

Impacto de las Redes de Comunicaciones en los Sistemas Robóticos de Control

Paillacho D.*; Novillo F.**; Agila W.**; Huilcapi V.***

¹Universitat Politècnica de Catalunya, Institute of Industrial and Control Engineering, Barcelona, España

dennys.paillacho@upc.edu

²Escuela Superior Politécnica del Litoral, CIDIS-Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación, Guayaquil, Ecuador

{fnovillo, wagila}@espol.edu.ec

³Universidad Politécnica Salesiana, GISTEL-Facultad de Ingenierías, Guayaquil, Ecuador

vhuilcapi@ups.edu.ec

Resumen: El análisis de incidencia que tienen las redes de comunicaciones sobre el comportamiento de los sistemas robóticos de control en red muestra grandes dificultades cuando se quieren hacer evaluaciones de tipo analítico. Por tal razón, en este trabajo un análisis que utiliza una aproximación basada en simulación es propuesto, de manera que el comportamiento temporal y espacial de un sistema robótico de control en red pueda ser evaluado. Para tal efecto, se propone un entorno de validación mediante el cual una red de comunicaciones permita distribuir mensajes de control entre el controlador principal y los controladores remotos ubicados en cada articulación angular del robot manipulador planar. Las interacciones entre los componentes del sistema han sido modeladas mediante un sistema de capas. Dicho modelo es llevado a un entorno de simulación con la finalidad de analizar el impacto de distintos parámetros de comunicaciones (i.e. tipo de red, tasa de datos y tamaño de datos) sobre el ciclo de comunicación y el error de seguimiento de trayectoria en un sistema robótico.

Palabras clave: Ethernet, CAN, Switched Ethernet, Sistemas de control en red, Ciclo de comunicación, Control de ajuste de trayectoria.

Abstract: The analysis of the incidence that the communications have in the behavior of the network controlled robotic systems shows big difficulties when you want to make analytic evaluations. for that reason, an analysis that uses an approaching based on simulation is proposed, so that the temporal and special behavior of a network controlled robotic system could be evaluated. for this purpose, it is proposed a validation environment whereby a communication network allows the distribution of control messages between the main controller and the remote controlled placed in each joint of the planar robot manipulator. The interactions between the components of the system have been modeled by means of a layer based system. This model is taken to a simulation environment in order to analyze the impact of the different parameters of the communications (i.e. network type, data rate and data size) in the communication cycle and the trajectory tracking error in a robotic system.

Keywords: Ethernet, CAN, Switched Ethernet, Networked Control Systems, Communication cycle, Control adjustment path.

1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día, la evolución que han tenido las redes de comunicaciones ha permitido que los sistemas robóticos de control en red (NCRS) sean más robustos con un desempeño eficaz, lo que ha motivado que aplicaciones como la telecirugía, agricultura de precisión, entre otras, hayan tenido un gran repunte en los últimos años. Dentro de la arquitectura de un NCRS, la red de comunicación constituye la piedra angular, alrededor de la cual se comunican coordinadamente a través del intercambio de mensajes controladores, actuadores y sensores cuyas operaciones están distribuidas en diferentes ubicaciones geográficas.

En este contexto, uno de los aspectos principales a tener en cuenta en los NCRS son los tiempos de retardo, ya que pueden degradar su rendimiento e inclusive causar su inestabilidad en el desempeño del mismo.

El estudio del rendimiento de los NCRS, tradicionalmente se ha realizado de manera aislada [9], tanto el diseño del sistema controlador como la planificación del CPU y la red de

comunicación fueron analizadas independientemente, esta separación ha permitido a la comunidad de control enfocarse en su propio dominio del problema sin preocuparse sobre cómo la planificación es realizada, y también ha liberado a la comunidad de planificación de la necesidad de entender el impacto que esta tiene en la estabilidad y rendimiento de la planta bajo control. Sin embargo, cuando los dos campos convergen en un NCRS algunas hipótesis no son verdaderas [5], generando un impacto en la medida del rendimiento del NCRS resultante.

En aplicaciones de control en red que requieren un alto grado de precisión y flexibilidad, especialmente cuando los recursos computacionales (e.g. el tiempo del CPU y el ancho de banda de la red) son limitados, se hace preciso una interacción más estrecha entre ambos enfoques. Dada esta estrecha relación entre el Control y la Red de comunicación en un NCRS, es importante considerar ambos parámetros simultáneamente. El análisis y modelamiento del impacto de la planificación y comunicación en el rendimiento del NCRS ha sido a menudo

muy complejo, sino imposibles de estudiarlos analíticamente [2].

En este contexto, en [7] se propone rutinas en la simulación de sistemas distribuidos de control en red para tiempo real a través de un núcleo y bloques de red basados en comunicaciones con retraso a través del protocolo TCP/IP y su influencia en los bucles de control en red. Una red de agentes que pueden recopilar información acerca de la evolución de un proceso discreto y aplicar las acciones de control a través de la red de comunicación para mejorar su comportamiento es presentado en [3]

El presente trabajo utiliza una aproximación basada en simulación por capas para analizar el impacto que tienen las redes de comunicaciones sobre la calidad en el seguimiento de la trayectoria de un sistema robótico.

Para el desarrollo de este estudio se ha utilizado un brazo robótico planar, analizando su precisión en el seguimiento de trayectorias de referencia frente a diferentes redes de comunicación (e.g. Ethernet, Switch Ethernet, CAN).

El resto del trabajo está organizado como se describe a continuación. En la Sección 2, una breve descripción del escenario de los Sistemas de Control en Red y sus componentes es presentada. La descripción del mecanismo de simulación es analizada en la sección 3. Los parámetros de simulación y los resultados obtenidos de las simulaciones son presentados en la sección 4. Finalmente, las conclusiones relevantes se presentan en la sección 5.

2. MODELO DEL SISTEMA DE CONTROL ROBÓTICO EN RED

2.1 Descripción del escenario

Para el análisis del SRCR se utiliza el sistema propuesto en la Fig.1, el cual está compuesto por un controlador principal (CP), la red de comunicación (i.e. Ethernet, Switch Ethernet, CAN), y los controladores remotos (CR's). La planta sobre la cual se verificará el impacto que tienen las redes de comunicaciones sobre la robustez del SRCR está constituida por un brazo robótico planar, con n articulaciones cuyo desplazamiento será en el plano X-Y.

El sistema empieza a operar cuando el CP envía las señales de referencia (i.e. posición \mathbf{P} ; velocidad \mathbf{V} y aceleración \mathbf{A}) a cada uno de los CR's a través de la red de comunicación. En la presente investigación se analizará el desempeño de las redes Ethernet, Switch Ethernet, y CAN sobre la precisión en el seguimiento de trayectorias del brazo manipulador anteriormente mencionado, así una vez que cada CR reciba las consignas, estos interactúan con las redes de sensores y actuadores que disponen para manejar a cada eslabón de la cadena cinemática, así también cada CR es responsable de enviar un mensaje de su estado al CP, y cuando el CP haya recibido todos los mensajes de estado de los n CR's estarán listo para enviar un nuevo grupo de consignas, iniciando de nuevo un ciclo de comunicación del SRCR.

2.2 Modelo de control de un eslabón

Para verificar la calidad del seguimiento de las referencias, el CP dispone de un generador de trayectorias, el cual define un conjunto de señales de posición, velocidad y aceleración,

representadas en el espacio articular por: $q_d(t)$, $\dot{q}_d(t)$, $\ddot{q}_d(t)$ respectivamente. Estas consignas son definidas a continuación:

$$q_d(t) = b(1 - e^{-2t^3}) + c(1 - e^{-2t^3}) \sin(\omega t) \quad (1)$$

$$\dot{q}_d(t) = 6bt^2 e^{-2t^3} + 6ct^2 e^{-2t^3} \sin(\omega t) + (c - ce^{-2t^3}) \cos(\omega t) \omega \quad (2)$$

$$\ddot{q}_d(t) = 12bte^{-2t^3} - 36bt^4 e^{-2t^3} + 12cte^{-2t^3} \sin(\omega t) - 36ct^4 e^{-2t^3} \sin(\omega t) + 12ct^2 e^{-2t^3} \cos(\omega t) \omega - (c - ce^{-2t^3}) \sin(\omega t) \omega^2 \quad (3)$$

Donde b , c , y ω son constantes de la trayectoria de referencia (consigna) fijadas para el entorno de simulación.

Para describir las trayectorias deseadas establecidas en (1), (2), (3), la salida de cada actuador se asocia con cada uno de los eslabones del brazo manipulador (i.e. $J1, J2 \dots Jn$), para que el efector final ejecute las consignas enviadas.

La calidad del control del manipulador robótico planar para el seguimiento de la trayectoria deseada se analiza usando el índice de medición del error denominado "Integral Absolute Error" (IAE) [6].

$$IAE = \int_{t_0}^{t_f} |y_{des}(t) - y_{act}(t)| dt \quad (4)$$

Donde $y_{des}(t)$ es la salida deseada del sistema, y $y_{act}(t)$ es la salida obtenida del sistema, t_0 y t_f representan los tiempos iniciales y finales respectivamente en donde se analizan los datos.

3. DESCRIPCIÓN DEL MECANISMO DE SIMULACIÓN

3.1 Formulación del problema

En el SRCR mostrado en la Fig.1, la red de comunicación representa el aspecto principal a evaluar para el óptimo desempeño del sistema robótico planar propuesto, ya que es el medio que permite la comunicación entre los diferentes dispositivos.

La disponibilidad de la red, se debe a varios factores, entre ellos: tasas de muestreo en las cuales los diferentes dispositivos envían información, el número de nodos que intervienen en la red, el método de sincronización entre los dispositivos, tamaño de los mensajes, factores físicos de la red, y el tipo de Control de Acceso al Medio (MAC) que controla la transmisión de la información [8]. Para evaluar el rendimiento del robot planar se analizará en detalle los tiempos de los ciclos de comunicación para los tres tipos de redes propuestas (i.e. Ethernet, Switch Ethernet, CAN) y el error en el seguimiento de trayectorias en el robot planar.

Para simplificar el análisis, todo el sistema es visto en su conjunto como un modelo de tres capas (i.e. modelo de cebolla) [1]. A continuación se describen las funciones de cada una:

Capa 0: El CP envía las señales de referencia de las trayectorias deseadas a todos los CR's a través de la red de

comunicación, también es encargado de gestionar la recepción de los mensajes de estado de cada controlador remoto. Las tareas asignadas al CP son: Tarea₀₀: toma lectura de las señales de referencia deseadas del CP. Tarea₀₁: encapsula las trayectorias de referencia en paquetes y las envía a través de la red de comunicación. Tarea₀₂: gestiona la llegada de los mensajes de estado de los n CR's. cuando todos los mensajes hayan sido recibidos, el CP está listo para iniciar nuevamente la Tarea₀₀. Las tareas son disparadas por eventos y el tiempo de liberación dependerá del algoritmo de planificación del CPU utilizado. El tiempo total de ejecución de la capa 0 dependerá en parte del número de controladores remotos del sistema.

Capa 1: La Red mapea las señales de referencia desde el CP hacia los CR's y los mensajes de estado entre los CR's y el CP. Las tareas asignadas a esta capa son: Tarea₁₀: mapea las señales de referencia desde el Controlador Principal a cada Controlador Remoto. Tarea₁₁: mapea los mensajes de estado desde los controladores remotos al CP. El tiempo de mapeo en esta capa depende de varios factores como la topología de la red, ancho de banda, número de nodos, etc.

Capa 2: Cada CR realiza el interfaz con la red de comunicación para recibir las señales de referencia enviadas por el CP, así también envían los mensajes del estado de cada

uno, también ejecuta el lazo de control de movimiento del actuador, las tareas asignadas a esta capa son: Tarea₂₀: extrae las señales de referencia deseadas de la trama recibida en la red de comunicación. Tarea₂₁: realiza el lazo de control. Si la diferencia entre la trayectoria deseada y la ejecutada por el manipulador robótico es menor a cierto porcentaje de error, el CR dispara la Tarea₂₂. La Tarea₂₂: encapsula el mensaje de estado del controlador remoto en paquetes y los envía por la red

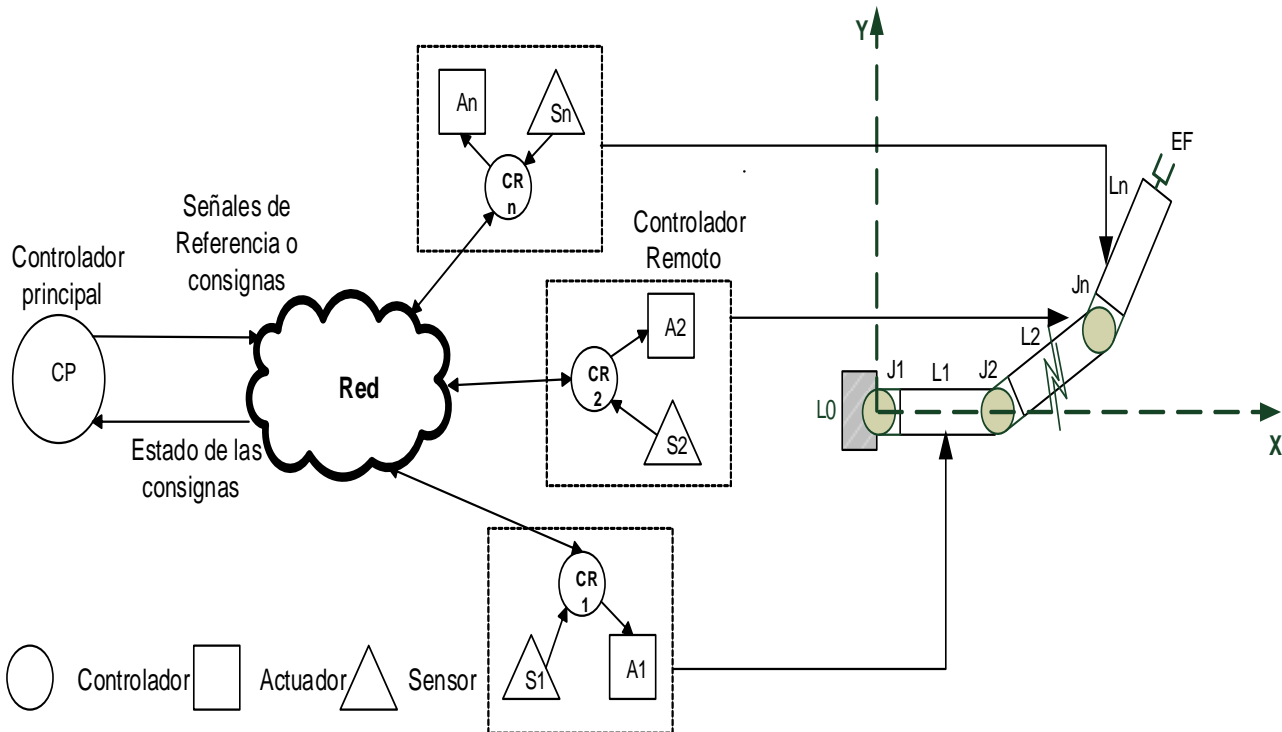


Figura 1. Estructura general del Sistema de control en Red.

3.2 Ciclo de comunicación

Los tiempos de retardo que ocurren en un sistema de control en red afectan su rendimiento e incluso pueden causar inestabilidades del mismo, es por esta razón que la presente investigación prioriza este análisis.

El ciclo de comunicación corresponde al tiempo comprendido entre el envío por parte del controlador principal del primer conjunto de trayectorias de referencias y del último mensaje de estado recibido del controlador remoto [4]. Para calcular el tiempo de retardo de transmisión de un mensaje (T_{delay}) este es dividido en dos partes: el tiempo del dispositivo (T_{disp}) y el tiempo de la red (T_{net}), y se calcula de acuerdo a la siguiente expresión:

$$T_{delay} = T_{disp} + T_{net} \quad (5)$$

Donde:

$$T_{disp} = T_{pre} + T_{hold} + T_{pos} \quad (6)$$

Por lo cual:

$$T_{delay} = T_{pre} + T_{hold} + T_{net} + T_{pos} \quad (7)$$

Dónde: T_{pre} y T_{hold} son los retardos de pre procesamiento y espera en el dispositivo fuente respectivamente, y T_{pos} es el retardo de pos procesamiento en el dispositivo de destino. A continuación se detalla en un gráfico la ecuación (7).

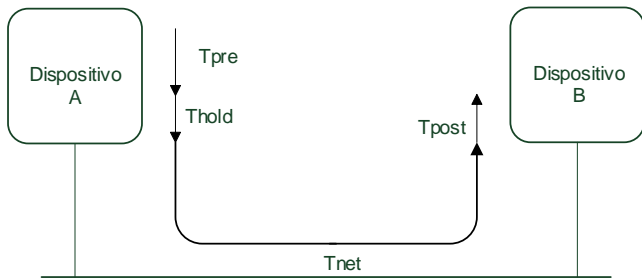


Figura 2. Tiempos de retardo de un sistema de control en Red.

En base a la ecuación (8) los tiempos de retardo en todo el sistema pueden ser agrupados en: el tiempo de retardo desde el CP al CR y viceversa, como se expresa a continuación:

$$T_{CP \rightarrow CR} = T_{CPpre} + T_{CPhold} + T_{CP \rightarrow CRnet} + T_{CPpos} \quad (8)$$

$$T_{CR \rightarrow CP} = T_{CRpre} + T_{CRhold} + T_{CR \rightarrow CPnet} + T_{CRpos} \quad (9)$$

donde T_{CPpre} es el tiempo de retardo del controlador principal al controlador remoto, T_{CPhold} es el tiempo de pre procesamiento en el controlador principal, $T_{CP \rightarrow CRnet}$ es el tiempo de la red cuando el CP envía información al CR, T_{CPpos} es el tiempo de pos procesamiento del CP, una vez haya llegado la información al CR.

El diagrama de los tiempos de retardos y su relación con las tareas asignadas a las distintas capas del modelo del SRCR es presentado en la Fig.3. De esta figura se puede observar que

los círculos indican el tiempo de entrada a una tarea, mientras que una cruz indica el tiempo de salida de una tarea, de tal manera que el ciclo de comunicación (T_{CC}) correspondiente al tiempo comprendido entre el envío de la primera consigna por parte del CP y del último mensaje respondido por el CR se calcula de la siguiente manera:

$$T_{CC} = T_{CP \rightarrow CR} + T_{CR \rightarrow CP} \quad (10)$$

Se debe observar que la única tarea periódica es t_{21} en la capa2 del CR, y tiene un periodo h_{21} . Debido a que la mayoría de las tareas en el sistema son manejadas por eventos, la variabilidad de los tiempos de retardo en algunas de ellas (e.g. en el tiempo de espera del controlador remoto) hace que varíe también su ciclo de comunicación. En el presente estudio se analizó la variabilidad del ciclo de comunicación cuando se aplican diferentes tipos de configuraciones al modelo (e.g. tipo de red, tamaño de datos, número de controladores remotos, tasa de datos)

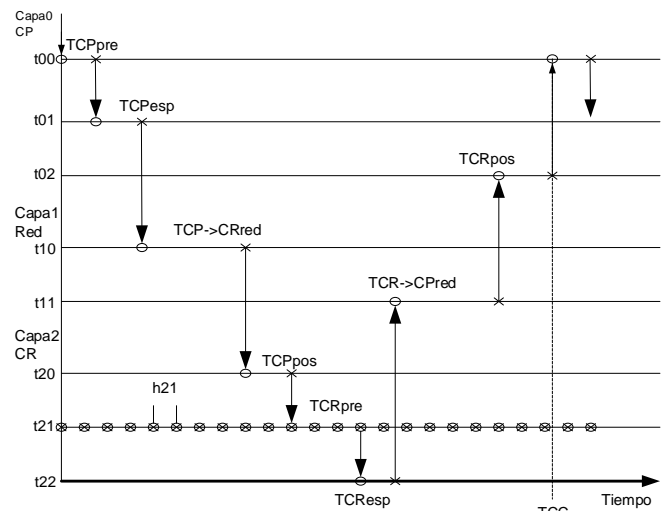


Figura 3. Diagramas de tiempo de un ciclo de comunicación del modelo.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados obtenidos luego de múltiples simulaciones del escenario propuesto, en particular se realiza el análisis del ciclo de comunicación y el IAE para redes Ethernet (E), Switch Ethernet (SE) y CAN (C).

4.1 Parámetros de simulación

Los parámetros de simulación del tipo de red de comunicación usado en el SRCR, tamaño y tasa de datos a transmitir, y las restricciones consideradas en el proceso de simulación, se presentan en la Tabla 1.

Para evaluar el impacto de las redes de comunicación en la precisión del elemento final del brazo robótico y el rendimiento del SRCR siguiendo movimientos periódicos sin llevar a saturar los actuadores, se utilizaron trayectorias de referencia definidas por las ecuaciones (1), (2), (3), con los siguientes valores para sus constantes:

$$b = \pi / 4 \text{ (rad)}; c = \pi / 9 \text{ (rad)}; y, w = 10 \text{ (rad/s)}$$

Tabla 1. Parámetros de configuración

Parámetros de Configuración	
RED de Comunicación	
Tipo de red	Ethernet (E), Switched Ethernet (SE) y CAN (C).
Tasa de datos (R)	1, 5, 10 Mbps.
Tamaño de datos (TD)	3, 6, 9, 12 bytes.
Número de controladores remotos (CR)	2, 6, 10.
Restricciones:	
a) No se consideran pérdidas de paquetes en la red, tiempos de propagación por la red e interferencias dentro de la red	b) El número y tamaño de mensajes que envía el CP a un determinado CR a través de la red es el mismo en sentido contrario

4.2 Impacto en el ciclo de comunicación

La función de densidad acumulada (CDF) del ciclo de comunicación para diferentes tamaños de datos (TD) sometidos a diferentes tipos de redes es mostrada en la Fig.4. De esta figura se observa que los tamaños de los datos propuestos afectan el T_{CC} en una red CAN (C), ya que su estándar no considera un mínimo tamaño de paquete de datos. El tamaño de la trama en una red CAN varía en relación al TD, variando con ello el tiempo de transmisión por la red y alterando de esta manera al ciclo de comunicación.

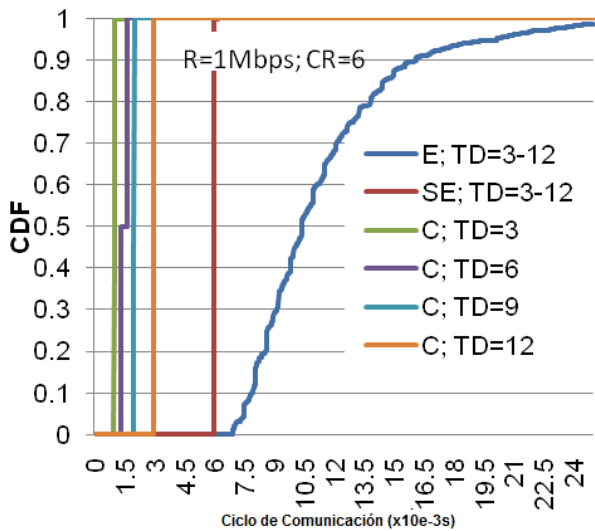
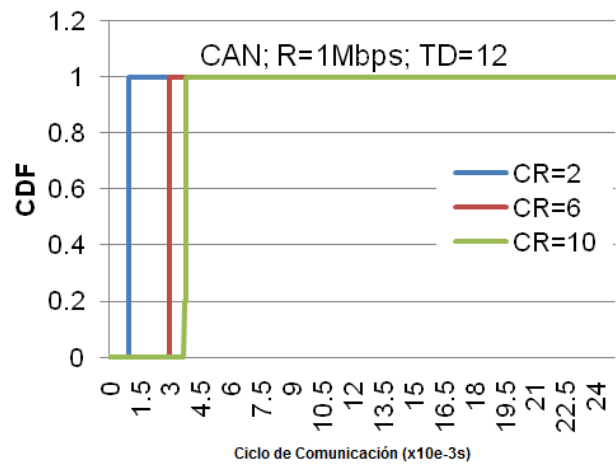


Figura 4. Ciclos de comunicación con diferentes TD.

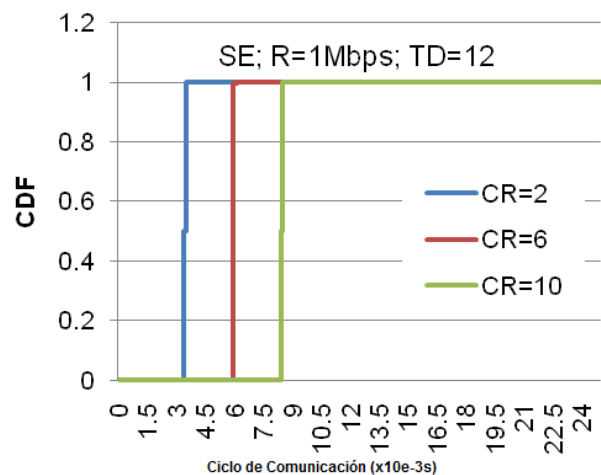
Por el contrario, para las redes Ethernet (E) y Switched Ethernet (SE) los ciclos de comunicación no presentan variaciones para los diferentes valores de TD propuestos. Esto se debe a que dichos valores son menores que el mínimo tamaño de paquete de datos (46 bytes) establecido por el estándar Ethernet. De la misma figura, se determina que los T_{CC} de una red Ethernet son mayores que los de una Switched Ethernet, debido a que el control de acceso al medio en la Ethernet permite colisiones en la red. La lenta respuesta que presenta la dispersión acumulada en Ethernet, se debe a la

aleatoriedad en la ventana de contención cuando ocurren estas colisiones. En CAN, este hecho no se presenta y por tanto tiene una rápida respuesta en los ciclos de comunicación, esto se debe al mecanismo de control de acceso al medio por prioridad de los mensajes con el que trabaja este estándar de comunicación, evitando de esta manera colisiones y mejorando su comportamiento. Se observa también que la probabilidad de que los T_{CC} sean menores o iguales a 25 ms es del 100%, sin importar el tipo de red de comunicación implementado.

La Fig.5 presenta la CDF del ciclo de comunicación para diferentes tipos de redes: a) CAN; b) Switch Ethernet. En las figuras se observa que para cualquier tipo de red propuesta, a medida que incrementa el número de CR's, aumenta el T_{CC} , esto se genera debido a que el CP debe atender un mayor número de CRs y con ello los retardos generados por cada dispositivo se incrementan.



a) Ciclos de comunicación en CAN.



b) Ciclos de comunicación en Switch Ethernet.

Figura 5. Ciclos de comunicación con diferentes CR's.

4.3 Impacto en la calidad del control del sistema robótico

En el análisis del impacto en el T_{CC} se notó una alta dependencia al tipo de configuración establecida en el modelo, esto es, los T_{CC} pueden variar tanto en el valor promedio como en su dispersión. Este tiempo de retardo inevitablemente producirá un error entre la trayectoria deseada y la generada. El **IAE** del error de seguimiento de trayectoria del brazo robótico para diferentes TD y tipos de red con respecto al tiempo es presentada en la Fig.6. De la figura se observa que el error de seguimiento se ve alterado por las variaciones en el tamaño de datos a ser gestionados por la red de comunicación. La red CAN presenta errores bajos en el seguimiento de trayectoria por parte del brazo robotizado; siendo la red Ethernet la que más error acumula. Para las diferentes redes analizadas la curva del **IAE** muestra un punto donde el error se mantiene constante ($t=0.85s$), que corresponde al punto donde la velocidad en las articulaciones es igual a cero

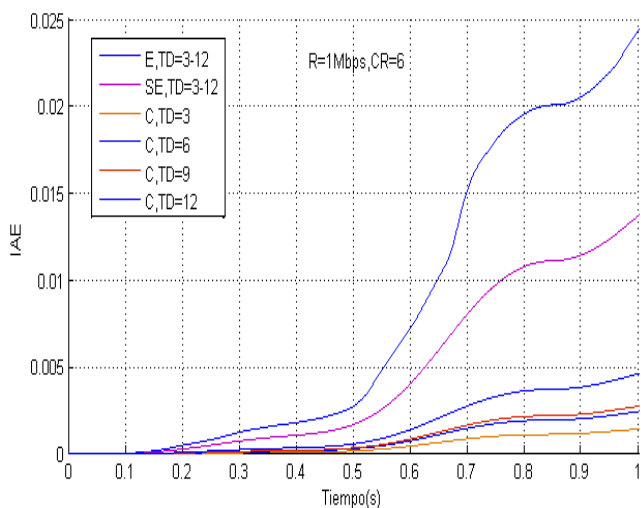


Figura 6. IAE del error de ajuste de trayectoria para diferentes TD.

6. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se realizó el modelado de un sistema robótico de control en red, NCRS, el mismo que fue recreado con una herramienta de simulación, considerando condiciones ideales, sin interferencias en la red ni perturbaciones en los actuadores. El NCRS fue sometido a diferentes redes de comunicaciones; así cuando el tamaño de dato aumenta la red CAN también aumenta su ciclo de comunicación a medida que aumenta el tamaño de datos, ya que su capacidad de transmisión es limitada, en cambio las redes Ethernet y Switch Ethernet no son afectadas. Sin embargo, la red Ethernet genera más retardos y dispersión por no contar con sistemas que impida colisiones de paquetes. En cuanto a los errores de trayectoria se puede concluir que dependiendo de la aplicación se podría determinar la bondad de la red de comunicaciones así por

ejemplo la red CAN podría ser usada para señales de control no muy complejas, la red SE daría soporte a señales más complejas y con retardos medios en cambio la red E genera más errores de trayectoria por lo que no sería apropiada en sistemas que requieran mucha precisión.

RECONOCIMIENTO

Este trabajo ha sido desarrollado gracias a la colaboración del personal investigador de UPC, los miembros del Grupo de Investigación en Comunicaciones Móviles (GICOM) de la ESPOL y los miembros del Grupo de Investigación en Sistemas de Telecomunicaciones (GISTEL) de la UPS sede Guayaquil.

REFERENCIAS

- [1] Barrientos, Antonio. Fundamentos de robótica. España : McGraw-Hill, 2007. pag.17.
- [2] Control Scheduling Codesign of RealTime Systems: The Control Server Approach. Anton Cervin, Johan Eker. s.l. : Journal of Embedded Computing, 2004.
- [3] Estimación y Control Distribuidos de SistemassobreRedes de Comunicación. Francisco Rubio, Pablo Millán, Luis Orihuela, Carlos Vivas. RIAI-Elsevier; 2014; vol. 11, pp. 377-388.
- [4] How does control timing affect performance? Analysis and simulation of timing using Jitterbug and TrueTime. Cervin, A., y otros. no.3, pp. 16-30, s.l. : Control Systems Magazine, IEEE, 2003, Vol. 23.
- [5] Integrated Control and Scheduling. K-E Arzen, B. Bemardsson, J.Eker, A. Cervin, K. Nilsson, P. Persson, L.Sha. Dept. Automatic Control, Lund Institute of Technology : Research report, 1999. ISSN 0820-5316.
- [6] Modern Control Engineering (5th Edition) by Katsuhiko Ogata.
- [7] Propuesta de algoritmos de control enlíneastcp/ip y compensación de retardos; Velasquez Sergio, Custodio Angel. Universidad, Ciencia y Tecnología; Vol 18, N° 70; 2014.
- [8] Simulation Based Performance Analysis of Networked Control Systems with Resource Constraints. Xia, Feng. Busan : The 30th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2004.
- [9] Wang, Fei Yue y Derong, Liu. Networked Control Systems Theory and Applications. Londres : Springer-Verlag, 2008. ISBN 978-1-84800-214-2.(9)