

Caracterización de canales de comunicación por tráfico y arquitectura de la red: una revisión

Characterization of communication channels in terms of traffic and network architecture: a review

Leonardo Serna-Guarín

M. Sc. (c) en Automatización y Control Industrial
Docente Tiempo Completo
Investigador Laboratorio MIRP
Instituto Tecnológico Metropolitano
Medellín, Colombia
leonardoserna@itm.edu.co

Edilson Delgado-Trejos

Ph. D en Ingeniería con línea de investigación en Automática,
Investigador Laboratorio MIRP
Instituto Tecnológico Metropolitano
Medellín, Colombia
edilsondt@gmail.com

Resumen— Las herramientas de software presentan limitaciones de acceso y disponibilidad en los procesos de monitoreo y control industrial, cuando las comunicaciones son afectadas por grandes distancias. Asimismo, las respuestas en tiempo real y la estabilidad también son limitadas por las condiciones de tráfico en redes LAN. Es conocido que las redes Ethernet son ampliamente usadas en comunicaciones industriales por su alto rendimiento en configuraciones de *switches*. Sin embargo, no han sido la solución adecuada para aplicaciones en tiempo real, dado el inconveniente de medir el tiempo de respuesta en la transmisión de datos, y más aún, cuando las topologías de las redes son diferentes y los niveles de tráfico varían permanentemente. En este artículo, se presenta una revisión del estado del arte sobre la caracterización de canales de comunicación en términos de tráfico y arquitectura de la red, donde se determinan campos que aún quedan abiertos en esta área del conocimiento, y se inquieta hacia nuevas alternativas que puedan ser fácilmente adoptables por el sector industrial. Como conclusión, se establece que una técnica integrada por la arquitectura y las características del tráfico en el análisis de redes mejora las perspectivas de rendimiento en sistemas heterogéneos para aplicaciones industriales vía web.

Palabras clave— Canales de comunicación, tráfico, arquitectura de red, monitoreo y control remoto.

Abstract— Software tools face accessibility and availability limitations in monitoring and industrial control processes when communications are affected by long distances. Likewise, real-time answers and stability are also limited by the traffic conditions in LAN network. Ethernet networks are widely-used in industrial communications due to high performance in multi-switch configuration. However, they are not the most appropriate solution for real-time applications, given the difficulty in measuring response times in data transmission, and even more so when the network topologies are different and traffic levels are permanently varying. This paper presents a review of the characterization of communi-

cation channels in terms of traffic and network architecture, identifying unexplored areas and promoting new alternatives that may be easily adopted by the industrial sector. In conclusion, a technique integrated by architecture and traffic characteristics in network analysis may performance in heterogeneous systems for industrial applications via web.

Keywords — Channels of communication, traffic, network architecture, remote monitoring and control.

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente la tecnología más usada a nivel LAN es Ethernet y las más extendida a nivel industrial [1] pero está presenta dificultades para sistemas de tiempo real [2]. Algunas técnicas se han utilizado teniendo en cuenta el hardware, mientras otras usan software especializado, o diferentes análisis de la eficiencia del ancho de banda [3]. Además, se hace necesario considerar otros aspectos que involucran diferentes retardos y condiciones que permitan, a fin de establecer las condiciones del canal, la implementación de sistemas en tiempo real [4].

Las comunicaciones Ethernet a través de internet, no garantizan calidad de servicio (QoS) [5], puesto que las diferentes arquitecturas de comunicaciones, la carga de datos, el *throughput* y los diferentes tipos de retardos lo hacen un sistema complejo de predecir [6], además de dificultar su modelado o simulación de forma eficiente. Otros aspectos son la latencia [7], el efecto *jitter* y el poder convertir el análisis de tráfico en un proceso determinístico [8] [9]. Los requisitos de tiempo

crítico enfrentan una dificultad en Ethernet por la cantidad de colisiones en el canal, y en los dispositivos por la estrategia del flujo de datos FIFO (*First-in First-out*) [10]. Adicionalmente, se añaden dificultades por los cambios en tecnología que se suman a la arquitectura de la red y que utilizan estándares no hechos para tiempo real [11]. Los sistemas híbridos de comunicaciones involucran velocidades diferentes y cambiantes, lo que dificulta aún más las condiciones estables y predecibles del canal y el tráfico [12], [13]. Es así, que la caracterización del canal involucra análisis de tráfico [14] basado en los componentes que forman la arquitectura de la red para convertirlo en un sistema determinable y predecible [15].

En este artículo se presenta una revisión del estado del arte sobre la caracterización de canales de comunicación en términos del tráfico y la arquitectura de la red, a fin de inquietar hacia nuevas investigaciones en esta área del conocimiento. Esta revisión inicialmente centra su discusión sobre las características relevantes que deben tomarse en cuenta en un canal de comunicaciones; luego se plantea la influencia que ejerce la arquitectura de la red en el tráfico de datos y, por último, se presenta el impacto que ejerce la caracterización del canal en aplicaciones de monitoreo y control industrial. Es importante anotar que este artículo se presenta en el marco del proyecto de investigación PM10255 financiado por el Centro de Investigación del Instituto Tecnológico Metropolitano ITM de Medellín.

2. CONTENIDO

2.1. Características relevantes de un canal de comunicaciones

Las redes de comunicaciones han sido comúnmente configuradas así: de manera local (LAN), a nivel de ciudad (MAN) y a nivel mundial (WAN). Particularmente, el entorno LAN se define en términos del protocolo utilizado y de la topología empleada para acceder a la red [16]. A pesar de la amplia expansión de las redes LAN (específicamente Ethernet), se han presentado dificultades para la implementación de sistemas en tiempo real [17]. En la práctica, la tecnología Ethernet utiliza el protocolo CSMA/CD (Acceso Múltiple con escucha de portadora y Detección de Colisiones)

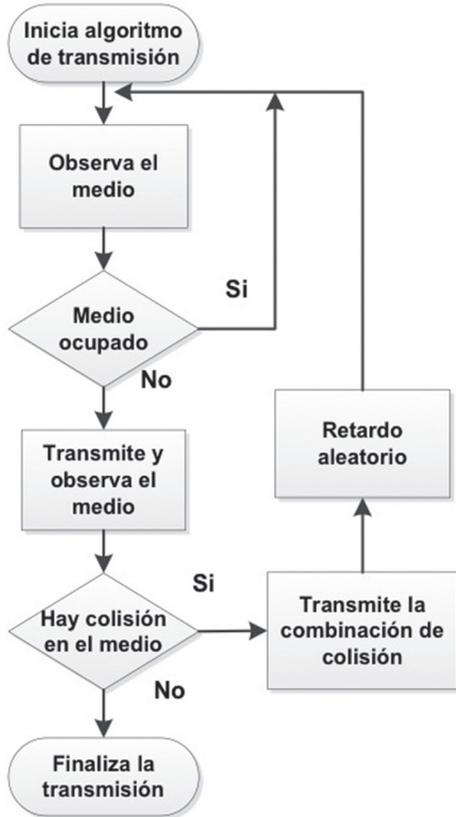
para acceder al medio, el cual opera de manera no determinística (ver Fig. 1 para analizar el modo de operación de este protocolo), y por lo tanto, no es la forma más recomendada para sistemas donde la respuesta en tiempo real es crucial [18]. Debido a esto, algunas aplicaciones empresariales han sido implementadas, modificando parámetros en el estándar [3], [19], pero también el alto costo de los buses de campo que permiten la interconexión de dispositivos industriales a la red, ha hecho que se busquen alternativas aplicando Ethernet y extendiéndolo a través de internet [20], con el apoyo del protocolo de sincronización de internet NTP (*Network Time Protocol*) [21].

En estudios realizados con Ethernet para aplicación industrial, se han considerado características como: el máximo retardo de transferencia, el *jitter* en la transmisión, el ancho de banda disponible y la pérdida de paquetes [22], [23]. También, se debe tener en cuenta la latencia de la red [24] y los tiempos tomados por los servidores para responder a los clientes [25], ya que esto afecta las condiciones de tiempo real del sistema [26]. Un estudio presentado en [4], analiza la influencia de los tiempos generados por estaciones que se suman a los sistemas de comunicaciones, considerando los retardos computacionales, los retardos de los controladores de los sensores y de los actuadores. Por su parte, la teoría existente y las medidas realizadas a los canales Ethernet es imprecisa [27], porque el estándar utiliza el ancho de banda disponible del canal cuando ocurren las colisiones y retransmisiones, y es esto lo que dificulta determinar de manera precisa las condiciones del canal y del flujo de datos [17]. Adicionalmente, Ethernet presenta un inestable rendimiento al tráfico pesado y a una gran cantidad de distribución de retardos [4].

Las herramientas para la captura de datos y análisis de la información comprenden modelos matemáticos y pruebas de datos reales que se relacionen con estos modelos, los cuales pueden ser ejecutados en modo simulado, de forma que los resultados deben evidenciar la presencia de errores que permitan diferenciarlos de los datos reales [28]. Otro parámetro utilizado para caracterizar un canal de comunicaciones es la tasa de transmisión [29], donde la medida del flujo de datos por el canal es obtenida con la herramienta ping, la cual determina el retardo de transmisión

de los paquetes [30]. De la misma manera, se obtiene el RTT (*Round Trip Time*), el cual detalla el tiempo requerido por los paquetes para ir a su destino y retornar a su origen [31]. Es importante tener presente el fenómeno de la caché de los sistemas operativos, los cuales no permiten una medida confiable con el RTT [32].

Fig. 1. MODO DE OPERACIÓN DEL ACCESO AL MEDIO CSMA/CD



Fuente: autor

Del mismo modo, otra característica usada para medir la calidad de los datos es la pérdida de paquetes y la cantidad de paquetes por unidad de tiempo que pasan a través del canal [33]. En la última década ha sido frecuente el uso de herramientas de software y hardware [34] que permiten determinar parámetros relevantes como el jitter, los retardos de transmisión, throughput y periodos de tiempo sin conectividad de la red. Como ejemplo, se realizó para este artículo un análisis de tráfico en un adaptador con la herramienta PRTG Network Monitor de Paessler, en la cual se obtuvo la Fig. 2 donde se puede observar la cantidad de tráfico en el tiempo y las interrupciones en el flujo de datos. En [35], se propone un prototipo para el análisis de un canal de comunicaciones

basado en hardware, con el cual se evalúa el tráfico de red, el rendimiento, los retardos y el jitter. Actualmente, se desarrollan aplicaciones que intentan solucionar el problema de los retardos en las redes Ethernet para la implementación de controles en tiempo real.

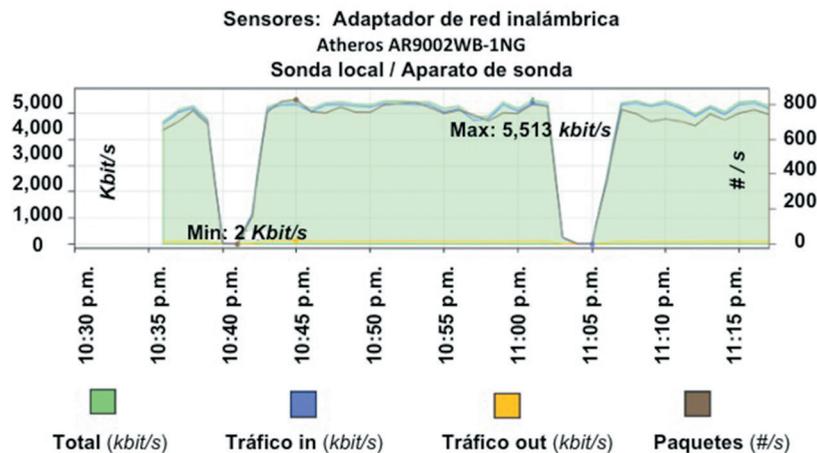
Por ejemplo en [27], es presentado un método computacional de conexión punto a punto, basado en los retardos de los paquetes y en la topología de la red para minimizar los retardos en la comunicación. En general, la literatura no reporta estudios que permitan el análisis integral de las características involucradas en un canal de comunicaciones para aplicaciones de máxima exigencia de rendimiento del canal. De la misma forma, las investigaciones realizadas en esta área del conocimiento, no ofrecen procedimientos determinísticos que permitan establecer con exactitud las características en orden de establecer así condiciones de rendimiento para procesos de monitoreo y control en tiempo real.

2.2. Influencia de la arquitectura de la red en el tráfico

En la red de comunicaciones se distinguen varios modelos de tráfico que pueden ser: tiempo real periódico, tiempo real esporádico y tráfico de mejor esfuerzo [17]. En estos modelos, los retardos del tráfico de tiempo real se incrementan cuando se adiciona una carga de datos al sistema. Para mejorar estos retardos de respuesta en tiempo real, se requiere una arquitectura basada en automatización, esta se encuentra constituida por muchos dispositivos inteligentes configurados en una red de área local o global [36]. Por otra parte, la configuración de la red permite la reducción de los sistemas de cableado y el fácil intercambio de información entre los dispositivos [37]. De modo específico, estas arquitecturas de red se fundamentan en el estándar Ethernet porque permiten más interconexión de dispositivos, buscando que los desarrollos posteriores puedan tener un mejor desempeño para las aplicaciones en tiempo real [38].

En el mismo sentido, las redes de comunicaciones pueden ser analizadas desde varios niveles: arquitectura, tecnología empleada y servicios prestados [39]. La arquitectura de comunicaciones se compone de nodos que se unen a través

Fig. 2. CANTIDAD DE TRÁFICO E INTERRUPCIÓN DEL FLUJO ANALIZADO CON PRTG



Fuente: autor

de switch, y tanto la organización o distribución de estos nodos, como su organización física y funcionamiento lógico, constituyen la arquitectura de la red. No obstante, la arquitectura está relacionada con un protocolo de comunicación y unas interfaces o dispositivos de interconexión que incluyen aplicaciones y usuarios [40], [41]. De esta forma, se interconectan las diferentes redes y las políticas de enrutamiento con otras arquitecturas, conforman un arreglo o unión de varias estructuras que se pueden diferenciar de arquitecturas básicas [42], las cuales conforman esencialmente el núcleo de la red, el acceso y la distribución de los equipos instalados.

En el campo industrial se han definido niveles para caracterizar o reconocer el modelo de comunicaciones: el primero se enmarca en los dispositivos, el segundo incluye la operación y el monitoreo, y el último corresponde a la planta donde opera la gestión y administración de la red [43]. Por tanto, esta organización de red permite la interoperabilidad e interconexión entre los diferentes niveles de comunicaciones [44], al quedar incluidos los tradicionales buses de campo, las redes Ethernet y la redes inalámbricas [45]. Asimismo, la arquitectura de red industrial, involucra conexiones inalámbricas, las cuales utilizan el protocolo de control de acceso al medio inalámbrico CSMA/CA (Censado de portadora de Múltiple Acceso con Evasión de Colisiones) [46]. En efecto, los segmentos inalámbricos forman parte de las redes locales Ethernet, aunque generan una latencia diferente en la red y determinan otras con-

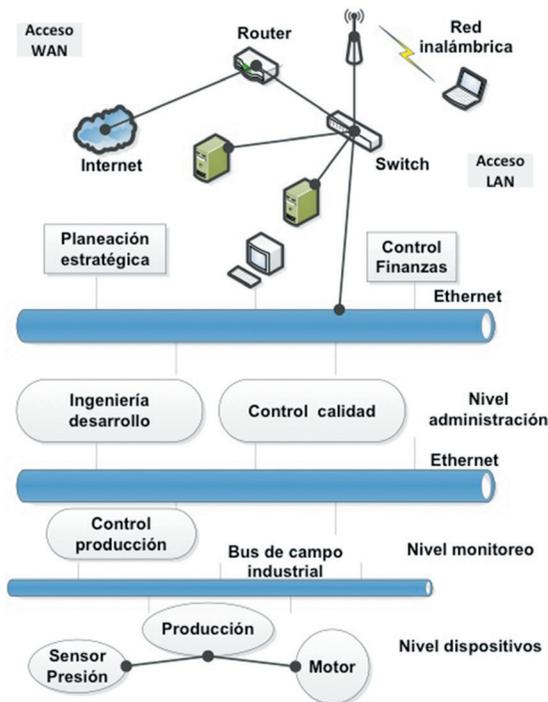
diciones y propiedades en la arquitectura [47]. En [48] se realizan estudios con tecnologías inalámbricas donde se evidencia la variabilidad que contienen diferentes arquitecturas de la red al utilizar diferentes protocolos. Por su parte, en [49] proponen un método con algoritmos genéticos para disminuir el retardo terminal a terminal con base en una distribución adecuada de los dispositivos en los switch, con lo que se permite segmentar las colisiones generadas en las redes Ethernet.

Es importante resaltar que la interconexión de dispositivos en diferentes topologías de red, han demostrado mejores resultados para sistemas en tiempo real, cuando son realizadas las distribuciones con switch conectados directamente al nivel donde operan los actuadores [50]. En estas consideraciones, los cambios en el cableado o infraestructura, pueden afectar el rendimiento, el tráfico, e impactar los procesos que requieren tiempo real [38]. La Fig. 3 muestra una arquitectura híbrida en un sistema de comunicación industrial unido a Ethernet, a dispositivos inalámbricos y a internet.

Otro aspecto importante orientado a mejorar el desempeño de las redes Ethernet, después de la segmentación a través de switch [51], es la creación de VLAN (Virtual Local Area Network). Aquí, los paquetes tienen un nuevo direccionamiento, aunque el incremento de nodos o dispositivos en la red hace que el ancho de banda compartido se reduzca, bajando el throughput e incrementando los retardos [52]. Por otro lado, las VLAN, los switch y la apropiada administración de recursos, incrementan el rendimiento del sistema de co-

municaciones, haciéndolo tolerante a fallos [53]. Por ejemplo, en [12] se implementan alternativas con sistemas de comunicaciones cableados e inalámbricos, ubicando los dispositivos en diferentes segmentos para balancear el retardo de los paquetes y la carga de tráfico de la red, con el fin de mejorar las condiciones de respuesta de los sistemas propuestos [54], [34]. También, se han estudiado la implementación de políticas en la prioridad de tráfico [55], [56] y se han realizado desarrollos con hardware especializado [57], [58], a fin de obtener mejoras en las condiciones de tráfico, posibilitando cambiar los tiempos de operación y respuesta de los sistemas analizados [59].

Fig. 3. RED INDUSTRIAL CONFIGURADA CON ETHERNET Y ACCES



Fuente: autor

En otro estudio [60], se propone un esquema para mejorar las condiciones de la red basado en direccionamiento, optimización en la transferencia de paquetes y sincronización programada. Una dificultad presentada por los switch, es el tiempo que demora el protocolo STP (Spanning Tree Protocol) en recuperarse cuando ocurre una falla [61], ya que son alterados los requerimientos críticos de respuesta en tiempo real para sistemas de monitoreo y control. En [38], se propone un algoritmo espectral basado en una red jerárquica con conexiones redundantes, cuya infraestructura mi-

nimiza los retardos sobre una arquitectura Ethernet. De igual forma, en [17] se implementan modificaciones para mejorar el aprovechamiento del canal de comunicaciones: minimizando el número de colisiones en forma determinística, utilizando switch, cambiando la MAC de los dispositivos y eliminando las colisiones.

Los retardos y tiempos de procesamiento que involucran el tiempo de una conexión punto a punto [40] [62], dependen de la arquitectura de la red y de sus componentes físicos, tales como cables, resistencia y porcentaje de ocupación del canal. Aunque en muchos casos, la determinación de estas características no se realiza de manera fácil, pueden ser utilizadas como herramientas de software para evaluar las condiciones de la red de manera generalizada [47]. Por lo tanto, la arquitectura determina las características específicas de tráfico en una red de comunicaciones, puesto que aquí es donde se involucran la distribución de los dispositivos y elementos. Sin embargo, en la literatura no se evidencia suficiente claridad en cuanto a la influencia de las características del tráfico en la red y los inconvenientes ocasionados por los sistemas operativos y las aplicaciones.

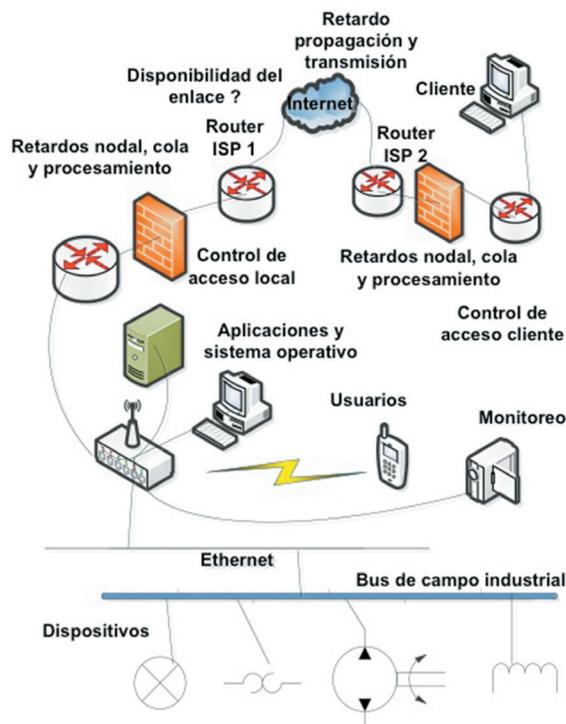
2.3. Proyección hacia el monitoreo y control remoto

A pesar de que Ethernet es la tecnología dominante en el mundo de las comunicaciones, en el ámbito industrial no se ha establecido como alternativa dominante por los requerimientos que demandan los procesos industriales, tales como tiempo real, disponibilidad y seguridad [63]. Sin embargo, en [59] se propone un modelo embebido para el monitoreo y control remoto a través de internet, utilizando tecnología VPN (Virtual Private Network). La dificultad radica en la sensibilidad a la disponibilidad del canal y a las condiciones variantes del tráfico de red. Por consiguiente, estas implementaciones vía internet, presentan inconvenientes relacionados con los retardos que se generan en el tráfico de la red y la seguridad [64], siendo este uno de los temas más principales por resolver [65], [66], si se toma en consideración que estos modelos no presentan un buen rendimiento para los procesos de control [40].

De la misma forma, en [67] es implementado un sistema vía web sobre TCP/IP con fines edu-

cativos para el control de plantas de pilotaje. Los cambios en el rendimiento de la red no afectan dramáticamente el proceso, pero se presentan dificultades determinantes para la respuesta en tiempo real. Estos experimentos no han suplido la necesidad de tiempo real requerido, por presentar gran complejidad con la tecnología Ethernet [68]. En otro caso, se implementan servidores web embebidos a nivel local, para acceso vía internet, los cuales mejoran el rendimiento, a pesar de utilizar tecnologías cableadas e inalámbricas [69]. En la Fig. 4 se detallan los elementos que se deben tener presente en un sistema de monitoreo vía web y que son caso de estudio por la comunidad científica con el fin de optimizar los tiempos requeridos en el proceso de control remoto. La comunicación terminal a terminal involucra mínimo 2 router de ISP, los cuales contienen recursos no controlables toda vez que dependen de los proveedores de servicio a internet.

Fig. 4. ELEMENTOS PRESENTES EN UN SISTEMA DE COMUNICACIONES DE MONITOREO VIA WEB



Fuente: autor

Con herramientas como el RTT y métodos estadísticos, se pueden predecir las condiciones de tráfico para determinar el desempeño del canal orientado a la implementación de sistemas de

monitoreo y control [70]. Asimismo, se han explorados otros recursos con redes neuronales para la predicción de tráfico y la optimización del rendimiento computacional, que faciliten las aplicaciones en tiempo real [71].

En general, el monitoreo y control vía internet presentan dificultades de rendimiento y seguridad al integrar diferentes plataformas y protocolos. La literatura actual no evidencia soluciones que permitan determinar y predecir de manera acertada el comportamiento del canal para sistemas de monitoreo y control en tiempo real utilizando internet. Es por esto, que se requieren avances en los estudios relacionados con el modelado del canal, teniendo en cuenta las conexiones y topologías híbridas que permitan determinar en conjunto su desempeño.

3. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los estudios realizados sobre el tráfico en los canales de comunicación carecen de evaluaciones conjuntas entre las características que forman parte, tanto a nivel de arquitectura como del comportamiento del flujo de datos a través del canal, orientado a determinar de manera acertada las propiedades y el comportamiento del medio involucrados en el establecimiento de las condiciones predictivas para la implementación programada de sistemas en tiempo real. Asimismo, no son frecuentes los estudios que establecen la influencia directa que tiene la arquitectura de la red sobre el comportamiento del tráfico de datos, toda vez que en forma aislada se experimenta con cada dispositivo de la red.

Extender el monitoreo y control en el ámbito local desde la industria hasta la red global (internet) presenta dificultades de seguridad y estabilidad que no garantizan su implementación en labores críticas de tiempo real. Es por esto, que se requieren nuevos estudios en cuanto al modelado del canal, con el fin de determinar ventanas temporales de disponibilidad que garanticen el rendimiento mínimo necesario para las operaciones. De igual forma, se requieren nuevas investigaciones en cuanto a la eficiencia del canal, de manera que se promuevan mejores implementaciones que determinen la importancia e influencia de la velocidad de procesamiento de los dispositivos, el rendimiento y disponibilidad del medio. Finalmen-

te, la intervención del protocolo de comunicación que opera en el canal podría ser intervenido con marca de prioridad en los paquetes, con el fin de establecer en la red condiciones de prioridad y rapidez para la entrega de datos en el entorno local.

REFERENCIAS

- [1] J. Kurose y K. Ross, "Redes de computadoras," Pearson Educación, 5 ed., 2010.
- [2] D. W. Pritty, J. R. Malone, D. N. Smeed, S. K. Banerjee, y N. L. Lawrie, "A real-time upgrade for ethernet based factory networking," in Proceedings of the 1995 IEEE IECON 21st International Conference on Industrial Electronics, Control, and Instrumentation, vol. 2, pp. 1631 -1637, 1995.
- [3] P. Pedreiras, P. Gai, L. Almeida, y G. C. Buttazzo, "FTT-Ethernet: a flexible real-time communication protocol that supports dynamic QoS management on Ethernet-based systems," IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 1, no. 3, pp. 162 - 172, Aug. 2005.
- [4] K. C. Lee y S. Lee, "Performance evaluation of switched ethernet for real-time industrial communications," in Computer Standards & Interfaces, vol. 24, no. 5, pp. 411-423, Nov. 2002.
- [5] J. Wang y S. Keshav, "Efficient and accurate ethernet simulation," in Conference on Local Computer Networks LCN, pp. 182 -191, 1999.
- [6] L. Tao, T. Jiang, y Z. Xiangli, "A solution for ethernet-based real-time communication network of distributed numerical control system," in Technology and Innovation Conference (ITIC 2009) pp. 1 -6, 2009.
- [7] M. Felser, "Ethernet TCP/IP in automation: a short introduction to real-time requirements", in 8th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, Proceedings, vol. 2, pp. 501 -504, 2001.
- [8] P. Ferrari, A. Flammini, D. Marioli, A. Taroni, y F. Venturini, "Experimental analysis to estimate jitter in PRO-FINET IO Class 1 networks," in IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, ETFA, pp. 429 -432, 2006.
- [9] Y. Chen, T. Farley, y N. Ye, "QoS requirements of network applications on the Internet," Information Knowledge Systems Management, vol. 4, no. 1, pp. 55-76, 2004.
- [10] M. Tan y Z. Wei, "A real-time scheduling algorithm for industrial communication," in IEEE International Conference on Intelligent Computing and Intelligent Systems, ICIS, vol. 1, pp. 331 -335, 2009.
- [11] T. Cucinotta, A. Mancina, G. F. Anastasi, G. Lipari, L. Mangeruca, R. Checco, y F. Rusina, "A Real-Time Service-Oriented Architecture for Industrial Automation," in IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 5, no. 3, pp. 267 -277, Aug. 2009.
- [12] Y. Cetinceviz y R. Bayindir, "Design and implementation of an Internet based effective controlling and monitoring system with wireless fieldbus communications technologies for process automation— an experimental study," ISA Transactions, vol. 5, no. 3, pp. 461-470, May. 2012.
- [13] X. Li, J. Scharbarg, y C. Fraboul, "Worst-case delay analysis on a real-time heterogeneous network," in 2012 7th IEEE International Symposium on Industrial Embedded Systems (SIES), pp. 11 -20, 2012,.
- [14] K. Elmeleegy y A. L. Cox, "EtherProxy: Scaling Ethernet By Suppressing Broadcast Traffic," in IEEE INFOCOM, pp. 1584 -1592, 2009.
- [15] J. Imtiaz, J. Jasperneite, y L. Han, "A performance study of Ethernet Audio Video Bridging (AVB) for Industrial real-time communication," in IEEE Conference on Emerging Technologies Factory Automation, ETFA, pp. 1 -8, 2009.
- [16] J. S. Beasley, "Networking," Pearson Education, 2nd Edition., Michigan, 2008.
- [17] J.-D. Decotignie, "Ethernet-based real-time and industrial communications," Proceedings of the IEEE, vol. 93, no. 6, pp. 1102 -1117, Jun. 2005.
- [18] A. Yiming y T. Eisaka, "Industrial hard real-time traffic protocol based on switched Ethernet," in IEEE International Symposium on Communications and Information Technology, 2005. ISCIT, vol. 1, pp. 205 - 208, 2005.
- [19] Y. Zou, T. Wang, H. Wei, y M. Liu, "A hard real-time robot communication approach based on preemptive CSMA/CA," in 6th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), pp. 1875 -1880, 2011.
- [20] P. Plesowicz y M. Metzger, "Experimental testing of TCP/IP/ethernet communication for automatic control," in Testing of Software and Communicating Systems, A. Petrenko, M. Veanes, J. Tretmans, y W. Grieskamp, Eds. Springer Berlin Heidelberg, pp. 260-275, 2007.
- [21] D. L. Mills, "Internet time synchronization: the network time protocol," in IEEE Transactions on Communications, vol. 39, no. 10, pp. 1482 -1493, Oct. 1991.
- [22] L. Thrybom y G. Prytz, "QoS in switched industrial ethernet," in IEEE Conference on Emerging Technologies Factory Automation, ETFA, pp. 1 -8, 2009.

- [23] C. Rojas y P. Morell, "Guidelines for industrial ethernet infrastructure implementation: a control engineer's guide," in Cement Industry Technical Conference, IEEE-IAS/PCA 52nd, pp. 1 -18, 2010,
- [24] G. Wang, J. Liu, H. Yao, y J. Ning, "Congestion control for industrial ethernet using network calculus," in International Symposium on Intelligent Information Technology Application Workshops, IITAW, pp. 193 -196, 2008.
- [25] T. Skeie, S. Johannessen, y O. Holmeide, "Timeliness of real-time IP communication in switched industrial Ethernet networks," in IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 2, no. 1, pp. 25 - 39, Feb. 2006.
- [26] J. J. Scarlett y R. W. Brennan, "Evaluating a new communication protocol for real-time distributed control," Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, vol. 27, no. 3, pp. 627-635, 2011.
- [27] K. Schmidt y E. G. Schmidt, "A longest-path problem for evaluating the worst-case packet delay of switched ethernet," in 2010 International Symposium on Industrial Embedded Systems (SIES), pp. 205 -208, 2010.
- [28] J. Tretmans, "Test generation with inputs, outputs and repetitive quiescence," in Software—Concepts and Tools, 1996. [Online]. Available: <http://doc.utwente.nl/65463/>.
- [29] A. Barczyk, D. Bortolotti, A. Carbone, J. P. Dufey, D. Galli, y B. Gaidioz, "High rate packets transmission on ethernet LAN using commodity hardware," in Real Time Conference, 14th IEEE-NPSS, p. 6, 2005.
- [30] P. Li, W. Zhou, y Y. Wang, "Getting the real-time precise round-trip time for stepping stone detection," in 2010 4th International Conference on Network and System Security (NSS), pp. 377 -382, 2010.
- [31] F. Ping, C. McConnell, y J.-H. Hwang, "A retrospective approach for accurate network latency prediction," in Proceedings of 19th International Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN), pp. 1 -6, 2010.
- [32] A. S. Tanenbaum, "Redes de computadoras," Pearson Educación, 2003.
- [33] S. Avallone, A. Pescapé, S. Pietro, y G. Ventre, "Analysis and performance evaluation of the real time traffic on premium IP (PIP) Network," .
- [34] P. Ferrari, A. Flammini, D. Marioli, y A. Taroni, "A distributed instrument for performance analysis of real-time ethernet networks," in IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 4, no. 1, pp. 16 -25, Feb. 2008.
- [35] A. Depari, P. Ferrari, A. Flammini, D. Marioli, y A. Taroni, "A new instrument for real-time ethernet performance measurement," in IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 57, n.o 1, pp. 121 -127, Jan. 2008.
- [36] P. Brooks, "Ethernet/IP-industrial protocol", in 8th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, Proceedings, vol. 2, pp. 505 -514, 2001.
- [37] B. Addad y S. Amari, "Delay evaluation and compensation in ethernet-networked control systems," presented at the 16th International Conference on Real-Time and Network Systems (RTNS), 2008.
- [38] N. Krommenacker, E. Rondeau, y N. Divoux, "Study of algorithms to define the cabling plan of switched Ethernet for real-time applications," in 8th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, Proceeding, vol.1, pp. 223 -230, 2001.
- [39] G. Fiche y G. Hébuterne, "Communicating Systems & Networks: Traffic & Performance," Kogan Page Science, 2004.
- [40] N. Krommenacker, J. P. Georges, E. Rondeau, y T. Divoux, "Designing, modelling and evaluating switched Ethernet networks in factory communication systems," RTLIA, p. 55, 2002.
- [41] S. H. Yang y J. L. Alty, "Development of a distributed simulator for control experiments through the internet," Future Generation Computer Systems, vol. 18, no. 5, pp. 595-611, Apr. 2002.
- [42] H. Hashim y Z. A. Haron, "A study on industrial communication networking: ethernet based implementation," in International Conference on Intelligent and Advanced Systems, ICIAS, pp. 1111 -1114, 2007.
- [43] S. Vitturi, "On the use of ethernet at low level of factory communication systems," in Computer Standards & Interfaces, vol. 23, no. 4, pp. 267-277, sep. 2001.
- [44] R. H. Khan y J. Y. Khan, «A comprehensive review of the application characteristics and traffic requirements of a smart grid communications network», Computer Networks, vol. 57, no. 3, pp. 825-845, Feb. 2013.
- [45] S.-L. Jämsä-Jounela, "Future trends in process automation," in Annual Reviews in Control, vol. 31, no. 2, pp. 211-220, 2007.
- [46] A. Flammini, P. Ferrari, E. Sisinni, D. Marioli, y A. Taroni, "Sensor interfaces: from field-bus to ethernet and internet," in Sensors and Actuators A: Physical, vol. 101, no. 1-2, pp. 194-202, Sep. 2002.
- [47] A. B. Lugli, M. M. Dias Santos, y L. R. Horta Rodrigues Franco, "A computer tool to support in design of industrial ethernet," ISA Transactions, vol. 48, no. 2, pp. 228-236, abr. 2009.

- [48] Z. Machacek y V. Srovnal, "Communication network model for industrial control," in *Roedunet International Conference (RoEduNet)*, 9th, pp. 293-298, 2010.
- [49] J.-P. Georges, N. Krommenacker, T. Divoux, y E. Rondeau, "A design process of switched ethernet architectures according to real-time application constraints," in *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 19, no. 3, pp. 335-344, Apr. 2006.
- [50] L. Carro-Calvo, S. Salcedo-Sanz, J. A. Portilla-Figueras, y E. G. Ortiz-García, "A genetic algorithm with switch-device encoding for optimal partition of switched industrial Ethernet networks," in *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 33, no. 4, pp. 375-382, Jul. 2010.
- [51] R. Viegas, R. A. M. Valentim, D. G. Teixeira, y L. F. Guedes, "Analysis of protocols to ethernet automation networks," in *SICE-ICASE, 2006. International Joint Conference*, pp. 4981-4985, 2006.
- [52] M. R. Nusekabel y K. J. Christensen, "Using tabu search to find optimal switched LAN configurations," in *IEEE Southeastcon, Proceedings, 1998*, pp. 298-301, 1998.
- [53] R. A. de M. Valentim, A. H. F. Morais, G. B. Brandao, y A. M. G. Guerreiro, "A performance analysis of the ethernet nets for applications in real-time: IEEE 802.3 and 802.3 1 Q," in *6th IEEE International Conference on Industrial Informatics, INDIN*, pp. 956-961, 2008.
- [54] S. Vitturi y D. Miorandi, "Hybrid ethernet/IEEE 802.11 networks for real-time industrial communications," in *10th IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, ETFA*, vol. 2, pp. 7-449, 2005.
- [55] S.-K. Kweon y K. G. Shin, "Achieving real-time communication over Ethernet with adaptive traffic smoothing," in *Sixth IEEE Real-Time Technology and Applications Symposium, RTAS Proceedings*, pp. 90-100, 2000.
- [56] J. Chen, Z. Wang, y Y. Sun, "Real-time capability analysis for switch industrial Ethernet traffic priority-based," in *Proceedings of the 2002 International Conference on Control Applications*, vol. 1, pp. 525 - 529, 2002..
- [57] R. Santos, R. Marau, A. Vieira, P. Pedreiras, A. Oliveira, y L. Almeida, "A synthesizable Ethernet switch with enhanced real-time features," in *35th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics, IECON* ,, pp. 2817-2824, 2009.
- [58] T. Shon y J. Moon, "A hybrid machine learning approach to network anomaly detection," in *Information Sciences*, vol. 177, no. 18, pp. 3799-3821, Sep. 2007.
- [59] L. Xiaohu, H. Yiping, y L. Hailang, "Based on embedded serial device remote monitoring system," in *International Conference on Intelligent Computing and Integrated Systems (ICISS)*, pp. 129-131, 2010..
- [60] J. Jasperneite, J. Imtiaz, M. Schumacher, y K. Weber, "A Proposal for a Generic Real-Time Ethernet System," in *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 5, no. 2, pp. 75-85, May, 2009.
- [61] S. Kubler, E. Rondeau, y J.-P. Georges, "Dependability of switched network architectures for Networked Control Systems," in *IEEE International Conference on Mechatronics (ICM)*, pp. 761-766, 2011.
- [62] N. Kalappa, K. Acton, M. Antolovic, S. Mantri, J. Parrott, J. Luntz, J. Moyne, y D. Tilbury, "c in IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, ETFA ,pp. 1061-1064, 2006.
- [63] S. Paul, J. Pan, y R. Jain, "Architectures for the future networks and the next generation Internet: A survey," in *Computer Communications*, vol. 34, no. 1, pp. 2-42, 2011.
- [64] S. Yang, X. Chen, y J. Alty, "Design issues and implementation of internet-based process control systems," in *Control Engineering Practice*, vol. 11, no. 6, pp. 709-720, Jun. 2003.
- [65] E. J. Byres, "Designing secure networks for process control", in *Pulp and Paper, Industry Technical Conference Record of 1999 Annual*, pp. 63-67, 1999.
- [66] L. Han, J. Jasperneite, y T. Werner, "DIVAN: A network calculator for the off-line performance analysis of Virtual Automation Networks," in *2010 8th IEEE International Workshop on Factory Communication Systems (WFCS)*, pp. 293-302, 2010.
- [67] M. Metzger, "Virtual controllers improve internet-based experiments on semi industrial pilot plants," pp. 2282-2282, 2005.
- [68] M. Metzger y G. Polaków, "Cooperative internet-based experimentation on semi-industrial pilot plants," in *Cooperative Design, Visualization, and Engineering*, Y. Luo, Ed. Springer Berlin Heidelberg, pp. 265-272, 2008.
- [69] C. J. Hong, L. K. Luong, y S. Y. Chark, "Building automation through web interface," in *2012 IEEE Conference on Sustainable Utilization and Development in Engineering and Technology (STUDENT)*, pp. 299-304, 2012.
- [70] W. Hu, G.-P. Liu, y D. Rees, "Networked Predictive Control Over the Internet Using Round-Trip Delay Measurement," in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 57, no. 10, pp. 2231-2241, Oct. 2008.
- [71] R.-M. Chen, "Reducing network and computation complexities in neural based real-time scheduling scheme," in *Applied Mathematics and Computation*, vol. 217, no. 13, pp. 6379-6389, Mar. 2011.