma red, el de más baja velocidad de datos usa modulación DSSS, [24].
- *IEEE 802.11g Turbo*: Es una tecnología propietaria de la empresa Atheros que mejora el rendimiento de las redes WLAN IEEE 802.11g mediante técnicas de compresión y unión de interfaces de red. El límite en la velocidad de transmisión al usar g Turbo puede estar entre los 40 Mbit/s y los 60 Mbit/s con una tasa de señalización de 108 Mbit/s, lo cual se consigue uniendo dos canales 802.11g de 54 Mbit/s, [24].

- *IEEE 802.11h*: 802.11h fue desarrollado para resolver problemas derivados de la coexistencia de las redes 802.11 con sistemas de Radar o Satélite en la banda de los 5 GHz. Con el fin de respetar estos sistemas, 802.11h proporciona a las redes 802.11a la capacidad de gestionar dinámicamente tanto la frecuencia, como la potencia de transmisión, [24].

1.3 Métricas de desempeño en redes inalámbricas

A continuación se da una breve introducción a las métricas usadas en el desarrollo del proyecto para analizar y diseñar la metodología de desempeño de las comunicaciones inalámbricas usadas en procesos de control. El uso de estas métricas en particular obedece a lo estudiado en cada uno de los artículos referenciados ya que son ampliamente usadas para caracterizar y evaluar el desempeño de estas redes.

1.3.1 Relación señal a ruido SNR

El SNR es una medida que muestra la relación entre la potencia de la señal de interés y la potencia del ruido presente en el medio de transmisión. Los ambientes industriales se caracterizan por presentar una baja SNR con niveles de ruido muy próximos a la señal de datos, esta se define como se muestra en la Ecuación (1-1) [32]:

$$SNR (dB) = 10 \log \frac{P_s}{P_n} = 10 \log P_s - 10 \log P_n \quad (1-1)$$

En la cual P_s es potencia de la señal (Watts) y P_n la potencia del ruido (Watts). La SNR puede evaluarse en términos de la señal recibida P_{RX} , el ruido presente en el canal (N) y el ruido agregado por el receptor, también llamado factor de ruido (NF). La suma de N y NF es igual al piso de ruido en el receptor (RNF) y este valor es utilizado como referencia del nivel de potencia para el cálculo de SNR . En el receptor, cualquier señal por encima del nivel de RNF obtiene valores positivos de SNR. La Figura 1-4 ilustra la relación entre SNR, N, NF y RNF [33].

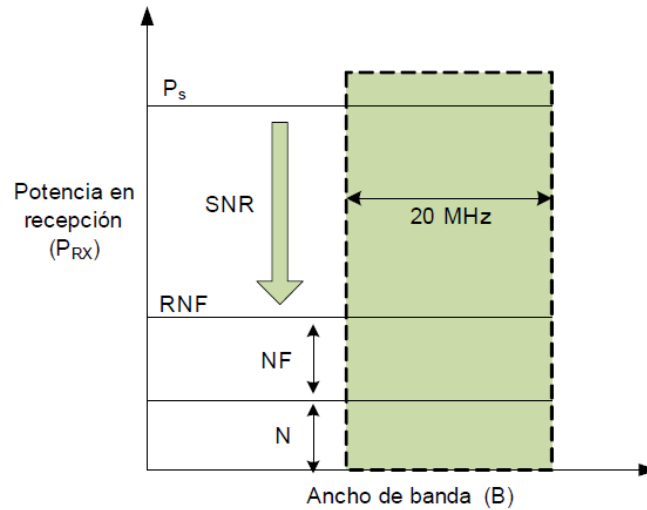


Figura 1-4. Comparación de SNR, ruido del canal N , factor de ruido NF y piso de ruido en receptor RNF en el receptor RX .

Fuente: Tomado de [33].

Las ecuaciones (1-2), (1-3) y (1-4) se utilizan en el cálculo de SNR, [27].

$$SNR = P_{RX} - RNF \quad (1-2)$$

$$RNF = N + NF \quad (1-3)$$

$$N = kTB \quad (1-4)$$

Un valor típico para NF es 10 dB [31]. El ruido N depende del ancho de banda del canal B , k es la constante de Boltzmann y T la temperatura ambiente en Kelvin, [27]. La SNR se debe tener en cuenta a la hora de establecer una comunicación inalámbrica ya que afecta considerablemente su desempeño, sobre todo en ambientes industriales donde el nivel de potencia del ruido es grande.

1.3.2 Distancia

La distancia está directamente relacionada con el desvanecimiento de la señal y los problemas por trayectoria multicamino que en definitiva afectan la calidad de la transmisión como se muestran en las ecuaciones (1-5) y (1-6)(1-6), [27].

$$L_{p(dB)} = 20 \left(\log \frac{4\pi}{c} + \log f + \log D \right) \quad (1-5)$$

$$F_m = 30 \log D + 10 \log(6ABf) - 10 \log(1 - R) - 70 \quad (1-6)$$

Trayectoria Multicamino	sensibilidad del terreno	objetivos de confiabilidad	Const
----------------------------	-----------------------------	-------------------------------	-------

Donde $L_{p(dB)}$ son las pérdidas en la trayectoria en espacio libre, $F_{m(dB)}$ es el margen de desvanecimiento, c la velocidad de la luz en el vacío, D la distancia en metros, f la frecuencia en Hertz, A el factor de aspereza del terreno, B factor climático y R la confiabilidad.

1.3.3 Numero de Bytes

Otro parámetro a evaluar será el número de bytes de datos enviados del PLC (Programmable Logic Controler) servidor al PLC cliente, se debe tener en cuenta que en el piso de la pirámide de automatización el número de bytes es pequeño, para la prueba se enviaron paquetes de datos de 8, 32, 64 y 128 bytes.

Otro parámetro que está relacionado con el número de bytes y que se usará para el análisis de resultados es el PER (Packed Error Rate) que está definido por la Ecuación (1-7) :

$$p_k = \binom{n}{k} p^k (1 - p)^{n-k} \quad (1-7)$$

Donde p es la probabilidad de que ocurra un error, n el número de paquetes y k el número de paquetes erróneos. El PER está relacionado con la interferencia, la potencia de transmisión, el tipo de modulación y el ancho de banda, [34] [35].

1.3.4 RTT (Round Trip delay Time)

Para el control en tiempo real es fundamental conocer el retardo ocasionado por el medio de transmisión, ya que a partir de este se puede determinar, de acuerdo a la planta, si este retardo permite obtener la respuesta deseada establecida por el controlador, además se debe tener en cuenta en el diseño de este. Es por esto que uno de las métricas más relevantes para medir el desempeño de una red utilizada para control en tiempo real es el retraso que sufren los datos, el termino relacionado para esta medida es el retardo RTT (tiempo de ida y retorno) que es definido como el tiempo que transcurre mientras se envía un paquete y se recibe el reconocimiento (ACK), ver Ecuación (1-8).

$$RTT = T_i + T_v \quad (1-8)$$

Donde T_i es el tiempo de ida y T_v el tiempo de vuelta. Es usado para establecer la velocidad de conexión en tiempo real entre dos host, [36].

La selección de estas cuatro métricas de medición, se basan en el estudio del estado del arte que se presenta a continuación.

1.4 Estado del arte

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 la seguridad en sus procesos productivos de tal forma que no represente riesgos para los operarios presentes en dicho procesos [37]. En este contexto y de cierta forma buscando solucionar estas problemáticas, las redes inalámbricas

han atraído la atención en los procesos de control. Ha habido un gran interés en la investigación y el desarrollo de redes inalámbricas [5]. En los sistemas de control en red, por ejemplo, hay un gran interés en el desarrollo de la tecnología inalámbrica como un replazo potencial para la actual generación de redes cableadas industriales [3]. 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 dispositivos móviles y portátiles [38]. 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 redes inalámbricas. Estas deben ofrecer la fiabilidad necesaria de los sistemas cableados y servir para procesos en tiempo real [4]. 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. La última meta aquí es aplicar redes para lograr control realimentado en tiempo real comparable al control cableado punto a punto [39].

En la Figura 1-5 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, en color rojo se destacan los protocolos evaluados en el desarrollo de la tesis. Los más utilizados son Bluetooth (IEEE 802.15.1) [4], ZigBee [3] que permiten conexiones entre puntos de acceso a corta distancia y WLAN con un rango de 100m [40]. 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 transmisión, recientemente han surgido nuevos protocolos, los tres más importantes son WirelessHART, establecido en 2006 por Hartfoundation, [10] y [11], el estándar ISA100.11a desarrollado por ISA WirelessCommitteeterminado en 2009, [12], [41] y [13], también en 2009, los investigadores chinos desarrollaron WIA-PA (Wireless Networks for Industrial Automation-ProcessAutomation), [14], [15] y [16], todos basados en el IEEE802.15.4.

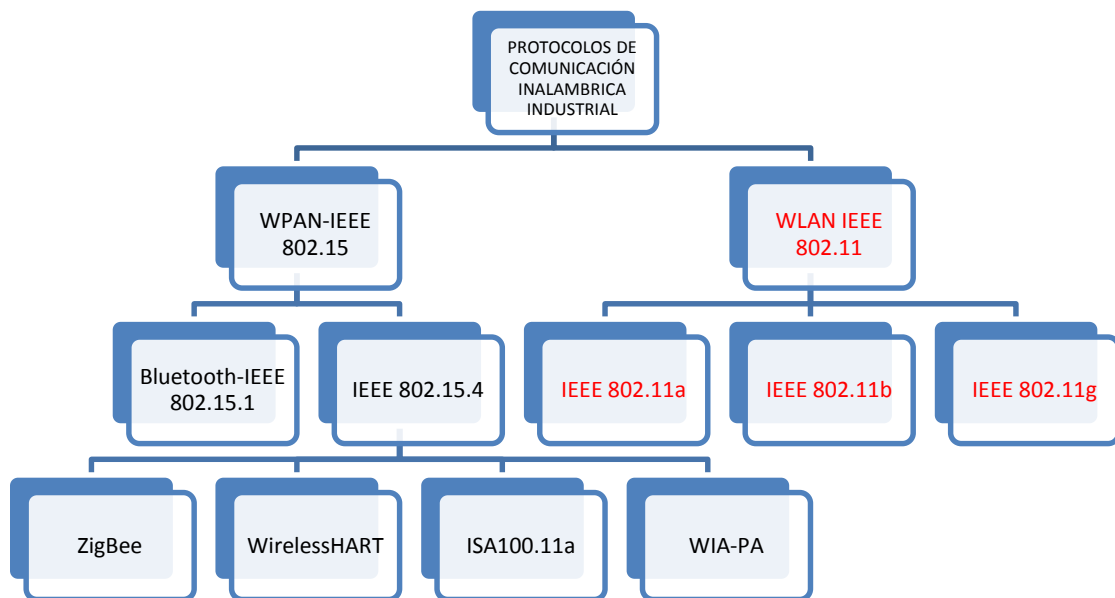


Figura 1-5. Estándares de comunicación Inalámbrica utilizadas a nivel industrial.

Fuente: Autor.

En la Figura 1-6 se presenta la pirámide de automatización con los protocolos de comunicación cableados más utilizados a nivel industrial, entre paréntesis y en rojo se muestran los protocolos más utilizados para sustituir o combinarse con 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 las exigencias antes mencionadas ya no son tan importantes, excepto la seguridad que será importante en todos los niveles con el fin de evitar que agentes externos o internos operen inadecuadamente o malintencionadamente el sistema de control ocasionando grandes daños. A partir de esta capa 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 documentadas en literatura científica, principalmente con los protocolos IEEE.802.11 y

IEEE802.15, sustituyendo el sistema de comunicación cableado o combinándolo con el inalámbrico, todos menciona las debilidades y ventajas de las redes WLAN sobre las cableadas. También se han diseñado nuevos protocolos inalámbricos basados en el IEEE802.15.4 que utiliza multiplexación TDMA (Time Division Multiple Access) 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 aun no tan comunes [10] y [42].

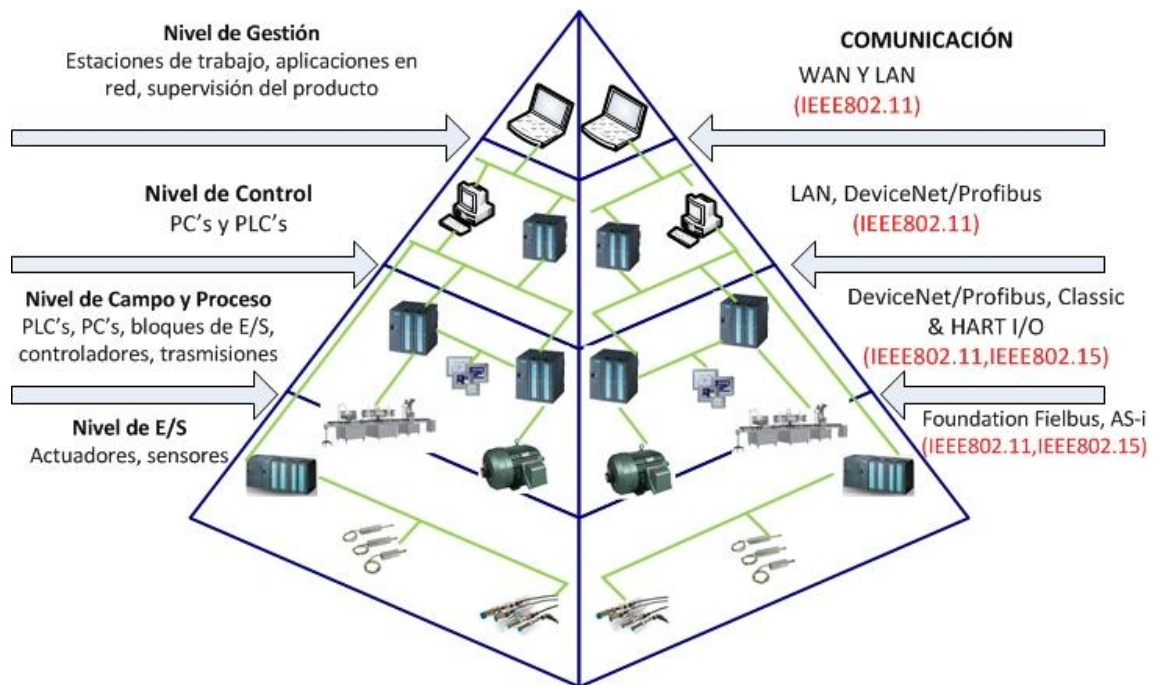


Figura 1-6. Pirámide de Automatización, protocolos alámbricos más utilizados y replazo o integración con redes inalámbricas.

Fuente: Autor.

A continuación se describen los resultados más importantes encontrados en artículos relacionados con la investigación, estos se describen por temáticas tratadas en la investigación.

1.4.1 Retardos

Es uno de los grandes problemas en redes inalámbricas, ya que determinan si una red cableada utilizada en un proceso industrial puede ser sustituida por una red inalámbrica, [4] discute la conveniencia y aplicabilidad de redes WLAN y Bluetooth para propósitos de control industrial y presenta un experimento donde el retardo es medido a través del RTT ante diversos parámetros como interferencia y velocidad de transmisión, muestra una gráfica de distribución del retardo donde la mayoría de los valores están entre 15 y 25 ms. En [38] se hace una prueba similar pero solo se comparan los resultados de los retardos cambiando la encriptación del canal. En [39] se presenta una visión sobre el desempeño de IEEE 802.11b WLAN para una aplicación de control en tiempo real sobre un carro con péndulo invertido, todas las 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. [43] destaca el gran auge de aplicaciones de las redes WLAN basadas en el estándar 802.11b, menciona que la medida básica de realimentación de la información, para estas redes es el RTT, ya que puede ser usado para inferir la velocidad inicial para la conexión en tiempo real de dos hosts de tal forma que no se interrumpa la conexión, el artículo presenta seis diferentes técnicas para hallar el RTT, los mejores resultados se obtienen con un algoritmo de Filtros de Kalman. En [44] y [45] se define un conjunto de indicadores de rendimiento, entre ellos el RTT para dos casos de utilización de redes WLAN en la industria, posteriormente se presentan algunos ejemplos de su evaluación en diferentes condiciones de funcionamiento.

1.4.2 Pérdida de paquetes

Uno de los causantes de los retardos son la pérdida de paquetes, ya que si el reconocimiento manejado por el protocolo no llega, este solicita un nuevo envío, traduciéndose en un retraso, los paquetes se pueden perder por interferencia o colisiones a través del medio, en [46] se hace un experimento donde se mide la pérdida de paquetes, en el análisis de resultados menciona que para una distancia de 30 metros la pérdida de paquetes fue

menor del 0.1 %. En [2] 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, menciona algunas características de los protocolos IEEE802.15 y IEEE802.11 destacando mejores resultados en cuanto a pérdida de paquetes en los protocolos IEEE802.11a y g.

1.4.3 Interferencia

A diferencia de los protocolos cableados, los inalámbricos no pueden protegerse de las inclemencias del medio de transmisión, donde hay grandes fuentes de interferencia, especialmente en ambientes industriales, esta afecta fuertemente este tipo de comunicaciones siendo una de las principales causas de los retardos y pérdidas de paquetes, algunos artículos crean estas fuentes de interferencia para sus experimentos con el fin de evaluar cómo afectan la red, por ejemplo en [4] y [38] se crearon diferentes fuentes de interferencias como teléfonos móviles, computadores, microondas y fotocopiadores, estableciendo que los microondas eran los que más afectaban la comunicación WLAN IEEE802.11b. En [47] y [48] 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. [3] da una descripción detallada de los 3 protocolos inalámbricos más utilizados 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 RF, donde sugiere instalar nodos redundantes en la banda de los 5 GHz.

1.4.4 Fiabilidad

Los protocolos WLAN presentan problemas de fiabilidad causados, en mayor medida por el medio de transmisión, otra causa es el no determinismo del protocolo WLAN, especialmente aquellos que utilizan el protocolo de acceso al medio “acceso múltiple por detección de portadora con evasión de colisiones” o CSMA/CA por sus siglas en inglés, que establece en caso de que dos paquetes de datos lleguen en el mismo instante espera un tiempo aleatorio para volver a leer los datos, todos los protocolos del estándar IEEE 802.11 utilizan este método. En [49] 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. [50] 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. [20] 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 que ha sido ampliamente estudiado para el control en tiempo real.

1.4.5 Seguridad y consumo de energía

En [2] y [10] mencionan varios de los principales problemas a resolver en redes inalámbricas utilizadas para procesos de control, entre ellos la seguridad, la robustez y el consumo de energía, en este último los artículos establecen que, comparado con los protocolos Bluetooth y ZigBee consume más energía. En cuanto a seguridad vale decir que los dispositivos SCALANCE de Siemens utilizan el mecanismo de protección de datos Wi-Fi Protected Access (WPA) y para cifrar los datos se aplica el Advanced Encryption Standard

(AES), también permite la integración con otros esquemas de seguridad, teniendo en cuenta lo anterior en este trabajo no se investigara la seguridad.

1.4.6 Redes Híbridas Cable/Inalámbrico

El objetivo principal de esta investigación es establecer una metodología que permita definir bajo que parámetros una red cableada puede ser sustituida por una red inalámbrica, en este contexto se ha encontrado varias trabajos que tratan el tema, en [46] realizan un test de desempeño para redes híbridas cable/inalámbrico, propone una metodología para adquirir un conjunto de indicadores de redes inalámbricas. En [51] 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 redes inalámbricas, y en algunos se muestran sus posibles soluciones, como el caso de la robustez, donde propone una adecuada ubicación de antenas. [3] 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. [52] destaca que las redes inalámbricas ofrecen soluciones en el último nivel de la pirámide de automatización y analiza la posibilidad de integrar el protocolo cableado Profibus DP con el inalámbrico Bluetooth.

1.4.7 Control Lógico Programable PLC

En este proyecto el uso de PLC's obedece a su amplia utilización a nivel industrial, gracias a las múltiples ventajas sobre otros dispositivos como computadores, micro-controladores y FPGA's, que se ven afectados por los pesados ambientes industriales, además posee una construcción modular y múltiples entradas y salidas, en varios artículos citados también los usan, [21], [46], [53] y [38].

1.4.8 Dispositivos inalámbricos especialmente diseñados para ambientes industriales

Una de las características más importantes de este proyectos es la utilización de dispositivos inalámbricos especialmente diseñados para ambientes industriales como lo son los puntos de acceso inalámbricos SCALANCE de Siemens, es importante ya que en la mayoría de artículos usan puntos de acceso comercial, que no cuenta con las debidas protecciones contra ambientes industriales, que en definitiva afectan el desempeño total de sistema de comunicación, [45] 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. [19] menciona 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 mucho experimentos hechos para estudiar las redes WLAN 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. En [21] se describe 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 el siguiente capítulo se presentan los vacíos encontrados en el estado del arte y como, a partir de estos, se establecieron los alcances y aportes del proyecto de investigación.

2 Problema

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, de tal forma que los paquetes enviados no puedan ser modificados por agentes externos, como la interferencia ocasiona en ambientes industriales, o la intervención mal intencionada y/o inapropiada del humano. 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 [39] y [38]. De igual forma que en el estado del arte, se abordarán lo que no se hizo en los artículos de acuerdo a la temática de investigación.

2.1 Retardos

En varios trabajos se ha realizado análisis del desempeño de una conexión inalámbrica en el control de un proceso industrial simulado [4], [38] y [39], 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 [43] se presenta seis diferentes técnicas para hallar el RTT, pero no relaciona este con ningún tipo de parámetro como interferencia o distancia entre otros. [44] y [45] se define un conjunto de indicadores de rendimiento para dos casos de utilización de redes WLAN 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, adicional, en el siguiente artículo 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.

En este proyecto se hicieron pruebas y se recolectaron datos de tal forma que se puede relacionar los retardos con otros parámetros como el SNR, distancia, pérdida de paquetes entre otros, en la metodología se describe como se realizará el experimento y la forma como se presentarán los datos.

2.2 Interferencia

En [47] y [48] investigan los efectos del ruido y la interferencia electromagnética en las comunicaciones inalámbricas industriales en una fábrica de papel y una fábrica de acero, se mencionan las principales fuentes de ruido electromagnético y en que frecuencias se manifiesta pero no muestran como este ruido afecta las comunicaciones inalámbricas utilizadas en procesos de control en tiempo real. [3] 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 el proyecto se implementaran las fuentes de ruido utilizadas en [4] y [38] con el fin de observar como los ambientes industriales afecta las comunicaciones inalámbricas.

2.3 Fiabilidad

Los artículos mencionados en esta temática proponen técnicas para mejora la fiabilidad de las comunicaciones inalámbricas, ya que no es el objetivo de este proyecto de investigación, solo se resaltara la conclusión que se menciona en [20], aquí se realizan pruebas con dos protocolos, IEEE802.11 y IEEE802.15.4 del cual se derivan los protocolos más recientes establecidos para el control en tiempo real como WirelessHART, ISA100.11a y WIA-PA, 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, segundo, aunque hay muchas aplicaciones industriales con menos de 10 nodos transmitiendo datos por debajo de los 80 bytes, también hay muchas aplicaciones que utilizan cientos de nodos transmitiendo por encima de 80 bytes, para estas el IEEE802.15.4 presenta problemas. Esto muestra que definitiva la fiabilidad no es uno de los puntos fuertes del protocolo WiFi, pero que en contraprestación muestra ciertas ventajas que en la actualidad, son de interés en aplicaciones industriales.

2.4 Redes Híbridas Cable/Inalámbrico

En [46] realizan un test de desempeño para redes híbridas cable/inalámbrico, propone una metodología para adquirir un conjunto de indicadores de redes inalámbricas, pero solo se presentan estos indicadores en función de la distancia, los autores mencionan que no tuvieron en cuenta la interferencia ya que las pruebas se realizaron en un laboratorio. En [51], [3] y [52] no establecen bajo qué condiciones las redes cableadas puede ser reemplazadas por redes inalámbricas.

2.5 Dispositivos inalámbricos especialmente diseñados para ambientes industriales

En [44] y [45] define un conjunto de indicadores de rendimiento para dos casos de utilización de redes WLAN 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, adicional, en el siguiente artículo 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 dispositivos utilizados

en esta investigación, 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. En [19] se 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, en un futuro proyecto, los puntos de acceso que son intencionalmente diseñados para aplicaciones industriales, tales como, por ejemplo, los que pertenecen a la familia SCALANCE de productos suministrados por Siemens, que son, precisamente los utilizados en esta investigación, y por último en [21] describe 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, 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. Esto en definitiva, por lo reciente de los artículos, muestra que la investigación con dispositivos inalámbricos especialmente diseñados para ambientes industriales está en proceso en la actualidad.

Los artículos referenciados en el estado del arte indican, de forma general, que hay un gran crecimiento de las aplicaciones de control que usan las redes inalámbricas como sistema de comunicación, principal o alternativo, y que por lo tanto se debe crear una red de comunicación inalámbrica que pueda sustituir, sin ningún problema, sistemas tradicionales y confiables como lo es Profibus. Una de las tendencias, establecidas por los grandes fabricantes de dispositivos de control, es cambiar el tradicional Profibus incluido en sus PLC's, por Ethernet, a su vez, este puede ser fácilmente integrado con sistemas inalámbricos, principalmente IEEE802.11, con todas las ventajas que ofrecen. En este aspecto se encontró un vacío en el estado del arte y que se soluciona a través del desarrollo del proyecto, a continuación se presenta la síntesis del problema a resolver.

2.6 Síntesis del problema

No hay una metodología que determine bajo qué características y/o parámetros una red inalámbrica en el estándar IEEE802.11, puede sustituir un sistema de comunicación para el control en tiempo real como el ProfiBus en ambientes industriales.

2.7 Hipótesis:

Se podrá realizar el control de un proceso industrial en tiempo real empleando controladores lógicos programables enlazados por una conexión inalámbrica, tomando las medidas de los retardos de la transmisión y evaluando el correcto envío de datos y desempeño del sistema bajo diferentes condiciones en el medio asegurando un tiempo mínimo para realizar la tarea de control.

2.8 Objetivos

A continuación se describen los objetivos del proyecto:

2.8.1 Objetivo General:

Desarrollar una metodología para la medición del desempeño de una conexión inalámbrica WiFi para el control de un proceso industrial en tiempo real usando PLC y dispositivos inalámbricos especialmente diseñados para ambientes industriales.

2.8.2 Objetivos específicos:

- Caracterizar los protocolos de conexión inalámbrica empleados para el control y monitoreo de procesos industriales.
- Proponer los diferentes escenarios de prueba para la validación del sistema de control.

- Desarrollar un método de evaluación del desempeño de la conexión inalámbrica WiFi de forma que se explique la dependencia con las variables de distancia, interferencia en el medio, retraso, pérdida de paquetes y ancho de banda, con los resultados de medición desarrollados.
- Determinar las condiciones de interferencia y cuáles son las condiciones de uso óptimo de la conexión inalámbrica WiFi empleada.

3 Metodología para la medición del desempeño de una conexión inalámbrica para el control de un proceso industrial en tiempo real.

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos para cada uno de los objetivos específicos planteados en el proyecto. Inicialmente se caracterizaron los protocolos de comunicación inalámbricos del estándar IEEE802.11 con el objetivo de verificar y establecer sus parámetros de operación, luego se describen los diferentes escenarios de prueba usados para el desarrollo de la metodología, por último se presenta la metodología y los resultados obtenidos.

3.1 Caracterización de los protocolos de conexión inalámbrica empleados para el control y monitoreo de procesos industriales.

La caracterización de los protocolos inalámbricos permite encontrar parámetros distintivos que son usados para explicar porque determinado protocolo puede ser mejor que otro. Para esto, se tomaron medias con los analizadores de espectro Rohde & Schwarz FSH3 que tiene un ancho de banda de 9 KHz a 3 GHz y el FHS8 con un ancho de banda 9 KHz a 8 GHz, como transductor se usó una antena directiva de banda ancha HyperLOG 7060 (700MHz - 6GHz) con ganancia de 5 dBi. Los parámetros medidos para los diferentes protocolos fueron: frecuencia central, ancho de banda, velocidad de transmisión y distancia máxima del enlace en línea de vista para todos los protocolos. En la Figura 3-1 presenta el esquema para la caracterización de los protocolos. La frecuencia central y el ancho de banda se miden con el analizador de espectros, el firmware de los AP's (Puntos de acceso) permite medir la velocidad de transmisión y recepción de los datos. Para determinar la distancia máxima del enlace, se envían datos del PLC servidor al PLC cliente, cuando este último recibe los datos se enciende un LED, gradualmente se va aumentando la distancia entre los AP's hasta encontrar el lugar donde el LED no enciende, determinando de esta forma la distancia máxima a la cual el protocolo permite enviar datos.



Figura 3-1. Experimento para la caracterización de los protocolos.

Fuente: Autor.

A continuación se presenta la caracterización de los protocolos inalámbricos analizados en el proyecto, en IEEE 802.11 a se explica con detalle cómo se hicieron las medidas para todos los estándares, así para los siguientes solo se muestran los resultados y su respectivo análisis.

3.1.1 Protocolo IEEE 802.11 a

En la Figura 3-2 se presenta el espectro de la señal correspondiente al canal 36 de IEEE 802.11 a. Para medir el ancho de banda B_w se usa la Ecuación (3-1):

$$B_w = F_{c2} - F_{c1} \quad (3-1)$$

Donde F_{c2} y F_{c1} son las frecuencias de corte y se definen como las frecuencias que corresponden al 70% de la potencia máxima, en este caso están identificadas por los marcadores M3 y M2 de la Figura 3-2. Para este caso B_w es 54.8 MHz y la Frecuencia central F_c es 5.18 GHz. La distancia máxima medida para el radio enlace fue de 85 metros.

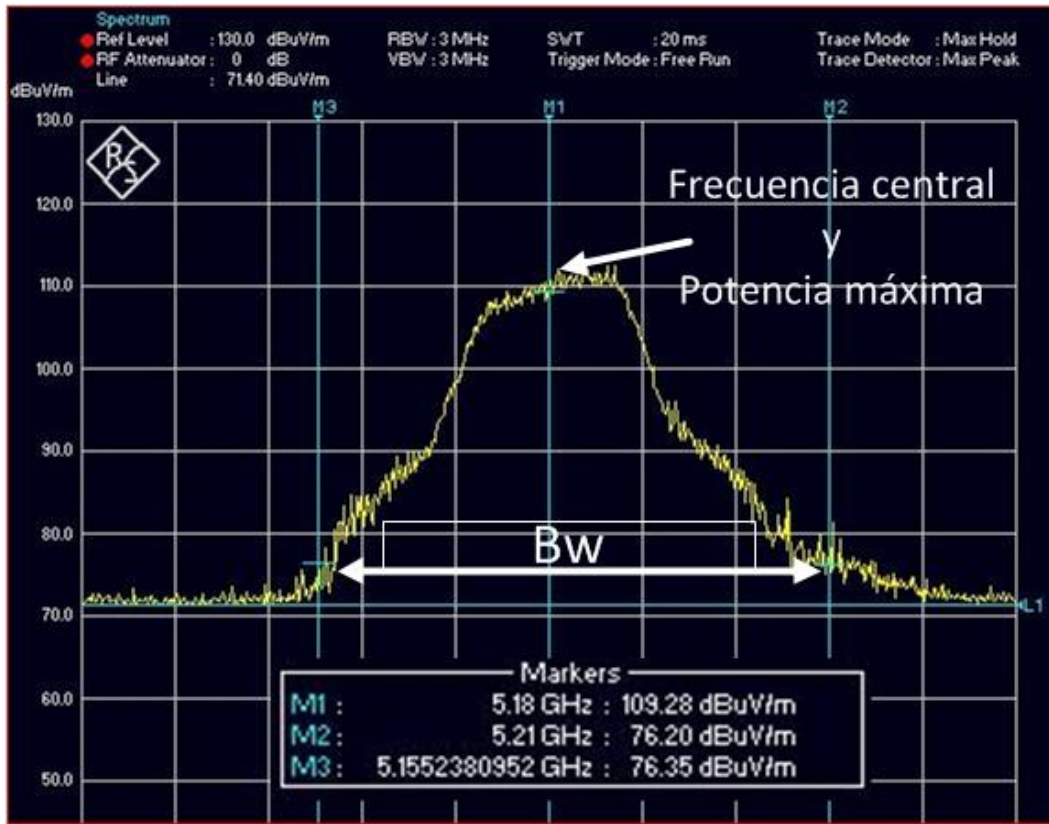


Figura 3-2. Espectro para IEEE 802.11 a canal 36.

Fuente: Autor.

En la Figura 3-3 se presentan los resultados del tráfico tomados del módulo Scalance, en rojo, el cual se usa para medir la máxima velocidad de transmisión (Rate Transmit), que para este caso, corresponde a 54.0 Mbps en la transmisión. La figura también permite apreciar diferentes mediciones de tráfico que se usaran y describirán más adelante.

Traffic statistics on the Wireless Interface		
Associations:	1	Disassociations: 0
Authentications:	1	Deauthentications: 1
	Receive	Transmit
Rate:	54.0 Mbits	54.0 Mbits
Signal strength:	76%	N/A
Frame count:	28759	26983
Bytes count:	6083494	2284247
Data frame count:	28953	26953
Data bytes count:	6658873	2248860
Unicast:	28953	26746
Multicast:	0	139
Broadcast:	0	98
Control frames:	0	0
Management frames:	74	30

Figura 3-3. Trafico para 802.11 a.

Fuente: Autor.

En la Tabla 3-1, se resumen los datos medidos y teóricos para el estándar 802.11 a operando en el canal 36.

Tabla 3-1. Parámetros medidos y teóricos para 802.11 a.

<i>Parámetro</i>	<i>Medido</i>	<i>Teórico</i>
B_w	54.8 MHz	20 MHz
F_c canal 36	5.18 GHz	5.18 GHz
<i>Velocidad máxima de transmisión</i>	54 Mbps	54 Mbps
<i>Rango de operacion</i>	85 m	50 - 100 m

Fuente: Autor.

De los resultados se puede concluir que los datos medidos de frecuencia central y velocidad máxima de transmisión, corresponde con los valores establecidos por el estándar. En cuanto al ancho de banda, normalmente con este protocolo se pueden lograr velocidades promedios entre 25 a 30 Mbps, para poder garantizar los 54 Mbps lo que hace el dispositivo es usar dos canales para la comunicación, teniendo en cuenta que cada canal ocupa entre 20 a 25 MHz, [54].

3.1.2 Protocolo IEEE 802.11 h

En la Figura 3-4, se muestra el espectro de frecuencia y la velocidad máxima de transmisión para 802.11 h canal 36.

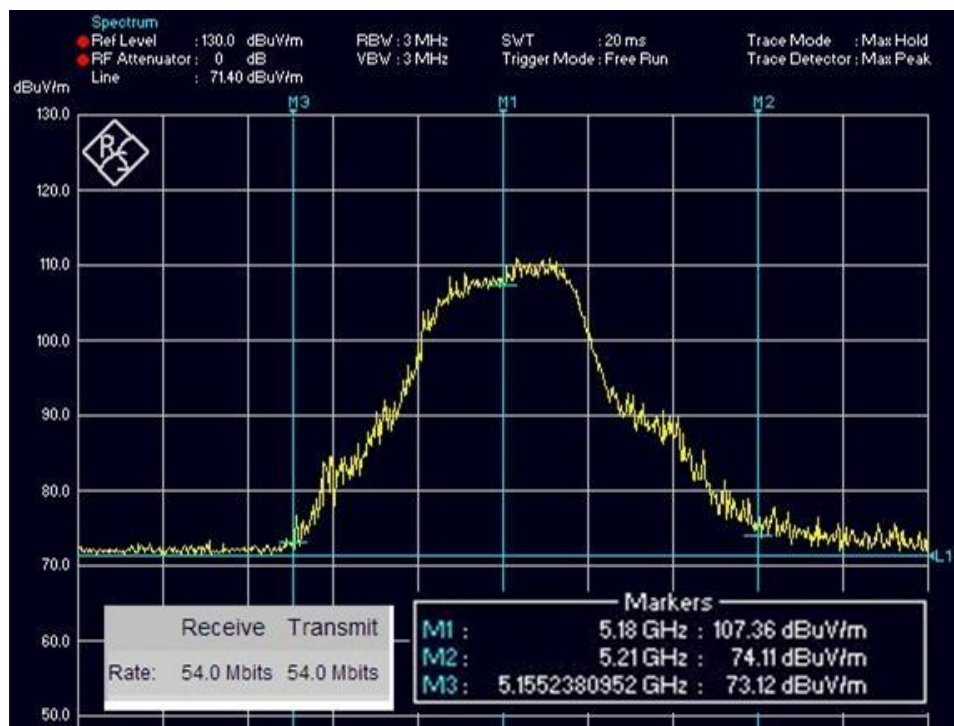


Figura 3-4. Espectro y velocidad máxima de transmisión para 802.11 h canal 36.

Fuente: Autor.

En la Tabla 3-2, se resumen los datos medidos y teóricos para el estándar 802.11 h operando en el canal 36.

Tabla 3-2. Parámetros medidos y teóricos para 802.11 h.

<i>Parámetro</i>	<i>Medido</i>	<i>Teórico</i>
B_w	53.4 MHz	20 MHz
F_c canal 36	5.18 GHz	5.18 GHz
<i>Velocidad máxima de transmisión</i>	54 Mbps	54 Mbps
<i>Rango de operacion</i>	90 m	50 - 100 m

Fuente: Autor.

De los resultados, se puede observar que los datos medidos de 802.11h son idénticos a los de 802.11 a.

3.1.3 Protocolo IEEE 802.11 b

En la Figura 3-5, se muestra el espectro de frecuencia y la velocidad máxima de transmisión para 802.11 b canal 6. Y en la Tabla 3-3, se resumen los datos medidos y teóricos para el estándar 802.11 b operando en el canal 6.

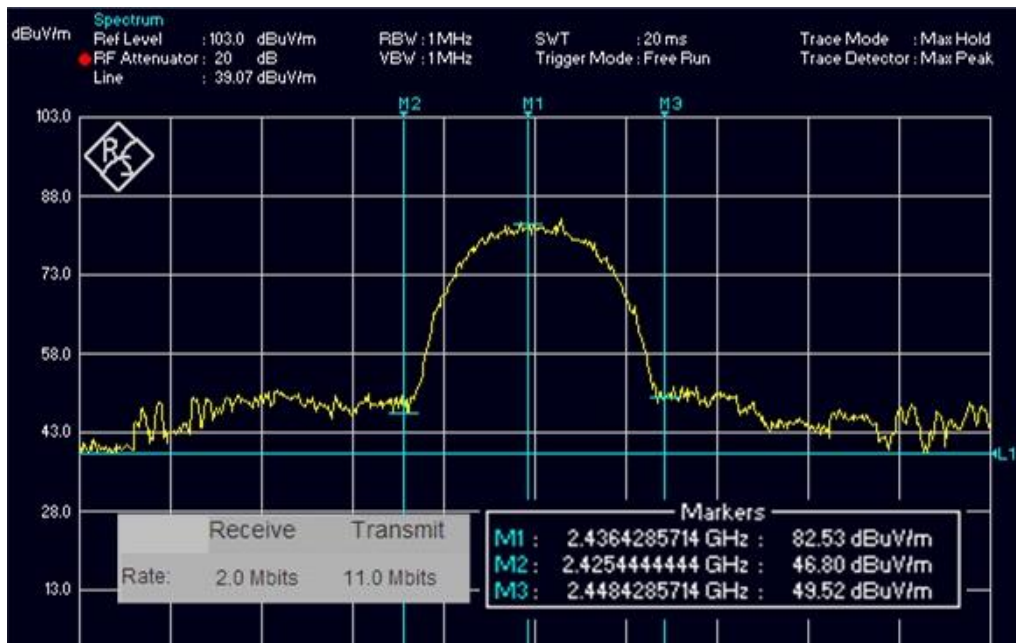


Figura 3-5. Espectro y velocidad máxima de transmisión para 802.11 b canal 6.

Fuente: Autor.

De los resultados, se puede ver que este estándar es el que cuenta con la menor velocidad de transmisión con 11 Mbps que es lo que establece la norma. Los parámetros medidos corresponden, de manera muy aproximada, lo establecido por la norma.

Tabla 3-3. Parámetros medidos y teóricos para 802.11 b.

Parámetro	Medido	Teórico
B_w	23.1MHz	20 MHz
F_c canal 6	2.436 GHz	2.437 GHz
Velocidad máxima de transmisión	11 Mbps	11 Mbps
Rango de operacion	50 m	50 - 100 m

Fuente: Autor.

3.1.4 Protocolo IEEE 802.11 g

En la Figura 3-6, se muestra el espectro de frecuencia y la velocidad máxima de transmisión para 802.11 g canal 6.

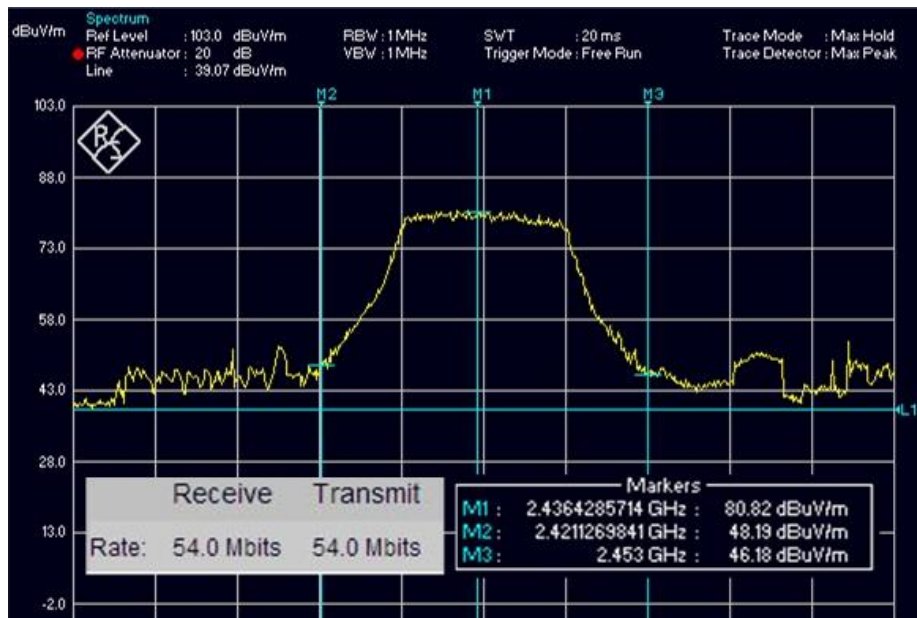


Figura 3-6. Espectro y velocidad máxima de transmisión para 802.11 g canal 6.

Fuente: Autor.

En la Tabla 3-4, se resumen los datos medidos y teóricos para el estándar 802.11 g operando en el canal 6.

Tabla 3-4. Parámetros medidos y teóricos para 802.11 g.

Parámetro	Medido	Teórico
B_w	22.3MHz	20 MHz
F_c canal 6	2.436 GHz	2.437 GHz
Velocidad máxima de transmisión	54 Mbps	54 Mbps
Rango de operacion	55 m	50 - 100 m

Fuente: Autor.

Este estándar cuenta con mayor velocidad de transmisión que el 802.11b. Igual que para b, las mediciones están muy cerca de lo establecido por la norma.

3.1.5 Protocolo IEEE 802.11 g Turbo

En la Figura 3-7, se muestra el espectro de frecuencia y la velocidad máxima de transmisión para 802.11 g Turbo canal 6.

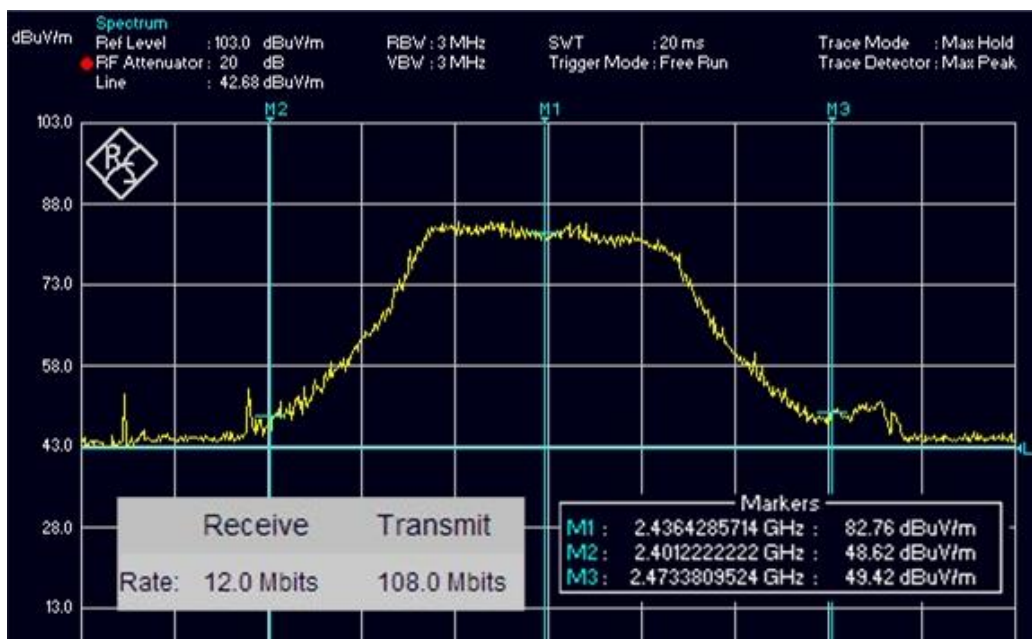


Figura 3-7. Espectro y velocidad máxima de transmisión para 802.11 g Turbo canal 6.

Fuente: Autor.

En la Tabla 3-5, se resumen los datos medidos y teóricos para el estándar 802.11 g Turbo operando en el canal 6. IEEE802.11 g Turbo es el que mejores características muestra de todos los anteriores, ya que al contar con un ancho de banda de 40 MHz, el doble que los anteriores, le permite de igual forma, doblar la velocidad de transmisión con 108 Mbps.

Tabla 3-5. Parámetros medidos y teóricos para 802.11 g Turbo.

<i>Parámetro</i>	<i>Medido</i>	<i>Teórico</i>
B_w	41.4MHz	40 MHz
F_c canal 6	2.436 GHz	2.437 GHz
<i>Velocidad máxima de transmisión</i>	108 Mbps	108 Mbps
<i>Rango de operacion</i>	70 m	50 - 100 m

Fuente: Autor.

Las caracterización de los protocolo se realizó bajo condiciones ideales, sin fuentes de ruido he interferencia, no obstante, con el analizador de espectro se pudo observar que muchos equipos de comunicación inalámbrica como celulares, enrutadores, puntos de acceso, y hornos microondas, operan en la banda de 2.4 GHz o cercana. Esto, sin lugar a dudas representa una desventaja para los protocolos que usan este espectro que cuenta con gran cantidad de fuentes de interferencia y ruido, a diferencia de la banda de los 5 GHz donde las fuentes de interferencia y ruido son más reducidas. Obtenidos estos resultados, a continuación se presentan los diferentes escenarios de prueba diseñados para el desarrollo de los experimentos.

3.2 Escenarios de prueba para la caracterización y validación del sistema de control

Una característica típica de los ambientes industriales son los altos niveles de ruido electromagnético, para evaluar el desempeño de las redes inalámbricas variando este parámetro, se usaron hornos microondas que fueron propuestos por [4] como una gran fuente de perturbación para redes inalámbricas.

En la Figura 3-8 a) se muestra el plano del laboratorio de PLC donde se realizaron las pruebas para distancias entre los AP's (Puntos de Acceso) de 2 y 10 metros, en la Figura 3-8 b) está el lugar donde se hicieron las pruebas para distancias de 30 y 50 metros.

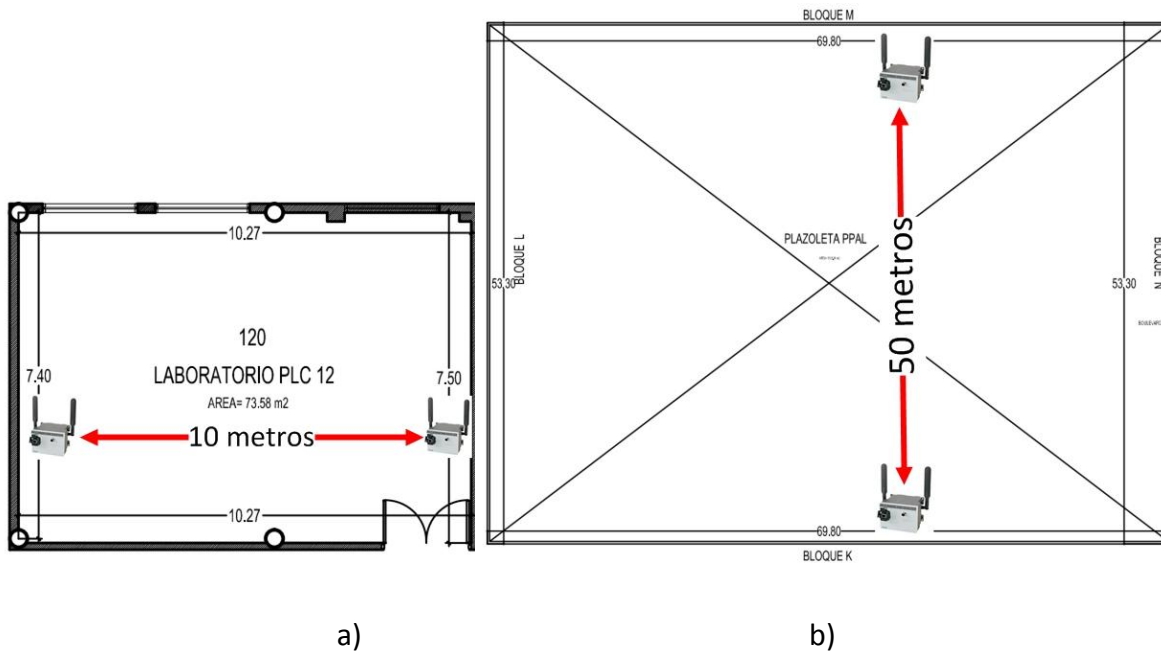


Figura 3-8. Lugares de prueba.

Fuente: Autor.

A continuación se presenta la metodología de medición para las redes cableadas y las redes inalámbricas, luego se muestra el proceso de control propuesto para evaluar los resultados obtenidos con la metodología de medición y por último, se dan las características de los AP usados.

3.2.1 Comunicaciones cableadas

Como se mencionó anteriormente, Profibus tiene retardos máximos de 10 ms, en esta prueba solo se caracteriza los retardos (RTT) de Profibus y Ethernet variando la distancia y la cantidad de datos en una comunicación punto a punto, que permita comparar los

retardos de estas redes con las redes inalámbricas. En la Figura 3-9 se muestra el esquema implementado para medir los retardos en redes cableadas.

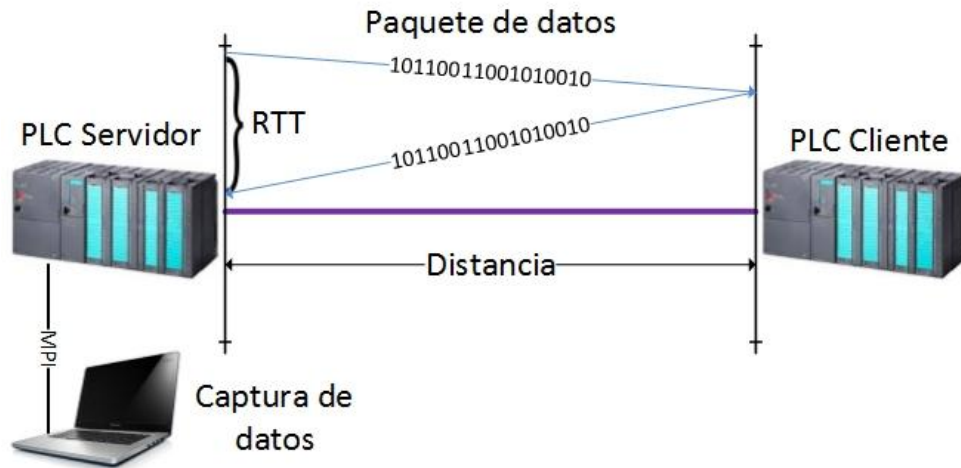


Figura 3-9. Esquema propuesto para medir el RTT para Profibus.

Fuente: Autor.

Los PLC's usados son Siemens S7 300 con CPU 314C-2DP, estos cuentan con un módulo integrado de comunicación Profibus DP, consultar el anexo D para ver las características del PLC. En ambos PLC's se le instalaron módulos de comunicación Ethernet CP343-1 de Siemens.

3.2.2 Comunicaciones Inalámbricas

A diferencia de las redes cableadas, donde la señal se transporta por un medio protegido contra las adversidades del ambiente, las redes inalámbricas viajan en el espacio libre que presenta serios inconvenientes. En este aspecto, hay que tener en cuenta variables adicionales para medir su desempeño. En la Figura 3-10 se muestra el esquema propuesto para evaluar el desempeño de un sistema de comunicación con industrial Ethernet inalámbrico bajo ambientes industriales.

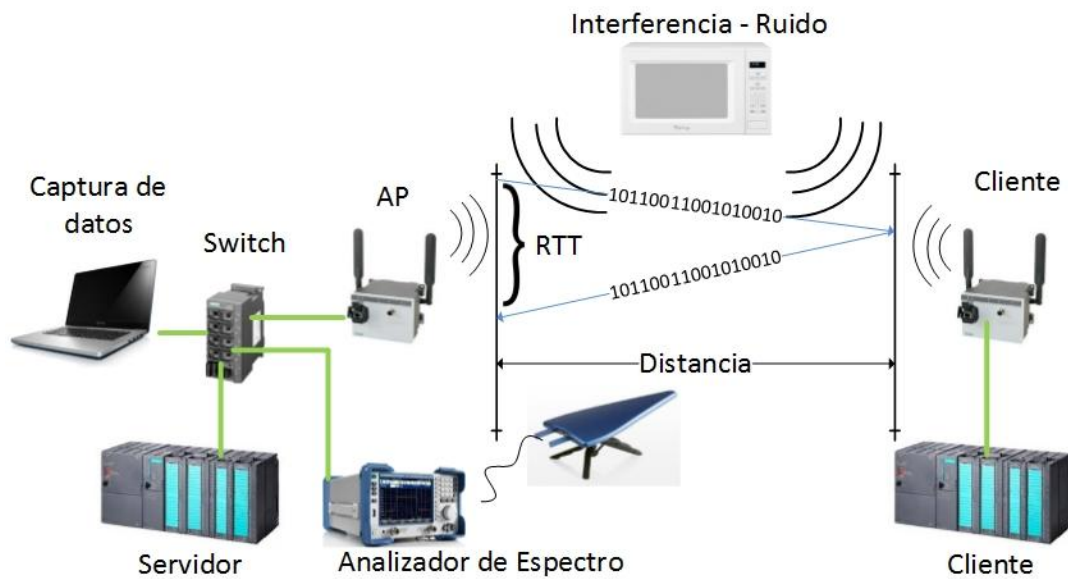


Figura 3-10. Esquema propuesto para la prueba de comunicación industrial Ethernet inalámbrica.

Fuente: Autor.

Los ambientes industriales se caracterizan por tener altos niveles de ruido, para crear estas condiciones en un laboratorio se usaron dos hornos microondas, que fue implementado como una gran fuente de perturbación para redes inalámbricas en [4]. Cada horno se ubicó al lado de los módulos de transmisión inalámbrica, el Scalance W788 Pro para el servidor y W744 para el cliente. Variando la distancia de los hornos a estos módulos, se puede lograr variaciones en el SNR, y de esta forma caracterizar la influencia de este parámetro en la comunicación.

3.2.3 Pruebas en un proceso de control en tiempo real

Un proceso de control en tiempo real muy común en la industria es el control de motores AC, además es un planta con una respuesta muy rápida¹ que permitiría ver los efectos de los retardos causados por la redes de comunicación en la respuesta del controlador, por eso, se propone éste como experimento de prueba para validar los resultados obtenidos, en la Figura 3-11 se presenta el esquema diseñado, en el cual se varia la distancia entre los AP's y la SNR, el número de bytes de datos está determinado por los parámetros del controlador (Micromaster 440) que se explica en la sesión de resultados. Lo que hace es enviar el Set Point desde una interfaz de control instalada en un PC a un controlador (PLC), estos están enlazados por una comunicación inalámbrica entre los dos AP's, el servidor y el cliente, una vez el dato llega al controlador este se comunica con el actuador vía Profibus para establecer el valor deseado de velocidad en el motor, a su vez, el controlador leerá la velocidad actual del motor y se la enviara al PC para ser visualizada en la interfaz de control.

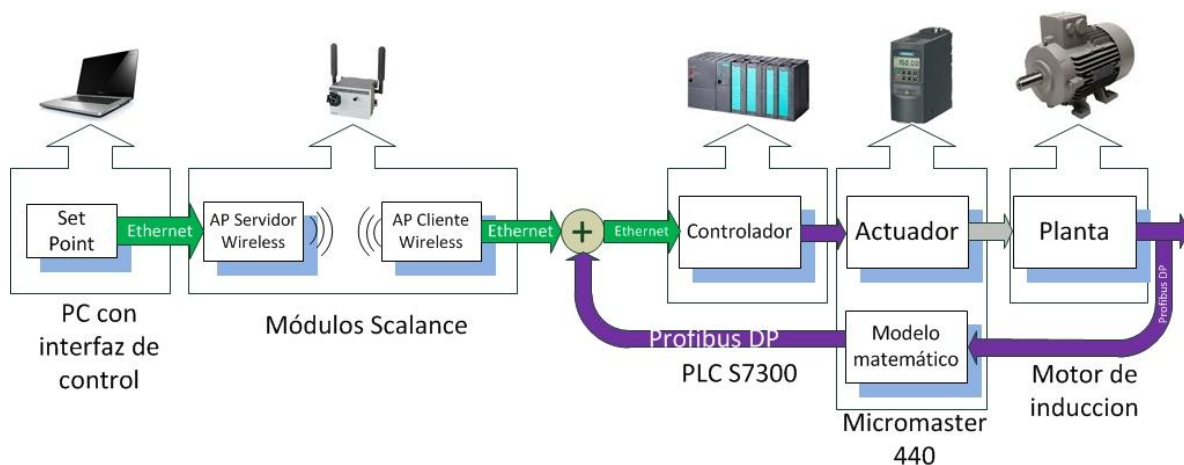


Figura 3-11. Escenario para las pruebas en un proceso de control en tiempo real.

Fuente: Autor.

¹ El motor usado en este prueba tiene una velocidad máxima en vacío de 1800 RPM

La interfaz de control y visualización se diseñó usando LabView, ver Figura 3-12, ésta cuenta con cuatro características que son:

- Cargar parámetros del motor al variador de velocidad Micromaster 440, que incluye voltaje, corriente, potencia y velocidad nominal.
- Exportar datos obtenidos a un archivo de texto.
- Parámetros de control de motor los cuales incluye, marcha, paro, sentido de giro y velocidad deseada.
- Visualización de datos del motor como, velocidad deseada (set point), velocidad actual, par, voltaje y corriente del motor.

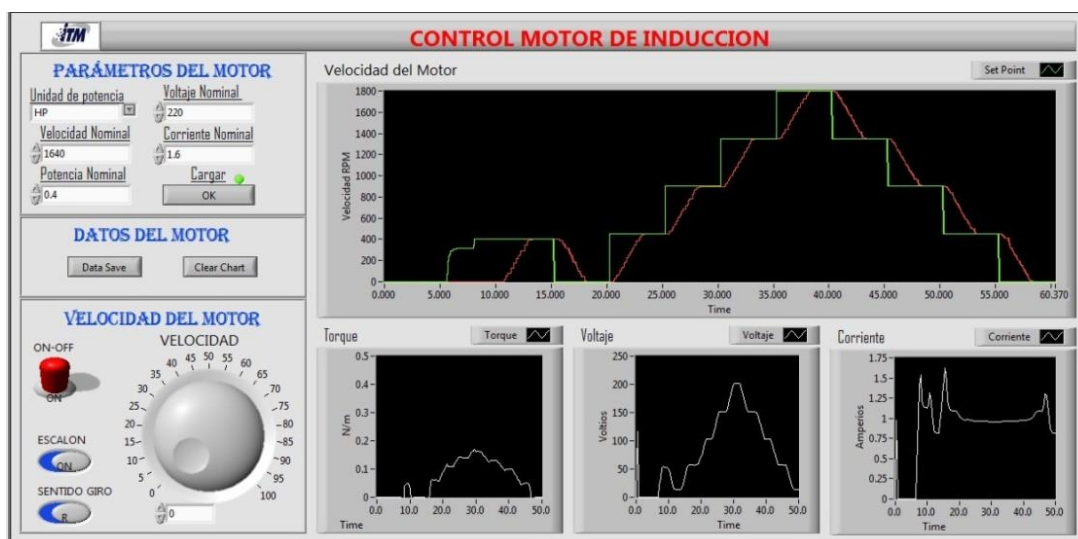


Figura 3-12. Interfaz de control de motor de inducción.

Fuente: Autor.

Desde el Software diseñado en LabView se envía el set point al Software diseñado en el PLC, los valores establecidos para el set point son, en RPM: 450, 900, 1350, 1800, 1350, 900, 450 y 0, en periodos de 5 segundos denominado T_p , ver Figura 3-13. En la interfaz de control se programó un periodo de muestreo usando el teorema de muestro en la Ecuación (3-2):

$$F_s > 2F_{max} \tag{3-2}$$

Como la mayor velocidad del motor es 1800 RPM, la F_{max} es 30 Hz equivalente a 33.33 ms, con lo que el periodo de muestreo P_s necesario máximo es de 16.66 ms, ahora, como se desean medir los retardos de las redes inalámbricas y basado en los resultados obtenidos en la sección 3.3 que muestran que los RTT mínimos para estas redes fueron de 10 ms, se usara un periodo de muestreo de 10 ms. En el anexo C se muestra el Software diseñado para la interfaz de control.

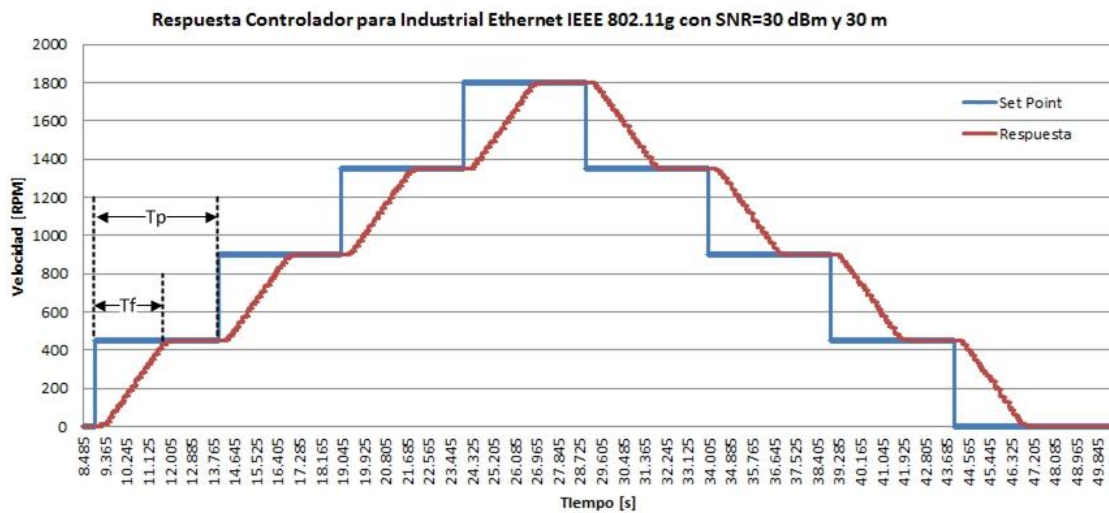


Figura 3-13. Resultados exportados a Excel.

Fuente: Autor.

Con los datos en Excel, se mide el tiempo que tarda el controlador en llegar al set point, Tf , este parámetro incluye los retardos ocasionados por la red, ya que todas los tiempos se establecen desde el PC con la interfaz de control, ver Figura 3-12. Para cada valor del set point se mide él Tf y se promedian, como valor de referencia se usan los Tf medidos para una comunicación con Profibus a una distancia de 2 metros.

3.2.4 Características de los equipos usados en las pruebas

De los equipos usados, los que determinarán sustancialmente el desempeño de la red son los puntos de acceso (AP) ya que permiten configurar, administrar y supervisar la red, por esta razón a continuación se describen las características más importantes de los AP de Industrial Ethernet de Siemens.

Tabla 3-6. Características de los módulos inalámbricos Scalance.

<i>Scalance W788-1 Pro - W744-1 Pro</i>	
Velocidad de transmisión Ethernet	10/100 Mbps
Velocidad de transmisión Inalámbrica	1...108 Mbps
Estándares inalámbricos	IEEE 802.11a, IEEE 802.11h, IEEE 802.11b, IEEE 802.11g y IEEE 802.11g Turbo (108 Mbps)
Bandas de frecuencia	2.5 GHz y 5 GHz
Seguridad Inalámbrica	WPA (Radius)/WPA-PSK, IEEE 802.1x, WEP, AES, TKIP y Filtro MAC
Energía	Conector M12 (24...48 V DC), Conector Híbrido (24...48 V DC) y Conector RJ-45 – alimentación sobre Ethernet 48 V DC
Consumo de potencia	≤ 9 W
Pérdidas de retorno	≤ -10 dB
Ganancia a 2.45/5.25 GHz	3/5 dBi
Potencia de transmisión	13.5 - 20 dBm
Sensibilidad de recepción	-98 a -74 dBm, depende de la velocidad de transmisión
Grado de protección	IP65
Temperatura de operación	-20°...60° C
Humedad no condensada	95%
Material externo	Policarbonato
Certificaciones	99/5/EC, EN 60950, EN 301 489-1, EN 301 489-17, EN 300 328, EN 301 893, EN 50371, 1999/519/EC, EN50021, UL 60950-1
Otros	Autopolaridad (PoE), Autocrossing, Monitoreo de red y del dispositivo, MTBF (Tiempo medio entre fallos) 67 años

Fuente: [54].

El módulo W788-1 Pro actúa como AP y el módulo W744-1 Pro se conecta al AP como cliente. Con estos, es posible conectar estaciones fijas o móviles con conexión Industrial Ethernet que deban ser integradas en las redes de radiotransmisión Industrial Wireless LAN (IWLAN), con un alto grado de fiabilidad en las comunicaciones, [55]. En la Tabla 3-6 se pueden observar las principales características de estos módulos inalámbricos. En el anexo D se presentan las características de todos los equipos e instrumentos usados en el desarrollo del proyecto.

El proceso de diseño de los tres experimentos presentados en este numeral, son el resultado de lo estudiado en los diferentes artículos referenciados en el estado del arte y un sin número de pruebas de ensayo y error, para el final establecer los más adecuados escenarios de prueba. Una vez se implementas estos escenarios, se procede a explicar la metodología de evaluación basada en la variación de las cuatro métricas de desempeño seleccionadas.

3.3 Metodología de evaluación del desempeño de la conexión inalámbrica

Esta metodología consiste básicamente en la variación de cuatro métricas de desempeño determinadas a partir del estado del arte que son: distancia, RTT, SNR y el PER. Inicialmente se realiza en el montaje de los esquemas propuestos en la Figura 3-9 para cableadas y Figura 3-10 para inalámbricas, luego se implementa el programa diseñado en los PLC's, y que se presenta más adelante, al igual que la configuración de los AP's variando los diferentes protocolos que se quieren evaluar, ver Figura 3-14. Luego, progresivamente se procede a variar cada uno de los cuatro parámetros de desempeño, teniendo en cuenta que el PER es un parámetro asociado al número de datos y la SNR y por tanto no se varía directamente.

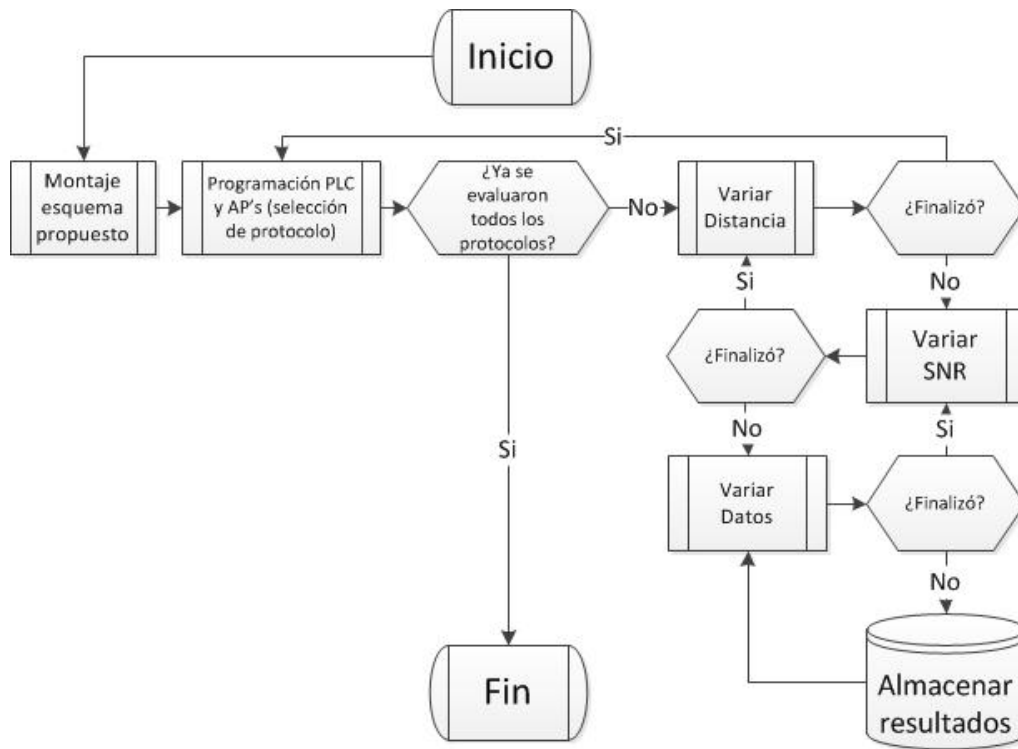


Figura 3-14. Diagrama de flujo de la metodología de evaluación.

Fuente: Autor.

A continuación se describe el proceso de medición de las métricas de desempeño y posteriormente la metodología de medición.

3.3.1 Medición del RTT

Para medir el RTT se implementó un algoritmo en dos PLC's, uno de servidor y otro de cliente. Lo que se hace en el PLC servidor es enviar un bloque de datos al PLC Cliente al mismo tiempo que se activa el bloque de temporización FC80, una vez todos los datos llegan el PLC Cliente, este envía nuevamente el mismo bloque de datos al PLC Servidor, cuando todos los datos llegan al servidor, se detiene el temporizador midiendo de esta forma el RTT.

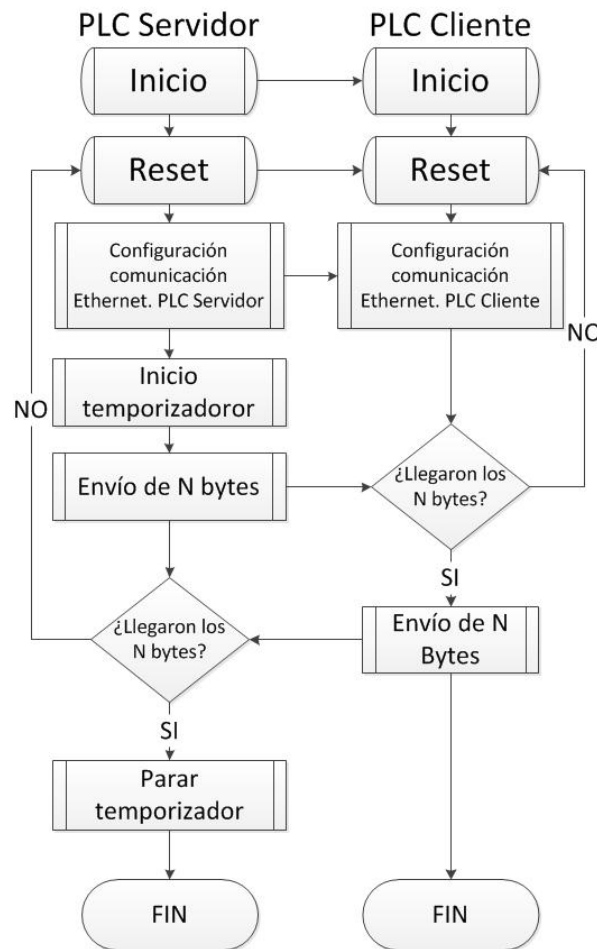


Figura 3-15. Algoritmo diseñado para medir el RTT entre dos PLC’s con comunicación Ethernet.

Fuente: Autor.

En la Figura 3-15 se muestra el algoritmo usado para medir el RTT en ambas redes, el Software diseñado a partir del algoritmo se describe en el Anexo B. Para las redes cableadas, se hicieron pruebas variando distancia y tamaño de datos, con 2, 10 ,30 y 50 m, y 8, 32, 64 y 128 bytes respectivamente, tomando 10 medidas en cada prueba para promediar los resultados. Las pruebas se realizaron al lado del laboratorio de PLC del Instituto Tecnológico Metropolitano sede Fraternidad, con los cables totalmente estirados para evitar bucles de ruido que pudieran afectar las mediciones.

3.3.2 Medición del SNR

Para medir el SNR se usó el analizador de espectro Rohde & Schwarz FSC3 que tiene un ancho de banda de 3 GHz, y como transductor una antena direccional de banda ancha HyperLOG 7060 (700MHz - 6GHz) con ganancia de 5 dBi. Para adaptar el transductor al analizador se editó la librería de esta con la tabla datos del factor de antena suministrados por el fabricante, este factor tiene unidades de $\mu\text{V}/\text{m}$, por tanto todas las medidas realizadas con el analizador fueron en unidades de campo eléctrico.

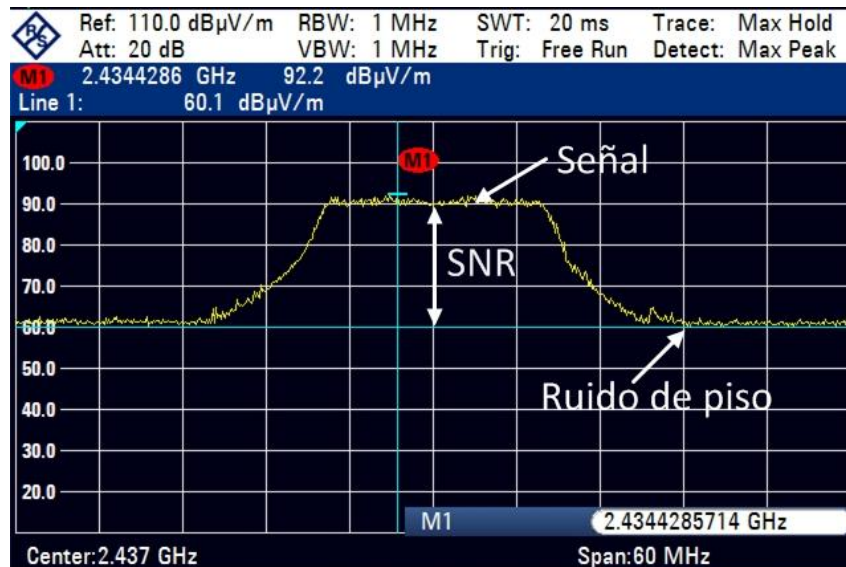


Figura 3-16. Medidas de SNR sin fuente de ruido para 2437 MHz correspondiente al canal 6 de IEEE 802.11 g.

Fuente: Autor.

En la Figura 3-16 se muestra un ejemplo de las mediciones hechas para IEEE 802.11g sin el ruido introducido con el microondas, la Figura 3-17 muestra como el nivel del ruido se incrementa con el horno microondas. El nivel de campo eléctrico de la señal se toma como el pico máximo identificado por el marcador M1, y el nivel de campo eléctrico del ruido se tomó como valor mínimo o ruido de piso identificado por la línea 1 o el marcador M2, como

la SNR se da en unidades de dBm, usando la Ecuación (3-3) primero se pasa a campo eléctrico E:

$$E = 10^{((dB\mu V/m - Att - 120)/20)} \quad (3-3)$$

Donde $dB\mu V/m$ es campo eléctrico y Att la atenuación. Con estos datos encuentra la densidad de potencia incidente con la Ecuación (3-4):

$$W_i = \frac{E^2}{\eta_0} \quad (3-4)$$

Donde η_0 impedancia intrínseca del medio. Una vez obtenida la densidad de potencia, se calcula la potencia incidente usando la Ecuación (3-5):

$$P_i = W_i A_{eff} \quad (3-5)$$

Donde A_{eff} es área efectiva. Finalmente la potencia en dBm se encuentra con la Ecuación (3-6):

$$dBm = 10 \log(1000 P_i) \quad (3-6)$$



Figura 3-17. Medidas de SNR con fuente de ruido para 2437 MHz correspondiente al canal 6 de IEEE 802.11 g.

Fuente: Autor.

Variando la distancia entre la fuente de ruido, en este caso el horno microondas, y el Punto de Acceso, se pueden lograr variaciones de la SNR que servirán para describir el desempeño de la red ante el cambio de este parámetro.

3.3.3 Medición del PER

Para medir el PER se usa los datos de tráfico que se pueden tomar de los AP usados en el proyecto, ver Figura 3-18. Con estos datos se puede obtener el PER a partir de la Ecuación (3-7):

$$PER = \frac{\text{Receiving errors}}{(\text{Received Frame Count})} \times 100 \quad (3-7)$$

SCALANCE W788-1PRO Access Point Servidor-W788			
Traffic statistics on the Wireless Interface			
Authentications:	1	Deauthentications:	1
	Receive	Transmit	
Rate:	11.0 Mbits	11.0 Mbits	
Signal strength:	100%	N/A	
Frame count:	81585	87591	
Bytes count:	52196444	7382237	
Data frame count:	81586	86972	
Data bytes count:	53666506	7283396	
Unicast:			This counter shall be incremented on the length of the frame for each successful client.
Multicast:			
Broadcast:	5	80	
Control frames:	0	0	
Management frames:	2271	739	

Errors statistics on the Wireless Interface			
Errors			
Receiving errors:	1530	Transmission errors:	52559
Discarded frames:	2	Dropped frames:	75
Acknowledged errors:	65100	Filtered frames:	49717
Duplicate frames:	2	RTS errors:	3348
CRC errors:	1530	Transmission retries:	27728
Encryption errors:	0		

Figura 3-18. Imagen con los datos de tráfico tomados de los módulos Scalance.

Fuente: Autor.

Todas las medidas del PER se hicieron para un periodo de 5 minutos con el sistema inalámbrico transmitiendo datos y la fuente de microondas emitiendo ruido.

3.3.4 Metodología de medición

Una vez se tenga implementado el esquema propuesto en la Figura 3-10, se procede a realizar la variaciones de las métricas de desempeño mencionadas anteriormente como se explica a continuación.

En una prueba inicial, se dejó encendido el microondas con una carga de agua durante 10 minutos, la intensidad de campo, el ancho de banda y la frecuencia central del ruido emitido fue de -19.5 dBm, 130 MHz y 2444 MHz respectivamente, ver Figura 3-19. Con esto se evidencia que el horno afecta el rango de frecuencias de 2340 – 2528 MHz en los cuales opera IEEE 802.11 b, g y g Turbo.

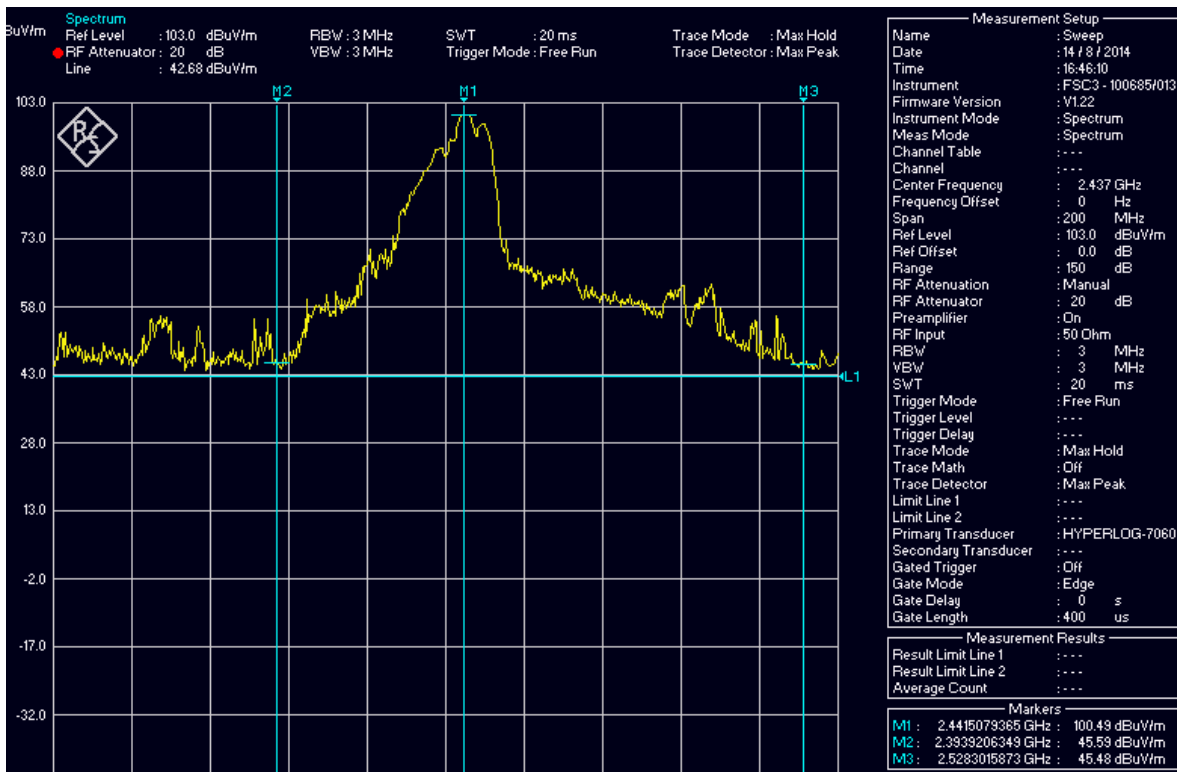


Figura 3-19. Medidas del ruido emitido por los hornos microondas.

Fuente: Autor.

Para el experimento con el radio enlace funcionando, se tomaron tres medidas, la primera con los microondas apagados, le segunda con los microondas encendidos durante 3 minutos y a una distancia de 100 cm del servidor y del cliente, y la tercera, igual que la anterior pero con una distancia de 20 cm, con esto se obtuvieron SNR promedio de 29.54 dBm, 10.985 dBm y 0.66 dBm respectivamente.

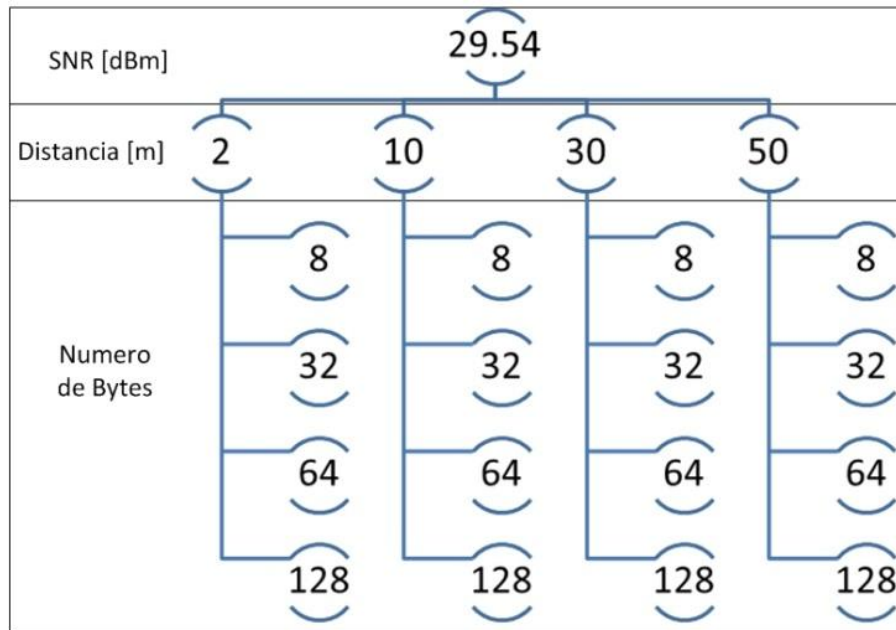


Figura 3-20. Esquema sobre la metodología de medición.

Fuente: Autor.

En la Figura 3-20 se presenta un esquema sobre la metodología de medición para el radio enlace con las variaciones de SNR, distancia y número de datos a enviar. Como primer paso se dejan los hornos apagados, con lo que se obtiene un SNR de 29.54 dBm, luego se fijan los AP con una separación inicial de 2 metros, para esta distancia se varía el tamaño de datos a enviar con paquetes de datos de 8, 32, 64 y 128 bytes, se toman 10 medidas del RTT y una del PER para cada uno de los protocolos a evaluar, IEEE 802.11 a, h, b, g y g Turbo, luego se cambia la distancia de los AP a 10 metros y se toman medidas nuevamente para cada protocolo, se continúa haciendo medias hasta cubrir las distancias de 30 y 50 metros. Se repite todo el proceso nuevamente, ahora encendiendo los hornos, para SNR de 10.985 dBm y 0.66 dBm, hay que tener en cuenta que para estos dos últimos casos no se hicieron mediciones para IEEE 802.11 a y h ya que operan en la banda de los 5 GHz y por tanto el ruido de las microondas no los afecta.

Con esta metodología, se tomaron 1760 mediciones calculadas así, para SNR=29.54 dBm, variando 4 veces la distancias, 4 veces el tamaño de bytes, 5 protocolos y tomando 10 medidas del RTT se tienen 800 mediciones del RTT, para SNR=10.985 dBm y 0.66 dBm se toman las mismas variaciones pero sin tener en cuenta los protocolos IEEE 802.11 a y h con lo que da 960 medidas de RTT para cada SNR, dando un total de 1760 mediciones.

3.4 Resultados obtenidos con la metodología de medición

A continuación se presenta un análisis comparativo entre las redes cableadas Profibus, Ethernet y las redes inalámbricas con los estándares IEEE 802.11a, h, b, g y g Turbo. Cabe resaltar nuevamente que las redes cableadas se usan como punto de referencia y comparación para el desempeño de las redes inalámbricas.

Inicialmente se muestran los resultados para las mediciones del RTT para redes cableadas variando la distancia de comunicación y el número de datos transmitidos, luego se presentan los resultados de las mediciones realizadas para las comunicaciones inalámbricas variando los mismos parámetros, y dada la naturaleza del medio de comunicación, se evalúan otros dos parámetros que son, el SNR y el PER.

Para mostrar los datos obtenidos, se usan gráficas Box-plots que son diagramas basados en cuartiles, compuesto por una caja donde se ubican los cuartiles uno, el dos que es la media que se idéntica con la línea roja y el cuartil tres. Además cuenta con dos brazos que indican el valor máximo y mínimo de la muestra. Cuando un dato esta fuera de este rango (signo más), se considera un dato atípico. De esta forma se tienen variables estadísticas interesantes en un solo gráfico. También se usa la función de distribución de probabilidad (PDF) para comparar los resultados obtenidos en los diferentes protocolos. La PDF tiene forma de campana he indica cual es la probabilidad de que un dato de la muestra ocurra. Idealmente, los RTT para las comunicaciones industriales deberían tener un PDF con una campana cerrada, ya que indicaría un menor rango de RTT que lo harían determinístico.

3.4.1 Resultados y análisis para redes cableadas

A continuación se presenta los resultados y su análisis para comunicación Profibus y luego para la comunicación Ethernet cableada.

- *Resultados y análisis para Profibus:* En la Figura 3-21 se muestran los resultados obtenidos para la comunicación Profibus DP, en a) se presenta las gráficas boxplot que muestran como varía el RTT de acuerdo al número de bytes para cada una de las distancias de prueba. En b) se presentan los mismos datos, pero mostrando como varían el RTT de acuerdo a la distancia para cada paquete de datos enviado.

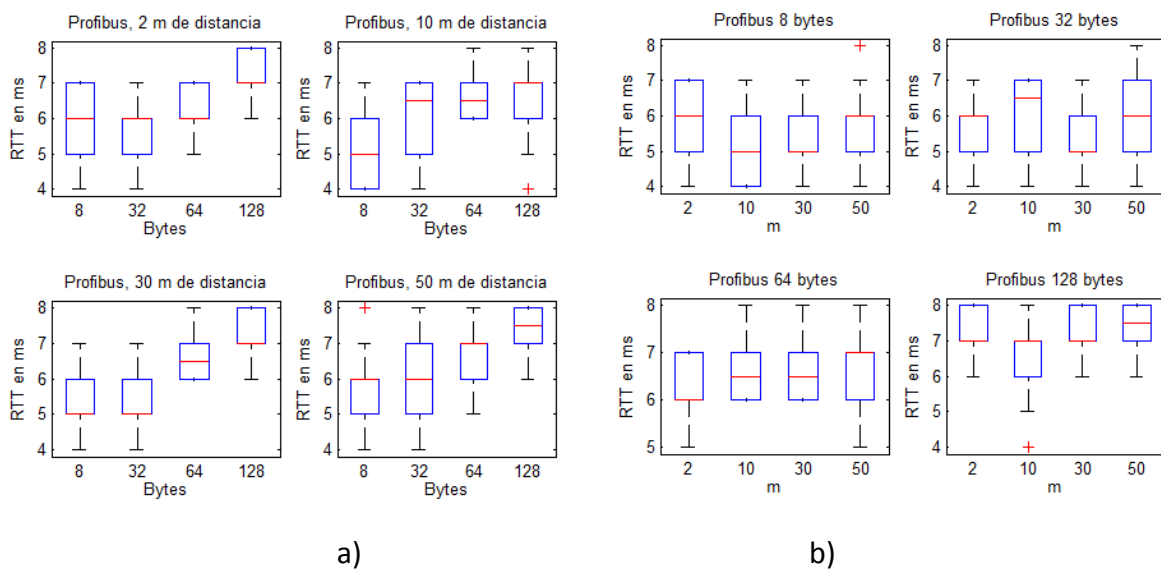


Figura 3-21. Resultados Profibus.

Fuente: Autor.

De las gráficas se puede observar que en ninguna de las pruebas, el RTT máximo sobrepaso los 10 ms, llegando a un promedio máximo de 7.50 ms en la comunicación a 50 metros y 128 bytes, además se tiene una baja dispersión de los datos, que van desde los 4 ms a los 9 ms. La Figura 3-21 a) muestra que en la medida que aumenta el número de bytes transmitidos, el RTT va aumentando, empezando con un RTT promedio mínimo

de 5.01 ms para 10m y 8 bytes, hasta un RTT promedio máximo de 7.5 ms para 128 bytes y 50 m. En b) no se muestra una tendencia clara del aumento del RTT con la distancia, esto se debe a que Profibus permite enviar datos a una distancia de 1200 metros sin uso de repetidores, haciendo que 2, 10, 30 y 50 metros no sea una distancia significativa comparada con 1200 metros. Vale aclarar que para los objetivos del proyecto solo hace pruebas con distancias significativas para las comunicaciones de industrial Ethernet inalámbrico de tal forma que se permita hacer una comparación. Los resultados muestran que Profibus DP cumple con las características del protocolo, que establece que es una comunicación determinística con retardos inferiores a 10 ms, lo que sin duda lo hace ideal para comunicaciones donde los retardos máximos no puedan ser mayores a este valor.

- **Resultados y análisis para Ethernet cableada:** En la Figura 3-22 se muestran los resultados obtenidos para la comunicación Ethernet, en a) se presenta las gráficas boxplot que muestran como varía el RTT de acuerdo al número de bytes para cada una de las distancias de prueba. En b) se presentan los mismos datos, pero mostrando como varían el RTT de acuerdo a la distancia para cada paquete de datos enviado.

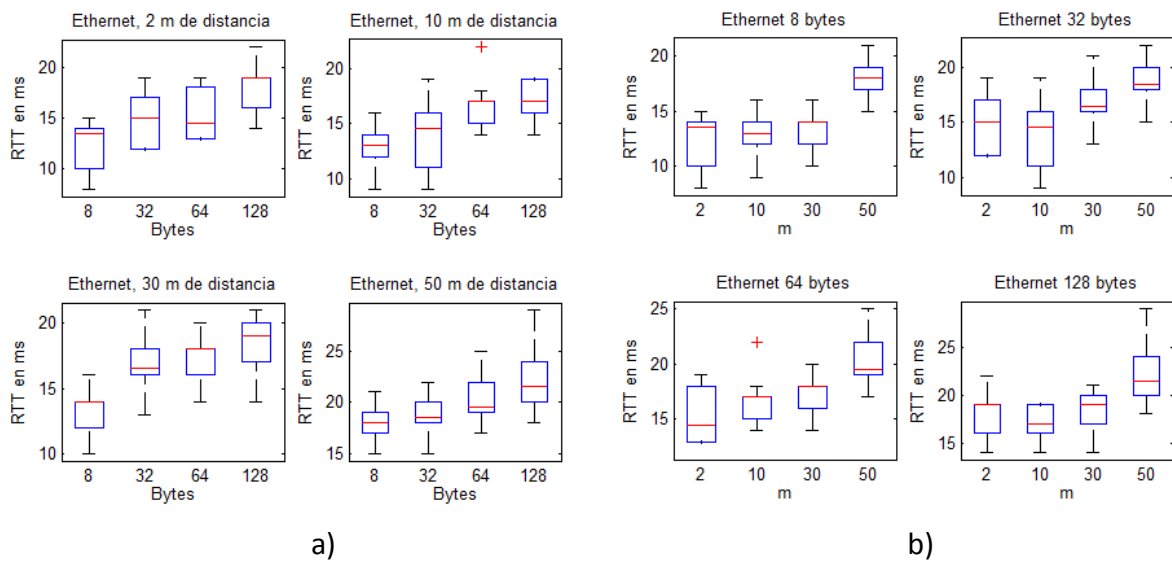


Figura 3-22. Resultados Ethernet cableado.

Fuente: Autor.

El máximo retardo para estas pruebas fue de 29 ms que se muestra en 128 bytes y 50 metros, el promedio máximo del RTT que se midió fue de 21.5 ms para una distancia de 50 metros y el paquete de datos de 128 bytes, la dispersión de datos va desde los 8 ms hasta los 29 ms, mucho mayor que los de Profibus. En la Figura 3-22 a) se ve que cuando aumenta el tamaño del paquete de datos el RTT aumenta, por ejemplo para 2 metros, con 8 bytes se pasa de 13.5 ms a 19 ms para 128 bytes, de igual forma en b), cuando la distancia aumenta el RTT aumenta.

Para ambas pruebas se evidencia que la distancia no afecta de forma tan significativa la latencia, por el contrario el tamaño de paquete de datos si lo hace. Además se puede observar que los RTT de Ethernet son muy superiores a los de Profibus, que en ningún momento supero los 10 ms, pero que si se tiene en cuenta a [28], que afirma que para procesos de control los retardos máximos permitidos son de 50 ms, todas las pruebas realizadas para Ethernet cumplen con este requerimiento.

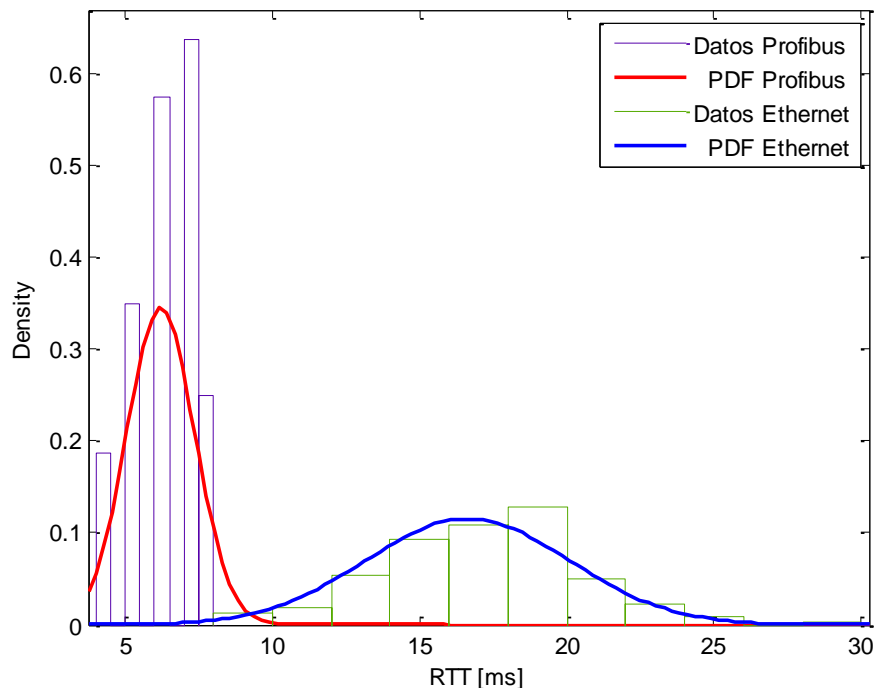


Figura 3-23. PDF para datos de Ethernet y Profibus.

Fuente: Autor.

En la Figura 3-23 se presenta la PDF para todos los datos obtenidos en Profibus y Ethernet, la PDF de Profibus muestra una campana más cerrada con valores entre 0 y 9 ms, que indica claramente que es un protocolo determinista, la PDF de Ethernet es una campana más abierta con valores entre los 9 y los 25 ms con una probabilidad máxima en los 17 ms.

Estos resultados serán usados como punto de comparación para los resultados obtenidos de las redes inalámbricas, permitiendo hacer un análisis más objetivo sobre el desempeño estas comparadas con el desempeño de las comunicaciones cableadas, que han sido por años los sistemas de comunicación más usados en la industria.

3.4.2 Resultados y análisis para redes inalámbricas

Para las pruebas con redes inalámbricas se tuvieron en cuenta los mismos parámetros usados en las pruebas con redes cableadas, además se agregaron otros dos parámetros para evaluar el desempeño y las condiciones de correcto funcionamiento, que son el SNR y el PER. Como se tomaron 3 promedios para hacer las variaciones del SNR (29.54 dBm, 10.985 dBm y 0.66 dBm) catalogadas en alta, media y baja respectivamente, se presentan los resultados clasificados de acuerdo a el SNR para cada protocolo evaluado, a su vez se ira haciendo el respectivo análisis de cada gráfica.

- *SNR alta (29.54 dBm):* Este SNR corresponde a un medio de propagación sin ruido o con una alta relación señal a ruido, relativamente ideal para comunicaciones inalámbricas y que servirá como punto de referencia para los resultados con las otras SNR.

En la Figura 3-24 a) se muestran los resultados para 802.11a configurado para transmitir a 54 Mbps, con RTT's que van desde los 9 ms para 2 metros y 8 bytes, hasta los 41 ms para 50 metros y 128 bytes, el máximo retardo medio corresponde 29 ms para 128 bytes y 50 metros. En b) se presentan los resultados para 802.11h que transmite a 54 Mbps, los RTT's van desde 9 ms hasta los 43 ms que corresponde a 50 metros y 128 bytes, el

máximo RTT promedio para esta medida corresponde a 31.5ms para 128 bytes y 50 metros.

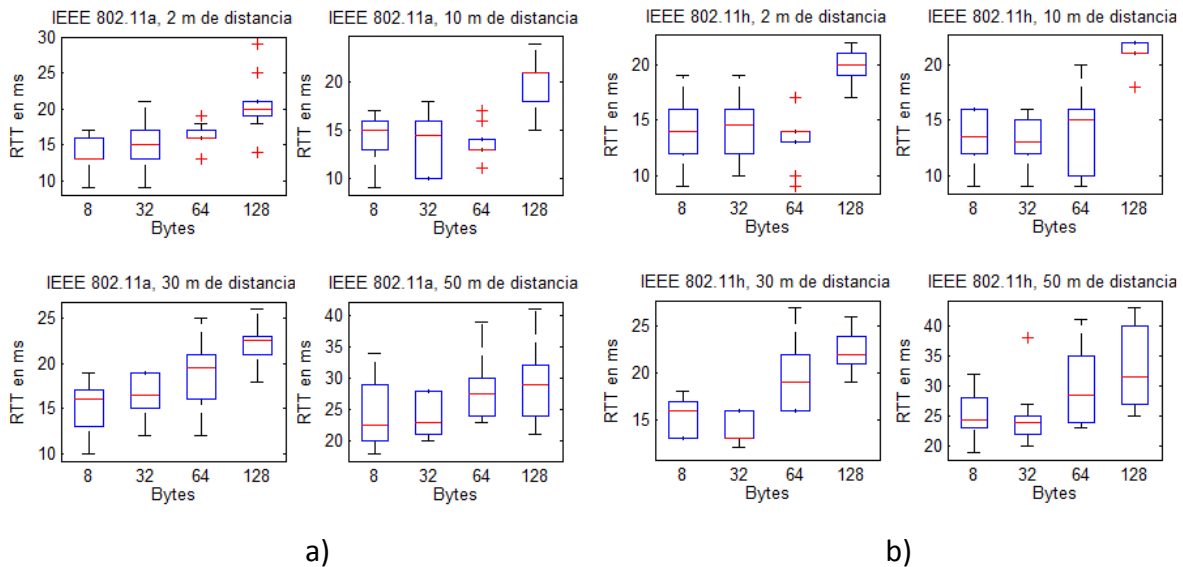


Figura 3-24. Resultados para 802.11 a y h.

Fuente: Autor.

Analizando las gráficas anteriores, se puede ver que los resultados para ambos protocolos, que operan en la banda de los 5 GHz, son muy similares, la dispersión de datos están entre los 9 ms y los 45 ms, se observa que cuando sube el tamaño de datos o la distancia los RTT aumenta, sin nunca sobrepasar los 45 ms, si se tiene en cuenta los requerimientos de latencia máxima de 50 ms para procesos de control en tiempo real, se puede concluir que ambos estándares operan bien bajo estas condiciones, además, al operar en la frecuencia de los 5 GHz puede mejorar la SNR ya que no hay interferencia de múltiples dispositivos que operan en las banda de los 2.4 GHz o frecuencias cercanas como por ejemplo AP que se usen para la red inalámbrica de las oficinas, o cercanas como las de celular que operan en la banda de los 1.8-1.9 GHz.

En la Figura 3-25 a) se presentan los resultados obtenidos para 802.11 b que opera a una velocidad máxima de 11 Mbps, los RTT's promedio van desde 15 ms para 2 metros y 8 bytes, hasta los 50.5 ms para 128 bytes y 50 metros. El máximo retardo medido

marco los 87 ms para 8 bytes y 50 metros. En b) se dan los RTT medidos para 802.11 g transmitiendo a 54 Mbps, en esta caso, los RTT promedio va desde los 16 ms para 8 bytes y 2 metros hasta los 50.5 ms para 64 bytes y 50 metros, con un RTT máximo de 104 ms para 128 bytes y 50 metros.

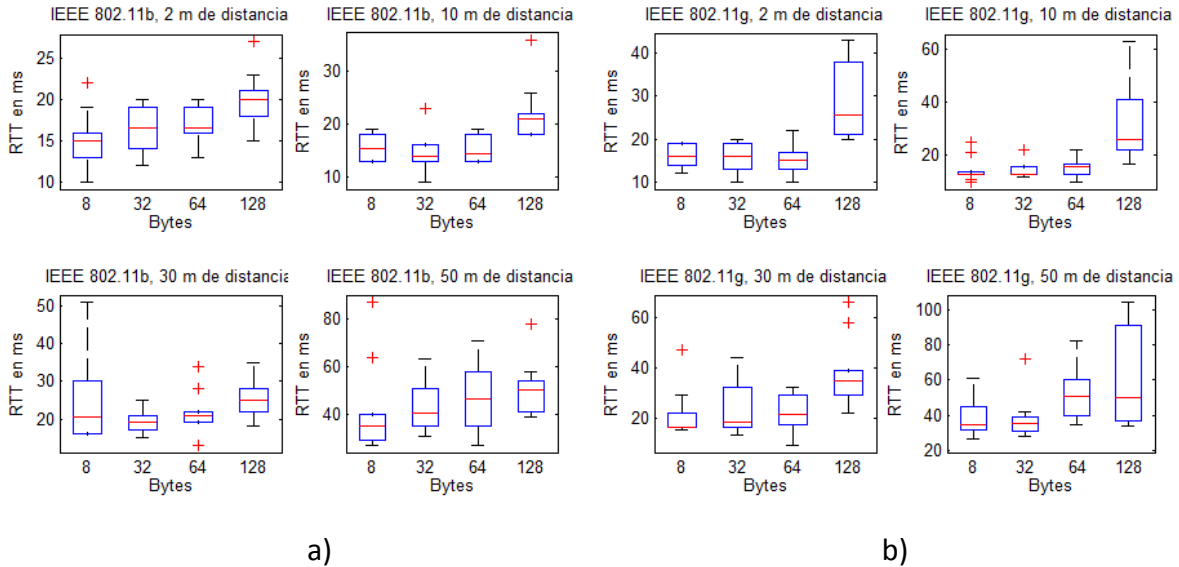


Figura 3-25. Resultados para 802.11 b y g.

Fuente: Autor.

Los resultados para estos dos protocolos no son mejores que para los que operan en la banda de los 5 GHz, pero teniendo en cuenta el límite de los 50 ms, se puede establecer que operan adecuadamente hasta los 30 metros donde ningún promedio supero este límite, sobre todo el 802.11 b, ya que para el g dos mediciones marcaron un valor de RTT superior a los 50 ms.

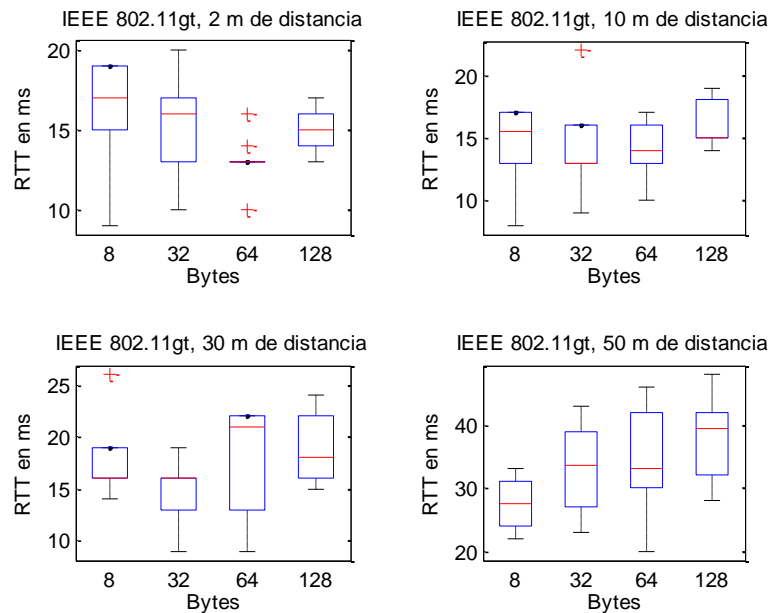


Figura 3-26. Resultados para 802.11 g Turbo.

Fuente: Autor.

En la Figura 3-26 se grafican los resultados de los RTT obtenidos para el 802.11 g Turbo operando a 108 Mps. Los retardos promedios van desde los 13 ms para 32 bytes y 10 metros, hasta los 39.5 ms para 128 bytes y 50 metros, con un RTT máximo de 48 ms. Los resultados mostrados, indican un buen desempeño para este protocolo, con retardos promedios mucho menores que los del 802.11 b y g, además sus RTT promedio he individuales en ninguna prueba sobrepasaron el umbral de los 50 ms.

Por último, en la Figura 3-27 se presenta el PDF para todos los resultados obtenidos en cada uno de los protocolos evaluados con una SNR de 29.54 dBm, se puede apreciar que los estándares IEEE 802.11 a, h y g Turbo obtuvieron resultados muy similares, con baja distribución de datos, entre los 9 y los 35 ms, con mayor densidad de probabilidad en los 20 ms. Para IEEE 802.11 b y g las gráficas muestran una mayor distribución de datos, que va entre los 10 y los 60 ms, con mayor densidad de probabilidad en los 28 ms.

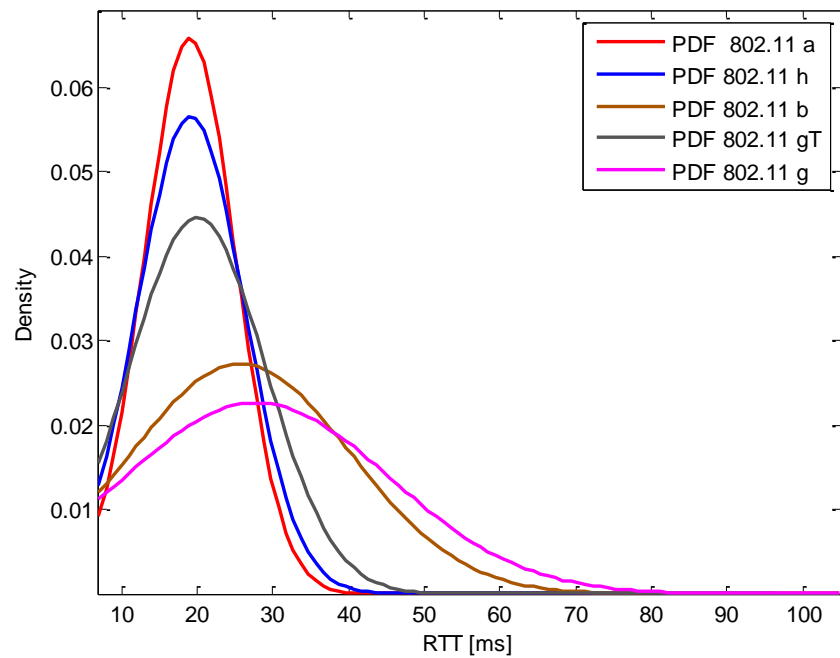


Figura 3-27. PDF para resultados de redes inalámbricas con SNR=29.54 dBm.

Fuente: Autor.

- *SNR media (10.985 dBm):* Comparado con la anterior SNR, esta se puede considerar un nivel de ruido intermedio. En la Figura 3-28 se muestra los resultados para 802.11 b y g y en la Figura 3-29 los de 802.11 g Turbo, para una SNR de 10.985 dBm. Las gráficas muestran las mismas tendencias que en el caso anterior, es decir, un incremento en el RTT promedio cuando aumenta la distancia de comunicación y el tamaño del paquete de datos.

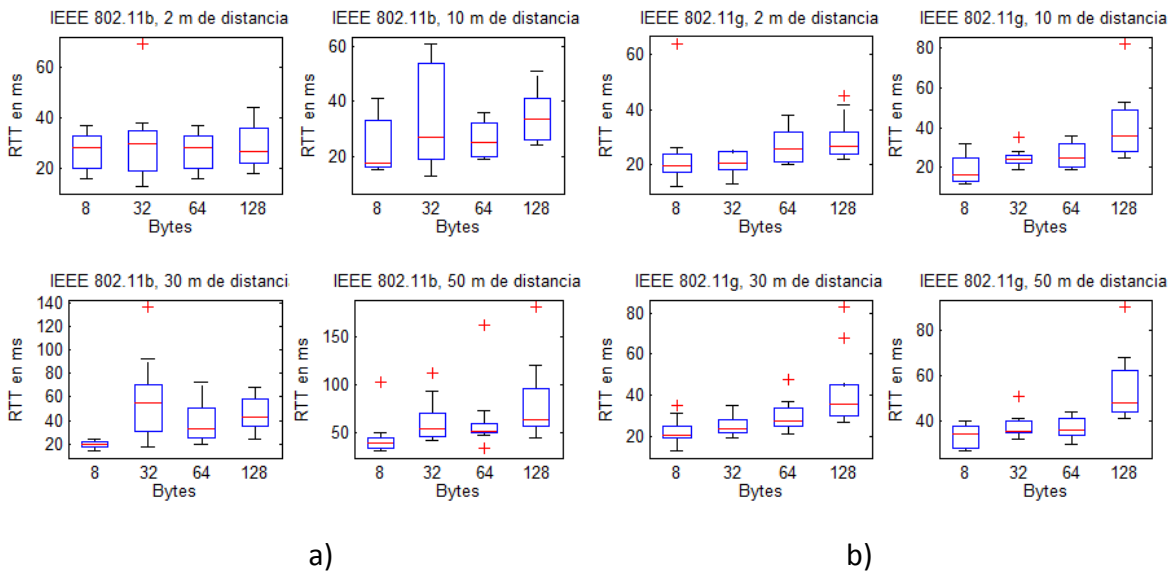


Figura 3-28. Resultados para 802.11 b y g.

Fuente: Autor.

La Figura 3-28 a) corresponde a los resultados para 802.11 b, en esta se puede apreciar que para distancias de dos y diez metros, se midieron valores del RTT de 65 ms, pero en ningún caso los promedios superan los 50 ms, este umbral se sobrepasó para las pruebas de 30 m y 32 bytes, y a partir de los 32 bytes para los 50 m. Para la Figura 3-28 b) se muestran los resultados para 802.11 g, en ninguna de las pruebas se obtuvieron RTT promedios superiores a los 50 ms, aunque se puede ver que algunas medidas del RTT superan este umbral.

En la Figura 3-29 se muestran los resultados para 802.11 g Turbo, en todas las pruebas se obtuvieron buenos resultados en términos del RTT, ya que en ningún momento sobrepasa la barrera de los 50 ms siendo el más ideal para comunicar procesos de control con requerimientos de retardos mínimos.

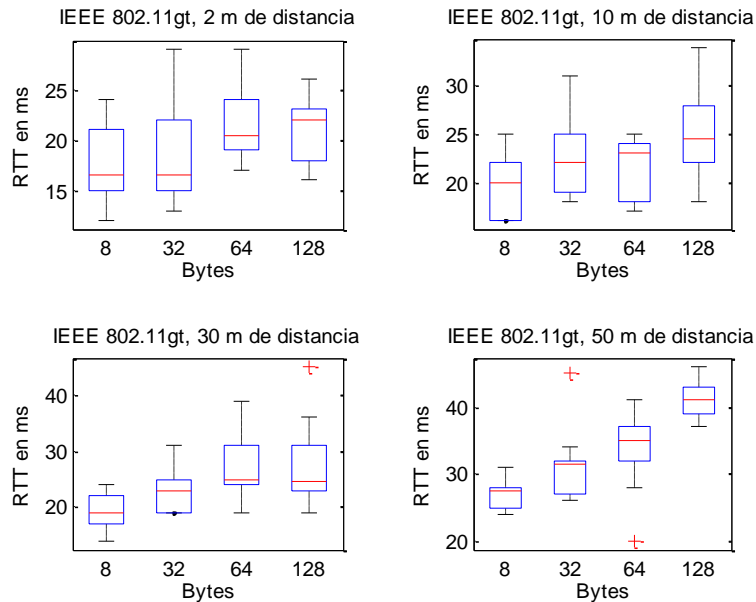


Figura 3-29. Resultados para 802.11 g Turbo.

Fuente: Autor.

La PDF de los protocolos, muestra una mejor comparación de su desempeño en lo referente a los RTT, ver Figura 3-30, la menor dispersión de datos y los menores RTT medidos fue para 802.11 g Turbo con una densidad de probabilidad máxima de 0.053 en 24.03 ms, seguido de 802.11 g con una densidad máxima de 0.0348 a 31.07 ms, los mayores RTT para estas características se midieron en 802.11 b cuya máxima densidad fue de 0.01531 a 39.83 ms, además de una mayor apertura de la distribución, con valores entre los 9 y 100 ms.

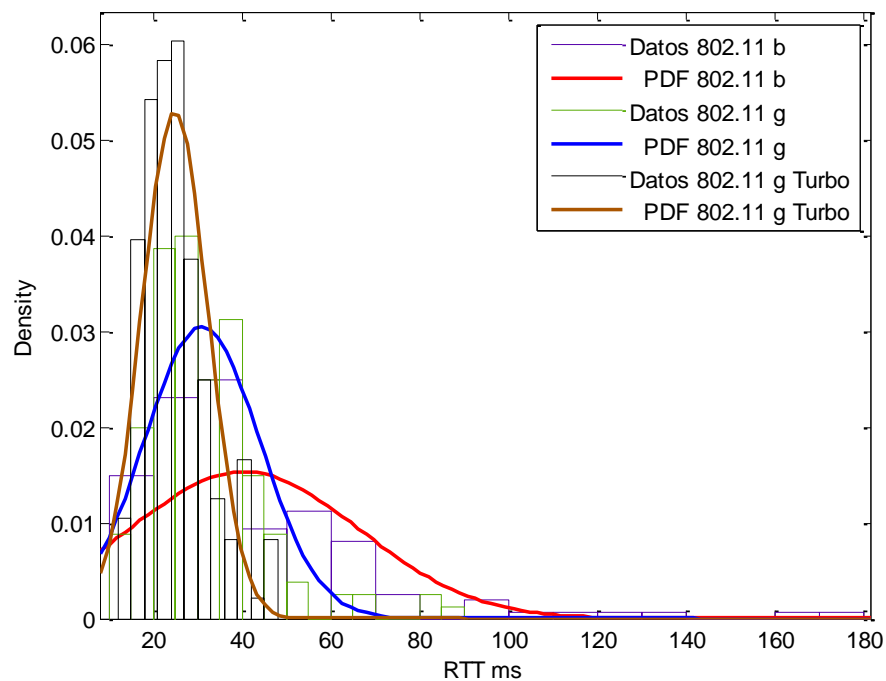


Figura 3-30. PDF para resultados de redes inalámbricas con SNR=10.985 dBm.

Fuente: Autor.

- *SNR baja (0.66 dBm):* En una SNR de 0.66 el nivel de potencia del ruido, producido por los microondas, es casi igual al nivel de potencia de la señal de información, de hecho, como este valor es un promedio de las mediciones de ruido cuando los microondas están a 10 cm de los AP, en algunas mediciones la SNR marco los -5.20 dBm lo que indica que la señal de potencia del ruido es superior a la señal de información. Por tal motivo se puede considerar un ambiente con altos niveles de ruido.

En la Figura 3-31 a) se presentan los resultados obtenidos para el estándar 802.11 b operando con esta SNR. Se puede observar que para distancias de dos metro, este protocolo puede operar sin sobrepasar los 50 ms en los RTT promedios. En 10 metros puede operar hasta los 64 bytes, para 128 el RTT promedio fue de 90 ms, muy superior a los 50 ms máximos permitidos. Para 30 metros, opera bajo los 50 ms con paquetes de 8, 32 y 64 bytes, en 128 bytes el RTT promedio fue de 98.5 ms, en los 50 metros solo se está por debajo del umbral con 8 bytes de datos. En la Figura 3-31 b) se presentan los resultados obtenidos para el estándar 802.11 g, estos muestran buen desempeño para

distancias de 2 metros. En 10, 30 y 50 metros con 8 bytes, los RTT promedios son muy cercanos al umbral, de ahí en adelante se superan los 50 ms.

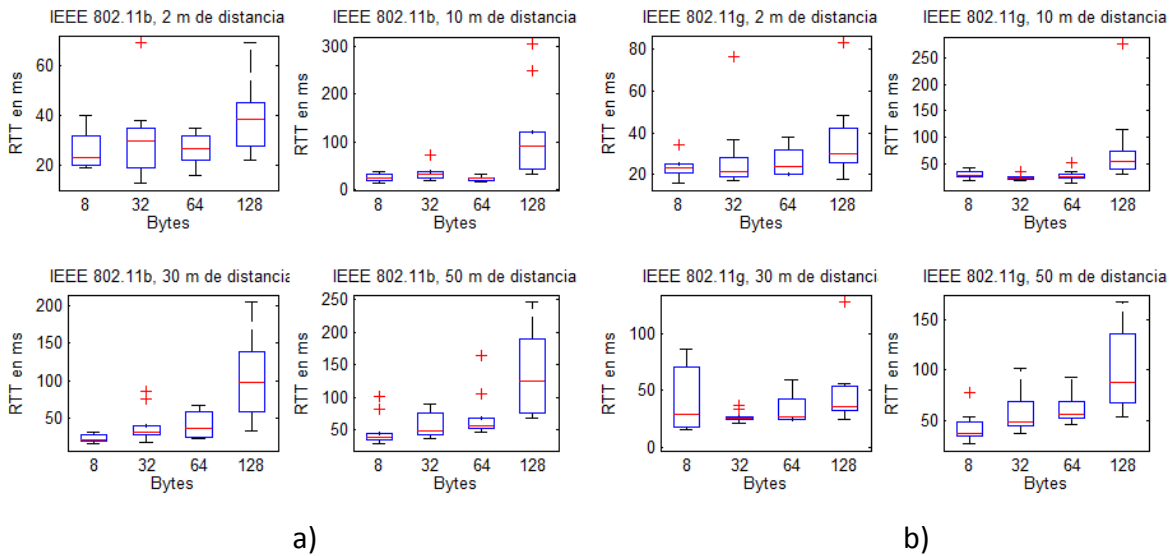


Figura 3-31. Resultados para 802.11 b y g.

Fuente: Autor.

Para ambos protocolos, se recomienda tener precaución cuando operan bajo estos requerimientos, porque si bien, los RTT promedio no superan los 50 ms, varios de las mediciones individuales si superan, y por amplio margen, este valor, por ejemplo se midieron retardos con valores de hasta los 300 ms.

En la Figura 3-32 se presentan los resultados para 802.11 g Turbo. Para 2, 10 y 30 metros, el RTT promedio nunca supero la barrera de los 50 ms, con retardos que van desde los 19 ms para 2 metros y 8 bytes, hasta los 28 ms para 30 metros y 64 bytes. En 50 metros se obtuvieron RTT por debajo del umbral para 8, 32 y 64 bytes, para 128 bytes el RTT promedio fue de 61.5 ms.

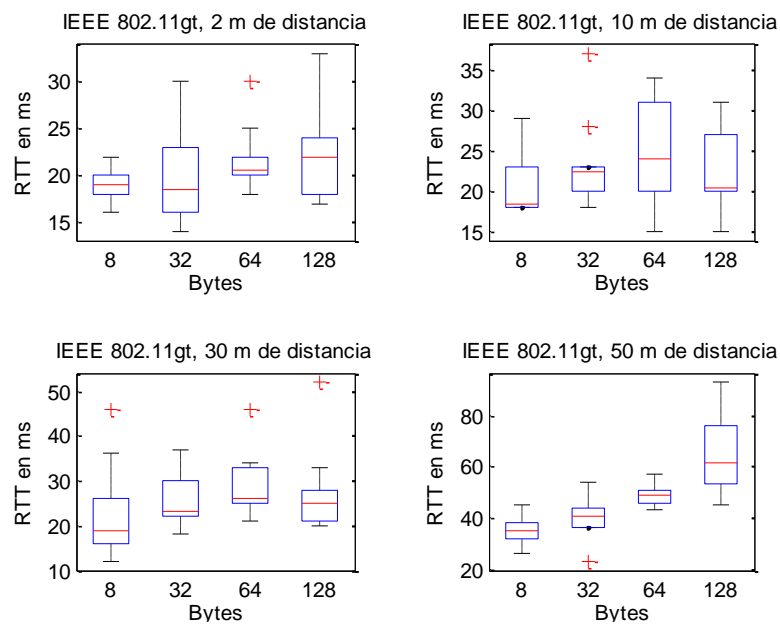


Figura 3-32. Resultados para 802.11 g Turbo.

Fuente: Autor.

Comparado con los protocolos anteriores, 802.11 g Turbo es el que mejor desempeño tiene para todos los niveles de SRN probados, de la Figura 3-33 se puede ver que g Turbo tiene una dispersión de datos menor que los demás protocolos, con valores entre 10 y los 62 ms con una densidad pico de 0.028 para 31.73 ms. Para 802.11 b la dispersión de los datos está entre 10 y 152 ms con una densidad pico de 0.008 en 53 ms. En 802.11 g la dispersión de datos está entre 10 y 120 ms, con densidad pico máxima de 0.012 para 48 ms.

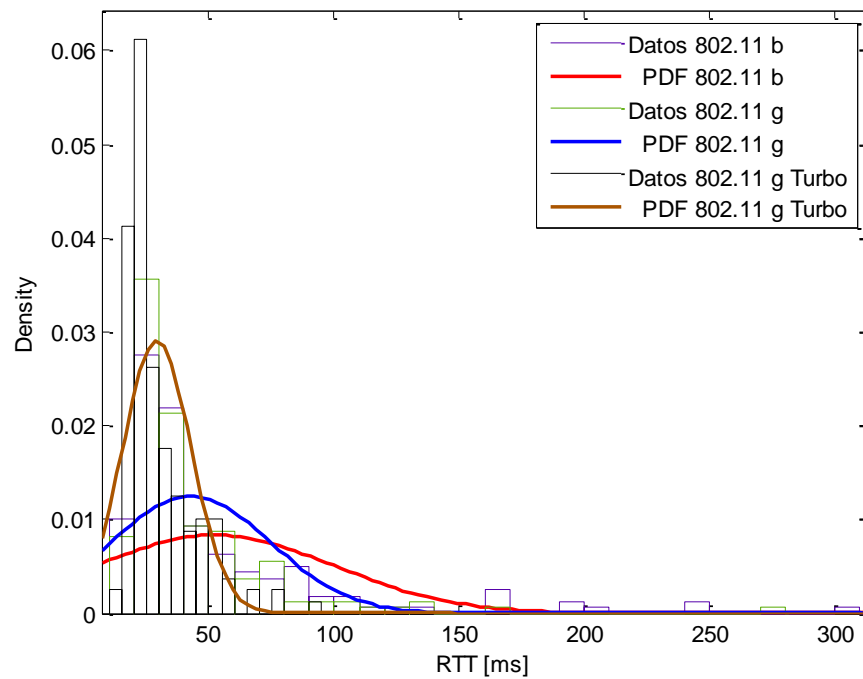


Figura 3-33. PDF para resultados de redes inalámbricas con SNR=0.66 dBm.

Fuente: Autor.

- PER: Como se mencionó en el marco teórico, el PER es un parámetro relacionado con la interferencia, el ancho de banda y la potencia de la señal. En la Figura 3-34 se muestra la relación que existe entre el PER y los parámetros antes señalados, de las gráficas se puede observar como el PER aumenta cuando disminuye la SNR, por ejemplo, para SNR Vs PER con 8 bytes de datos y 10 metros entre los AP, el PER pasa de 3.2% para una SNR de 30, a 8.1% para SNR de 0.5 para 802.11b. De igual forma, se observa que cuando aumenta el tamaño de datos el PER se incrementa, con 8 bytes de datos y 10m, el PER pasa de 8.1% a 39.4% en 128 bytes para SNR de 0.5 y 802.11b.

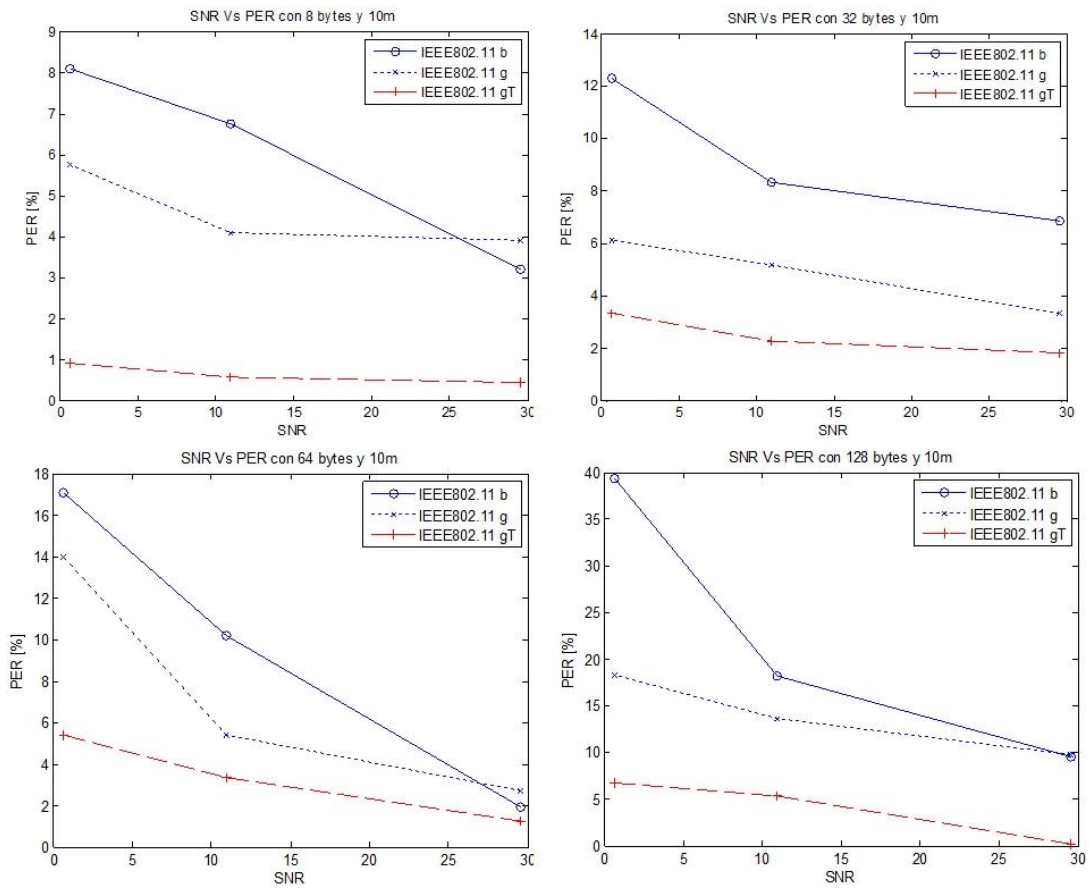


Figura 3-34. SNR Vs PER para distancia de 10 metros y 8, 32, 64 y 128 bytes de datos.

Fuente: Autor.

Por último, las gráficas muestran que cuando más ancho de banda tenga el protocolo menor será el PER, 802.11 g Turbo tiene un ancho de banda de 108 Mbps y es al que menor PER se le midió, siempre por debajo del 6%, para 802.11g el ancho de banda es de 54 Mbps y PER estuvo por debajo del 20%, el mayor PER se muestra para 802.11 b que cuenta un ancho de banda de 11 Mbps con un PER máximo del 40%. Estos datos también muestra que cuando mayor es el PER mayor será el RTT, cuyos valores máximos se obtuvieron para 802.11 b con 30 metros y 128 bytes.

Los resultados y conclusiones presentados en este capítulo muestran cuales son los límites de operación de las redes inalámbricas en comparación con las redes cableadas. Si bien las redes cableadas tienen mejor desempeño que las inalámbricas, se logró establecer bajo qué condiciones, estas pueden operar de forma adecuada dentro de un rango de retardos permitidos de hasta 50 ms, que como se mencionó anteriormente, es permisible para muchos de los sistemas de control aplicados en la industria. Como las conclusiones se abordan en cada prueba, en el siguiente capítulo se recopilarán estos datos para ser presentados de forma más compacta, útil y simple en una tabla.

3.5 Condiciones de uso óptimo de la conexión inalámbrica WiFi empleada

Los resultados anteriores demuestran que si bien las redes inalámbricas no pueden igualar los retardos medidos para las redes cableadas, si se pueden establecer las condiciones para que los retardos no sean superiores a los establecido por [28] con 50 ms en la mayor parte de los procesos de control. Con los resultados anteriores, se puede establecer los limitantes de operación con retardos menores a 50 ms, para los protocolos 802.11 b y g y g Turbo.

La Tabla 3-7 condensa los resultados obtenidos en el subcapítulo anterior. En esta, se presentan las condiciones de uso para 802.11 b, g y g Turbo teniendo en cuenta tres parámetros: SNR, distancia y cantidad de datos. El desempeño de los protocolos se clasificó en tres estados que son: Recomendado, Precaución y no Usar. El estado “Recomendado” se estableció para RTT’s individuales y promedios que no superan el umbral de los 50 ms bajo los parámetros establecidos, por lo tanto, como lo indica el nombre del estado, el protocolo se puede usar para comunicar procesos de control con RTT menores a 50 ms con las características indicadas en la tabla, por ejemplo, se puede observar que 802.11 g Turbo está “Recomendado” cuando la SNR medida en el medio es mayor o igual 0.66 dBm , la distancia entre los AP’s es máximo de 10 metros y se transmiten como máximo 128 bytes de información. El estado “Precaución” se definió para los resultados donde los RTT’s promedio estuvieron por debajo del umbral, pero algunas mediciones individuales de los

RTT superaron los 50 ms, por esta razón se recomienda su uso en procesos de control que admitan retardos ocasionales mayores al umbral, por ejemplo, de la tabla se puede observar que 802.11 g está en “Precaución” para una SNR entre 29.54 y 10.98 dBm, distancias entre 10 y 50 metros y tamaño de datos de 128 bytes. El estado “No usar” se estableció para los resultados donde los RTT’s promedio fueron mayores al umbral, y por tanto no se debe usar para comunicar procesos de control con requerimientos de retardos menores a los 50 ms, por ejemplo, de la tabla se puede observar que ninguno de los tres protocolos se debe usar para distancias entre los AP’s a partir de los 50 metros, SNR menores o iguales a 0.66 dBm y tamaño de datos a partir de los 128 bytes.

Tabla 3-7. Condición de uso óptimo para 802.11 b, g y g Turbo

		Recomendado			Precaución			No usar					
SNR [dBm]	Distancia [m]	Bytes											
		8			32			64			128		
$SNR \geq 29.54$	2	b	g	gT	b	g	gT	b	g	gT	b	g	gT
	10	b	g	gT	b	g	gT	b	g	gT	b	g	gT
	30	b	g	gT	b	g	gT	b	g	gT	b	g	gT
	50	b	g	gT	b	g	gT	b	g	gT	b	g	gT
$29.54 \geq SNR \geq 10.985$	2	b	g	gT	b	g	gT	b	g	gT	b	g	gT
	10	b	g	gT	b	g	gT	b	g	gT	b	g	gT
	30	b	g	gT	b	g	gT	b	g	gT	b	g	gT
	50	b	g	gT	b	g	gT	b	g	gT	b	g	gT
$SNR \geq 0.66$	2	b	g	gT	b	g	gT	b	g	gT	b	g	gT
	10	b	g	gT	b	g	gT	b	g	gT	b	g	gT
	30	b	g	gT	b	g	gT	b	g	gT	b	g	gT
	50	b	g	gT	b	g	gT	b	g	gT	b	g	gT

Fuente: Autor.

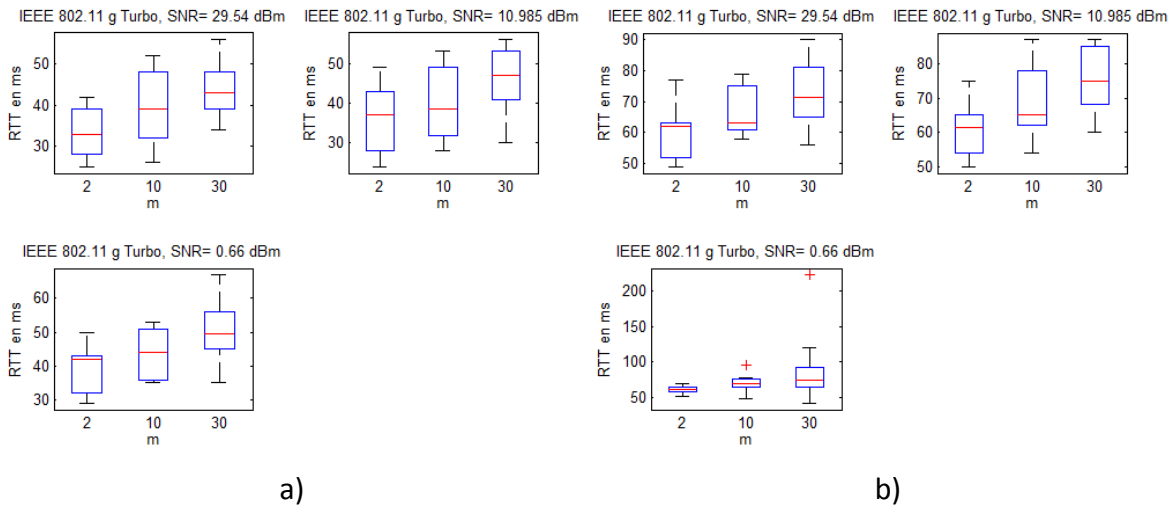


Figura 3-35. Resultados para 802.11 g Turbo con 256 bytes.

Fuente: Autor.

Analizando la Tabla 3-7 se puede ver que los límites de operación hasta el estado de precaución para 802.11 b y g ya están definidos teniendo en cuenta todas las variables, en cambio, para 802.11 g Turbo se observa que puede operar en el estado recomendado para distancias de 2 y 10 metros y hasta los 128 bytes con las SNR definidas, como se pretende establecer el límite máximo al cual puede funcionar de forma correcta, se hicieron pruebas adicionales para este protocolo variando el tamaño de datos a 256 y 512 bytes. En la Figura 3-35 a) se muestran los resultados obtenidos para 802.11 g Turbo con 256 bytes de datos, se puede observar que está en el estado “Recomendado” para 2 metros y las tres variaciones de SNR, para las otras condiciones está en el estado “Precaución”, para 512 bytes de datos, Figura 3-35 b), los resultados para los RTT están en el estado “No Usar”.

3.6 Evaluación de la metodología

En la sección 3.2.3 se explicó cómo funciona el proceso de control el tiempo real al cual se le varía la SRN y la distancia entre los AP's, el número de bytes está determinado por los parámetros de control del variador. Cada 5 ms se envía el valor del Set Point desde el PC al

PLC y este lo entrega vía Profibus al Micromaster, este dato se compone de una marca llamada M22.2 de un bit para habilitar el bloque "MOVE", y una palabra denominada MW28 de 2 bytes con el valor del Set Point, para un total aproximado de 2 bytes de datos, ver Figura 3-36², luego se lee el valor real de velocidad que es retornada en la variable EW10 con un tamaño de 2 bytes, por lo tanto, para el proceso de transmisión y recepción de velocidad se usan 2 bytes de ida y 2 bytes de vuelta, estos resultados se confrontan con los resultados obtenidos más cercanos que son 8 bytes.

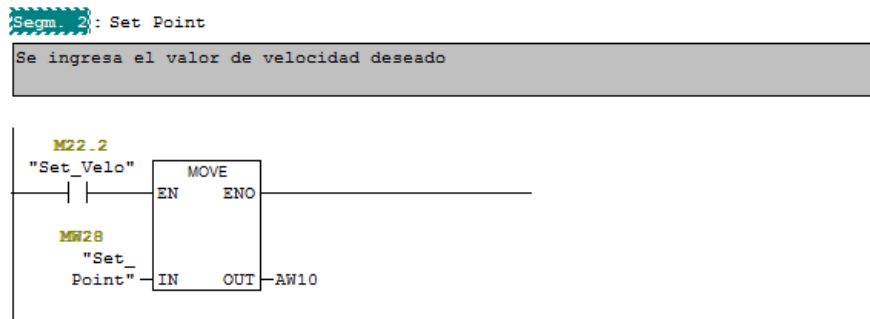


Figura 3-36. Bloque en el PLC para establecer el Set Point en el motor.

Fuente: Autor.

En este experimento, basado en el control de motores de inducción, primero se medirán los retardos que tiene el sistema de control en llegar al valor deseado usando solo la comunicación con Profibus, ver Figura 3-37, teniendo en cuenta que los RTT medidos en el capítulo anterior demostraron que no sobrepasan los 10 ms. Este retardo promedio será el cero a partir del cual se mide el retardo que introduce la comunicación inalámbrica al sistema de control y que se compara con los resultados obtenidos en el subcapítulo anterior, ver Figura 3-11. Por ejemplo, si los retardos promedios del experimento con comunicación Profibus fueron de 3529 ms, valor que demora el sistema en llegar al valor

² En el Anexo C se muestra el software diseñado en el PLC para el control del motor

del deseado, y los retardos con comunicación inalámbrica fueron 3549 ms, indica que el sistema inalámbrico introduce 20 ms de retardo más el sistema de control.

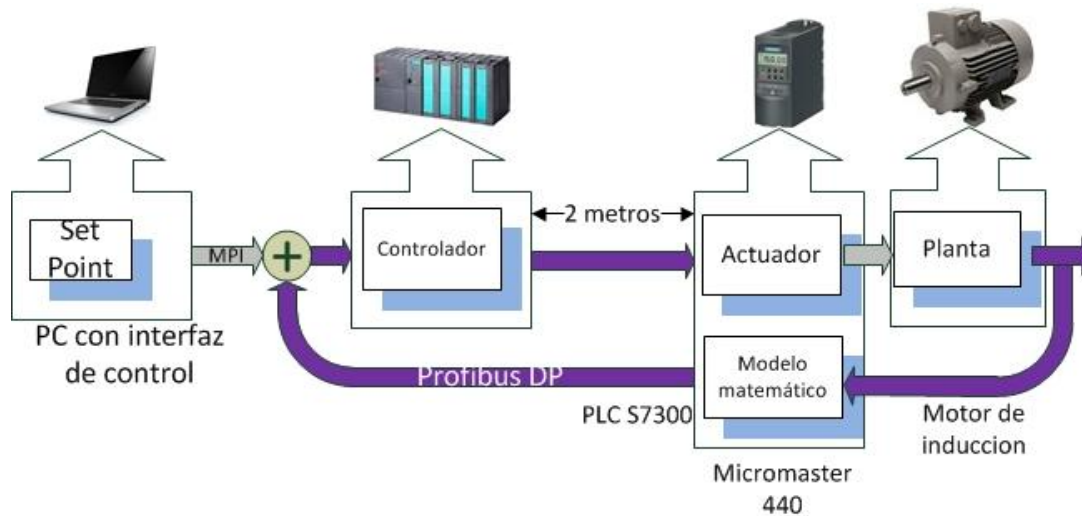


Figura 3-37. Prueba de control con Profibus.

Fuente: Autor.

En la Figura 3-38 se muestran los resultados obtenidos para la prueba de control usando Profibus a una distancia de 2 metros del PC, se puede apreciar que la respuesta, línea roja, no presenta discontinuidades.

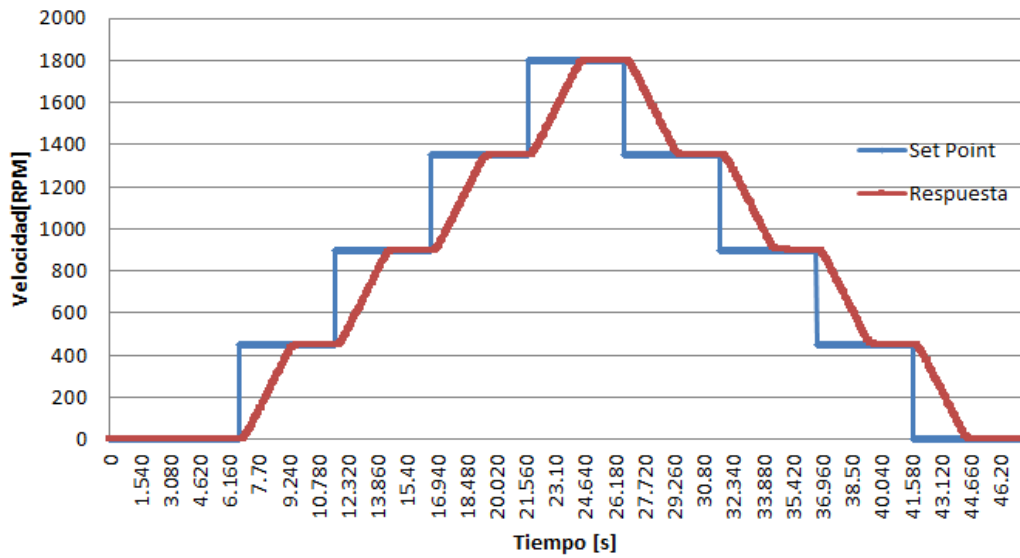


Figura 3-38. Repuesta del controlador usando comunicación Profibus con un distancia de 2 metros.

Fuente: Autor.

Con estos datos se encuentran el tiempo de referencia T_{fr} que tarda la respuesta en llegar al Set Point, los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 3-8, el tiempo promedio de referencia $\overline{T_{fr}}$ calculado es de 3.529 segundos, este será el valor de referencia o cero a partir del cual se medirá el retardo introducido por la red inalámbrica.

Tabla 3-8. Medición del tiempo Tf.

Set Point [RPM]	0-450	450-900	900-1350	1350-1800	1800-1350	1350-900	900-450	450-0
T_{fr}	3.54	3.53	3.52	3.51	3.505	3.54	3.53	3.555
$\overline{T_{fr}}$	3.529							

Fuente: Autor.

En la Figura 3-39 se presentan los resultados obtenidos para el controlador usando IEEE 802.11 g con una distancia entre los AP's de 30 metros y una $SNR = 29.54 \approx 30 \text{ dBm}$.

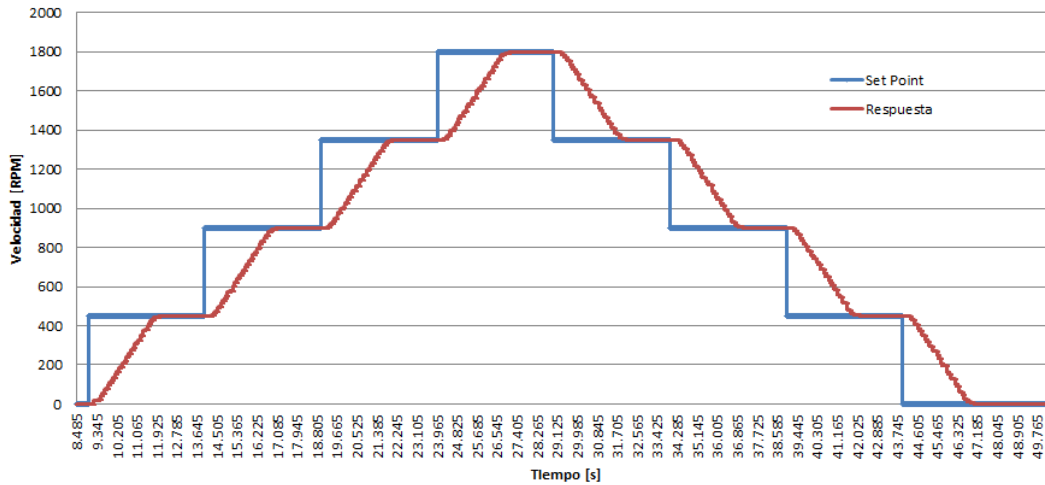


Figura 3-39. Respuesta Controlador para IEEE 802.11g con SNR=30 dBm y 30 m.

Fuente: Autor.

Igual que para los resultados con Profibus se encuentra en tiempo T_f , pero en este caso hay que tener en cuenta que en este proceso de control intervienen los tres medios de comunicación: WiFi, Ethernet cableado y Profibus, ver Figura 3-11, por lo tanto al \bar{T}_f hay que restarle los retardos de los dos cables Ethernet usados³. De los resultados de la sección 3.2.1 se demostró que los RTT's medidos en Ethernet para 8 bytes y dos metros es de 14 ms, también se pudo observar que a las distancias probadas los RTT's no tenían cambios significativos, por lo tanto, el T_f promedio correspondiente a la comunicación inalámbrica y a la comunicación Profibus, denominado $\overline{T_{f_{pw}}}$, está dado por (3-8):

$$\overline{T_{f_{pw}}} = \frac{\sum_{i=1}^n T_{fn}}{n} - 2RTT_{Eth} \quad (3-8)$$

Donde n es el número de medidas para T_f y RTT_{Eth} es 14 ms que es el retardo medido para Ethernet bajo las condiciones establecidas anteriormente. Como el resultado de

³ Los cables Ethernet y Profibus usados en esta prueba tienen una longitud de 20 cm

referencia incluye los retardos de Profibus, no es necesario restar este a $\overline{T_{f_{pw}}}$ para establecer la comparación.

Tabla 3-9. Comparación de los resultados de la metodología con los resultados del proceso de control.

SNR [dBm]	Protocolo y distancia	Set Point								error relativo
		0-450	450-900	900-1350	1350-1800	1800-1350	1350-900	900-450	450-0	
30	802.11 b con 2 m	Tf_1	Tf_2	Tf_3	Tf_4	Tf_5	Tf_6	Tf_7	Tf_8	17.50%
		3.57	3.58	3.58	3.585	3.56	3.57	3.575	3.58	
		$\overline{T_f}$	3.57438	$\overline{T_{f_{pw}}}$	3.546375	$\overline{T_{f_{pw}}} - \overline{T_r}$	.018	RTT medido	0.015	
	802.11 g con 10 m	3.56	3.57	3.595	3.575	3.58	3.595	3.54	3.57	9.17%
		$\overline{T_f}$	3.57313	$\overline{T_{f_{pw}}}$	3.545125	$\overline{T_{f_{pw}}} - \overline{T_r}$	.016	RTT medido	0.015	
		3.55	3.565	3.55	3.6	3.61	3.63	3.57	3.54		14.71%
	$\overline{T_f}$	3.57625	$\overline{T_{f_{pw}}}$	3.54825	$\overline{T_{f_{pw}}} - \overline{T_r}$	.020	RTT medido	0.017		
	802.11 g T con 30 m	3.58	3.56	3.585	3.585	3.585	3.67	3.59	3.695	6.45%
	$\overline{T_f}$	3.60625	$\overline{T_{f_{pw}}}$	3.57825	$\overline{T_{f_{pw}}} - \overline{T_r}$	.049	RTT medido	0.047		
0.5	802.11 g con 10 m	3.58	3.605	3.595	3.62	3.57	3.57	3.63	3.65	1.67%
		$\overline{T_f}$	3.6025	$\overline{T_{f_{pw}}}$	3.5745	$\overline{T_{f_{pw}}} - \overline{T_r}$	.046	RTT medido	0.045	
	802.11 g T con 50 m	3.58	3.595	3.6	3.625	3.61	3.6	3.6	3.56	3.95%
$\overline{T_f}$	3.59625	$\overline{T_{f_{pw}}}$	3.56825	$\overline{T_{f_{pw}}} - \overline{T_r}$	.040	RTT medido	0.038			

Fuente: Autor.

En la Tabla 3-9 se presenta la comparación de los resultados de la metodología con los resultados obtenidos del proceso de control, se hicieron pruebas para dos SNR, la de 30⁴

⁴ Ambiente sin ruido

dBm, y la de 0.66 ⁵dBm, todos los tiempos se dan en segundos, el Set Point está en RPM, los resultados se comparan a usando error relativo. Para IEEE 802.11 b con SNR de 30 dBm y distancia de dos metros entre los AP's, se obtuvo una medida del RTT de 18 ms, que comparado con los 15 ms establecidos con la metodología de medición da un error relativo de 17.5 %, de forma general se puede observar que todos los resultados están muy cerca de los valores establecidos en la metodología.

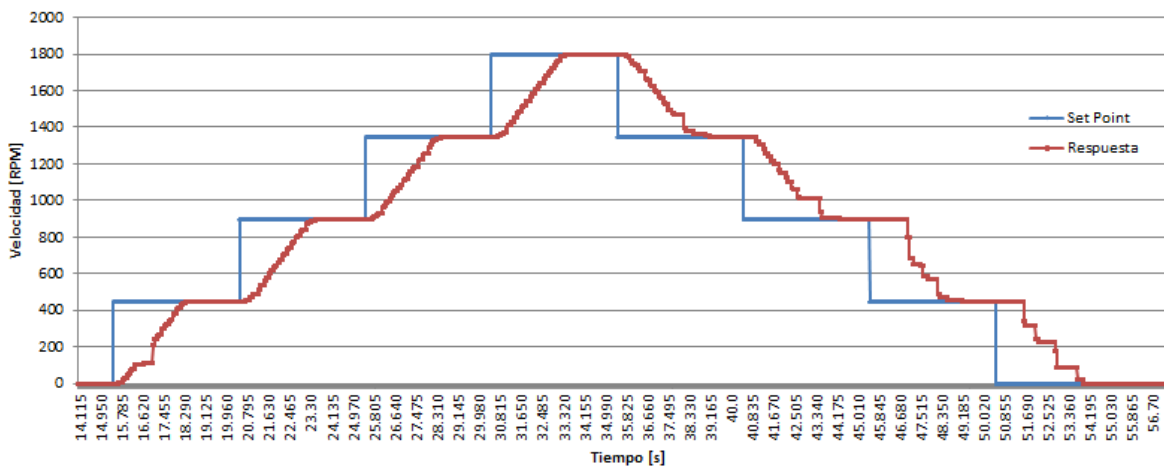


Figura 3-40. Respuesta Controlador para IEEE 802.11 b con SNR=0.5 dBm y 30 m.

Fuente: Autor.

Una de las pruebas con mayor retardo fue la de IEEE 802.11 b para SNR de 0.5 dBm y 30 metros de distancia entre los AP's, el RTT medido fue de 49 ms, en la Figura 3-40 se puede observar como la señal de respuesta, línea rojo, presenta discontinuidades ante los largos retardos que se producen en la comunicación inalámbrica por los altos niveles de ruido.

⁵ Ambiente con altos niveles de ruido

4 Conclusiones y trabajo futuro

Con base en el desarrollo del proyecto de investigación y en el orden de los objetivos específicos, se plantean las siguientes conclusiones:

- En la caracterización de las redes inalámbricas usadas en el proyecto, IEEE 802.11 a, b, g, g Turbo y h, se encontró que los protocolos con mayor alcance en la comunicación en línea de vista fueron 802.11 a y h con una distancia máxima de 85 y 90 metros respectivamente, además, el protocolo con mayor velocidad y ancho de banda es 802.11 g Turbo con 108 Mbps y 40 MHz respectivamente. Estas últimas características juegan un papel importante en el desempeño de estas redes, ya que, como demuestran los resultados, 802.11 g Turbo con pruebas de ruido y 802.11 a y h sin ruido fueron las que mejores resultados arrojaron.
- Para el diseño de un escenario de prueba con un proceso de control en tiempo real, se tuvieron en cuenta dos aspectos: que fuera común en aplicaciones industriales y que contara con una rápida respuesta de tal forma que permita ver cómo los retardos introducidos por la comunicación afectan la respuesta del controlador. Por esto, se seleccionó el control de un motor de inducción, usando el variador de velocidad Micromaster 440. Inicialmente se usaría el programa WinCC para crear la interfaz de control, pero este cuenta con un periodo de muestreo mínimo de un segundo, insuficiente para poder percibir los retardos introducidos por la red, por tal motivo se diseñó la interfaz de control usando LabView que permite periodos de muestro en la OPC Server de hasta mínimo 10 ms. La primera versión del Software de control contaba con la configuración de velocidad, encendido, paro, sentido de giro y las gráficas para los valores de velocidad deseada, velocidad real, voltaje en las terminales del motor, corriente de consumo del motor y par del motor, la configuración de los parámetros del motor se hacía de forma manual en el Micromaster, pero cada que este se apagaba se perdía esta configuración por lo que se era desgastante estar configurando estos parámetros constantemente, por eso en las siguientes versiones, se creó la configuración directamente desde el Software.

- Los dos principales problemas de las redes inalámbricas utilizadas para control en ambientes industriales 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. Con base en estos problemas se diseñó una metodología de medición para redes inalámbricas que permitió describir el comportamiento de los retardos RTT con la variación de tres parámetros que son: SNR, tamaño de datos de información y distancia entre los puntos de acceso. Como la investigación se hace en ambientes industriales, en la metodología se hace uso de dispositivos especialmente diseñado para estos ambientes, como son los PLC's y los módulos de comunicación inalámbricos Siemens. En los PLC's se diseñó un algoritmo que permitió medir el tiempo que tarda un paquete de datos en ir de un PLC maestro a otro PLC esclavo y retornar nuevamente al PLC maestro; con los AP's W788 Pro y W744 Pro de Siemens se hicieron las medidas de trafico correspondientes a la perdida de paquetes y con el analizador de espectro Rohde & Schwarz FSH3 se midió la SNR, para variar el SNR se usaron dos hornos microondas, uno ubicado al lado del AP servidor y otro ubicado al lado del AP cliente, que como se pudo observar en la Figura 3-19 crea ruido en el ancho de banda donde operan los protocolos 802.11 en 2.5 GHz. Con esta metodología se obtuvieron más de 1760 medidas que permitieron establecer las condiciones de uso óptimo de las redes inalámbricas aplicadas en procesos de control en tiempo real bajo ambientes industriales
- Para las redes cableadas los resultados mostraron que la distancia no afecta de forma tan significativa los retardos, por el contrario el tamaño de paquete de datos si lo hace, además se observó que los RTT de Ethernet son muy superiores a los de Profibus, que en ningún momento superó los 10 ms, pero que si se tiene en cuenta a [28] que afirma que para procesos de control los retardos máximos permitidos son de 50 ms, todas las pruebas realizadas para Ethernet cumplen con este requerimiento. La PDF de Profibus dio una campana más cerrada con valores entre 0 y 9 ms, que indica claramente que es un protocolo determinista, la PDF de Ethernet es una campana más abierta con valores entre los 9 y los 25 ms con una probabilidad máxima en los 17 ms.

- Para las pruebas sin ruido, los mejores resultados fueron para los protocolos que operan en la banda de 5 GHz, es decir 802.11 a y h, con retardos que están entre 10 y 30 ms con densidad de probabilidad pico en 20 ms, seguido de 802.11 g Turbo con RTT's entre 10 y 35 ms con densidad de probabilidad pico en 24 ms, para 802.11 b los RTT's están entre 10 y 60 ms con densidad pico en 28 ms, las mayores RTT medidos fueron para 802.11 g, con valores entre 10 y 70 ms con densidad pico de 30 ms , Figura 3-27. En las pruebas de con ruido medio y ruido alto no se tuvo en cuenta los protocolos que operan en 5 GHz porque la fuente de ruido establecida no afecta este ancho de banda, por tal motivo se propondrá como trabajo futuro, los resultados para estos niveles de ruido muestran que los menores RTT's se obtiene para el estándar 802.11 g Turbo, para niveles altos de ruido los RTT estuvieron entre 10 y los 62 ms con una densidad pico de 0.028 para 31.73 ms. En 802.11 g la dispersión de datos esta entre 10 y 120 ms, con densidad pico máxima de 0.012 para 48 ms. Para 802.11 b la dispersión de los datos esta entre 10 y 152 ms con una densidad pico de 0.008 en 53 ms, para este último se observa que, en las pruebas sin ruido tiene mejores resultados que el 802.11 g, pero cuando aumentan los niveles de ruido, los RTT's son los más altos de todos los protocolos, lo que indica que es el más susceptible al ruido, la causa es la baja velocidad de transmisión que usa, 11 Mbps, además de los tres es el único que usa modulación DSSS. Por lo anterior, definitivamente el protocolo inalámbrico que no se recomienda usar para comunicar procesos de control en tiempo real es el 802.11 b.
- En la Tabla 3-7 se presentó un resumen de los resultados obtenidos que permite establecer los límites de operación y las condiciones de uso óptimo de los protocolos evaluados con los parámetros de distancia, RTT, SNR y bytes de información en aplicaciones de control en ambientes industriales, los resultados se clasificaron en tres estados que fueron: Recomendado, Precaución y no Usar. El estado "Recomendado" se estableció para RTT's individuales y promedios que no superan el umbral de los 50 ms. El estado "Precaución" se definió para los resultados donde los RTT's promedio estuvieron por debajo del umbral, pero algunas mediciones individuales de los RTT superaron los 50 ms, y el estado "No usar" se estableció para los resultados donde los

RTT's promedio fueron mayores al umbral. Lo que se pretende con la tabla es que cualquier usuario que necesite usar una comunicación inalámbrica pueda seleccionar el estándar más adecuado, para esto, el usuario debe conocer el tamaño de bytes de información, o un promedio, que use el actuador o sensor con el controlador, esta información se obtiene del Software diseñado en el PLC, también necesita la distancia que hay entre los puntos de acceso y por último la SNR, tal vez este último sea el más complejo de medir ya que muchas empresas no cuentan con un analizador de espectros, que suelen ser muy costosos, como alternativa se propone el uso de herramientas libres que se encuentran en Internet, estas se instalan en un PC con una tarjeta de red inalámbrica y permiten medir la SNR en diferentes canales y protocolos, algunos ejemplos son: "inSSIDer 2.1" y "Chanalizer 4" desarrollados por la empresa Metageek. Si bien, estos Software libres no cuenta con la precisión de un analizador de espectros, permiten tener una aproximación de los niveles de SNR en los canales de comunicación que se están usando.

- Como primera alternativa se propone usar el protocolo 802.11 g Turbo que fue el que mejores resultados arrojó, el problema con los protocolos que operan en la banda de 2.4 GHz, es que hay muchos equipos electrónicos que usan esta misma banda, o bandas cercanas, como son: las mismas redes inalámbricas usadas en el área de oficinas para interconectar los PC con Internet y con la red interna, señales de celular que operan en la banda de 1.9 GHz, Bluetooth, Zigbee, entre otros, causando interferencias y por lo tanto aumentando los retardos en la comunicación, en estos casos se recomienda usar los protocolos que operan en 5 GHz. Si los AP usados no cuenta con protocolos mencionados anteriormente, se puede usar la tabla para establecer las condiciones de uso en 802.11 b y g, en estos casos se recomienda configurar los protocolos en canales que no sean usados en otros enlaces inalámbricos, usar comunicaciones inalámbricas punto a punto con línea de vista y con los AP's lo más cercano posible.
- En la Tabla 3-9 se presentaron los resultados comparativos entre lo establecido por la metodología de medición y la prueba de control en tiempo real, se observó que ambos resultados están muy cercanos, los mayores errores relativos fueron 17.5% y 14.71 %

que presentan un diferencia entre ambas medias de 3 ms. También se presentó la respuesta del controlador usando 802.11 b con altos niveles de ruido, Figura 3-40, en esta se puede observar con la respuesta del controlador se deforma a causa de los retardo introducidos por la red inalámbrica.

- A pesar de los problemas que presentan, 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 PLC's con comunicación Ethernet y dispositivos inalámbricos diseñados para ambientes industriales como los SCALANCE W744-1Pro y W788-1Pro de Siemens, ambos trabajando con el protocolo IEEE802.11, prueba de esto es que la nueva gama de PLC's de Siemens, S7-1500 cuenta con módulos integrados de comunicación Ethernet.

Se propone la realización de las siguientes actividades como trabajo futuro, que permita complementar el trabajo de investigación desarrollado.

- En muchas aplicaciones de control en ambientes industriales se usan múltiples nodos comunicados inalámbricamente con un PLC, estos nodos suelen ser sensores y actuadores, a la metodología diseñada se puede agregar otro parámetro adicional que sería el número de nodos que se comunican con el controlador conformando una red punto – multipunto, además, si se usan equipos con características de Ethernet Industrial, se puede evaluar su desempeño variando parámetros en los AP's o swiches "inteligentes" como son, los niveles de prioridad para tráfico de datos críticos y las tablas dinámicas que permiten establecer que datos en particular se deben enviar a puertos o nodos específicos.

- Caracterizar el desempeño de los protocolos que operan en la banda de 5 GHz como son 802.11 a y h evaluando los retardos con variaciones en la relación señal a ruido, para esto se debe buscar una gran fuente de ruido que emita en la banda de los 5 GHz.
- La metodología se puede extender a cualquier comunicación inalámbrica, por lo tanto se puede evaluar el desempeño en ambientes industriales de otros protocolos como son Bluetooth, Zigbee, WirelessHART, ISA100.11a, WIA-PA, entre otros.

A. Anexo: Producción científica

Inicialmente se propuso como meta en la producción científica dos artículos, uno para revista indexada en C y otro en B, para la fecha de publicación de la tesis se tiene un artículo publicado la revista Politécnica clasificada en C, y otro sometido en la revista Tecnológicas clasificada en B. Actualmente se está realizando otro artículo con los principales resultados del proyecto, con el asesor se está evaluando a que revista apuntarle, el objetivo es una revista internacional preferiblemente con clasificación A.



Figura A-1. Portada de la revista Politécnica donde se publicó el artículo.

En la Figura A-1 se muestra la portada de la revista Politécnica donde se publicó el artículo “REDES INALÁMBRICAS PARA EL CONTROL DE PROCESOS INDUSTRIALES EN TIEMPO REAL” recibido el 11 de julio de 2013 y aceptado el 26 de noviembre de 2013, y en la Figura A-2 se presenta la primera página que contiene el resumen.

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 78A -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 78A -354 Vía al Volador Medellín – Colombia. profetim@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.*

Figura A-2. Primera página del artículo publicado en la revista Politécnica.

Las conclusiones del artículo fueron:

“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.”

Tecno Lógicas
ISSN 0123-7799
Vol. 18, No. 34, pp. 87-98
Enero-junio de 2015

Tecnológicas

**Desempeño de redes inalámbricas y
redes industriales inalámbricas en
procesos de control en tiempo real
bajo ambientes industriales**

**Performance in wireless networks and
industrial wireless networks on control
processes in real time under industrial
environments**

Juan F. Monsalve-Posada¹, Alexander Arias-Londoño²
y Juan G. Mejía-Arango³

Recibido: 26 de junio de 2014,
Aceptado: 1 de diciembre de 2014

Cómo citar / [How to cite](#)

J. F. Monsalve-Posada, A. Arias-Londoño y J. G. Mejía-Arango,
"Desempeño de Redes Inalámbricas y Redes Industriales Inalámbricas
en Procesos de Control en Tiempo Real Bajo Ambientes Industriales",
Tecno Lógicas, vol. 18, no. 34, pp. 87-98, 2015.

Figura A-3. Confirmación de aprobación del artículo enviado a la revista Tecnológicas.

Fuente: Autor.

El segundo artículo elaborado se tituló "DESEMPEÑO DE REDES ETHERNET Y REDES INDUSTRIALES ETHERNET INALÁMBRICAS EN PROCESOS DE CONTROL EN TIEMPO REAL BAJO AMBIENTES INDUSTRIALES", que fue aprobado por la revista Tecnológicas el 10 de diciembre de 2014, en la Figura A-3 se presenta el correo de la revista confirmando la aprobación del artículo que será presentado en la Edición Vol. 34, No. 18 de 2015.

Las conclusiones para este artículo fueron:

“El uso creciente de las redes Ethernet en el piso de la pirámide de automatización ha hecho que muchas compañías desarrollen dispositivos para operar bajo los requerimientos característicos de este nivel, en la actualidad denominada red Industrial Ethernet, muchos de estos equipos se venden a muy alto costo, por eso en este artículo se evaluó el desempeño de dos redes inalámbricas, una con dispositivos del Ethernet convencional, y otra con dispositivos de Industrial Ethernet. En primera instancia, analizando la Tabla 3 y la Tabla 4 se pueden observar algunas diferencias a favor de los AP Scalance de Siemens como son, un mayor número de protocolos de comunicación que permitiría, de acuerdo a los niveles y frecuencias de interferencia, seleccionar el más adecuado entre un mayor número de posibilidades que el D-Link; menor sensibilidad de recepción, -96 dBm contra -92 dBm de D-Link, con esto se logra un mayor alcance en la comunicación, aunque se recomienda instalar los AP lo más cercano posible; y por último Scalance tiene un mayor grado de protección reflejado en mayor temperatura y humedad de operación con rangos desde los -20 a 60 Cº y 95% respectivamente. Ahora, analizando los resultados de cada uno de los parámetros evaluados, respecto al número de datos, se puede observar de la Fig. 7 y Fig. 8 resultados muy similares entre Industrial Ethernet y el Ethernet convencional, con variaciones promedio en RTT de algunos milisegundos, también es claro que a mayor número de bytes mayor es el RTT. Con el parámetro distancia, de la Fig. 9 y Fig. 10 se puede establecer una conclusión similar a la anterior. Para la SNR se puede observar un buen desempeño de ambos equipos, incluso con una SNR de 0.66 dBm, donde el nivel de potencia del ruido en el emisor es casi igual al nivel de potencia de la señal transmitida, observando las figuras antes mencionadas se ve claramente como el RTT aumenta en la medida que aumenta el nivel del ruido, por eso es importante hacer mediciones de nivel de ruido y potencia en la planta para determinar cuál frecuencia y protocolo es el más indicado para un buen desempeño. De la Fig. 12 se observa como el PER aumenta cuando la SNR disminuye ocasionando mayores retardos en la comunicación, en este aspecto los módulos de Industrial Ethernet muestran un mejor desempeño que los convencionales. En la mayor parte de las pruebas, el protocolo con mejores resultados fue el IEEE 802.11gT para Industrial Ethernet, por eso se recomienda trabajar este. Por último, se puede concluir que

bajo los parámetros y condiciones evaluados, las redes inalámbricas pueden servir como sistema de comunicación en aplicaciones de control con retardos permisibles de hasta 50 ms, además, los resultados demuestran un desempeño similar entre los dispositivos del Industrial Ethernet y el Ethernet convencional que, bajo ciertas características como condiciones de humedad y temperatura pueden operar adecuadamente durante un tiempo considerable y a un menor costo que los dispositivos de Industrial Ethernet.”

B. Anexo: Software en el PLC para medir el RTT

A continuación se presenta el software desarrollado en el PLC S7 300 para el algoritmo de medición del RTT, ver Figura 3-15. Primero se muestra el diseño del Software para las pruebas con la comunicación Profibus, y luego para la comunicación Ethernet.

Las siguientes figuras corresponden al bloque OB1 del PLC maestro. En la Figura B-1 se muestra como se configura el bloque SFC15 para la comunicación en Profibus enviando 32 bytes de datos.

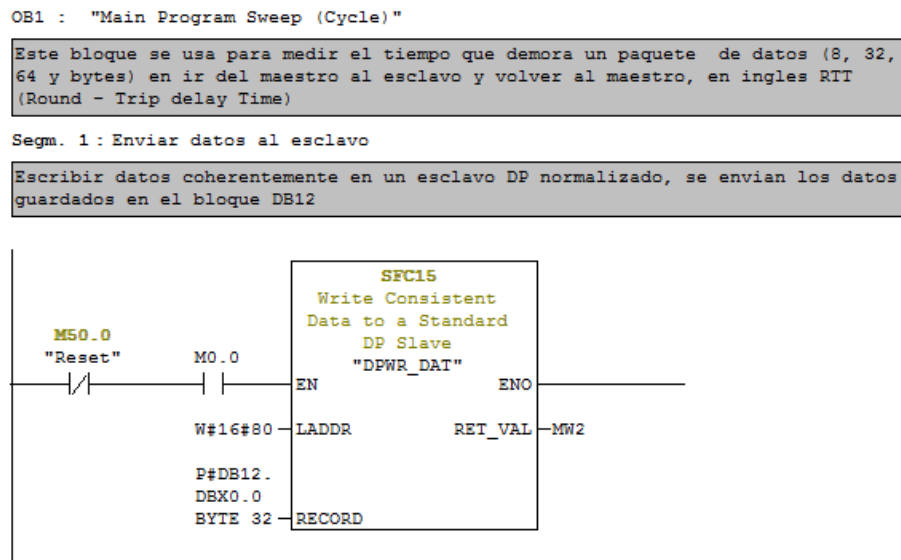


Figura B-1. Bloque SFC15 para la configuración de la comunicación Profibus PLC maestro.

Fuente: Autor.

Para medir el RTT se usó el bloque FC80 del PLC S7-300, este bloque es el único que permite medir el tiempo con una resolución de 1 ms, en la Figura B-2 muestra cómo se configura.

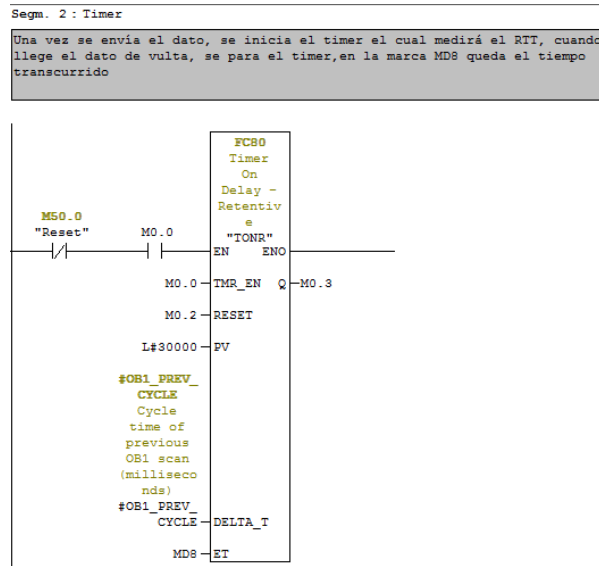


Figura B-2. Bloque FC80 usado para medir el RTT en el PLC maestro.

Fuente: Autor.

En la Figura B-3 está la configuración del bloque para leer datos del PLC esclavo y parar el temporizador.

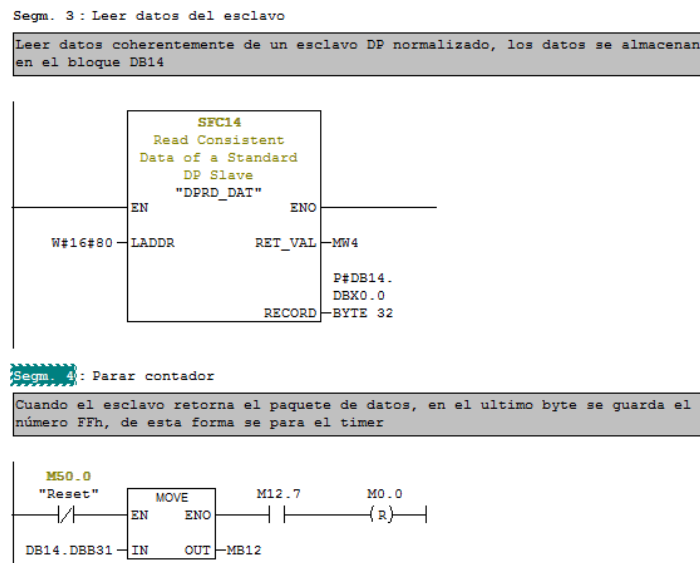


Figura B-3. Leer datos del esclavo y parar el contador en el PLC maestro.

Fuente: Autor.

En la **Figura B-4** se muestra el segmento usado en el maestro para reiniciar la prueba.

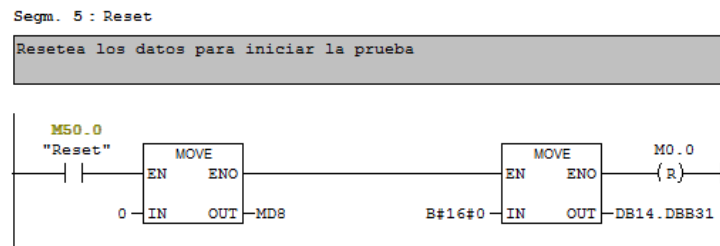


Figura B-4. Segmento para resetear la prueba.

Fuente: Autor.

En las siguientes figuras se presentan los segmentos realizados en el PLC esclavo, en la Figura B-5 se muestran la configuración de los bloques de comunicación en el PLC esclavo.

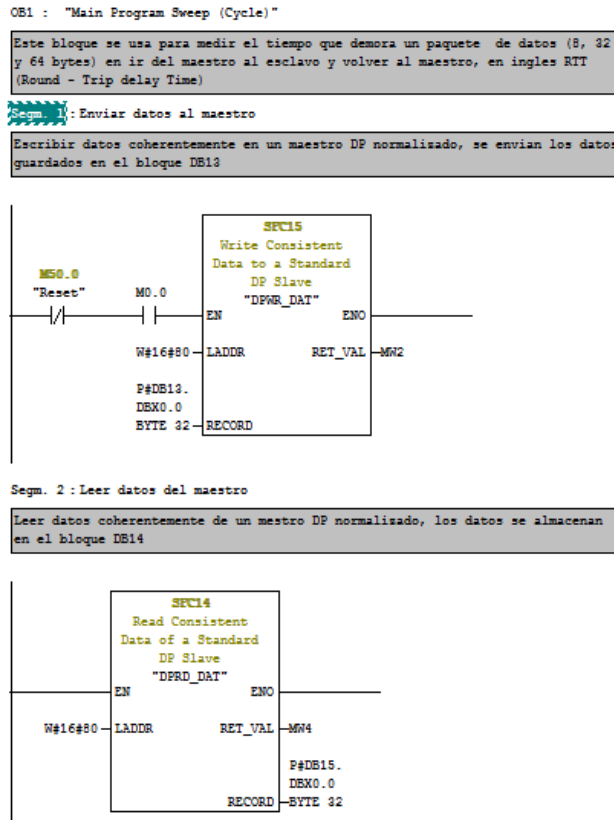


Figura B-5. Configuración de bloques en el PLC esclavo.

Fuente: Autor.

En la Figura B-6 se muestra la configuración de los bloques para leer datos del maestro.

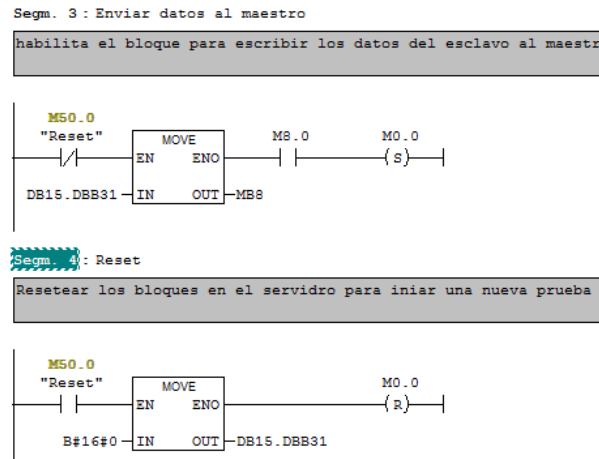
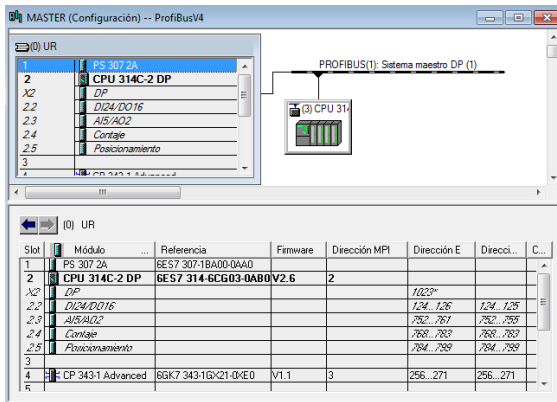


Figura B-6. Segmentos del esclavo para enviar datos al maestro y reiniciar los bloques de comunicación.

Fuente: Autor.

En la Figura B-7 a) se muestra como es la configuración del Hardware en el PLC maestro y en b) como queda el bloque de datos de información de 8 bytes.



Dirección	Nombre	Tipo	Valor inicial
0.0		STRUCT	
+0.0	dato0m	BYTE	B#16#10
+1.0	dato1m	BYTE	B#16#11
+2.0	dato2m	BYTE	B#16#12
+3.0	dato3m	BYTE	B#16#13
+4.0	dato4m	BYTE	B#16#14
+5.0	dato5m	BYTE	B#16#15
+6.0	dato6m	BYTE	B#16#16
+7.0	dato7m	BYTE	B#16#FF
=8.0		END_STRUCT	

a)

b)

Figura B-7. Configuración del Hardware del maestro y bloque de datos de información de 8 bytes.

Fuente: Autor.

A continuación se presenta el diseño del Software para medir el RTT con Ethernet, las siguientes figuras muestran la parte correspondiente al PLC servidor.

En la Figura B-8 se muestran los segmentos 1 y 2 del bloque OB1 para configurar la comunicación Ethernet entre dos PLC's.

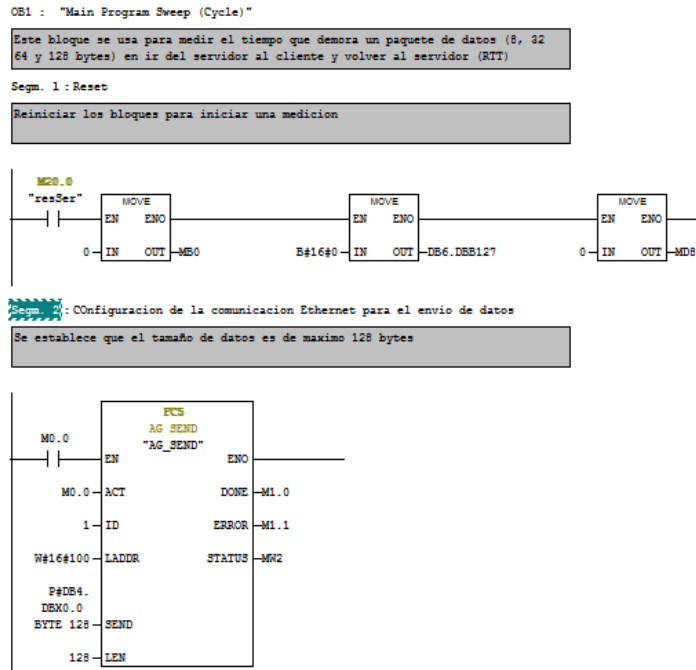


Figura B-8. Segmentos creados en el servidor para reiniciar la comunicación y configurar el bloque FC5 para comunicación Ethernet.

Fuente: Autor.

El segmento 3 corresponde al bloque del timer para medir el RTT, este segmento es igual que el mostrado para Profibus, Figura B-2. Los segmentos de configuración del bloque para recibir datos desde el PLC cliente y el paro del contador una vez llegan los datos se muestran en la Figura B-9.

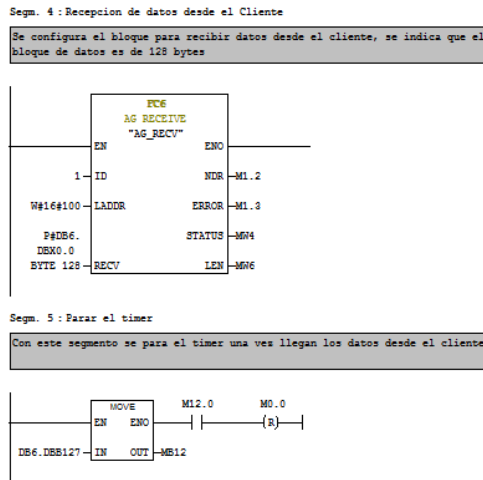


Figura B-9. Configuración del bloque FC6 para recibir datos desde el cliente y segmento que para el Timer.

Fuente: Autor.

En las siguientes figuras se muestra el Software diseñado en el PLC cliente. En la Figura B-10 esta la configuracion del bloque Ethernet para el envio de datos al servidor.

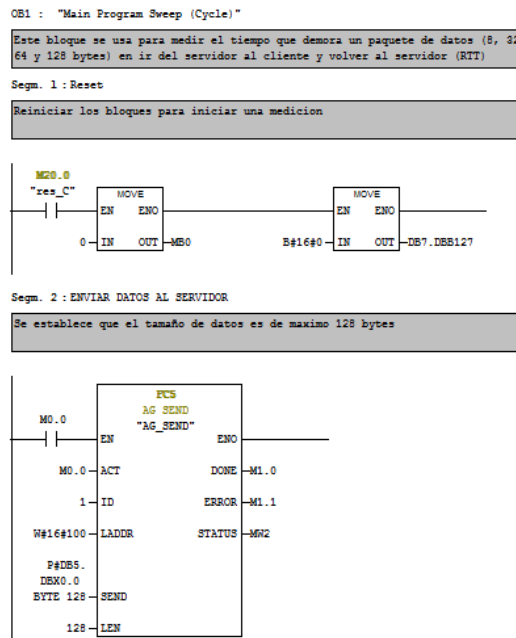


Figura B-10. Segmentos creados en el cliente para reiniciar la comunicación y configurar el bloque FC5 para comunicación Ethernet.

Fuente: Autor.

En la Figura B-11 está la configuración del bloque para enviar datos desde el cliente al servidor y el segmento que se activa cuando los datos del cliente llegan correctamente, este segmento habilita el envío de datos al servidor.

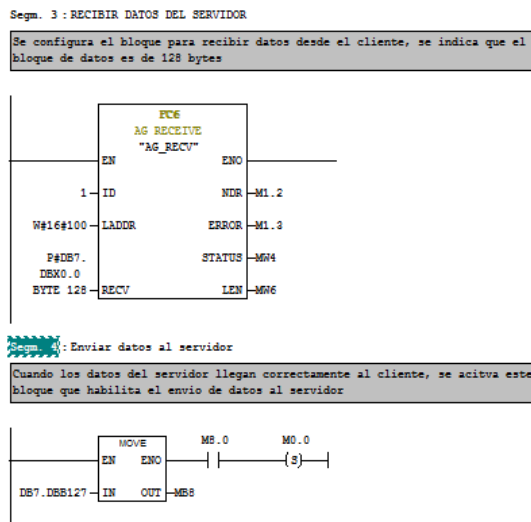


Figura B-11. Configuración del bloque FC6 para recibir datos desde el servidor y segmento que activa el envío de datos al servidor.

Fuente: Autor.

En la Figura B-12 muestra la configuración de Hardware en el PLC servidor.

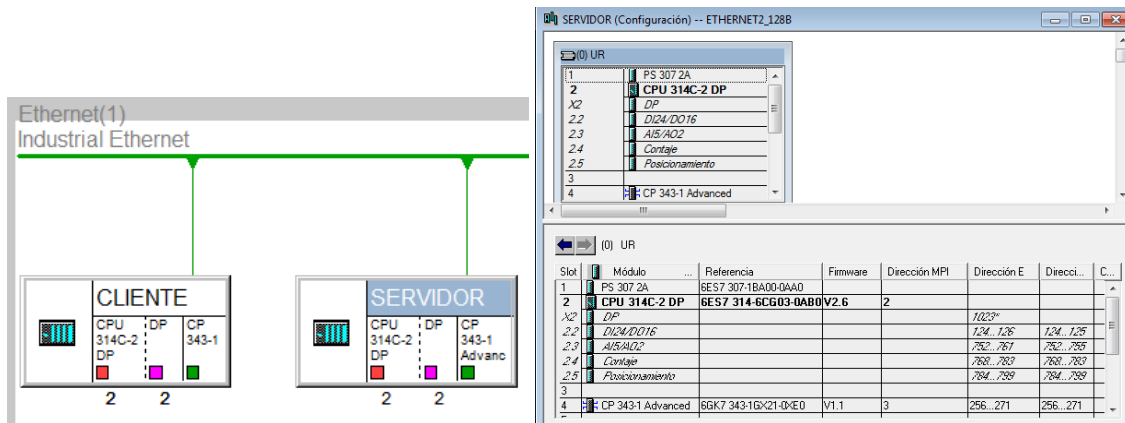


Figura B-12. Configuración del Hardware del servidor para la comunicación Ethernet.

Fuente: Autor.

C. Anexo: Interfaz de control

La interfaz de control se compone de dos partes, una es el Software en el PLC que se encarga de enviar y recibir información al variador de velocidad vía Profibus, la otra es el Software diseñado en LabView para configurar y procesar la información que se envía y obtiene del Micromaster 440, a continuación se presenta el Software diseñado en el PLC.

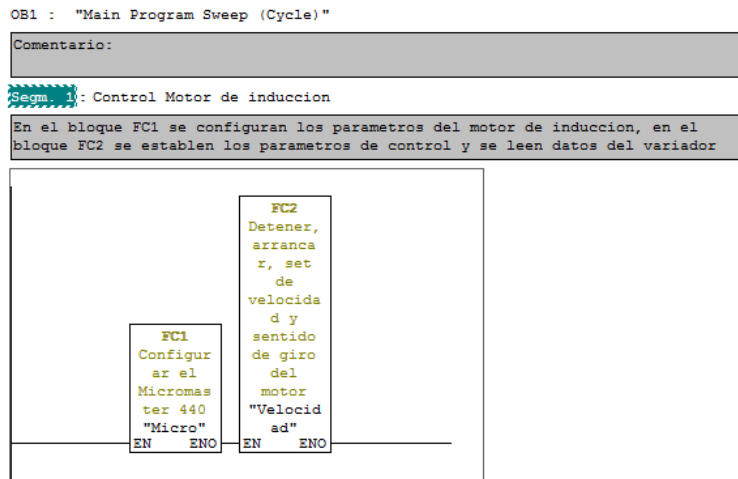


Figura C-1. Vista del bloque OB1.

Fuente: Autor.

El Software diseñado en el PLC está conformado por dos bloques de funciones, Figura C-1, el en bloque FC1 se configuran los parámetros del motor en el Micromaster 440, y en el bloque FC2 se establece el valor de velocidad deseado y se leen los valores de voltaje, corriente, par y velocidad actual del motor, para conocer el nombre de los registros donde se configura y se leen datos del Micromaster, se recomienda leer la guía del variador, [56]. En las siguientes figuras se muestran los segmentos diseñados para el bloque FC1. En la Figura C-2 se presenta la descripción general del bloque FC1.

```

FC1 : Configuracion Micromaster 440

Autores: Juan F. Monsalve P.
Fecha: 08-08-13
Version 3.0

Para configurar el Micromaster 440, se debe ingresar, un 1 si solo se desea
conocer el valor de un parametro del variador, 2 si se quiere modificar un
valor, y este es un numero entero (2 bytes=1 word), un 3 si se quiere modificar
un valor y este es un numero real (4 bytes=2 words, este numero debe estar
seguido del valor del parametro, que se desea configurar en hexadecimal, por
ejemplo: si se quiere poner un 1 en el parametro 10(P10) del variador, el
10=00Ah y como el 1 es entero se debe poner en la palabra AW0=200ah y el valor
en AW6=1. El comparador se pone para saber si el inversor ya modifico el valor
indicado de la siguiente forma, para el ejemplo anterior, el variador retorna
en la palabra EWO=100Ah para indicar que se hizo correctamente, tenga cuenta
que 100Ah=4106

NOTA: TENER EN CUENTA LA DIRECCION DE PROFIBUS CONFIGURADA EN EL MICROMASTER,
PARAMETRO 918, DEBE ESTAR EN 1
    
```

Figura C-2. Descripción general del bloque FC1.

Fuente: Autor.

En la Figura C-3 se muestran los dos segmentos que conforman el reinicio del variador de velocidad, para indicar en el LabView que cada segmento se ha ejecutado correctamente, se activan marcas.

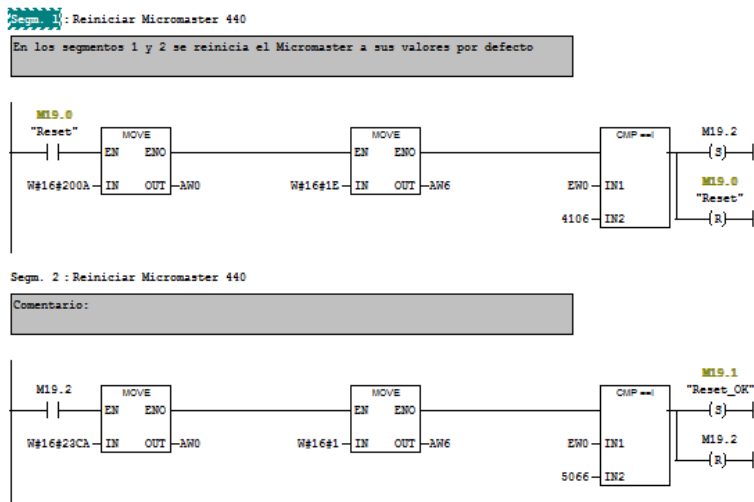


Figura C-3. Reinicio del Micromaster 440.

Fuente: Autor.

En la Figura C-4 se presenta los segmentos para seleccionar la configuración rápida del variador y las unidades de potencia del motor, HP o Watts.

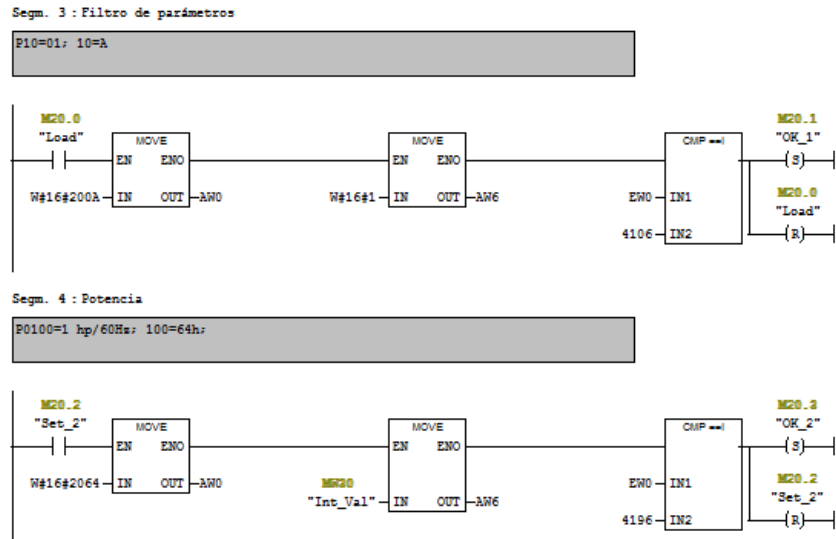


Figura C-4. Configuración rápida y unidad de potencia del motor.

Fuente: Autor.

Para indicar al variador los valores nominales de voltaje y corriente del motor se crean los segmentos 5 y 6 en el bloque FC1, Figura C-5.

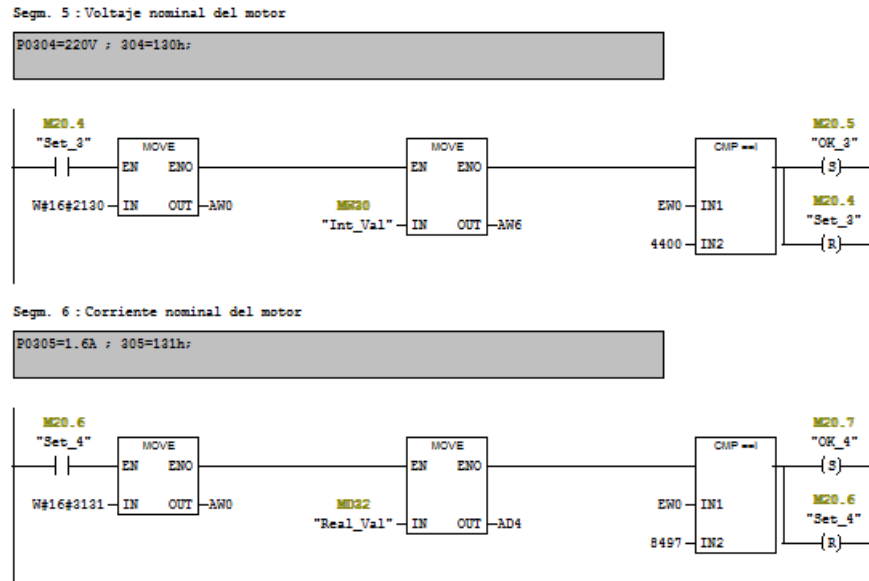


Figura C-5. Configuración del voltaje y la corriente nominal del motor.

Fuente: Autor.

En la Figura C-6 se muestran los segmentos para configurar la potencia y la velocidad nominal del motor.

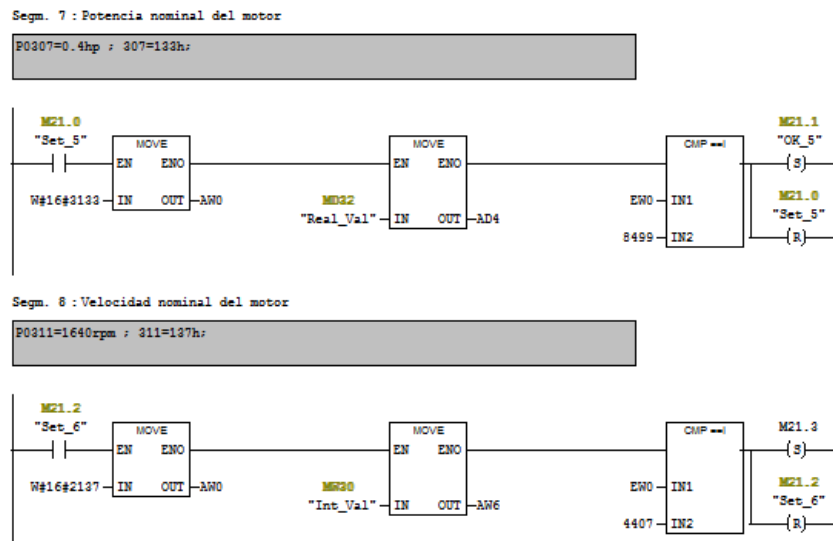


Figura C-6. Configuración de potencia y velocidad nominal del motor.

Fuente: Autor.

En la Figura C-7 se muestran los segmentos para seleccionar el valor del Set Point a través de la comunicación Profibus y elegir el tipo de control usado por el variador de velocidad.

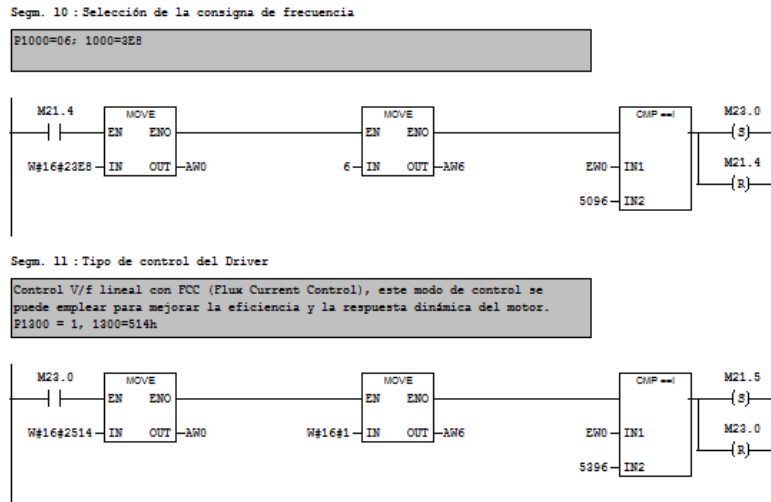


Figura C-7. Selección de consigna de frecuencia y tipo de control del variador.

Fuente: Autor.

En la Figura C-8 se muestra la forma de indicar al variador que la configuración a terminado.

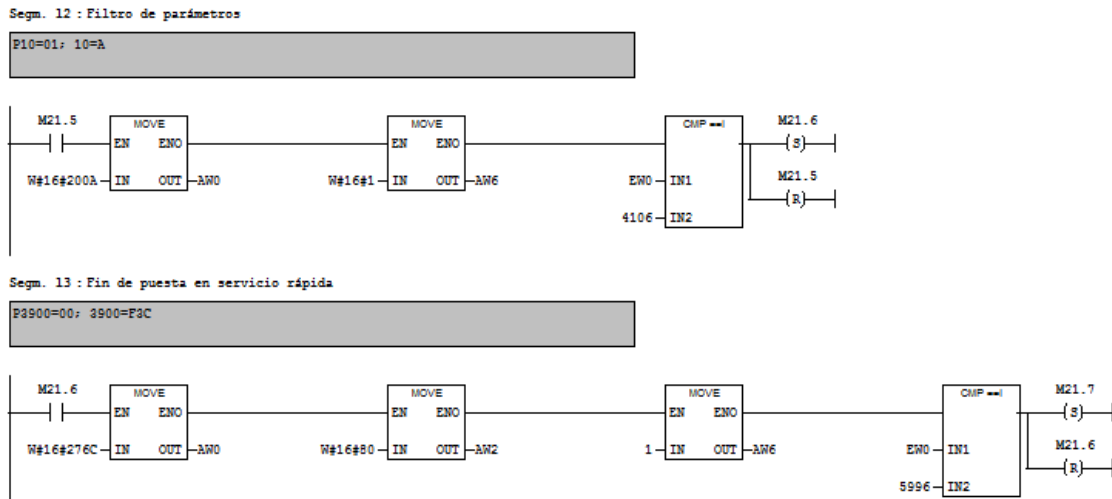


Figura C-8. Fin de puesta en servicio rápida.

Fuente: Autor.

Al finalizar la configuración del variador de velocidad se deben limpiar los registros de configuración, Figura C-9, también se crea una marca para indicar que el proceso se realizó con éxito.

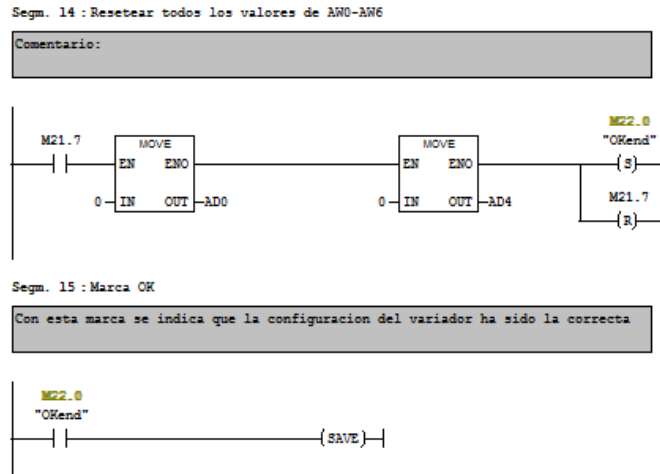


Figura C-9. Reset para los registros del variador y configuración OK.

Fuente: Autor.

En el bloque de función FC2 se crea los segmentos para indicar el Set Point, sentido de giro, stop y start al variador, y leer los valores de velocidad real, corriente, voltaje y par del motor. En la Figura C-10 se presentan los segmentos para indicar el sentido de giro, start, stop y establecer el valor de velocidad deseado.

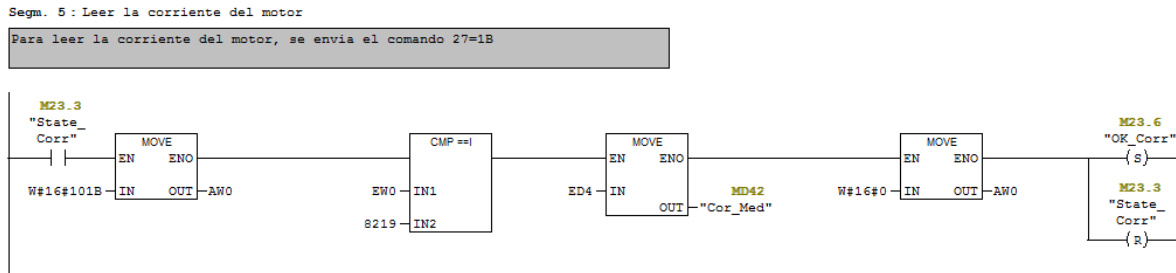


Figura C-12. Lectura de la corriente que consume el motor.

Fuente: Autor.

El esquema general de la configuración del Hardware se muestra en la Figura C-13.

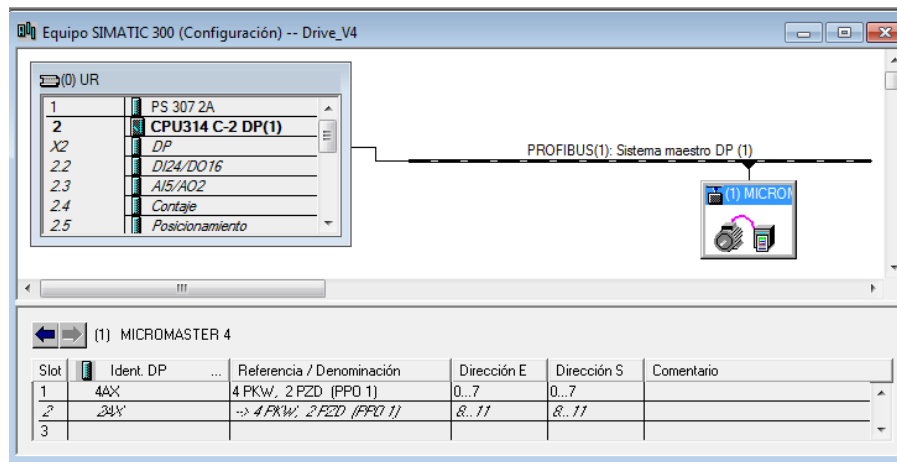


Figura C-13. Configuración del Hardware.

Fuente: Autor.

A continuación se presentan el software diseñado en LabView para la interfaz de control, como primera etapa se debe configurar y crear las variables que se leerán y modificaran en el PLC a través de LabView, para esto se usa el OPC Server de LabView llamado NI OPC Servers que permite tener acceso a los registros del PLC S7-300, en la Figura C-14 se muestran todas las variables usadas en el PLC para la configuración y el control del variador de velocidad.

Tag Name	Address	Data Type	Scan #	Scaling	Description
Set_6	M21.2	Boolean	1000	None	Configura velocidad nominal del motor
Set_5	M21.0	Boolean	1000	None	Configura corriente nominal de motor
Set_4	M20.6	Boolean	1000	None	Configura corriente nominal de motor
Set_3	M20.4	Boolean	1000	None	Configura voltaje nominal del motor
Set_2	M20.2	Boolean	1000	None	Configura las unidades de potencia
Stop_OK	M22.2	Boolean	200	None	
Start_OK	M22.4	Boolean	200	None	
Peak_Value	M20.8	Float	200	None	
OK_End	M22.0	Boolean	200	None	Configuración completa
OK_5	M21.1	Boolean	200	None	
OK_4	M20.7	Boolean	200	None	
Vol_Med	M03.8	Float	100	None	
Tor_Med	M03.4	Float	100	None	
State_Vol	M22.2	Boolean	100	None	
State_Torq	M22.1	Boolean	100	None	
State_M	M22.1	Boolean	100	None	
State_Cor	M22.3	Boolean	100	None	
Set_Veloc	M22.2	Boolean	100	None	
Reset_OK	M19.1	Boolean	100	None	
Reset	M19.0	Boolean	100	None	
OK_Vol	M23.5	Boolean	100	None	
OK_Tor	M23.4	Boolean	100	None	
OK_Cor	M23.6	Boolean	100	None	
OK_3	M20.5	Boolean	100	None	
OK_2	M20.3	Boolean	100	None	
OK_1	M20.1	Boolean	100	None	
Load	M20.0	Boolean	100	None	Inicia configuración del programa
Cor_Med	M04.2	Float	100	None	
Velocidad	EW10	Word	10	None	
Set_point	MW28	Word	10	None	Guarda un valor entero para enviar al Driver
Ht_Value	MW30	Word	10	None	

Figura C-14. Banco de variables de lectura y escritura del PLC al OPC.

Fuente: Autor.

Desde el LabView se exportan todas las variables y se les define un valor por defecto, en la Figura C-15 se muestra como se hace, los valores por defecto del voltaje, corriente, potencia y velocidad nominal son los correspondientes al motor de inducción usado, el Simenes 1LA7070-4YC60.

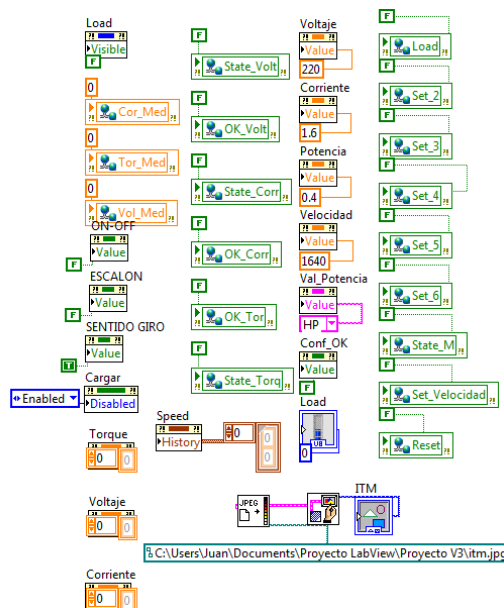


Figura C-15. Configuración inicial de las variables del PLC en LabView.

Fuente: Autor.

Ya con las variables creadas y definidas, se procede a realizar las diferentes secuencias para el diseño de la interfaz, en la Figura C-16 se presenta una parte del programa correspondiente a la configuración del Micromaster, en este caso se hace uso de bloque de estructura "While", dentro de este se usa una secuencia con los pasos que se deben seguir para configurar el variador.

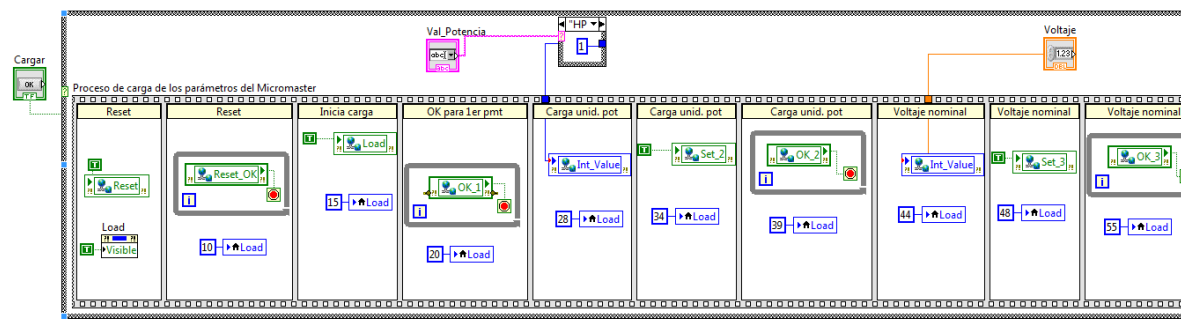


Figura C-16. Vista en LabView para la configuración del Micromaster 440.

Fuente: Autor.

En la Figura C-17, se muestra la secuencia que corresponde al arranque, paro, sentido de giro y valor de velocidad sedeada en el motor.

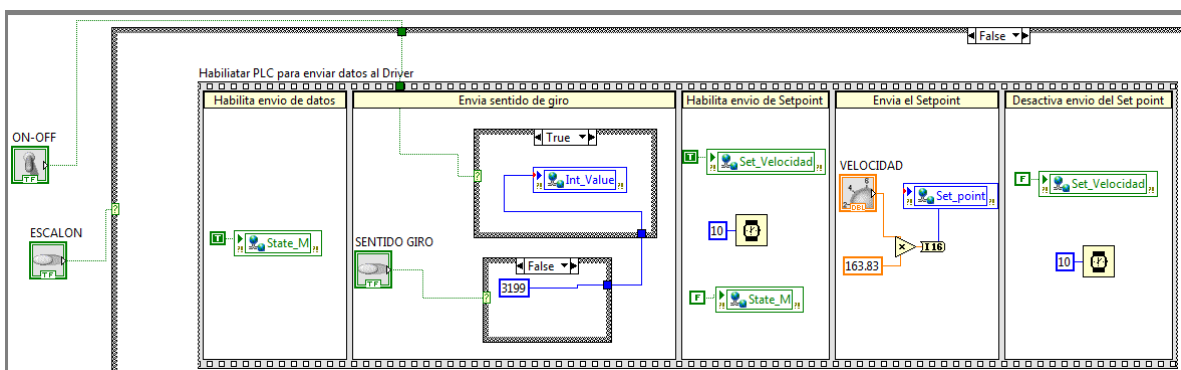


Figura C-17. Secuencia para establecer el arranque, paro, sentido de giro y Set Point al motor.

Fuente: Autor.

Para ver la respuesta al escalón, se programó una secuencia que aumentara el Set Point cada 5 segundos, ver Figura C-18.

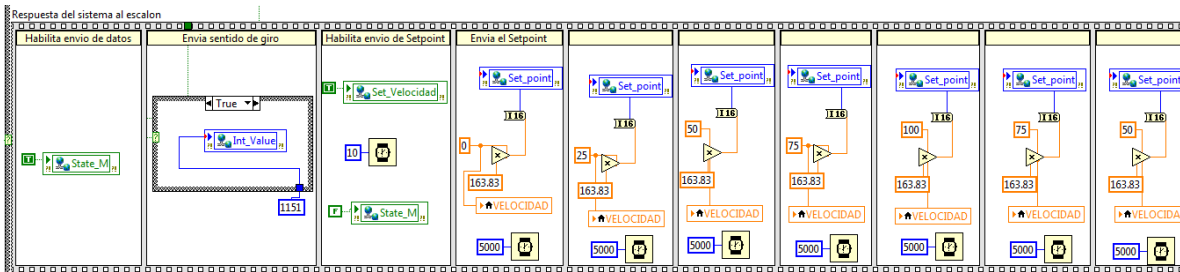


Figura C-18. Secuencia de programación para la respuesta al escalón.

Fuente: Autor.

En la Figura C-19 se presenta la estructura “While” para leer la velocidad real del motor y graficarla junto que el valor deseado en la interfaz de control.

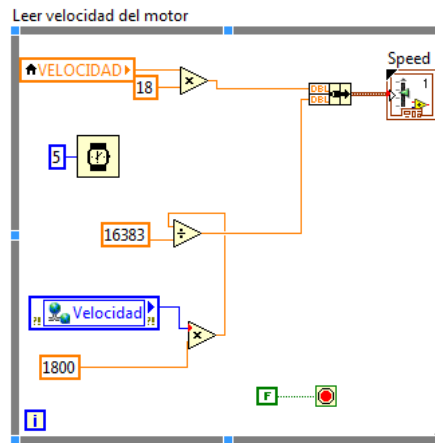


Figura C-19. Estructura para leer la velocidad real del motor y graficarla en la interfaz de control.

Fuente: Autor.

Para leer algunas de las variables del motor se diseñó la secuencia de la Figura C-20.

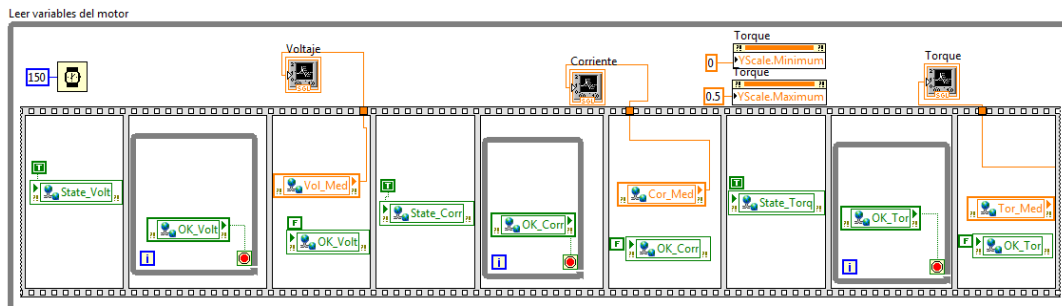


Figura C-20. Lectura de las variables del motor.

Fuente: Autor.

Para limpiar la gráfica de velocidad y guardar la información en Excel se usan las secuencias de la Figura C-21.

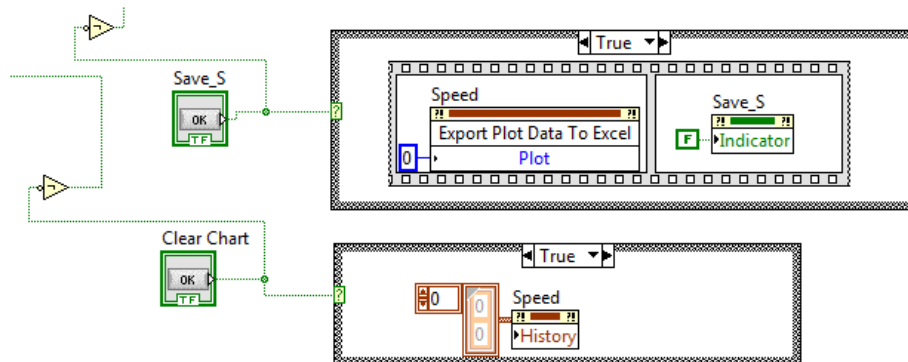


Figura C-21. Exportar datos a Excel y borrar la gráfica de velocidad.

Fuente: Autor.

Con este último bloque se muestra como fue el Software diseñado en LabView con la ventaja de poder exportar los datos a Excel y aplicar las diferentes herramientas que tiene para los respectivos análisis estadísticos.

D. Anexo: Características de los equipos usados en el desarrollo del proyecto

En este anexo se muestran algunas de las características más importantes de los equipos he instrumentos usados durante el desarrollo del proyecto.

En la Figura D-1, Figura D-2 y Figura D-3 se resumen las principales características del PLC S7-300 con CPU 314C-2DP (Rojo).

S7-300 CPUs Estándar y de seguridad– Datos técnicos (Vista general 1)

SIEMENS

CPU	CPU 312	CPU 314 1)	CPU 315-2 DP 1)	CPU 315F-2 DP 1)	CPU 315-2 PN/DP 1)	CPU 315F-2 1) PN/DP
Dimensions (mm)	40 x 125 x 130	40 x 125 x 130	40 x 125 x 130	40 x 125 x 130	40 x 125 x 130	40 x 125 x 130
Order no. group: 6ES7	312-1AE.	314-1AG.	315-2AH.	315-6FF.	315-2EH.	315-2FJ.
Firmware	V3.0	V3.0	V3.0	V3.0	V3.2	V3.2 3)
Memory						
Main memory	32 KByte	128 KByte	256 KByte	384 KByte	384 KByte	512 KByte
Instructions	10 K	42 K	85 K		128 K	
Processing times						
Bit operation	0,1 µs	0,06 µs	0,05 µs	0,05 µs	0,05 µs	0,05 µs
Word operation	0,24 µs	0,12 µs	0,09 µs	0,09 µs	0,09 µs	0,09 µs
Fixed-point operation	0,32 µs	0,16 µs	0,12 µs	0,12 µs	0,12 µs	0,12 µs
Floating-point operation	1,1 µs	0,59 µs	0,45 µs	0,45 µs	0,45 µs	0,45 µs
Bit memories/timers/counters						
Bit memory	256 Byte	256 Byte	2 048 Byte	2 048 Byte	2 048 Byte	2 048 Byte
S7 timers/counters	256 / 256	256 / 256	256 / 256	256 / 256	256 / 256	256 / 256
IEC timers/counters	* *)	* *)	* *)	* *)	* *)	* *)
Address ranges						
Number of I/Os (bytes)	1 024 / 1 024	1 024 / 1 024	2 048 / 2 048	2 048 / 2 048	2 048 / 2 048	2 048 / 2 048
Process image I/O (bytes), max.	1 024 / 1 024	1 024 / 1 024	2 048 / 2 048	2 048 / 2 048	2 048 / 2 048	2 048 / 2 048
Digital channels (central)	256	1 024	1 024	1 024	1 024	1 024
Analog channels (central)	64	256	256	256	256	256
DP interfaces						
DP master systems internal/CP3425	- / *	- / *	* / *	* / *	* / *	* / *
DP-slaves			*	*	*	*
Data set gateway 2)			*		*	*
PROFINET interface						
PROFINET CBA					*	*
PROFINET IO					*	*
PROFINET with IRT					* 3)	*
Open User Communication (OUC)						
+ TCP/IP					*	*
+ UDP					*	*
+ ISO-on-TCP (RFC 1006)					*	*
webserver					*	*

Figura D-1. Datos técnicos del PLC S7-300 con CPU 314. Tomado de [57].

S7-300 CPUs Compactas– Datos técnicos(Vista general 1)

SIEMENS

CPUs	CPU 312C 1)	CPU 313C 1)	CPU 313C-2 PIP	CPU 313C-2 DP 1)	CPU 314C-2 PIP 1)	CPU 314C-2 DP 1)	CPU 314C-2 PN/DP
Dimensions (mm)	80 x 125 x 130	120 x 125 x 130	80 x 125 x 130	80 x 125 x 130	120 x 125 x 130	120 x 125 x 130	120 x 125 x 130
Required front connector	1 x 40 polig	2 x 40 polig	1 x 40 polig	1 x 40 polig	2 x 40 polig	2 x 40 polig	2 x 40 polig
Order No. group: BES7	312-5BF.	313-5BG.	313-6BG.	313-6CG.	314-6BH.	314-6CH.	314-6EH.
Firmware	V3.3	V3.3	V3.3	V3.3	V3.3	V3.3	V3.3
Memory							
Main memory	64 KByte	128 KByte	128 KByte	128 KByte	192 KByte	192 KByte	192 KByte
Instructions	21 K	42 K	42 K	42 K	64 K	64 K	64 K
Processing times							
Bit operation	0,1 µs	0,07 µs	0,07 µs	0,07 µs	0,06 µs	0,06 µs	0,06 µs
Word operations	0,24 µs	0,15 µs	0,15 µs	0,15 µs	0,12 µs	0,12 µs	0,12 µs
Fixed-point operations	0,32 µs	0,2 µs	0,2 µs	0,2 µs	0,16 µs	0,16 µs	0,16 µs
Floating-point operations	1,1 µs	0,72 µs	0,72 µs	0,72 µs	0,59 µs	0,59 µs	0,59 µs
Bit memories/timers/counters							
Bit memory	256 Byte	256 Byte	256 Byte	256 Byte	256 Byte	256 Byte	256 Byte
S7 timers/counters	256 / 256	256 / 256	256 / 256	256 / 256	256 / 256	256 / 256	256 / 256
IEC timers/counters	* *)	* *)	* *)	* *)	* *)	* *)	* *)
Address ranges							
Number of I/Os (bytes)	1 024 / 1 024	1 024 / 1 024	1 024 / 1 024	2 048 / 2 048	1 024 / 1 024	2 048 / 2 048	2 048 / 2 048
I/O process image	1 024 / 1 024	1 024 / 1 024	1 024 / 1 024	2 048 / 2 048	1 024 / 1 024	2 048 / 2 048	2 048 / 2 048
Digital channels (central)	266	1 016	1 008	1 008	1 016	1 016	1 016
Analog channels (central)	64	253	248	248	253	253	253
Integrated functions							
Counter (incremental enc.)	2, 24 V / 10 kHz	3, 24 V / 30 kHz	3, 24 V / 30 kHz	3, 24 V / 30 kHz	4, 24 V / 60 kHz	4, 24 V / 60 kHz	4, 24 V / 60 kHz
Pulse outputs (PCM)	2 channels, max. 2,5 kHz	3 channels, max. 2,5 kHz	3 channels, max. 2,5 kHz	3 channels, max. 2,5 kHz	4 channels, max. 2,5 kHz	4 channels, max. 2,5 kHz	4 channels, max. 2,5 kHz
Frequency measurement	2 channels, max. 10 kHz	3 channels, max. 30 kHz	3 channels, max. 30 kHz	3 channels, max. 30 kHz	4 channels max. 60 kHz	4 channels max. 60 kHz	4 channels max. 60 kHz
Controlled positioning					SFB for positioning, 1 axis via 2 DO, AO	SFB for positioning, 1 axis via 2 DO, AO	SFB for positioning, 1 axis via 2 DO, AO
Integrated "Control" FB		PID-controllers	PID-controllers	PID-controllers	PID-controllers	PID-controllers	PID-controllers

Figura D-2. Datos técnicos de la CPU 314C-2DP. Tomado de [57].

S7-300 CPUs compactas– Datos técnicos (Vista general 2) **SIEMENS**

CPUs	CPU 312C 1)	CPU 313C 1)	CPU 313C-2 PIP	CPU 313C-2 DP 1)	CPU 314C-2 PIP 1)	CPU 314C-2 DP 1)	CPU 314C-2 PN/DP
Integrated inputs/outputs							
Digital inputs	10 x 24 V DC; all channels can be used for process interrupts	24 x 24 V DC; all channels can be used for process interrupts	16 x 24 V DC; all channels can be used for process interrupts	16 x 24 V DC; all channels can be used for process interrupts	24 x 24 V DC; all channels can be used for process interrupts	24 x 24 V DC; all channels can be used for process interrupts	24 x 24 V DC; all channels can be used for process interrupts
Digital outputs	8 x DC 24 V, 0,5 A	16 x DC 24 V, 0,5 A	16 x DC 24 V, 0,5 A	16 x DC 24 V, 0,5 A	16 x DC 24 V, 0,5 A	16 x DC 24 V, 0,5 A	16 x DC 24 V, 0,5 A
Analog inputs		4 : ± 10 V, 0 ... 10 V, ± 20mA, 0 / 4 ... 20 mA; 1 : 0 ... 600 W, PT100			4 : ± 10 V, 0 ... 10 V, ± 20 mA, 0 / 4 ... 20 mA; 1 : 0 ... 600 Ω, PT100	4 : ± 10 V, 0 ... 10 V, ± 20 mA, 0 / 4 ... 20 mA; 1 : 0 ... 600 Ω, PT100	4 : ± 10 V, 0 ... 10 V, ± 20 mA, 0 / 4 ... 20 mA; 1 : 0 ... 600 Ω, PT100
Analog outputs		2 : ± 10 V, 0 ... 10 V, ± 20mA, 0 / 4 ... 20 mA			2 : ± 10 V, 0 ... 10 V, ± 20 mA, 0 / 4 ... 20 mA	2 : ± 10 V, 0 ... 10 V, ± 20 mA, 0 / 4 ... 20 mA	2 : ± 10 V, 0 ... 10 V, ± 20 mA, 0 / 4 ... 20 mA
DP interface							
DP master systems int./ CP 342-5	- / *	- / *	- / *	* / *	- / *	* / *	* / *
DP-Slave				*		*	*
Data set gateway 2)				*		*	*
PROFINET interface							
PROFINET CBA							*
PROFINET IO							*
PROFINET ml IRT							*
Open User Communication (OUC)							
- TCP/IP							*
- UDP							*
- ISO-on-TCP (RFC 1006)							*
Web server							*
IP interface							
Physik			RS485/422		RS485/422		
Protocol driver			3964 (R), RK512, ASCII		3964 (R), RK512, ASCII		

Figura D-3. Datos técnicos 2 para la CPU 314C-2DP. Tomado de [57].

En la Figura D-4 se muestran las principales características del Switch usado en el desarrollo del proyecto. En la Figura D-5 a) y b) están los analizadores de espectro usados.

Tabla 3- 1 Propiedades del producto en síntesis

Tipo de dispositivo SCALANCE	X104-2	X106-1	X108	X108PoE	X112-2	X116	X124
Entorno SIMATIC	+	+	+	+	+	+	+
LED Diagnóstico	+	+	+	+	+	+	+
24 V DC	+	+	+	+	+	+	+
2 x 24 V DC	+	+	+	+	+	+	+
Carcasa compacta (collar de sujeción, etc.)	+	+	+	+	+	+	+
Contacto de señalización + manejo in situ	+	+	+	+	+	+	+
Diagnóstico: Web, SNMP, PROFINET	-	-	-	-	-	-	-
C-PLUG	-	-	-	-	-	-	-
Redundancia de anillo con el administrador de redundancia	-	-	-	-	-	-	-
Redundancia de anillo pasiva	-	-	-	-	-	-	-
Redundancia en Standby	-	-	-	-	-	-	-
Capacidad IRT	-	-	-	-	-	-	-
Fast Learning	-	-	-	-	-	-	-
Passive Listening	-	-	-	-	-	-	-
Tabla de registro	-	-	-	-	-	-	-
SNTP + SICLOCK	-	-	-	-	-	-	-
Cut Through	-	-	-	-	-	-	-
Número de puertos PoE	-	-	-	2	-	-	-

Fast Learning:
Identificación rápida de direcciones MAC que cambian durante el funcionamiento en el dispositivo (p. ej. al enchufar otro terminal).

Figura D-4. Características del Switch X100 de Siemens. Tomado de [58].

Especificaciones		R&S®FSC3	R&S®FSC6
Frequency range		9 kHz to 3 GHz	9 kHz to 6 GHz
Resolution bandwidth		10 Hz to 3 MHz	10 Hz to 3 MHz
Displayed average noise level	without preamplifier, RBW = 1 Hz		
	10 MHz to 2 GHz	< -141 dBm, typ. -146 dBm	< -141 dBm, typ. -146 dBm
	2 GHz to 3 GHz	< -138 dBm, typ. -143 dBm	< -138 dBm, typ. -143 dBm
	3 GHz to 3.6 GHz	-	< -138 dBm, typ. -143 dBm
	3.6 GHz to 5 GHz	-	< -142 dBm, typ. -146 dBm
	5 GHz to 6 GHz	-	< -140 dBm, typ. -144 dBm
	with R&S®FSC-B22 preamplifier option, RBW = 1 Hz		
	10 MHz to 1 GHz	< -161 dBm, typ. -165 dBm	< -161 dBm, typ. -165 dBm
	1 GHz to 2 GHz	< -159 dBm, typ. -163 dBm	< -159 dBm, typ. -163 dBm
	2 GHz to 3 GHz	< -155 dBm, typ. -159 dBm	< -155 dBm, typ. -159 dBm
	3 GHz to 5 GHz	-	< -155 dBm, typ. -159 dBm
	5 GHz to 6 GHz	-	< -151 dBm, typ. -155 dBm
IP3	frequency 1 GHz	typ. 15 dBm	
Phase noise	frequency 500 MHz		
	30 kHz carrier offset	< -95 dBc (1 Hz)	
	100 kHz carrier offset	< -100 dBc (1 Hz)	
	1 MHz carrier offset	< -120 dBc (1 Hz)	
Detectors		sample, max/min peak, auto	peak, RMS
Level measurement uncertainty	10 MHz < f ≤ 3.6 GHz	< 1 dB, typ. 0.5 dB	< 1 dB, typ. 0.5 dB
	3 GHz < f < 3.6 GHz		< 1 dB, typ. 0.5 dB
	3.6 GHz < f ≤ 6 GHz		< 1.5 dB, typ. 1 dB
Tracking generator (model .13/.16)			
Frequency range		100 kHz to 3 GHz	100 kHz to 6 GHz
Output power	100 kHz < f < 300 kHz	0 dBm (nominal)	0 dBm (nominal)
Dynamic range (transmission)	300 kHz < f < 3 GHz	> 60 dB, typ. 80 dB	> 60 dB, typ. 80 dB
	3 GHz < f < 6 GHz	> 70 dB, typ. 90 dB	> 70 dB, typ. 90 dB
		> 70 dB, typ. 90 dB	> 70 dB, typ. 90 dB
Display		5.7" (14.5 cm) color LCD with	VGA resolution
Dimensions (W x H x D)		233 mm x 158 mm x 350 mm	(9.2 in x 6.2 in x 13.8 in)
Weight		4.5 kg (9.92 lbs)	

Especificaciones		R&S®FSH3
Frequency range		100 kHz to 3 GHz
Resolution bandwidths		
Video bandwidths		10 Hz to 1 MHz
Displayed average noise level		typ. -114 dBm (1 kHz) (model .13)
		typ. -135 dBm (100 Hz) (models .03 and .23)
TOI		typ. 13 dBm
SSB phase noise		< -100 dBc (1 Hz) at 100 kHz from carrier
Detectors		sample, max/min peak, auto peak, RMS
Level measurement uncertainty		< 1.5 dB, typ. 0.5 dB
Reference level		-80 dBm to +20 dBm
Dimensions		170 mm x 120 mm x 270 mm (6.69 in x 4.72 in x 10.63 in)
Weight		2.5 kg (5.52 lb)

a)

b)

Figura D-5. Características de los analizadores de espectro R&H FSC3 y R&H FSH3.

Las características del motor trifásico y el variador de velocidad se muestran en la Figura D-6 y la Figura D-7 respectivamente.

Velocidad 1800 rpm, 4 polos, 60 Hz															
Código	Tipo	Frame IEC Tamaño	Potencia HP	Potencia kW	F,S	In 220V A	In 440V A	Eficiencia h %	Factor de potencia Cos f	Velocidad nominal rpm	Torque nominal Nm	Torque de arranque Tarr / Tn	Cte. de arranque Iarr / In	Momento de inercia kg m2	Peso kg
25000001108	1LA7 070-4YC60	71M	0,4	0,30	1,05	1,60	0,80	66	0,77	1640	1,74	1,8	2,8	0,0006	4,7

Figura D-6. Características del motor de inducción trifásico 1LA7070-4YC60 de Siemens. Tomado de [59].

Tabla 7-1 Características del MICROMASTER 440

Característica	Especificación
Tensión de red y Márgenes de potencia	CT 1 AC 200 a 240 V ± 10 % 0,12 kW – 3,0 kW (0,16 hp – 4,0 hp)
	3 AC 200 a 240 V ± 10 % 0,12 kW – 45,0 kW (0,16 hp – 60,0 hp)
	VT 5,50 kW – 45,0 kW (7,50 hp – 60,0 hp)
	CT 3 AC 380 a 480 V ± 10 % 0,37 kW – 75,0 kW (0,50 hp – 100 hp)
	VT 7,50 kW – 90,0 kW (10,0 hp – 120 hp)
	CT 3 AC 500 a 600 V ± 10 % 0,75 kW – 75,0 kW (1,00 hp – 100 hp)
VT 1,50 kW – 90,0 kW (2,00 hp – 120 hp)	
Frecuencia de entrada	47 a 63 Hz
Frecuencia de salida	0 Hz a 650 Hz
Factor de potencia	≥ 0,7
Rendimiento del convertidor	96 a 97 %
Capacidad de sobrecarga (Par constante (CT))	50 % de sobrecarga durante 60 s en un periodo de 5 min o 100 % de sobrecarga durante 3 s en un periodo de 5 min referido a la corriente nominal de salida
Corriente de arranque	Inferior a la corriente nominal de entrada
Método de control	Control V/f lineal; Control V/f lineal con Flux Current Control (FCC); U Control V/f cuadrático; Control V/f multipunto; Control V/f lineal con modo ECO; Control V/f para aplicaciones textiles; Control V/f con FCC para aplicaciones textiles; Control V/f con consigna de tensión Independiente; Sensorless Vector Control; Sensorless Vector Torque Control
Frecuencia de pulsación	2 kHz a 16 kHz (en pasos de 2 kHz)
Frecuencias fijas	15, parametrizable
Frecuencias inhibibles	4, parametrizable
Resolución de consigna	0,01 Hz digital, 0,01 Hz serie, 10 bits analógica (potenciómetro motorizado 0,1 Hz [0,1% (en modo PID)])
Entradas digitales	6, parametrizable (libre de potencial), conmutables entre activa con high / activa con low (PNP/NPN)
Entrada analógica 1	0 – 10 V, 0 – 20 mA y –10 V a +10 V
Entrada analógica 2	0 – 10 V y 0 – 20 mA
Salidas de relé	3, parametrizable 30 V DC / 5 A (carga resistiva), 250 V AC 2 A (carga inductiva)
Salida analógica	2, parametrizable (0 a 20 mA)
Interface serie	RS-485, opcionales RS-232
Compatibilidad electromagnética	Filtros CEM opcionales según EN55011 Clase A o B, y también disponibles filtros Clase A internos
Frenado	frenado por inyección de corriente continua, frenado combinado y frenado dinámico
Grado de protección	IP20
Margen de temperatura	Par constante (CT) -10 °C a +50 °C (14 °F a 122 °F)
	Par variable (VT) -10 °C a +40 °C (14 °F a 104 °F)
Temperatura de almacenamiento	-40 °C a +70 °C (-40 °F a 158 °F)
Humedad relativa	< 95 % (sin condensación)
Altitud de operación	hasta 1000 m sobre el nivel del mar sin reducción de potencia
Características de protección	Mínima tensión, sobretensión, sobrecarga, defecto a tierra, cortocircuito, protección basculante, protección de bloqueo del motor, sobretemperatura en motor, sobretemperatura en convertidor, bloqueo de parámetros
Normas	UL, cUL, CE, C-tick
Marcado CE	de acuerdo con las directivas europeas "Baja tensión" 73/23/CEE y "Compatibilidad electromagnética" 89/336/CEE

Figura D-7. Características del Micromaster 440. Tomado de [56].

5 Bibliografía

- [1] B. Chejerla y S. Madria, «Securing a wireless networked control system using information fusion.,» *2012 31st International Symposium on Reliable Distributed Systems*, 2012.
- [2] X. Carcelle, T. Dang y C. Devi, «Wireless Networks in industrial environments: State of the art and Issues,» *International federation for information processing - publications- IFIP.*, pp. 141-156., 2006.
- [3] G. W. Irwin, J. Colandairaj y W. G. Scanlon, «An Overview of Wireless Networks in Control and Monitoring.,» *ICIC*, pp. 1061-1072, 2006.
- [4] V. Lucan, P. Simacek, J. Seppälä y H. Koivisto, «Bluetooth and Wireless LAN Applicability for Real-time Control,» *Automaatio 2003*, 2003.
- [5] J. Song, A. K. Mok, D. Chen y M. Nixon, «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] J. Chen, G. Irwin, A. McKernan y W. Scanlon, «A Model Predictive Approach to Wireless Networked Control,» 2009.
- [7] 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.
- [8] A. Ulusoy, A. Onat y O. Gurbuz, «Wireless Model Based Predictive Networked Control System.,» *Industrial and Embedded Systems*, 2009.

- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] T. I. Standards, « Overview and Status,» [En línea]. Available: http://www.isa.org/MSTemplate.cfm?Section=Home1034&Site=SP100,_Wireless_Systems_for_Automation&Template=/ContentManagement/MSContentDisplay.cfm&ContentID=80821..
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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 (ICDA), 2010 International Conference on.*, pp. 370-374, 25-27 June 2010a.
- [17] 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 (CNDIS), 23-24 February 2011.*
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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.

- [21] 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.
- [22] Camara de Comercio Medellin, «Camara de Comercio Medellin,» Enero 2015. [En línea]. Available: [ttp://www.camaramedellin.com.co/site/Servicios-Empresariales/Informacion-Empresarial/Estadisticas-Camara.aspx](http://www.camaramedellin.com.co/site/Servicios-Empresariales/Informacion-Empresarial/Estadisticas-Camara.aspx).
- [23] V. Guerrero , R. L. Yuste y L. Martínez, Comunicaciones industriales, México: Alfaomega, 2010.
- [24] IEEE, «IEEE 802.11 ORG,» 10 06 2014. [En línea]. Available: <http://www.ieee802.org/>.
- [25] O. Profibus, «Profibus-Profinet,» 2014. [En línea]. Available: <http://www.profibus.com/>.
- [26] B. A. Forouzan, Transmisión de datos y redes de comunicaciones. - 4a ed, Madrid: McGraw-Hill, 2007.
- [27] W. Tomasi, Sistemas de comunicaciones electrónicas, Naucalpan de Juárez: Pearson, 2003.
- [28] Cisco, «Industrial Ethernet: A Control Engineer's Guide,» p. 19, 2010.
- [29] C. Rojas y P. Morell, «GUIDELINES FOR INDUSTRIAL ETHERNET INFRASTRUCTURE,» *IEEE*, pp. 1-18, 2010.
- [30] A. F. Molisch, Wireless Communications, Second Edition, John Wiley & Sons Ltd., 2011.

- [31] I. S. 802.11a, «IEEE Std. 802.11a, Supplement to Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: High-speed Physical Layer in the 5 GHz Band,» *IEEE*, 1999.
- [32] B. Sklar, *Digital Communications; fundamentals and applications.*, Upper Saddle River, N.J: Prentice Hall, 2001.
- [33] J. Zyren y A. Petrick, «Tutorial on Basic Link Budget Analysis,» *Intersil Applications Note*, pp. 1-5, 1998.
- [34] M. Islam, M. A. Hannan, S. A. Samad y A. Hussain, «Bit-Error-Rate (BER) for modulation technique using Software defined Radio,» *International Conference on Electrical Engineering and Informatics. IEEE*, pp. 445-447, 2009.
- [35] K. Fukaw y Y. Tateishi, «Packet-Error-Rate Analysis Using Markov Models of the Signal-to-Interference Ratio for Mobile Packet Systems,» *IEEE TRANSACTIONS ON VEHICULAR TECHNOLOGY, VOL. 61, NO. 6*, pp. 2517-2530, 2012.
- [36] S. Y. Park, . H.-S. Ahn y W. Yu, «Round-Trip Time-based Wireless Positioning without Time Synchronization,» *International Conference on Control, Automation and Systems 2007*, pp. 2323-2326, 2007.
- [37] 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.
- [38] P. Simacek, V. Lucan, J. Seppälä y H. Koivisto, «Remote real-time control working on top,» *Tampere University of Technology, Automation and Control Institute*, 2002.

- [39] J. Colandairaj, G. W. Irwin y W. G. Scanlon, «ANALYSIS OF AN IEEE 802.11B WIRELESS,» *World Congress, Volume # 16 | Part# 1*, 2005.
- [40] A. Yao, S. Strombeck y J. Chi, «Development of a mobile manufacturing system with PDA and PLC,» *Springer-Verlag*, p. 723–729, 2005.
- [41] N. Q. Dinh y D.-S. Kim, «Performance evaluation of priority CSMA-CA mechanism on ISA100.11a wireless network,» *Computer Standards & Interfaces*, pp. 1-7, 2011.
- [42] 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.
- [43] R. C. Lozoya Gamez, P. Marti, M. Velasco y J. M. Fuertes, «Wireless Network Delay Estimation for Time-Sensitive,» *Research report ESAII RR-06-12*, 2006.
- [44] Gamba, Seno, Lucia, Stefano, «Performance Indicators for Wireless Industrial Communication Networks,» *IEEE*, 2010a.
- [45] G. Gamba, L. Seno y S. Vitturi, *IEEE*, 2010b.
- [46] 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*, pp. 1029-1034, 2011.
- [47] J. Chilo, C. Karlsson, P. Ängskog y P. Stenumgaard, «EMI Disruptive Effect on Wireless Industrial Communication Systems in a Paper Plant,» *IEEE*, pp. 221-224, 2009.
- [48] P. Ängskog, C. Karlsson, J. Ferrer Coll, J. Chilo y P. Stenumgaard, «Sources of Disturbances on Wireless Communication in Industrial and Factory Environments,»

- 2010 Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, pp. 281-284, 2010.
- [49] Y. Zheng, A. Xu, Y. Song, W. Zhao y M. Liu, «INDUSTRIAL WIRELESS DETERMINISTIC COMMUNICATION BASED ON WLAN: DESIGN, IMPLEMENTATION AND ANALYSIS,» *IEEE Proceedings of ICCTA2009*, pp. 274-278, 2009.
- [50] M. Jonsson y K. Kunert, «Towards Reliable Wireless Industrial Communication With Real-Time Guarantees,» *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL INFORMATICS, VOL. 5, NO. 4, NOVEMBER 2009*, 2009.
- [51] K. Koumpis, L. Hanna, M. Andersson y J. Magnus, «Wireless Industrial Control and Monitoring beyond Cable Replacement,» *PROFIBUS International Conference*, pp. 1-7, 2005.
- [52] D. Miorandi y S. Vitturi, «Hybrid wired/wireless implementations of Profibus DP: a feasibility study based on Ethernet and Bluetooth,» *Computer Communications*, pp. 946-960, 2004.
- [53] G. Cena, L. Seno, A. Valenzano y C. Zunino, «On the Performance of IEEE 802.11e Wireless Infrastructures for Soft-Real-Time Industrial Applications,» *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL INFORMATICS, VOL. 6, NO. 3, AUGUST 2010*, pp. 425-437, 2010.
- [54] Siemens, «Siemens SCALANCE-W788_Manual,» 2005.
- [55] Siemens, «SIMATIC NET Operating Instructions,» 12 05 2014. [En línea]. Available: <http://w3.siemens.com/mcims/industrial-communication/es/industrial-wireless-communication/componentes-de-red-para-iwlan/access-point/pages/old-puntos-de-acceso-scalance-w-780.aspx>.

- [56] Siemens, «MICROMASTER 440, Instrucciones de uso Edición B1,» 2014.
- [57] Siemens, «SIMATIC S7 SIMATIC S7-300 Control 300 Controladores,» 02 10 2014. [En línea]. Available: https://www.swe.siemens.com/spain/web/es/industry/automatizacion/sce_educacion/documentacion/Documents/SIMATIC%20S7300.pdf.
- [58] Siemens, «SIMATIC NET, Industrial Ethernet Switches SCALANCE X-100,» 02 Octubre 2014. [En línea]. Available: http://cache.automation.siemens.com/dnl/Tk/Tk0NDIzMQAA_24327130_HB/BA_SCALANCE-X-100_78.pdf.
- [59] jnvingenieros, «Catalogos,» 02 Octubre 2014. [En línea]. Available: <http://www.jnvingenieros.com/Web/CATALOGOS/10.pdf>.
- [60] W. G. I. 8. ETHERNET, «IEEE 802.3 Ethernet,» 2014. [En línea]. Available: <http://www.ieee802.org/3/>.
- [61] H. H. NGUYEN y E. SHWEDYK, A First Course in Digital Communications, New York: Cambridge University Press, 2009.
- [62] C. R. Nassar, B. Natarajan, Z. Wu, D. Wiegandt y S. A. Zekavat, Multi-Carrier Technologies for Wireless Communication, NEW YORK: Kluwer Academic Publishers, 2002.
- [63] J. M. Huidobra Moya y D. Roldan Martinez, Comunicaciones en redes WLAN, Mexico: Editorial Limusa S.A., 2006.

- [64] S. X. Z. P. Ding y S. D. E. L. Yin, «An Integrated Design Framework of Fault-Tolerant Wireless Networked Control Systems for Industrial Automatic Control Applications,» vol. 9, nº 1, FEBRUARY 2013.
- [65] 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.
- [66] S. Savazzi, S. Guardiano y U. Spagnolinil, «Wireless Critical Process Control in oil and gas refinery plants.,» *Industrial Technology (ICIT), 2012 IEEE International Conference on.*, 2012.
- [67] 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.
- [68] 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.
- [69] 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.
- [70] D-Link Corporation, «Unified Access Point (AP) Administrator's Guide,» 2008.
- [71] Rohde-Schwarz, «Analizadores_de_Señal_y_Espectro,» 02 Octubre 2014. [En línea]. Available: http://www.rohde-schwarz.es/es/producto/Test_y_medida/Analizadores_de_Se%C3%B1al_y_Espectro/FSC.html.

- [72] Siemens, «Instrucciones Micromaster 440,» 03 10 2014. [En línea]. Available: http://cache.automation.siemens.com/dnl/jk/jkzMTEyOQAA_11887362_HB/MM440_PList_Span_B1.pdf.
- [73] Siemens, «SCALANCE_W788,» 12 2014. [En línea]. Available: https://www.automatyka.siemens.pl/docs/docs_ia/SCALANCE_W788.pdf.