

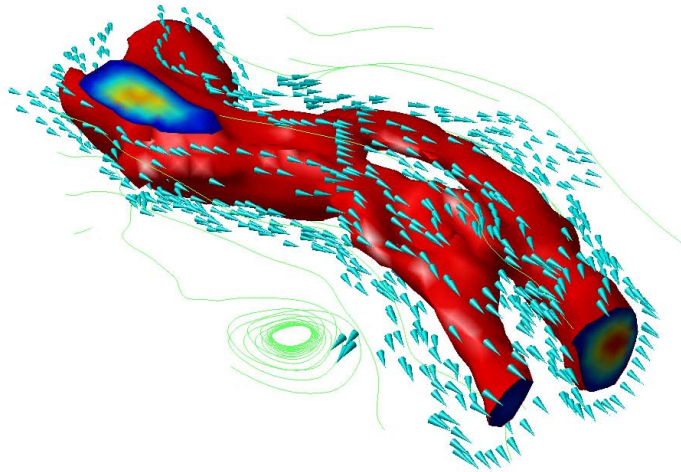
TRANSFERENCIA ÓPTIMA DE DATOS PARA el monitoreo y control remoto de sistemas en tiempo real

Leonardo Serna Guarín
Luis Javier Morantes Guzmán
Edilson Delgado Trejos

FONDO
EDITORIAL
ITM



TRANSFERENCIA ÓPTIMA DE DATOS PARA EL
MONITOREO Y CONTROL REMOTO DE SISTEMAS EN
TIEMPO REAL



TRANSFERENCIA ÓPTIMA DE DATOS PARA EL
MONITOREO Y CONTROL REMOTO DE SISTEMAS EN
TIEMPO REAL

LEONARDO SERNA GUARÍN

LUIS JAVIER MORANTES GUZMÁN

EDILSON DELGADO TREJOS



Serna Guarín, Leonardo

Transferencia óptima de datos para el monitoreo y control remoto de sistemas en tiempo real / Leonardo Serna Guarín, Luis Javier Morantes Guzmán, Edilson Delgado Trejos –1a ed.– Medellín : Fondo Editorial ITM, 2015.
115 p. : il. – (Investigación Científica)

Incluye referencias bibliográficas
ISBN 978-958-8743-76-9

1. Sistemas de comunicaciones 2. Comunicación en tiempo real 3. Ethernet 4. Canales de comunicación 5. Redes de comunicación 6. Análisis multivariado I. Delgado Trejos, Edilson II. Morantes Guzmán, Luis Javier III. Tit. IV. Serie

621.382 SCDD 21 ed.

Catalogación en la publicación - Biblioteca ITM

Transferencia óptima de datos para el monitoreo y control remoto de sistemas en tiempo real

©LEONARDO SERNA GUARÍN
©LUIS JAVIER MORANTES GUZMÁN
©EDILSON DELGADO TREJOS
©FONDO EDITORIAL ITM

Edición: noviembre de 2015
ISBN: 978-958-8743-76-9
Hechos todos los depósitos legales

Rectora

MARÍA VICTORIA MEJÍA OROZCO

Editora

SILVIA INÉS JIMÉNEZ GÓMEZ

Comité editorial

EDUARD EMIRO RODRÍGUEZ RAMÍREZ, MSc
JAIME ANDRÉS CANO SALAZAR, PhD
YOLANDA ÁLVAREZ RÍOS, MSc
SILVIA INÉS JIMÉNEZ GÓMEZ, MSc
VIVIANA DÍAZ DÍAZ, Esp

Corrección de textos

LILIA M. CORTÉS FONNEGRA

Diagramación

LEONARDO SERNA GUARÍN
EDILSON DELGADO TREJOS

Diseño de carátula

JULIANA ECHEVERRI GARCÍA

Editado en Medellín, Colombia

Fondo Editorial ITM

Instituto Tecnológico Metropolitano
Calle 73 No. 76A 354
Tel.: (574) 440 5197 • Fax: 440 5246
www.itm.edu.co
Medellín – Colombia

Las opiniones, originales y citas del texto son de la responsabilidad de los autores. El ITM salva cualquier obligación derivada del libro que se publica. Por lo tanto, ella recaerá única y exclusivamente sobre los autores.

Este libro es derivado de los proyectos de investigación con código PM10255 y P13115, financiados por el Instituto Tecnológico Metropolitano – ITM, Institución Universitaria adscrita al Municipio de Medellín. Además, es el resultado de una iniciativa de cooperación científica entre la Facultad de Ingenierías y la Facultad de Ciencias Económicas y Administrativas del ITM.

Resumen

Desde la aparición de las redes Ethernet, su implementación ganó popularidad y su utilización se llevó a todos los niveles de producción del ámbito local. Este tipo de redes han buscado cubrir cada vez más grandes áreas geográficas en el mundo a través de sistemas de comunicaciones de mayor complejidad. En el ámbito industrial, se establecen como las redes por defecto para la interconexión con otras, pero requieren soporte para la transferencia de información en un entorno global. Esto implica que la implementación de redes Ethernet debe apoyarse en técnicas y desarrollos cada vez más exigentes que permitan la estabilidad, seguridad, eficiencia y disponibilidad que el contexto demande. En este libro se condensa el resultado de una investigación que tuvo como objetivo establecer una herramienta para identificar los aspectos más relevantes de un sistema de comunicaciones, y así determinar la capacidad del canal para soportar el monitoreo y control remoto de procesos orientados a sistemas en tiempo real.

La inteligencia computacional y las técnicas de análisis multivariado sobre grandes cantidades de información son ampliamente usadas en la minería de datos y el reconocimiento de patrones. En el ejercicio científico presentado en este libro de investigación, se utilizan diversas herramientas para caracterizar los sistemas de comunicaciones, con el objetivo de inferir su comportamiento en tiempo real, y además, determinar niveles de capacidad del sistema relacionadas con acciones de monitoreo y control remoto, bajo condiciones específicas de tiempo y calidad de funcionamiento.

En esta obra se abordan los aspectos teóricos mas relevantes del estándar Ethernet, y de igual forma, se describen las técnicas de inteligencia computacional y análisis multivariado que soportan el marco experimental de la investigación realizada sobre un sistema de comunicaciones empresarial y validada en uno de los laboratorios de redes ubicado en el campus Fraternidad del Instituto Tecnológico Metropolitano –ITM, Institución Universitaria adscrita al Municipio de Medellín, donde se realizaron diversos experimentos, de forma que la emulación del proceso industrial pudiera ser lograda a través de la infraestructura de red local.

Contenido

Resumen	vi
Contenido	viii
Índice de Figuras	xi
Índice de Tablas	xiii
1 Introducción	1
2 Caracterización de un canal de comunicación	6
2.1 Características relevantes de un canal	8
2.2 Influencia de la arquitectura de red en el tráfico	12
2.3 Proyección hacia el monitoreo y control remoto	16
2.4 Recomendaciones	19
3 Redes Ethernet	21
3.1 Ethernet	21
3.1.1 MAC	23
3.1.2 CSMA	24
3.1.3 CSMA-CD	26

3.2	Ethernet y estándares IEEE802.3	26
3.3	QoS en Ethernet	28
3.4	Ethernet industrial	30
3.5	Sistemas de tiempo real	31
3.6	Características del tráfico	32
4	Técnicas de análisis multivariado	36
4.1	Análisis de correlación de Pearson	36
4.2	Análisis de componentes principales (PCA)	38
4.2.1	Enfoque descriptivo	40
4.2.2	Enfoque estadístico	41
4.2.3	Enfoque geométrico	42
4.3	Selección de características	43
4.3.1	Medidas basadas en las propiedades de los datos	44
4.3.2	Medidas de clasificación	46
4.3.3	Algoritmos de búsqueda y selección subconjuntos	47
4.3.4	Selección secuencial hacia adelante (SFS)	48
4.4	Clasificador de Bayes	50
4.4.1	Probabilidad a priori	52
4.4.2	Probabilidad a posteriori	53
4.4.3	Función de costo uniforme y la tasa de error mínima	54
4.4.4	Distribución normal y clasificador de Bayes	57
4.5	Validación cruzada	58
5	Análisis multivariado en redes de datos	60
5.1	Descripción del sistema: análisis de tráfico	60
5.2	Arreglo multivariado de datos	64

5.2.1	Correlación de Pearson	65
5.2.2	Aplicaciones de PCA	75
5.2.3	Selección de características	76
5.2.4	Entrenamiento y validación	77
5.3	Aplicación en red de comunicaciones	90
5.3.1	Funciones utilizadas en MatLab	90
5.3.2	Medida de latencia del canal	90
5.3.3	Control del motor a través del canal	91
5.3.4	Campos de datos	92
5.3.5	Canal de alta congestión	93
5.3.6	Canal de baja congestión	94
5.3.7	Dirección de captura de datos	94
5.3.8	Acceso vía web	95
5.3.9	Tiempos de control para baja congestión	95
5.3.10	Tiempos de control para alta congestión	95
5.3.11	Diagrama de conexiones	97
6	Conclusiones	98
7	Recomendaciones	101
A	Apéndice	103
A.1	Diagrama del laboratorio de redes del ITM	103
	Referencias	105

Índice de Figuras

2.1	Modo de operación del acceso al medio CSMA-CD	9
2.2	Flujo e interrupción de tráfico en un adaptador	11
2.3	Red industrial Ethernet y acceso WAN	14
2.4	Elementos en un sistema de monitoreo vía web	18
3.1	Colisión en el medio compartido	23
3.2	Troughput o carga máxima	24
4.1	Definiciones de PCA	39
4.2	Recta que minimiza las distancias ortogonales de los puntos a ella	40
4.3	Regiones formadas por el clasificador de Bayes	51
4.4	Función de decisión de costo uniforme	56
4.5	Validación cruzada	59
5.1	Red de datos empresarial	61
5.2	Datos de certificación del medio físico	62
5.3	Rango de valores de frecuencia soportado por el medio físico	62
5.4	Periodo CSMA-CD	63
5.5	Correlación de las variables x_1 a x_6 del grupo 1	66
5.6	Correlación de las variables x_{11} a x_{15} del grupo 1	67
5.7	Correlación de las variables x_{16} a x_{20} con x_{11} a x_{15} del grupo 1	67
5.8	Correlación de x_3 y x_4 con x_{11} a x_{20} del grupo 1	68
5.9	Correlación de x_{21} a x_{31} del grupo 1	68
5.10	Variables x_1 a x_{20} con correlación no significativa del grupo 1	69

5.11	Variables x_1 a x_{28} con correlación no significativa del grupo 1	69
5.12	Variables x_1 a x_{32} con correlación no significativa del grupo 1	70
5.13	Relación entre x_1 , x_2 y x_3 , y las variables del grupo 1	71
5.14	Relación entre x_1 y x_5 y las variables del grupo 1	71
5.15	Comportamiento inverso entre x_{22} y x_{25} y las variables del grupo 1	72
5.16	Variables con alta dependencia lineal en el grupo 1	72
5.17	Variables sin correlación significativa en el grupo 1	73
5.18	Correlación de las variables del grupo 2	73
5.19	Componentes requeridos para un 95% de variabilidad	75
5.20	Ponderación de variables de acuerdo con su poder discriminante	77
5.21	Separabilidad de las características x_2 , x_6 y x_{12}	79
5.22	Separabilidad de las características del grupo tráfico	79
5.23	Mejores características del grupo campo	80
5.24	Sensado del canal y tiempo de control de un motor DC	81
5.25	Curva de arranque de un motor DC	81
5.26	Control de un motor DC sobre Ethernet vía web	82
5.27	Diagrama de control del motor DC	82
5.28	Congestión del canal y características del tráfico	83
5.29	Intervalos de latencia del canal con congestión	84
5.30	Canal congestionado al 89.4%	84
5.31	Tiempos de operación vía Ethernet del motor DC	87
5.32	Latencia del canal de 10 Mb	88
5.33	Congestión del canal de 10 Mb	88
5.34	Congestión de canal 10Mb en switch	89
5.35	Mensaje generado para el canal de alta congestión	93
5.36	Mensaje generado para el canal de baja congestión	94
5.37	Tiempo de ejecución de una orden de operación en el servidor web	95
5.38	Tiempo de operación del motor DC	96
5.39	Tiempo de control del motor DC en canal con congestión	96
5.40	Diagrama de conexiones de los módulos de control del motor DC	97
A.1	Esquema del laboratorio de redes	104

Índice de Tablas

3.1	Evolución de Ethernet	27
3.2	Tecnologías y aplicaciones de Ethernet	28
4.1	Expresiones matemáticas para distancia probabilística	46
4.2	Expresiones matemáticas para dependencia probabilística	47
5.1	Lista de las 32 variables con PRTG <i>Network</i>	65
5.2	Variables relevantes mediante el método de correlación de Pearson	74
5.3	Componentes que suman el 95% de variabilidad	75
5.4	Clasificador de Bayes sobre el espacio de dimensión reducida	76
5.5	Error de validación con las características del grupo tráfico	77
5.6	Error de validación con las características del grupo campo	78
5.7	Error de validación con todas las características	78
5.8	Error de validación con las 4 mejores variables	78
5.9	Error de validación con las 3 mejores variables	78
5.10	Tiempos de diálogo para la operación del motor DC	85
5.11	Tiempos de control del motor en baja congestión	85
5.12	Tasa de transferencia y promedio de paquetes	87
5.13	Comunicación web para el control del motor DC	88
5.14	Tiempos de control del motor en alta congestión	89
5.15	Eventos de toma de datos para 31 experimentos	91
5.16	Funciones utilizadas en MatLab 2012a	92
5.17	Medida de latencia del canal en congestión	92

5.18 Control del motor en canal con congestión	93
5.19 Campos de datos en formato <i>XML</i>	93
5.20 Dirección de captura de datos con aplicación en C#	94

Introducción

Investigaciones realizadas en el campo de las comunicaciones industriales con redes Ethernet evidencian interés por resolver aplicaciones sobre sistemas de soporte en tiempo real (Scarlett & Brennan, 2011), (Lu, Feng & Chu, 2013) y dedican esfuerzos en ofrecer calidad de servicio en el sistema (*Quality of Service - QoS*) y condiciones requeridas de tráfico a través de diferentes medios de comunicación (Cucinotta et al., 2009) con diversas tecnologías de acceso (Metzger & Polaków, 2008). A pesar de lo anterior, la literatura revisada presenta vacíos al emplear metodologías donde se tienen en cuenta múltiples variables y características extraídas de los sistemas de comunicaciones, como son la carga de procesador, uso de memoria, *jitter*, entre otros, los cuales involucran el canal, dispositivos y sistemas operativos. Muchas soluciones implementadas a la mejora del rendimiento de los sistemas de comunicaciones, obedecen a procesos heurísticos. Se pueden encontrar investigaciones que ayudan a estas tareas mediante procesos independientes con nuevas arquitecturas, o sistemas embebidos, algoritmos especiales, o nuevos protocolos, orientados al apoyo de las comunicaciones en tiempo real realizables desde sitios remotos.

La evaluación en conjunto de múltiples variables pueden determinar las circunstancias más importantes del sistema y establecer condiciones específicas de

respuesta (dispositivos físicos, sistemas operativos y tipo de tráfico), mejorar la QoS y el óptimo estado de funcionamiento de la red. De esta forma, las condiciones estadísticas de tráfico y los parámetros del sistema de comunicaciones establecen condiciones de tiempo para que una operación de control fluya a través de la red, desde un nodo origen hasta el nodo destino, donde ocurre un proceso o se requiere un control. Este recorrido involucra los retardos conocidos en las redes de datos como el de propagación (Kurose & Ross, 2010), el de transmisión y los generados por otros problemas que ocurren con redes Ethernet para sistemas de comunicación industrial (Reynders, Mackay, Wright & Mackay, 2004).

Los sistemas de monitoreo y control remoto cumplen una labor importante en los ambientes donde se hace difícil el acceso, y aun más cuando este representa un riesgo inminente para el usuario o la integridad humana (e.g., casos de la temperatura y el aire contaminado por ruido o sustancias químicas). Debido a esto, se hace necesario promover el número de investigaciones que resulten en propuestas para controlar o ejercer acciones de forma remota, donde se logre el manejo u operación de variables críticas dentro de la conformación de un sistema que a distancia puede ser controlado o monitoreado. En este sentido, las condiciones de funcionamiento de los sistemas de comunicación industrial integrado a las redes Ethernet, se convierten en un objetivo importante para el diseño de sistemas de monitoreo y control remoto, debido a su rendimiento, disponibilidad, seguridad, escalabilidad y capacidad de respuesta que exigen ser regidos bajos márgenes determinados de tiempo crítico.

Dada la importancia de lo mencionado en el párrafo anterior, se han incrementado los estudios sobre sistemas de comunicaciones que permiten integrarse a redes industriales, y en este sentido, la orientación de este libro permite abordar diferentes aspectos relacionados con el análisis de tráfico en redes LAN (FastEthernet), de forma que se presenta la evaluación de las características más importantes del sistema de

comunicaciones, las cuales son requeridas para que un elemento se pueda monitorear y controlar en el tiempo necesario por un proceso dado. La respuesta del sistema de comunicaciones debe obedecer a criterios de operación establecidos por condiciones específicas de tiempo del modelo, dentro del marco de la ejecución oportuna de una tarea.

Las redes de datos están compuestas por muchos factores que determinan su desempeño en términos de *QoS*. Los cambios requeridos en la mejora del rendimiento de la red para aplicaciones que demandan mayor procesamiento, o rapidez en el transporte de información, implican inversiones en infraestructura o nuevas tecnologías para la empresa, sin embargo, se pueden mejorar las condiciones de operación, o incluso resolver el problema, con los ajustes adecuados en la configuración del sistema de comunicaciones. En el ámbito industrial, FastEthernet es el estándar más empleado por su fácil utilización, bajo costo económico, puede acoplarse sin mayores dificultades a otras tecnologías (Zurawski, 2009) y hace pocos años comenzó a hacer parte activa de los sistemas de control. Aunque puede decirse que este estándar responde bien al tráfico en general, su comportamiento es totalmente diferente cuando involucra sistemas críticos de tiempo real (Lu et al., 2013).

La identificación del sistema de comunicaciones y de su desempeño requiere evaluar características y factores que convergen en su funcionalidad. Esta tarea también implica determinar las variables más relevantes que influyen en el rendimiento, así como realizar la gestión necesaria que permita escalar el sistema para mejorar sus propiedades. De este modo, con la inclusión de procedimientos que permitan la selección de los parámetros más importantes, se conoce el funcionamiento y el estado de rendimiento del sistema de comunicaciones, de tal forma que se hace posible el establecimiento de condiciones de escalabilidad e integración a sistemas con aplicaciones que requieren respuesta en tiempo real. La identificación de variables y

su relevancia se hace pertinente gracias a la evaluación de tiempos requeridos en los sistemas de respuesta crítica y a la utilización de herramientas reconocidas para la observación de las variables en conjunto que permiten determinar su comportamiento desde la agrupación de toda la infraestructura y no sólo desde el medio.

Las técnicas de análisis multivariado de datos y reconocimiento de patrones son ampliamente utilizadas en la identificación de comportamientos o tendencias de la información que suministran objetos físicos o abstractos, por lo que su utilización es muy reconocida en los procesos de ingeniería. En la comunidad científica se han utilizado estas técnicas para evaluar rutinas o dinámicas específicas como protocolos de comunicación, nuevos algoritmos de representación o hasta el posicionamiento de nodos en redes inalámbricas (Baala, Zheng & Caminada, 2009). En este libro se analizan de manera simultánea los múltiples parámetros de los sistemas de comunicaciones, a fin de identificar las variables más relevantes, con lo que se facilita la caracterización de redes FastEthernet, y por tanto, se pueden establecer las condiciones que exigen los procesos que demandan tiempo real. Además, con la detección de parámetros importantes se pueden determinar las condiciones de desempeño bajas del sistema, y de esta forma reconocer los ajustes orientados a mejorar el rendimiento de la red, donde los gastos económicos implicados para el sistema de comunicaciones sean de menor impacto. Todo lo anterior indica la pertinencia de utilizar este tipo de estrategias en las infraestructuras actuales del sector industrial, dadas las tendencias actuales, los estándares económicos y la fácil integración de varias tecnologías (Moraes, Vasques & Portugal, 2010).

En la literatura reciente se indica la realización de estudios de condiciones relacionadas con protocolos, distribución de puntos inalámbricos y el desarrollo de nuevos algoritmos potenciados con métodos de inteligencia computacional. Sin embargo, es necesario considerar la estructura conjunta de la mayoría de variables

involucradas en el sistema de comunicaciones. Actualmente, se puede decir que todavía falta la formalización de métodos que permitan caracterizar de manera conjunta todos los elementos que componen un sistema de comunicación para intervenir procesos de forma remota y en tiempo real. Este libro contribuye a ampliar el conocimiento asociado a los sistemas de comunicaciones con nuevas técnicas de inteligencia computacional, análisis multivariado y reconocimiento de patrones, en orden de enfrentar las dificultades que se presentan al integrar sistemas industriales a una plataforma de propósito general (Georges, Krommenacker, Divoux & Rondeau, 2006), (Jasperneite, Schumacher & Weber, 2007). Así también, se dan indicaciones para diagnosticar el flujo de datos de control a nivel de la red local, analizar la transferencia de datos en los tiempos requeridos por el proceso, y optimizar a través de la web operaciones de monitoreo y control para una planta industrial de proceso general.

Este libro presenta una discusión sobre las componentes teóricas y experimentales asociadas a la transferencia óptima de datos para el monitoreo y control remoto de sistemas en tiempo real, quedando estructurado en 6 capítulos. En el capítulo 2, se presenta una revisión sobre la identificación de canales de comunicación y, de acuerdo con la literatura existente, se analizan los estudios realizados para determinar las condiciones del canal y la arquitectura de la red. En los capítulos 3 y 4, se presentan temas importantes de la componente experimental relacionada con las redes Ethernet, así como también aspectos relacionados con el análisis multivariado, y que están involucrados en la selección de parámetros, clasificación y validación. En el capítulo 5, se presenta la discusión de los resultados y la validación de la metodología mediante los resultados obtenidos a través de la emulación de un proceso industrial. Finalmente, en el capítulo 6, se presentan las conclusiones y recomendaciones de la investigación, donde se analizan bondades y limitaciones que tienen algunos métodos orientados a optimizar los sistemas de comunicación Ethernet para sistemas de tiempo real.

Caracterización de un canal de comunicación

En este capítulo se presenta una revisión del estado del arte sobre la caracterización de un canal de comunicación en términos del tráfico y la arquitectura de la red, a fin de generar interés 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.

La tecnología más usada actualmente (al nivel de LAN) es Ethernet, como también la más extendida a nivel industrial (Kurose & Ross, 2010), pero presenta dificultades para sistemas de tiempo real (Lin, Hsueh & Huang, 2004), (Kenyon, 2002), puesto que al aumentar la cantidad de dispositivos, también aumenta la probabilidad de colisiones y retransmisiones (Beasley, 2008), (Cucinotta et al., 2009). Estas dificultades se han venido investigando durante varios años, con el fin de convertir esta tecnología Ethernet en una alternativa viable cuando se requieren soluciones de alto rendimiento en sistemas críticos de tiempo real (Xu, Xiong, Wu & Zhu, 2013), (Diao & Liu, 2011), (Alnuem, 2010). Algunas técnicas han sido utilizadas teniendo en cuenta el hardware, mientras otras

se soportan en software especializado, o en el análisis de la eficiencia del ancho de banda (Pedreiras, Gai, Almeida & Buttazzo, 2005). Así las cosas, se hace necesaria la consideración de otros aspectos que involucran retardos y condiciones, a fin de establecer de manera determinística las condiciones del canal, y de esta manera, lograr la implementación de sistemas en tiempo real (Lee & Lee, 2002).

Las comunicaciones Ethernet, a través de internet, no garantizan calidad de servicio (QoS) (Hussain, Kapoor & Heidemann, 2004) y esta es la razón por la que en los últimos años se reportan diversos desarrollos orientados a mejorar los inconvenientes que son de frecuente interés científico (Cucinotta et al., 2009). Los defectos de TCP/IP no pueden ser ignorados (Diao & Liu, 2011), 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 (Tao, Jiang & Xiangli, 2009), modelar o simular de forma eficiente. Otros aspectos son la latencia (Zurawski, 2005), el efecto *jitter* y el poder convertir el análisis de tráfico en un proceso determinístico (Ferrari, Flammini, Marioli, Taroni & Venturini, 2006), (Y. Chen, Farley & Ye, 2004). 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*) (Tan & Wei, 2009). Adicionalmente, se añaden conflictos por los cambios en tecnología que se suman a la arquitectura de la red y que utilizan estándares no diseñados para tiempo real (Cucinotta et al., 2009). Los sistemas híbridos de comunicaciones involucran diferentes reacciones y tiempos de operación, además que las redes cableadas presentan dificultades y desventajas en su configuración (Cetinceviz & Bayindir, 2012), (X. Li, Scharbarg & Fraboul, 2012). Es así que la caracterización del canal involucra el análisis de condiciones de tráfico (Elmeleegy & Cox, 2009), basado en los componentes que forman la arquitectura de la red, sin contar con que algunas topologías presentan un rendimiento muy bajo (Jasperneite, Imtiaz, Schumacher & Weber, 2009).

2.1 Características relevantes de un canal

Las redes de comunicaciones han sido clasificadas de acuerdo con su cobertura: redes de área local (LAN), redes de área metropolitana (MAN) y redes de área amplia (WAN). Particularmente, el entorno LAN se define en términos del protocolo utilizado y de la topología empleada para acceder a la red (Beasley, 2008). A pesar de la amplia expansión de las redes LAN (específicamente Ethernet), se han presentado dificultades para la implementación de sistemas en tiempo real (Decotignie, 2005), (Moraes et al., 2011). La tecnología Ethernet utiliza el protocolo CSMA-CD (Acceso Múltiple con Percepción de Portadora y Detección de Colisiones) para acceder al medio, el cual opera de manera no determinística, y por lo tanto, no es la forma más recomendada para sistemas donde la respuesta en tiempo real es importante (Yiming & Eisaka, 2005), (Vitturi, Peretti, Seno, Zigliotto & Zunino, 2011). Debido a esto, algunas aplicaciones empresariales han sido implementadas modificando parámetros en el estándar (Pedreiras et al., 2005), (Elshuber & Obermaisser, 2013), (Zou, Wang, Wei & Liu, 2011), pero 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 (Plesowicz & Metzger, 2007), (Xu, Xiong, Wu & Zhu, 2011), con el apoyo del protocolo de sincronización de internet NTP (*Network Time Protocol*) (Mills, Delaware, Martin, Burbank & Kasch, 2010). En la Figura 2.1, se puede analizar el modo de operación del protocolo CSMA-CD.

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 (Thrybom & Prytz, 2009), (Rojas & Morell, 2010). También se debe tener en cuenta la latencia de la red (Wang, Liu, Yao & Ning, 2008) y los tiempos tomados por los servidores para responder a los clientes (Skeie, Johannessen & Holmeide, 2006), ya que esto afecta las condiciones de tiempo real

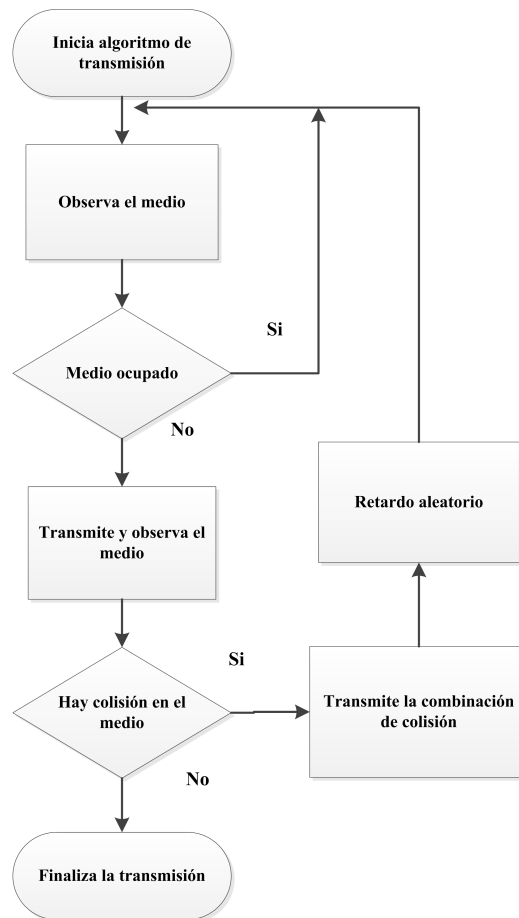


Figura 2.1: Modo de operación del acceso al medio CSMA-CD
Fuente: Autores

del sistema (Scarlett & Brennan, 2011). Un estudio presentado en (Ganjalizadeh, Jonsson & Kunert, 2014), 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, los modelos existentes de análisis son aproximados y las medidas realizadas a los canales Ethernet requieren ser complementarias (Schmidt & Schmidt, 2010), porque el estándar utiliza el ancho de banda disponible del canal cuando ocurren las colisiones y retransmisiones, y esto es lo que dificulta determinar de manera precisa las condiciones

del canal y del flujo de datos (Decotignie, 2005). Adicionalmente, Ethernet presenta un rendimiento inestable frente al tráfico pesado y a grandes cantidades de distribución de retardos (Lee & Lee, 2002).

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 (Simao & Petrenko, 2011). Otro parámetro utilizado para caracterizar un canal de comunicaciones es la tasa de transmisión (Barczyk et al., 2006), (DeCusatis, 2014) 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 (P. Li, Zhou & Wang, 2010). 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 (Ping, McConnell & Hwang, 2010). Es importante tener presente el fenómeno de la caché de los sistemas operativos, los cuales no permiten una medida confiable con el *RTT* (Tanenbaum, 2003). 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 (Avallone, D'Arienzo, Pescapè, Romano & Ventre, 2003), (Sharafeddine & Dawy, 2010). Es así pues que en la última década ha sido frecuente el uso de herramientas de software y hardware para determinar parámetros que han evidenciado relevancia en los canales de comunicación, como es el *jitter*, los retardos de transmisión, *throughput* y los periodos de tiempo sin conectividad de la red (Ferrari, Flammini, Marioli & Taroni, 2008). En (Depari, Ferrari, Flammini, Marioli & Taroni, 2008), se reporta un prototipo para el análisis de un canal de comunicaciones basado en hardware, con el que se consigue la evaluación exitosa del tráfico de la red, el rendimiento, los retardos y el *jitter*. De esta forma, se percibe en la literatura que cada vez va ganando importancia la extracción de

parámetros y características, por su importancia a la hora de representar efectivamente los diferentes estados de un canal de comunicaciones.

Con fines ilustrativos de este libro, se realizó como experimento de ejemplo, el análisis de tráfico en un adaptador con la herramienta PRTG Network Monitor de Paessler, en el cual se obtuvo la Figura 2.2, donde se pueden observar los estados del canal asociados con la cantidad de tráfico en el tiempo y las interrupciones en el flujo de datos.

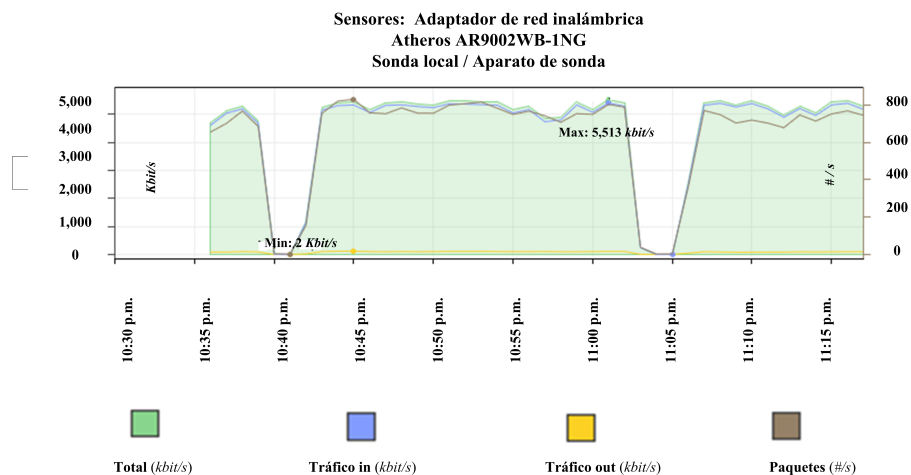


Figura 2.2: Flujo e interrupción de tráfico en un adaptador analizado con un PRTG
Fuente: Autores

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 (Scarlett & Brennan, 2011), se presenta 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. Así, de manera 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 una determinación exacta de 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 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 (Decotignie, 2005). 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, la cual se encuentra constituida de muchos dispositivos inteligentes configurados en una red de área local o global (Zhang, 2010). 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 (Addad & Amari, 2008). 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 (Krommenacker, Georges, Rondeau & Divoux, 2002), (Vatanski, Georges, Aubrun, Rondeau & Jamsa-Jounela, 2009), (Kubler, Robert, Georges & Rondeau, 2012). Del mismo modo, las redes de comunicaciones pueden ser analizadas desde varios niveles: arquitectura, tecnología empleada y servicios prestados (Fiche & Hebuterne, 2004), (Edge, Barker, Hunter & Sullivan, 2010).

La arquitectura de comunicaciones se compone de nodos que se unen a través de un 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 (Krommenacker et al., 2002), (Cetinceviz & Bayindir, 2012). De esta forma, se interconectan las diferentes redes y las políticas de enrutamiento con otras arquitecturas, conformando un arreglo, o unión de varias estructuras, que se pueden diferenciar de arquitecturas básicas (Hashim & Haron, 2007), las cuales conforman esencialmente el núcleo de la red, el acceso y la distribución de los equipos instalados.

A nivel industrial se han definido niveles para identificar 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 (Wilamowski & Irwin, 2011) (Zurawski, 2009). Por tanto, esta organización de red permite la interoperabilidad e interconexión entre los diferentes niveles de comunicaciones (Khan & Khan, 2013), al quedar incluidos los tradicionales buses de campo, las redes Ethernet y la redes inalámbricas (Jamsa-Jounela, 2007). Asimismo, la arquitectura de red industrial, involucra conexiones inalámbricas, las cuales utilizan el protocolo de control de acceso al medio inalámbrico CSMA-CA (Acceso Múltiple con Percepción de Portadora y Evasión de Colisiones) (Flammini, Ferrari, Sisinni, Marioli & Taroni, 2002). En efecto, los segmentos inalámbricos forman parte de las redes locales Ethernet, aunque generan una latencia diferente en la red y determinan otras condiciones y propiedades en la arquitectura (Baratella-Lugli, Dias-Santos & Horta Rodrigues-Franco, 2009).

En (Machacek & Srovnal, 2010), 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 (Georges et al., 2006), se propone un método con algoritmos genéticos para disminuir el retardo terminal a terminal con base a 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 (Carro-Calvo, Salcedo-Sanz, Portilla-Figueras & Ortiz-García, 2010). En estas consideraciones, los cambios en el cableado o infraestructura pueden afectar el rendimiento, el tráfico, e impactar los procesos que requieren tiempo real (Addad & Amari, 2008). La Figura 2.3 muestra una arquitectura híbrida en un sistema de comunicación industrial unido a Ethernet, a dispositivos inalámbricos y a internet.

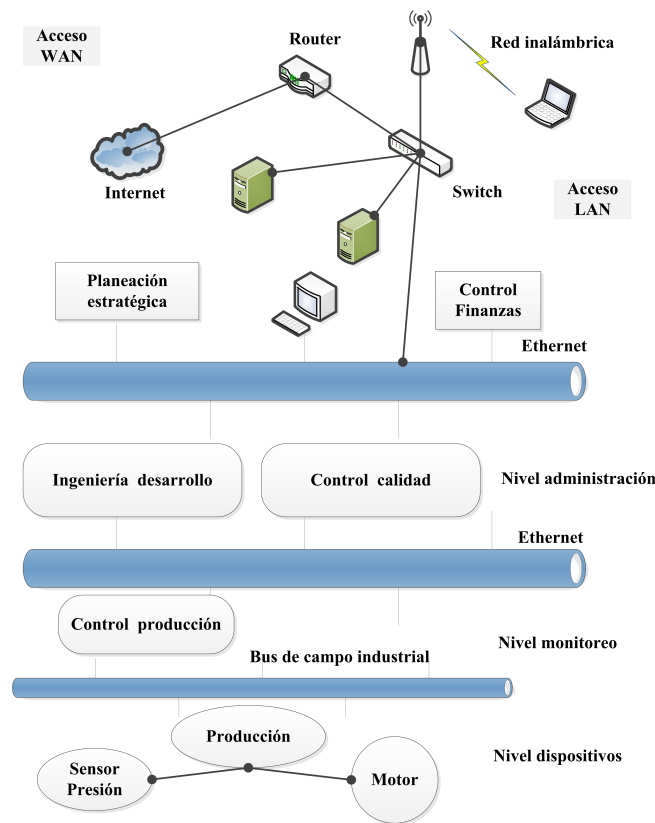


Figura 2.3: Red industrial Ethernet y acceso WAN

Fuente: Autores

Otro aspecto importante orientado a mejorar el desempeño de las redes Ethernet, después de la segmentación a través de switch (Viegas, Valentim, Texeira & Guedes,

Referencias

- Addad, B. & Amari, S. (2008). Delay evaluation and compensation in Ethernet-networked control systems. In *16th international conference on real-time and network systems (RTNS 2008)*. Rennes, France.
- Alnuem, M. A. (2010). An extended review of techniques for enhancing TCP performance. *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*, 22, 45-61.
- Avallone, S., D'Arienzo, M., Pescapè, A., Romano, S. P. & Ventre, G. (2003). Analysis and performance evaluation of the real time traffic on premium IP (PIP) network. In *Proceedings of ICOIN 2003* (Vol. 2, p. 1000-1014). Jeju Island, Corea del Sur.
- Baala, O., Zheng, Y. & Caminada, A. (2009). Toward environment indicators to evaluate WLAN-based indoor positioning system. In *7th IEEE/ACS international conference on computer systems and applications (AICCSA 2009)* (p. 243-250). Rabat, Marruecos.
- Baratella-Lugli, A., Dias-Santos, M. M. & Horta Rodrigues-Franco, L. R. (2009). A computer tool to support in design of industrial Ethernet. *ISA Transactions*, 48(2), 228-236.
- Barczyk, A., Bortolotti, D., Carbone, A., Dufey, J.-P., Galli, D., Gaidioz, B., ... Vagnoni, V. (2006). High rate packets transmission on Ethernet LAN using commodity hardware. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 53(3), 810-816.
- Beasley, J. S. (2008). *Networking* (2nd ed.). Prentice Hall.

- Bishop, C. M. (2006). *Pattern recognition and machine learning*. New York: Springer.
- Carro-Calvo, L., Salcedo-Sanz, S., Portilla-Figueras, J. A. & Ortiz-García, E. G. (2010). A genetic algorithm with switch-device encoding for optimal partition of switched industrial Ethernet networks. *Journal of Network and Computer Applications*, 33(4), 375–382.
- Cetinceviz, Y. & Bayindir, R. (2012). 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*, 51(3), 461–470.
- Chen, J., Wang, Z. & Sun, Y. (2002). Real-time capability analysis for switch industrial Ethernet traffic priority-based. In *Proceedings of the 2002 international conference on control applications* (Vol. 1, p. 525-529).
- Chen, R.-M. (2011). Reducing network and computation complexities in neural based real-time scheduling scheme. *Applied Mathematics and Computation*, 217(13), 6379–6389.
- Chen, Y., Farley, T. & Ye, N. (2004). QoS requirements of network applications on the Internet. *Information-Knowledge-Systems Management*, 4(1), 55-76.
- Chu, W., Guan, X., Cai, Z. & Gao, L. (2013). Real-time volume control for interactive network traffic replay. *Computer Networks*, 57(7), 1611–1629.
- Cucinotta, T., Mancina, A., Anastasi, G. F., Lipari, G., Mangeruca, L., CheccoZZo, R. & Rusina, F. (2009). A real-time service-oriented architecture for industrial automation. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 5(3), 267-277.
- Decotignie, J.-D. (2005). Ethernet-based real-time and industrial communications. *Proceedings of the IEEE*, 93(6), 1102-1117.
- DeCusatis, C. (2014). Transforming the data center network. In C. DeCusatis (Ed.), *Handbook of fiber optic data communication: A practical guide to optical networking* (4th ed., p. 3-22). Londres: Academic Press.

- Delgado-Trejos, E., Castellanos-Domínguez, G. & Vallverdú-Ferrer, M. (2009). *Análisis de relevancia en espacios de representación orientado al soporte de diagnóstico*. Manizales: Publicaciones Universidad Nacional de Colombia.
- Depari, A., Ferrari, P., Flammini, A., Marioli, D. & Taroni, A. (2008). A new instrument for real-time Ethernet performance measurement. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 57(1), 121-127.
- Diao, X. & Liu, B. (2011). Design and research on real-time interface management framework of the general embedded testing system for model driven testing. In Y. Wu (Ed.), *Communications in Computer and Information Science – High Performance Networking, Computing, and Communication Systems* (Vol. 163, p. 359-365). Springer Berlin Heidelberg.
- Duda, R. O., Hart, P. E. & Stork, D. G. (2001). *Pattern classification* (2nd ed.). New York: John Wiley & Sons Ltd.
- Duin, R. P. W. & Pekalska, E. (2007). The science of pattern recognition: Achievements and perspectives. In W. Duch & J. Mańdziuk (Eds.), *Studies in Computational Intelligence – Challenges for Computational Intelligence* (Vol. 63, p. 221-259). Springer Berlin Heidelberg.
- Edge, C., Barker, W., Hunter, B. & Sullivan, G. (2010). Securing network traffic. In *Enterprise mac security* (p. 277-297). Apress.
- Elmeleegy, K. & Cox, A. L. (2009). EtherProxy: Scaling Ethernet by suppressing broadcast traffic. In *IEEE INFOCOM 2009* (p. 1584-1592). Rio de Janeiro, Brasil.
- Elshuber, M. & Obermaisser, R. (2013). Dependable and predictable time-triggered Ethernet networks with COTS components. *Journal of Systems Architecture*, 59(9), 679–690.
- Ferrari, P., Flammini, A., Marioli, D. & Taroni, A. (2008). A distributed instrument for performance analysis of real-time Ethernet networks. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 4(1), 16-25.

- Ferrari, P., Flammini, A., Marioli, D., Taroni, A. & Venturini, F. (2006). Experimental analysis to estimate jitter in PROFINET IO Class 1 networks. In *IEEE conference on emerging technologies and factory automation (etfa'06)* (p. 429-432). Prague, Czech Republic.
- Fiche, G. & Hebuterne, G. (2004). *Communicating Systems & Networks: Traffic & Performance*. Londres: ISTE Publishing Company.
- Flammini, A., Ferrari, P., Sisinni, E., Marioli, D. & Taroni, A. (2002). Sensor interfaces: from field-bus to Ethernet and Internet. *Sensors and Actuators A: Physical*, 101(1-2), 194-202.
- Ganjalizadeh, M., Jonsson, M. & Kunert, K. (2014). Reliability enhancement for hard real-time communication in industrial packet-switched networks. In M. Jonsson, A. Vinel, B. Bellalta & E. Belyaev (Eds.), *Lecture Notes in Computer Science – Multiple Access Communications* (Vol. 8715, p. 59-74). Springer International Publishing.
- Garg, V. K. (2007). *Wireless communications & networking* (1st ed.). San Francisco: Morgan Kaufmann.
- Georges, J.-P., Krommenacker, N., Divoux, T. & Rondeau, E. (2006). A design process of switched Ethernet architectures according to real-time application constraints. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 19(3), 335-344.
- Han, L., Jasperneite, J. & Werner, T. (2010). DIVAN: A network calculator for the off-line performance analysis of Virtual Automation Networks. In *8th IEEE international workshop on factory communication systems (WFCS 2010)* (p. 293-302). Nancy, Francia.
- Hashim, H. & Haron, Z. A. (2007). A study on industrial communication networking: Ethernet based implementation. In *International conference on intelligent and advanced systems (ICIAS 2007)* (p. 1111-1114). Kuala Lumpur, Malasia.
- Hong, C. J., Luong, L. K. & Chark, S. Y. (2012). Building automation through Web interface. In *IEEE conference on sustainable utilization and development in engineering*

- and technology (STUDENT 2012)* (p. 299-304). Kuala Lumpur, Malasia.
- Hu, W., Liu, G.-P. & Rees, D. (2008). Networked predictive control over the Internet using round-trip delay measurement. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 57(10), 2231-2241.
- Hussain, A., Kapoor, A. & Heidemann, J. (2004). The effect of detail on Ethernet simulation. In *18th workshop on parallel and distributed simulation (PADS 2004)* (p. 97-104).
- Jamsa-Jounela, S.-L. (2007). Future trends in process automation. *Annual Reviews in Control*, 31(2), 211–220.
- Jasperneite, J., Imtiaz, J., Schumacher, M. & Weber, K. (2009). A proposal for a generic real-time Ethernet system. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 5(2), 75-85.
- Jasperneite, J., Schumacher, M. & Weber, K. (2007). Limits of increasing the performance of industrial Ethernet protocols. In *IEEE conference on emerging technologies and factory automation (ETFA 2007)* (p. 17-24). Patras, Grecia.
- Kalappa, N., Acton, K., Antolovic, M., Mantri, S., Parrott, J., Luntz, J., ... Tilbury, D. (2006). Experimental determination of real time peer to peer communication characteristics of EtherNet/IP. In *IEEE conference on emerging technologies and factory automation (ETFA 2006)* (p. 1061-1064). Praga, República Checa.
- Kenyon, T. (2002). *High-performance data network design: Design techniques and tools* (1st ed.). Boston: Digital Press.
- Khan, R. H. & Khan, J. Y. (2013). A comprehensive review of the application characteristics and traffic requirements of a smart grid communications network. *Computer Networks*, 57(3), 825–845.
- Krommenacker, N., Georges, J. P., Rondeau, E. & Divoux, T. (2002). Designing, modelling and evaluating switched ethernet networks in factory communication systems. In *14th IEEE Euro-micro Conference on Real Time Systems – 1st Workshop on Real Time LAN's in the Internet Age (RTLIA 2002)*. Viena, Austria.

- Kubler, S., Robert, J., Georges, J.-P. & Rondeau, E. (2012). Dual path communications over multiple spanning trees for networked control systems. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 25(7), 1460–1470.
- Kubler, S., Rondeau, E. & Georges, J.-P. (2011). Dependability of switched network architectures for networked control systems. In *IEEE international conference on mechatronics (ICM 2011)* (p. 761-766). Estambul, Turquía.
- Kurose, J. & Ross, K. (2010). *Redes de computadoras* (5th ed.). Pearson.
- Lee, K. C. & Lee, S. (2002). Performance evaluation of switched Ethernet for real-time industrial communications. *Computer Standards & Interfaces*, 24(5), 411–423.
- Leon-Garcia, A. & Widjaja, I. (2003). *Communication networks: Fundamental concepts and key architectures* (2nd ed.). McGraw Hill.
- Li, P., Zhou, W. & Wang, Y. (2010). Getting the real-time precise round-trip time for stepping stone detection. In *4th international conference on network and system security (NSS 2010)* (p. 377-382). Melbourne, Australia.
- Li, X., Scharbarg, J. & Fraboul, C. (2012). Worst-case delay analysis on a real-time heterogeneous network. In *7th IEEE international symposium on industrial embedded systems (SIES 2012)* (p. 11-20). Karlsruhe, Alemania.
- Lin, H.-h., Hsueh, C.-w. & Huang, G.-C. (2004). BondingPlus: Real-time message channel in Linux Ethernet environment using regular switching hub. In J. Chen & S. Hong (Eds.), *Lecture Notes in Computer Science – Real-Time and Embedded Computing Systems and Applications* (Vol. 2968, p. 176-193). Springer Berlin Heidelberg.
- Lu, L., Feng, D.-Q. & Chu, J. (2013). Improving the real-time performance of Ethernet for plant automation (EPA) based industrial networks. *Journal of Zhejiang University SCIENCE C*, 14(6), 433-448.
- Machacek, Z. & Srovnal, V. (2010). Communication network model for industrial control. In *9th roedunet international conference (RoEduNet 2010)* (p. 293-298). Sibiu,

- Rumania.
- Mandado-Pérez, E., Acevedo, J. M., Fernández-Silva, C. & Armesto-Quiroga, J. I. (2009). *Autómatas programables y sistemas de automatización* (2nd ed.). Barcelona: Marcombo.
- Metzger, M. (2005). Virtual controllers improve Internet-based experiments on semi industrial pilot plants. In *Proceedings of the 16th IFAC World Congress*. República Checa.
- Metzger, M. & Polaków, G. (2008). Cooperative Internet-based experimentation on semi-industrial pilot plants. In Y. Luo (Ed.), *Lecture Notes in Computer Science – Cooperative Design, Visualization, and Engineering* (Vol. 5220, p. 265-272). Springer Berlin Heidelberg.
- Mills, D., Delaware, U., Martin, J., Burbank, J. & Kasch, W. (2010). *Network Time Protocol version 4: Protocol and Algorithms Specification* (Standards Track No. RFC 5905). Internet Engineering Task Force (IETF).
- Moraes, R., Borges-Carreiro, F., Bartolomeu, P., Silva, V., Fonseca, J. A. & Vasques, F. (2011). Enforcing the timing behavior of real-time stations in legacy bus-based industrial Ethernet networks. *Computer Standards & Interfaces*, 33(3), 249-261.
- Moraes, R., Vasques, F. & Portugal, P. (2010). Survey of real-time communication in CSMA-based networks. *Network Protocols and Algorithms*, 2(1), 158-183.
- Oommen, T., Misra, D., Twarakavi, N. K. C., Prakash, A., Sahoo, B. & Bandopadhyay, S. (2008). An objective analysis of support vector machine based classification for remote sensing. *Mathematical Geosciences*, 40(4), 409-424.
- Paul, S., Pan, J. & Jain, R. (2011). Architectures for the future networks and the next generation Internet: A survey. *Computer Communications*, 34(1), 2-42.
- Peña, D. (2002). *Análisis de datos multivariantes*. McGraw-Hill Interamericana de España.
- Pedreiras, P., Gai, P., Almeida, L. & Buttazzo, G. C. (2005). FTT-Ethernet: a flexible real-time communication protocol that supports dynamic QoS management

- on Ethernet-based systems. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 1(3), 1551-3203.
- Ping, F., McConnell, C. & Hwang, J.-H. (2010). A retrospective approach for accurate network latency prediction. In *Proceedings of 19th international conference on computer communications and networks (ICCCN 2010)* (p. 1-6). Zurich, Suiza.
- Plesowicz, P. & Metzger, M. (2007). Experimental testing of TCP/IP/Ethernet communication for automatic control. In A. Petrenko, M. Veanes, J. Tretmans & W. Grieskamp (Eds.), *Lecture Notes in Computer Science – Testing of Software and Communicating Systems* (Vol. 4581, p. 260-275). Springer Berlin Heidelberg.
- Reynders, D., Mackay, S., Wright, E. & Mackay, S. (2004). 11b - Industrial Ethernet troubleshooting. In *Practical industrial data communications* (p. 255–270). Oxford: Butterworth-Heinemann.
- Rodríguez-Penin, A. (2013). *Sistemas SCADA* (3rd ed.). Alfaomega.
- Rojas, C. & Morell, P. (2010). Guidelines for Industrial Ethernet infrastructure implementation: A control engineer's guide. In *IEEE-IAS/PCA 52nd cement industry technical conference* (p. 1-18).
- Ruiz-Olabuénaga, J. I. (2010). *Metodología de la investigación cualitativa* (5th ed.). Deusto.
- Santos, R., Marau, R., Vieira, A., Pedreiras, P., Oliveira, A. & Almeida, L. (2009). A synthesizable Ethernet switch with enhanced real-time features. In *35th annual conference of IEEE industrial electronics (IECON 2009)* (p. 2817-2824). Porto, Portugal.
- Scarlett, J. J. & Brennan, R. W. (2011). Evaluating a new communication protocol for real-time distributed control. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 27(3), 627–635.
- Schmidt, K. & Schmidt, E. G. (2010). A longest-path problem for evaluating the worst-case packet delay of switched Ethernet. In *IEEE symposium on industrial embedded systems (SIES 2010)* (p. 205-208).

- Sharafeddine, S. & Dawy, Z. (2010). Robust network dimensioning for realtime services over IP networks with traffic deviation. *Computer Communications*, 33(8), 976–983.
- Shon, T. & Moon, J. (2007). A hybrid machine learning approach to network anomaly detection. *Information Sciences*, 177(18), 3799–3821.
- Simao, A. & Petrenko, A. (2011). Generating asynchronous test cases from test purposes. *Information and Software Technology*, 53(11), 1252–1262.
- Skeie, T., Johannessen, S. & Holmeide, O. (2006). Timeliness of real-time IP communication in switched industrial Ethernet networks. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2(1), 25-39.
- Sosinsky, B. (2009). *Networking bible*. Indianapolis: Wiley Publishing Inc.
- Stallings, W. (2004). *Comunicaciones y redes de computadores* (7th ed.). Madrid: Pearson Prentice Hall.
- Tan, M. & Wei, Z. (2009). A real-time scheduling algorithm for industrial communication. In *IEEE international conference on intelligent computing and intelligent systems (ICIS 2009)* (Vol. 1, p. 331-335). Shanghai, China.
- Tanenbaum, A. S. (2003). *Redes de computadoras* (4th ed.). Prentice Hall.
- Tao, L., Jiang, T. & Xiangli, Z. (2009). A solution for Ethernet-based real-time communication network of distributed numerical control system. In *International technology and innovation conference (ITIC 2009)* (p. 1-6). Xian, China.
- Theodoridis, S. & Koutroumbas, K. (2008). *Pattern recognition* (4th ed.). Academic Press.
- Theodoridis, S., Pikrakis, A., Koutroumbas, K. & Cavouras, D. (2010). *Introduction to pattern recognition: A MATLAB approach* (1st ed.). Burlington: Academic Press.
- Thrybom, L. & Prytz, G. (2009). QoS in switched industrial Ethernet. In *IEEE conference on emerging technologies & factory automation (ETFA 2009)* (p. 1-8). Mallorca, España.
- Valentim, R. A. M., Morais, A. H. F., Brandão, G. B. & Guerreiro, A. M. G. (2008). 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 2008)* (p. 956-961). Daejeon, Corea del Sur.
- van der Heijden, F., Duin, R., de Ridder, D. & Tax, D. M. J. (2004). *Classification, parameter estimation and state estimation: An engineering approach using MATLAB*. West Sussex: John Wiley & Sons Ltd.
- Vatanski, N., Georges, J.-P., Aubrun, C., Rondeau, E. & Jamsa-Jounela, S.-L. (2009). Networked control with delay measurement and estimation. *Control Engineering Practice*, 17(2), 231–244.
- Viegas, R., Valentim, R. A. M., Texeira, D. G. & Guedes, L. F. (2006). Analysis of protocols to Ethernet automation networks. In *2006 international joint conference SICE-ICASE* (p. 4981-4985). Busan, Corea del Sur.
- Vitturi, S. & Miorandi, D. (2005). Hybrid Ethernet/IEEE 802.11 networks for real-time industrial communications. In *10th IEEE conference on emerging technologies and factory automation (ETFA 2005)* (Vol. 2, p. 443-449). Catania, Italia.
- Vitturi, S., Peretti, L., Seno, L., Zigliotto, M. & Zunino, C. (2011). Real-time ethernet networks for motion control. *Computer Standards & Interfaces*, 33(5), 465–476.
- Wang, G., Liu, J., Yao, H. & Ning, J. (2008). Congestion control for Industrial Ethernet using network calculus. In *International symposium on intelligent information technology application workshops (IITAW 2008)* (p. 193 - 196). Shanghai, China.
- Webb, A. R. & Copsey, K. D. (2011). *Statistical pattern recognition* (3rd ed.). Wiley.
- Wilamowski, B. M. & Irwin, J. D. (2011). *The industrial electronics handbook* (2nd ed.). CRC Press.
- Xiaohu, L., Yiping, H. & Hailang, L. (2010). Based on embedded serial device remote monitoring system. In *International conference on intelligent computing and integrated systems (ICISS 2010)* (p. 129-131).
- Xu, X., Xiong, Z., Wu, J. & Zhu, X. (2011). Development of a networked multi-agent system based on real-time Ethernet. In S. Jeschke, H. Liu & D. Schilberg (Eds.),

- Lecture Notes in Computer Science – Intelligent Robotics and Applications* (Vol. 7101, p. 356-365). Springer Berlin Heidelberg.
- Xu, X., Xiong, Z., Wu, J. & Zhu, X. (2013). High-precision time synchronization in real-time Ethernet-based CNC systems. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 65(5), 1157-1170.
- Yang, S. H., Chen, X. & Alty, J. L. (2003). Design issues and implementation of Internet-based process control systems. *Control Engineering Practice*, 11(6), 709–720.
- Yiming, A. & Eisaka, T. (2005). Industrial hard real-time traffic protocol based on switched Ethernet. In *IEEE international symposium on communications and information technology (ISCIT 2005)* (Vol. 1, p. 205-208). Beijing, China.
- Zhang, P. (2010). *Advanced industrial control technology* (1st ed.). Kidlington: William Andrew.
- Zou, Y., Wang, T., Wei, H. & Liu, M. (2011). A hard real-time robot communication approach based on preemptive CSMA/CA. In *6th IEEE conference on industrial electronics and applications (ICIEA 2011)* (p. 1875-1880). Beijing, China.
- Zurawski, R. (2005). *The industrial communication technology handbook* (1st ed.). Danvers: CRC Press.
- Zurawski, R. (2009). *Embedded systems handbook: Networked embedded systems* (2nd ed.). Boca Raton: CRC Press.

LEONARDO SERNA GUARÍN

Profesor adscrito a la Facultad de Ingenierías del INSTITUTO TECNOLÓGICO METROPOLITANO –ITM, en la ciudad de Medellín. Desarrolla sus actividades científicas en el grupo de investigación Automática, Electrónica y Ciencias Computacionales del ITM. Recibió título de Tecnólogo en Electrónica, Ingeniero de Sistemas, Especialista en Redes de Datos y Magíster en Automatización y Control Industrial, en los años 2001, 2004, 2008 y 2014, respectivamente. Instructor de la Acedemia Cisco y certificado en Data Cabling System y Fibra Óptica. Sus intereses académicos e investigativos se orientan a temas relacionados con la ingeniería de teletráfico, desempeño de las redes industriales, infraestructura, servicios y redes de comunicaciones.

leonardoserna@itm.edu.co

LUIS JAVIER MORANTES GUZMÁN

Profesor Asistente adscrito a la Facultad de Ingenierías del INSTITUTO TECNOLÓGICO METROPOLITANO –ITM, en la ciudad de Medellín. Desarrolla sus actividades científicas en el grupo de investigación Automática, Electrónica y Ciencias Computacionales del ITM, y en el grupo de investigación en Sistemas Embebidos e Inteligencia Computacional –SISTEMIC de la Universidad de Antioquia –UdeA. Recibió título de Ingeniero Electrónico y Magíster en Ingeniería –Automatización Industrial de la Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales, en los años 2005 y 2009, respectivamente. En comisión de estudios desde 2014, para desarrollar su Doctorado en Ingeniería Electrónica en la UdeA. Sus intereses académicos e investigativos se orientan a temas relacionados con procesamiento de imágenes, visión por computador, inteligencia artificial, sistemas de control y robótica.

luismorantes@itm.edu.co

EDILSON DELGADO TREJOS

Profesor adscrito a la Facultad de Ciencias Económicas y Administrativas del INSTITUTO TECNOLÓGICO METROPOLITANO –ITM, en la ciudad de Medellín. Cuenta con la distinción de Investigador Sénior de Colciencias y desarrolla sus actividades científicas dentro del Grupo de Investigación en Calidad, Metrología y Producción del ITM. Recibió su título de Ingeniero Electrónico, Magíster en Automatización Industrial y Doctor en Ingeniería con Línea de Investigación en Automática, por la Universidad Nacional de Colombia, en los años 2000, 2003 y 2008, respectivamente. De 2009 a 2011, se desempeñó como Director del Centro de Investigación del ITM. En 2012 y 2013 realizó su Postdoctorado en Procesamiento de Señales en el Instituto de Ciencias Geológicas y Nucleares (GNS) de Nueva Zelanda. De 2013 a 2015, asumió el cargo de Decano de la Facultad de Ingenierías del ITM. Ha publicado más de 50 artículos científicos, 10 capítulos de libro y 2 libros, en diferentes fuentes reconocidas de divulgación científica. Sus intereses académicos y científicos se orientan a temas relacionados con procesamiento de señales, reconocimiento de patrones, aprendizaje de máquina, minería de datos y análisis dinámico no lineal.

edilsondelgado@itm.edu.co



Transferencia óptima de datos para el monitoreo y control remoto de sistemas en tiempo real
Fondo Editorial ITM, noviembre de 2015

Fuentes tipográficas: Century Regular para texto corrido, en 12 puntos.
Para títulos en Century Light, a 30 puntos, y subtítulos en Century Light, a 18 puntos.

En esta investigación se propone la aplicación de técnicas de computación estadística y matemática en las redes de comunicaciones como un camino viable, que debe ser explorado si se quieren identificar los ajustes que los canales deben tomar como condición necesaria de desempeño, a fin de optimizarse para una tarea específica de tiempo crítico. Particularmente, las técnicas de reducción de dimensiones combinadas con el poder del entrenamiento de máquinas inteligentes sobre aplicaciones de redes de datos abordados en este libro permiten, de forma simple y con alto nivel de rendimiento, la identificación de las características relevantes del sistema objeto de análisis, con lo que se facilita la posibilidad de establecer las condiciones de operatividad en ambientes de proceso, tan difíciles como son los de tiempo real, sin la necesidad de usar equipos especializados ni procedimientos de alta complejidad operativa y computacional. Se involucran conceptos fundamentales de los sistemas de comunicación en una red Ethernet y del procesamiento de datos logrado mediante análisis multivariado e inteligencia computacional.

De este libro pueden tomarse herramientas que aportan al diagnóstico de canales genéricos de comunicación, para determinar su desempeño como soporte a actividades de sistemas de monitoreo y control de nivel industrial en tiempos de respuesta mínimos.

Optimal data transfer for remote system monitoring and control in real time

This research proposes the application of statistical and mathematical techniques in computer communication networks as a viable strategy that should be explored in order to identify the adjustments that channels must make as a necessary condition for optimal performance and in order to enhance their quality for a specific task in a critical time frame. In particular, the dimension reduction techniques combined with the power of intelligent machine training on data network applications, as covered in this book, allow the identification of relevant features of the system under analysis in a simple and high performance manner. Thus, making it easier to set operating conditions in difficult process environments, such as those in real time. All of this, without the need for specialized equipment or processes of a high computational or operative complexity. This book includes fundamental concepts of communication systems in an Ethernet network and of data processing achieved by multivariate analysis and computational intelligence. This book also provides tools that can help with the diagnosis of generic communication channels, in order to measure their performance as a support for industrial monitoring and control activities in minimum response times.

