

Caracterización de retardos en redes Ethernet para aplicaciones de control distribuido

Mario Modesti, Andrés Silva
Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Córdoba.
Laboratorio de Sensores e Instrumentación (LabSen)
Centro de Investigación en Informática para la Ingeniería (CIII)
e-mail: mmodesti@scdt.frc.utn.edu.ar

Resumen: El correspondiente trabajo caracteriza mediante análisis estadístico, el comportamiento de los retardos en redes de tecnología Ethernet, bajo la modalidad de comunicación en modo asíncrono. Se propone un método de medición indirecta de retardos asociados a cada paquete transmitido, sobre la base de un enfoque no determinístico.

Palabras Clave: Simulink®, xPCTarget, Ethernet, CSMA/CD, UDP/IP, Real Time Model, Retardos de Red

1. OBJETIVOS

El propósito del siguiente informe técnico es el de poder caracterizar mediante análisis estadístico el comportamiento de retardos de red en diferentes segmentos de redes Ethernet (*Intranets en el ámbito del Campus de la U.T.N. – F.R..C.*), utilizando modo de comunicación asíncrona entre nodos bajo protocolo orientado a la transmisión de paquetes UDP/IP.

El correspondiente análisis se espera tendrá relevancia en un posterior modelado de redes orientado al diseño de sistemas de control distribuidos en tiempo real, que utilicen la plataforma de conectividad Ethernet como parte integrante del lazo de control como se muestra en la Figura 1.

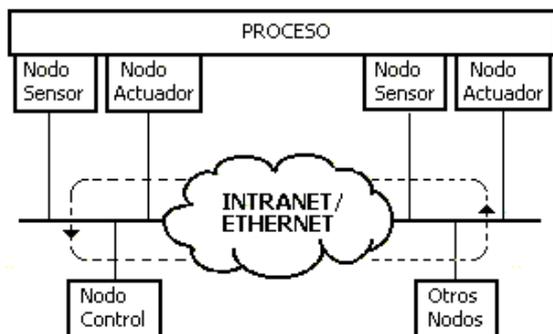


Figura 1
Sistema distribuido de control en red

Los adaptadores de red Ethernet utilizan un algoritmo de acceso al medio conocido como CSMA/CD, (*Carrier Sense Multiple Access/Collision Detect*). Se analiza brevemente la secuencia implementada por el mismo como así también, una descripción de otras fuentes de retardos introducidas por dispositivos en la red tales como (Routers y Gateways), con objeto de aportar un mayor y mejor entendimiento de los retardos de red producidos y su posterior caracterización.

De la misma forma se espera que, la implementación de un mecanismo de medición indirecta de retardos individuales (*asociados a cada paquete transmitido*) y usando un enfoque estocástico

permita obtener información fidedigna y relevante en la caracterización de los mismos.

2. INTRODUCCION

Actualmente la gran mayoría de las redes LAN (*Local Area Network*) son redes Ethernet; Su bajo costo y popularidad, conjuntamente con la explosión de crecimiento que ha tenido la red de redes Internet, hace cada vez más atractivo el uso de esta tecnología en sistemas de control distribuido de procesos industriales, pese a la existencia de múltiples tecnologías de *Redes de Campo* (como, *PROFIBUS, BITBUS, DEVICE-NET, FIP, INTERBUS, etc.*), las cuales no pueden proveer las prestaciones de conectividad que disponen las actuales redes Ethernet.

Por otra parte y en vista de que las redes Ethernet en un principio no fueron pensadas como medio de conectividad en sistemas de control de lazo cerrado en tiempo real, su utilización ha sido en los últimos años materia de estudio, produciéndose diferentes publicaciones técnicas al respecto [1].

Uno de los aspectos claves involucrados en la transmisión de paquetes de datos (*que transportan señales de control*) en redes bajo tecnología Ethernet, viene dada a partir de los inherente retardos producidos en la comunicación entre estaciones remotas, que eventualmente bajo la óptica de sistemas de control distribuido pudieran éstos verse comprometido tanto en términos de estabilidad como en términos de operabilidad propiamente dicha, dependiendo claro está del tipo de proceso de que se trate. Es por ello que, resulta esencial tener que caracterizar retardos de red a los efectos de contemplar la influencia que éstos pudieran producir en tales sistemas de control distribuido.

3. DESARROLLO

3.1 Plataforma y Metodología Utilizada:

Las mediciones de retardo propuestas en este trabajo son realizadas utilizando una plataforma física (o de Hardware) constituida por dos estaciones

remotas denominadas *Target 1* y *Target 2*.

Sobre el bus (medio), un patrón bien definido de paquetes de datos bajo protocolo UDP/IP, es puesto a intervalos regulares con origen *Target 1* y destino *Target 2*.

Es esperable una serie de retardos entre paquetes en el momento de acceso al Bus, como consecuencia del mecanismo de control de acceso al medio MAC (*Médium Access Control*), incorporado en los adaptadores de red y como consecuencia del encolamiento de paquetes en los buffers de tipo FIFO de Gateways y Routers.

Una tercera estación de trabajo es configurada de forma tal que, auspicie las veces de *Host*, arbitrando – bajo protocolo de comunicación TCP/IP – los tiempos de sincronización en la adquisición de p lotes de n muestras de datos (que contienen: el patrón datos recibido, datos de señalización y datos de tiempos de arribo), sincronizando también, la adquisición de los registros obtenidos y procesando cada lote de muestras adquiridas por la estación remota *Target 2*. La Figura 2 muestra la plataforma de hardware utilizada.

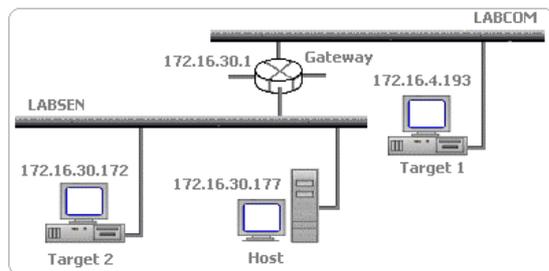


Figura 2.

Plataforma de hardware utilizada

El proceso de medición en sí mismo, se categoriza como un procesamiento por lotes en tiempo real, esto es, se realiza un procesamiento de cada lote a la vez que, el siguiente se encuentra en proceso de adquisición. Si bien, en ningún caso los tiempos de procesamiento de la estación *Host* superan los de adquisición, es destacable que, a los efectos de ser riguroso en este aspecto, subsiste un pequeño intervalo de tiempo – en comparación – entre tiempos de adquisiciones sucesivas, el cual se ha denominado tiempo *ciego*, como consecuencia de que no es posible observar el comportamiento de la red durante el mismo y durante el cual los registros adquiridos en *Target 2* son enviados al *Host*.

Una Plataforma de software basada en el núcleo o *kernel* de Tiempo-Real provisto en xPC-Target® Toolbox del paquete Matlab® de Mathworks[2] opera en cada estación remota proporcionando tanto exactitud como la resolución de tiempo requerida en el proceso de medición. Por otra parte, desde del lado del *Host*, una interfase GUI (*Graphical User Interface*) desarrollada en lenguaje Matlab® es operada sobre un Sistema Operativo Windows®, propiciando un mecanismo eficiente de interrelacionar el conjunto de scripts y funciones desarrolladas en lenguaje de Matlab® con motivo del procesamiento llevado a cabo de los datos, a la vez de permitir accionar en el control de la estación xPC-Target 2.

La figura 3 muestra un equivalente en flujo de estado del programa principal corriendo sobre la estación *Host*.

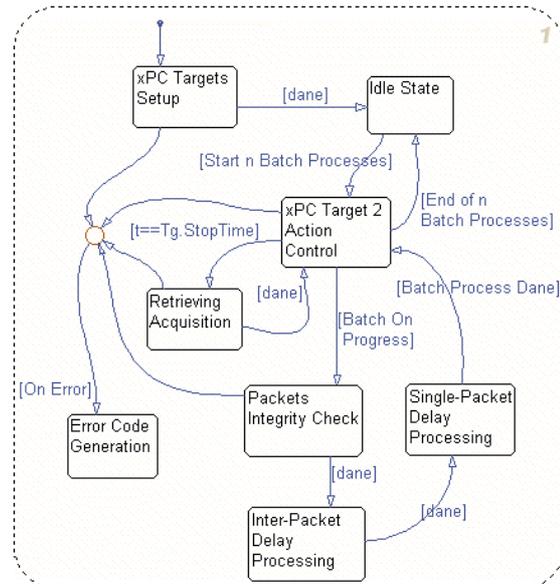


Figura 3

Diagrama de flujo de estado equivalente al diagrama de flujo del algoritmo principal.

3.2 Algoritmo CSMA/CD

Se menciona en secciones anteriores la importancia del mecanismo de acceso al medio MAC que implementan las interfaces Ethernet, el algoritmo utilizado se conoce como CSMA/CD, y se encuentra definido [3].

Existen modelos simulados de una red Ethernet donde el algoritmo CSMA/CD se desarrolla utilizando StateFlow® Toolbox[4]. Sobre este modelo es importante recalcar el siguiente análisis:

La posibilidad del adaptador de red de detectar colisiones cuando transmite, genera una secuencia lógica donde, un valor aleatorio elegido con igualdad de probabilidad sobre una población de valores posibles se incorpora en el cálculo del retardo a generar. Frente a la posibilidad de colisiones sucesivas, la población de valores sobre la cual se elige dicho valor aleatorio se incrementa en potencia de dos, dando lugar a retardos de crecimiento exponencial como un mecanismo óptimo, implementado para poder el adaptador ajustarse rápidamente al tipo de tráfico de red existente.

Cabe decir que mientras mayor colisiones se produzcan, éste será un indicativo de mayor tráfico en la red. De aquí nace el concepto de que los retardos de red producidos como consecuencia de colisiones sucesivas tenderán a ubicarse en franjas bien definidas sobre la gráfica de *Valor de Retardos contra Número de Muestras*, además de generar un patrón repetitivo.

El diagrama de la Figura 4 da cuenta de la posibilidad de retardos generados no como consecuencia de colisiones sucesivas, sino por espera de un Bus sin señal (*sin portadora*) al momento de querer transferir los paquetes en de red.

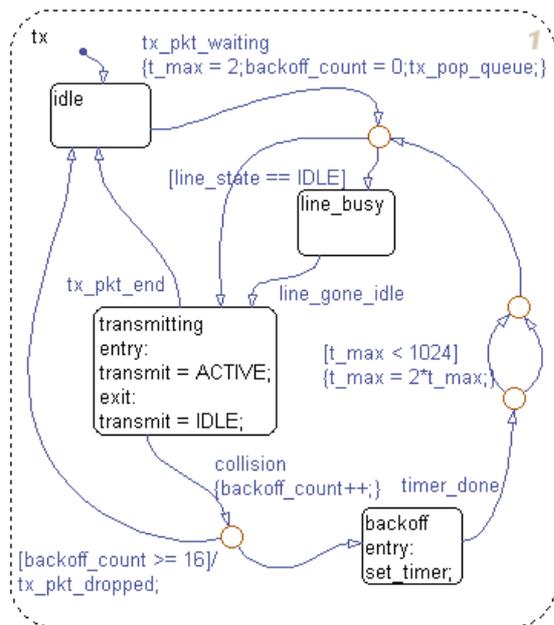


Figura 4
Diagrama de Flujo de Estado del Algoritmo CSMA/CD

Se debe destacar que en topologías de redes conmutadas con conectividad de enlaces en modo Full-Duplex éste algoritmo no es utilizado y por ende los retardos generados serán solo como consecuencia del encolado de paquetes en Routers y Gateways.

3.3 Retardos de Cola en Gateway y Routers:

La conmutación de paquetes que dispositivos como Routers, Gateways y Bridges llevan a cabo, implica la utilización de buffers o colas para cada puerto de enlace. Dependiendo de las características del tráfico en la red (si se da en forma periódica o en ráfagas, si es intenso o moderado, etc), como así también, del ancho de banda asignado al enlace bits/sec, se producirá o no una acumulación de paquetes en ellos. A este tipo de retardos se le llama *Retardo de Cola* (queuing delays) y su caracterización solo puede ser llevada a cabo mediante métodos estadísticos en vista de que el proceso de encolamiento es esencialmente aleatorio. La figura 5 muestra este esquema.

Es posible tener *Retardos de Cola* significantes en momentos donde hay una gran demanda de direccionamiento hacia un solo puerto de salida por parte de N paquetes de llegada, en tal caso el arribo de éstos superará la tasa de despacho de paquetes produciéndose el encolamiento.

El *Retardo de Cola* crecerá no linealmente acorde con la magnitud en la intensidad de tráfico existente TI, esta última definida como la relación entre la Tasa Promedio en Bits de Arribo de Paquetes a la Cola a la Tasa en Bits de Despacho de los mismos [5]. Así TI debe estar comprendido entre 0 y 1. Si TI es cercana a cero, esencialmente cada paquete arribado se encontrará con un buffer vacío y no habrá encolado, se tiene por ende que la naturaleza del tráfico arribado impactará directamente sobre los retardos de cola, y se deberá considerar el retardo de cola promedio producido.

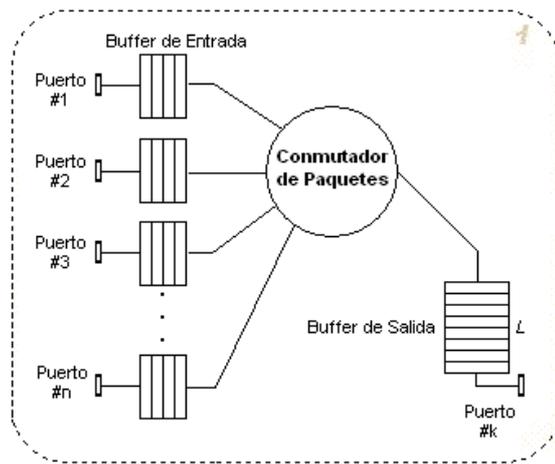


Figura 5
Retardos de Cola.

Otros Retardos producidos en la red cuyo efecto se consideran despreciable en los segmentos de red analizados son:

El *Retardo de Procesamiento* de paquetes d_{PROC} , el *Retardo de Transmisión* de paquetes d_{TRANS} , y el *Retardo de Propagación* de señal d_{PROP} en los enlaces.

3.4 Estimación de Retardos Individuales.

En esencia todo retardo en el arribo de los paquetes enviados, se podrá modelar a partir del concepto presentado en la figura 6, desarrollado a partir de experiencias precedentes en [6].

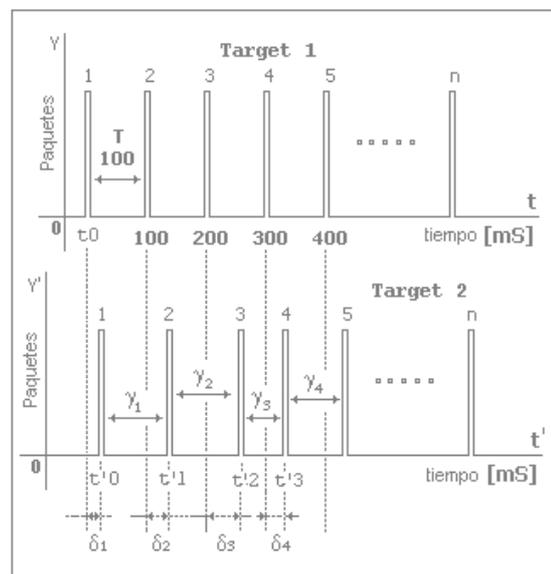


Figura 6.
Modelo de retardos

Aquí el método de medición utilizado, se encuentra basado en el concepto de que, la medición de los valores de retardos entre paquetes sucesivos que arriban a destino – sin contemplar pérdidas de paquetes – deriva en una correlación bien definida del tipo lineal e iterativa en los valores de retardo de arribo individuales de cada paquete, quedando inherentemente asociado un factor de ajuste estocástico en el proceso.

Así pues, del gráfico de la figura se desprende que:

$$\delta_1 + \gamma_{1,2} = T + \delta_2 \quad (1)$$

donde:

$$\delta_2 = \left[\gamma_{1,2} - T \right] + \delta_1 \quad (2)$$

luego:

$$\delta_2 = \Delta_1 + \delta_1 \quad (3)$$

si:

$$\Delta_1 = \left[\gamma_{1,2} - T \right] \quad (4)$$

Extendiendo estas expresiones en términos genéricos para el resto de los retardos se tendrá:

$$\delta_k = \Delta_{k-1} + \delta_{k-1} \quad (5)$$

si:

$$\Delta_k = \left[\gamma_{k,k+1} - T \right] \quad (6)$$

se podrá entonces plantear un sistema de ecuaciones:

$$\begin{cases} \Delta_1 = 0\delta_N + 0\delta_{N-1} + \dots + 0\delta_k + 0\delta_{k-1} + \dots + 0\delta_3 + 1\delta_2 - 1\delta_1 \\ \Delta_2 = 0\delta_N + 0\delta_{N-1} + \dots + 0\delta_k + 0\delta_{k-1} + \dots + 1\delta_3 - 1\delta_2 + 0\delta_1 \\ \Delta_{k-1} = 0\delta_N + 0\delta_{N-1} + \dots + 1\delta_k - 1\delta_{k-1} + \dots + 0\delta_3 - 0\delta_2 + 0\delta_1 \\ \Delta_{N-1} = 1\delta_N - 1\delta_{N-1} + \dots + 0\delta_k + 0\delta_{k-1} + \dots + 0\delta_3 - 0\delta_2 + 0\delta_1 \end{cases} \quad (7)$$

su expresión en forma matricial resulta en:

$$\begin{bmatrix} \Delta_1 + \delta_1 \\ \Delta_2 \\ \Delta_{k-1} \\ \Delta_{N-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 1 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 1 & -1 \\ & & \cdot & & & & & \\ 0 & 0 & \dots & 1 & -1 & \dots & 0 & 0 \\ & & \cdot & & & & & \\ 1 & -1 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \delta_N \\ \delta_{N-1} \\ \cdot \\ \delta_k \\ \cdot \\ \delta_2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

El sistema no Homogéneo así formado, es uno de (N-1) ecuaciones con N incógnitas, con lo cual, admitirá infinitas soluciones. No obstante, se desprende que estimando el valor del primer retardo de forma estocástica, será posible determinar el valor de los N-1 retardos subsecuentes producidos.

La metodología seguida para ajustar el valor del primer retardo, nace del valor más probable en los valores de retardos de eco producidos considerando la dispersión previa computada para el primer retardo individual δ_1 .

4. MEDICIONES

4.1 Protocolo UDP y Retardo de Eco.

UDP/IP, es un protocolo orientado a la transmisión de paquetes, y no a la conectividad como TCP/IP, esto quiere decir, que no hay garantías de que los paquetes enviados lleguen a destino, situación que se da por desbordamiento de las colas FIFO de Gateways y Routers cuando hay congestión de tráfico de paquetes. Ambos protocolos se encuentran definidos por las recomendaciones correspondientes en [7].

Las transmisiones bajo protocolo UDP/IP de un patrón de datos de valores crecientes - Señal Rampa - y bajo la modalidad de Eco, han sido llevadas a cabo entre dos estaciones de trabajo remotas, ubicadas en segmentos de red diferentes, permitiendo determinar a priori la magnitud con la que algunos retardos de red se venían produciendo, a la vez de poder corroborar fehacientemente la no confiabilidad en la recepción de paquetes bajo este tipo de protocolo.

Las mediciones realizadas muestran en un análisis de un pequeño tramo del patrón de eco enviado (en rojo) y recibido (en azul), retardos de aproximadamente 40mS con pérdidas de los paquetes 88 a 91, observándose pérdidas y retardos mayores a éstas en otros tramos de las mediciones como se puede apreciar en la Figura 7.

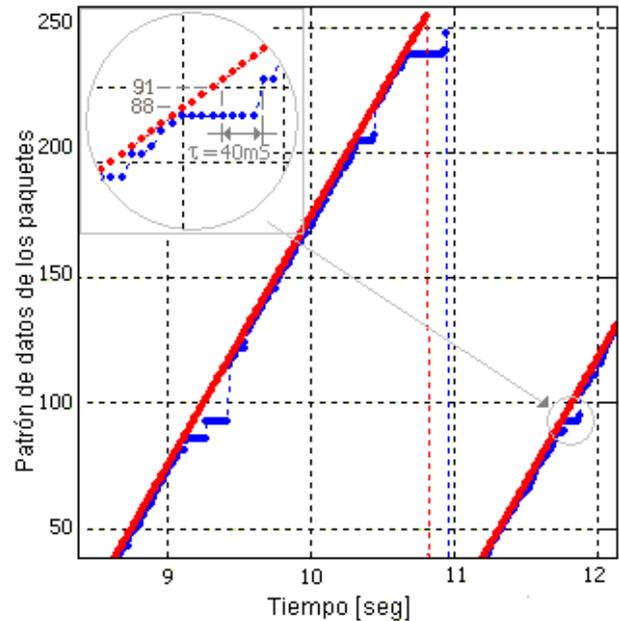


Figura 7
Retardos de Eco.

Desde el punto de vista de los sistemas de control digital distribuidos, el tener lazos de control que incorporen redes Ethernet transmitiendo paquetes bajo protocolo UDP/IP tendrá, sin lugar a dudas que afrontar la posibilidad de pérdida de señal de control por periodos breves, que bien pudieran comprometer la estabilidad del sistema.

Se desprende por ende que, se tenderá a conformar un sistema de control robusto, que contemple también, el carácter variante en el tiempo (*consecuencia esto último de los retardos producidos.*), mediante la inclusión de colas (*buffers*) de determinada longitudes en los nodos de recepción.

4.2 Mediciones de Retardo Inter-Paquetes y Cómputo de Retardos Individuales:

En el procesamiento se analizan N lotes de entre 600 y 1000 muestras de retardo en tiempo real llevadas a cabo por la estación de trabajo Host a partir de una serie de scripts y funciones en lenguaje de Matlab® de donde se extraen un conjunto de valores estadísticos típicos, (*máximo, mínimos, media, mediana, desviación estándar, varianza, rango*).

Gráficamente los retardos entre paquetes procesados se muestran en la Figura 8, éstos se dan en condiciones normales de tráfico de red, donde se aprecia un patrón de retardo muy característico, a partir de que, la mayoría de estos retardos se ubican en torno de un valor central (*media*), produciéndose dispersiones tanto por encima como por de bajo de este valor central en franjas bien definidas.

En este análisis debe tenerse en cuenta que los retardos medidos son entre paquetes, lo cual implica que cada dispersión por encima del valor central trae aparejado en el retardo consecutivo una dispersión – aproximadamente en la misma proporción – por debajo de la media, dándose de esta forma de a pares.

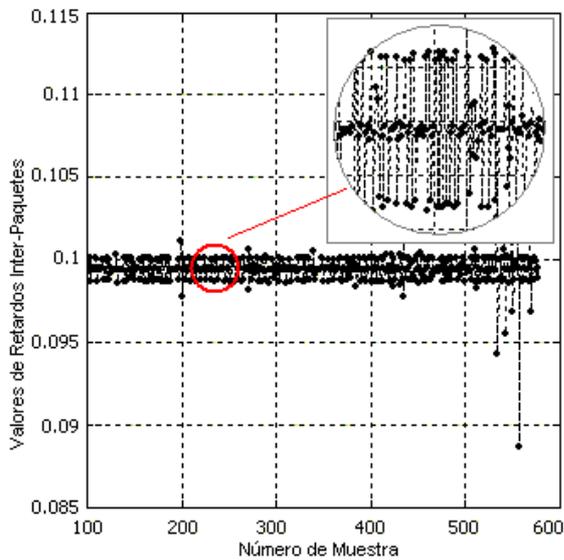


Figura 8

Mediciones de retardos Inter-Paquetes.

Por otra parte, la Figura 9 muestra el patrón de retardo de otro lote, el cual se da de forma espontánea y esporádica, mostrando un tipo de tráfico intenso (que se da de a ráfagas) al que “gateways / routers” deben hacer frente en determinados momentos. La duración en este caso es relativamente corta de entre 10 y 30 segundos.

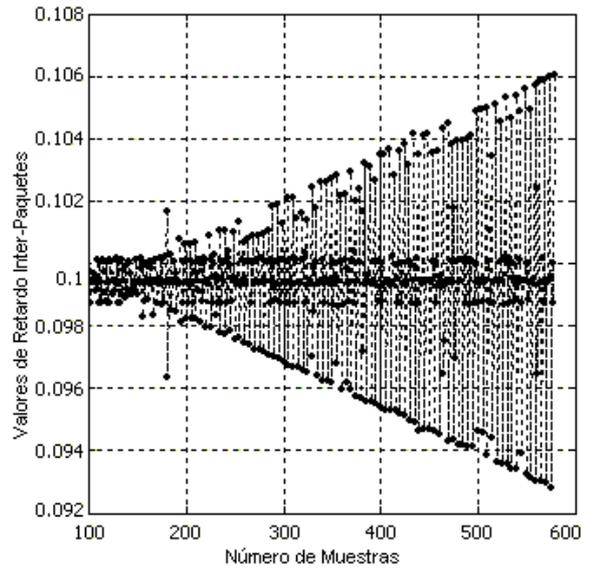


Figura 9

Valor de retardo Vs. numero de muestra

Si bien los valores de retardo individuales de cada paquete son computados en base a las ecuaciones desarrolladas precedentemente, se implementa un algoritmo en lenguaje Matlab® para prestar especial atención a las derivas acumulativas que se van dando en el cómputo, como consecuencia del valor estimativo del periodo con que los paquetes son enviados.

La Figura 10 muestra los resultados obtenidos para un lote del registro concordante con aquella representada en la figura 8.

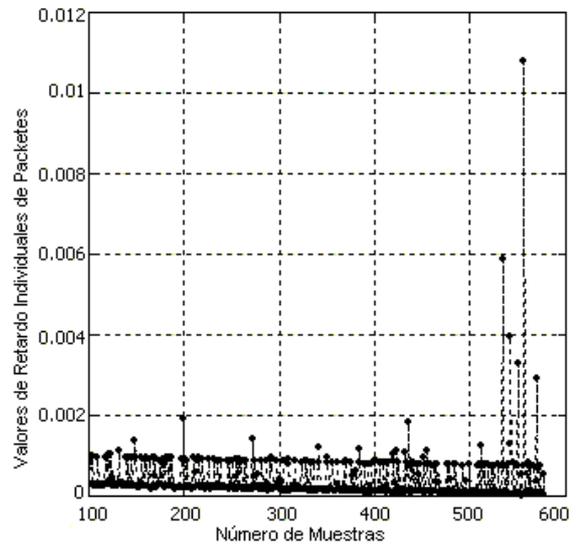


Figura 10.

Retardos individuales Vs. número de muestras

4.2 Análisis de Distribución de Retardos por Lote

Se realiza un análisis de dispersión en los valores de retardo Inter-paquetes, como así también, para los retardos Individuales mediante un algoritmo capaz de proveer con el grado de exactitud requerida la forma de la envolvente con que la dispersión de retardos producidos caracteriza el comportamiento de la red.

En la Figura 11, y bajo condiciones normales de tráfico se muestra un patrón repetitivo característico de distribución de retardos Inter-paquetes, que presenta simetría en torno de un valor central coincidente con el valor de la media y una marcada concentración que se da simétricamente a cada lado para una franja de dispersión bien definida. Se piensa, bien pudiera deberse a colisiones sucesivas en el momento de acceso al medio.

En observaciones realizadas para con otros conjuntos de lotes de muestras se aprecia una marcada reducción en los valores de ocurrencias asociada a los retardos laterales cuando los periodos de emisión de paquetes son menores.

Con relación a la distribución de los retardos individuales computados, estos se muestran en la figura 12 (con magnificación en su eje de absisa).

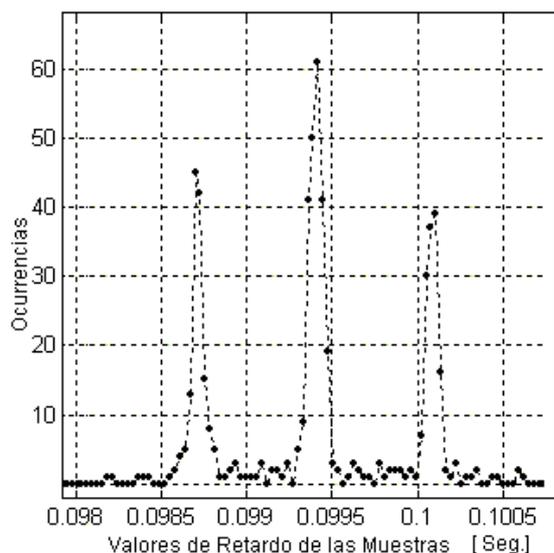


Figura 11.

Ocurrencias Vs. Número de Muestras de Retardos Inter-paquetes

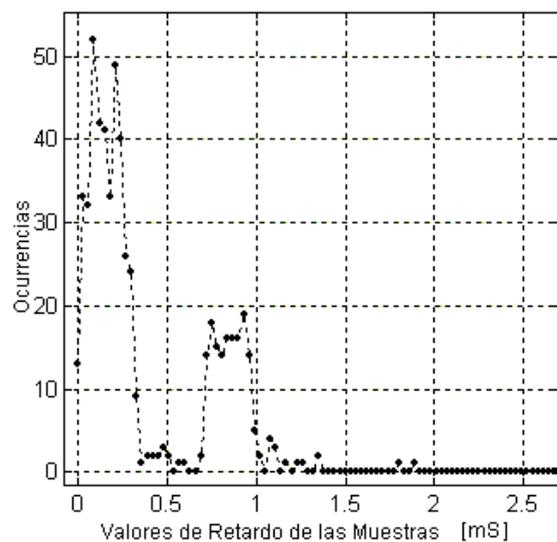


Figura 12

Ocurrencia Vs. Número de Muestras de Retardos Individuales.

5. CONCLUSIONES

Del análisis de los retardos de eco realizada, se aprecia claramente la característica de no confiabilidad en el arribo de paquetes al utilizar el servicio

UDP como protocolo de comunicación. En este caso la pérdida de paquetes será por desbordamiento de las colas (buffers) de Routers y Gateways como ya se explicara.

Si bien se analizó con detalle el algoritmo CSMA/CD, se ha de tener en cuenta que este algoritmo es totalmente funcional solo cuando el enlace establecido es del tipo Half-Duplex. Así mismo, se concluye que los retardos de red medidos y presentados en este informe no son solamente consecuente con este algoritmo CSMA/CD, sino que también se encuentran involucrados los llamados *Retardos de Cola*.

Los análisis estadísticos realizados sobre un conjunto de entre 50 a 100 lotes de muestras son muy significativos, en la caracterización de los retardos producidos entre segmentos de redes, en especial los valores de máximos, mínimos y rango.

Una inmediata utilización impone un límite claro en el máximo valor de tasa de muestreo a utilizar por los sistemas distribuidos de control digital a los efectos de minimizar las pérdidas de paquetes que se producen en la transmisión bajo servicio UDP. Por otra parte, la desviación estándar (*std.*) se presenta esencialmente constante la mayor parte del tiempo y con ello la posibilidad de ajustar una función de densidad de probabilidad tanto para retardos Inter-paquetes como para retardos individuales.

Con relación a la determinación indirecta de los valores de retardos individuales, se puede concluir que la forma y el grado de dispersión relativa que los mismos presentan queda perfectamente definida cuando se computa según las ecuaciones presentadas. No obstante, un error de calibración se encontrará asociado a dicho cálculo, que debe ser ajustado estocásticamente de forma tal que sea coincidente con el valor más probable resultante de considerar la mitad del valor promedio de retardos de ecos

6. REFERENCIAS

- [1] Nilsson Johan,(1998),”*Real-Time control Systems with delays*”, Department of Automatic Control, Lund, Institute of Technology, ISSN 0280-5316.
- [2] Mathworks,(2002). Matlab r13, Real Time Workshop, xPC-Target Toolbox User’s Guide.
- [3] IEEE 802.3 –“*CSMA/CD Ethernet*”
- [4] McGarrity Stuart,(1999) “*Stateflow Model of the 10Base-T Ethernet and CSMA/CD protocol*”, Matlab Central.
- [5] James F. Kurose and Keith W. Ross,(2000) “*Computer Networking, A Top Down Approach Featuring the Internet*”, ISBN:0201477114.
- [6] Mario R. Modesti, Luis R. Canali , Jorge Vaschetti, (2004) “*Ethernet delay evaluation by an embedded real time Simulink® model PC in asynchronous mode*”, XIX Congreso Argentino de Control Automático AADECA.
- [7] J. Postel , ISI, (1980), RFC768,”*User Datagram Protocol*”. (1981), RFC793, “*Transmission Control Protocol*”