

Medición, caracterización y reconstrucción de los tiempos de ejecución y transporte para sistemas de telecontrol en tiempo real

Jorge Salvador Valdez Martínez¹, Pedro Guevara López²

¹ Universidad Tecnológica Emiliano Zapata del Estado de Morelos, Morelos, México

² Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Sección de Estudios de Posgrado e Investigación, Unidad Culhuacán, México

jorgevaldez@utez.edu.mx, pguevara@ipn.mx

Resumen. En este trabajo se analiza y presenta el proceso de medición, caracterización y reconstrucción de los tiempos de un sistema de telecontrol tiempo real por internet a partir de su segmentación en tiempos de ejecución, tiempos de transmisión y recepción de información. El estudio experimental se hizo con un banco de pruebas basado en el esquema de comunicación cliente-servidor donde se simula un motor eléctrico. Los tiempos medidos fueron caracterizados con el primer y segundo momento de probabilidad y el error cuadrático medio para determinar el método de reconstrucción adecuado. En el caso del tiempo de ejecución se usó la reconstrucción basada en filtrado digital difuso o en el método de la variable instrumental; para la reconstrucción de los tiempos de transmisión y recepción por internet, se usó el filtro de Kalman. Finalmente, con las reconstrucciones realizadas, se concluyó que son aceptables para determinar la dinámica de los tiempos de un sistema de telecontrol en tiempo real.

Palabras clave. Telecontrol, tiempo de transporte, tiempo de ejecución, tiempo de telecontrol, reconstrucción, tiempo real.

Measurement, Characterization and Reconstruction of Computing Time and Transporting Time for Real-Time Telecontrol Systems

Abstract. In this paper we analyze and shown the process of measurement, characterization and reconstruction of times of a real-time telecontrol system by its segmentation of computing time, transmission time and reception time of information over the Internet.

Experimental analysis was made by a workbench's development with a client-server communication scheme to simulate the behavior and control of an electric motor; all measured times were characterized with the first moment and second moment of probability, the mean squared error was used to determine the adequate reconstruction method. For computing time reconstruction, fuzzy digital filtering or instrumental variable method was used. For transmission and reception times over Internet, was used the Kalman filter. Finally, with reconstructions obtained, we concluded that algorithms and methods used are acceptable to determine the dynamics of a time of computing and transmission a real-time telecontrol system.

Keywords. Telecontrol, transport time, computing time, telecontrol time, reconstruction, real-time.

1. Introducción

Los sistemas de telecontrol en tiempo real a través de Internet presentan un tiempo telecontrol $T_{Tc,k}$, constituido por los tiempos de ejecución c_k y transporte τ_k el cual a su vez está conformado por los tiempos de transmisión $\tau_{Tx,k}$ y recepción $\tau_{Rx,k}$. Sin embargo, estos sistemas son susceptibles a diversos factores (tal y como la infraestructura, horario, fecha, códigos informáticos maliciosos, interferencias electromagnéticas, normas de comunicación o protocolos) que afectan al tiempo de telecontrol [1] repercutiendo directamente a la dinámica del tiempo de respuesta total de los equipos involucrados, lo que conlleva a formular modelos matemáticos capaces de imitar el

comportamiento de los tiempos involucrados a partir de la extracción de sus propiedades básicas expresadas en un conjunto de atributos matemáticos.

Se han encontrado trabajos en donde se proponen modelos que han servido para encontrar medidas de desempeño de interés como el retardo promedio, variaciones en el retardo, tiempo de arribo, tiempo de transmisión y recepción (Round trip time), ocupación en tiempo de la memoria en los circuitos de interconexión, tiempos de codificación, etcétera, los cuales conforman principalmente al tiempo existente en el tráfico de datos en el medio de comunicación por internet.

Para cuantificar los tiempos de codificación, compresión y de transmisión de una señal digital de video, en [2] se presenta un modelo que ha servido para tal fin mediante el uso de técnicas autoregresivas y procesos markovianos, justificando la necesidad de modelar el tráfico de datos en función de la naturaleza de la señal audio visual. En [3], se presentó el modelado del retardo del tiempo de transmisión en la tecnología inalámbrica de comunicación Bluetooth 2.0, en donde se utilizó una arquitectura cliente-servidor programada en lenguaje C utilizando el protocolo BlueZ, en donde el receptor calcula el tiempo transcurrido desde el inicio de la transmisión de los datos hasta el instante de recepción, tomando en consideración el número de bits de transmitidos, así como el tipo de modulación empleada.

En el trabajo de [4] se realiza el análisis de los modelos de tiempos de transmisión de datos en el tráfico para redes de banda ancha basado en diversos protocolos y para el caso específico del protocolo TCP se menciona que se han usado modelos poissonianos para los cuales, debido a su estructura, subestiman la variabilidad de los tiempos de la transmisión de paquetes, lo que permitió concluir que lo hace impropio para su modelado de tráfico con el protocolo mencionado. En tanto que en trabajo de [5] se realizó una revisión de los modelos de tráfico y control de redes de comunicaciones, observaron que los procedimientos actuales en control de redes se basan en modelos de tráfico acotados, definidos por la tasa pico y la tasa media, y son efectivos para el diseño basado en el sobredimensionamiento, con altas tasas de transmisión y poca memoria para los buffers de

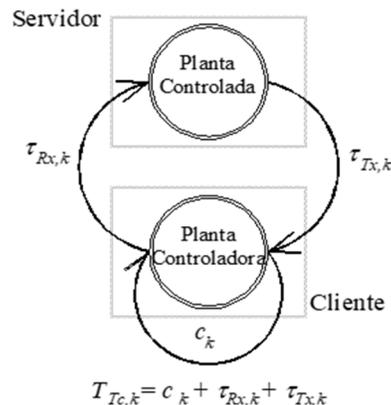


Fig. 1. Diagrama básico de telecontrol

espera. Pero si es considerada la variabilidad de los tiempos involucrados, los autores sugieren la investigación basada en la aplicación de técnicas de procesamiento estadístico de señales para monitorear y predecir el desempeño de la red, de manera que se puedan tomar decisiones de control más oportunas y efectivas.

Es por eso que en este trabajo de investigación se midieron, caracterizaron estadísticamente, modelaron y reconstruyeron a los tiempos de transporte (transmisión y recepción) y los tiempos de ejecución o procesamiento remoto en un sistema de telecontrol en tiempo real por Internet; como objeto de estudio se planteó un esquema cliente – servidor en donde se coloca una planta controladora y una planta controlada respectivamente (ver figura 1), que sirvió de base para modelar y reconstruir los tiempos involucrados en la transmisión y recepción de datos a través de técnicas de filtrado digital estocástico.

Para lograr el objetivo del trabajo, se desarrolló un banco de pruebas para la medición y estudio de los tiempos involucrados en la simulación de un proceso de control, el cual fue basado en una arquitectura de software de un esquema multicliente-servidor multiplataforma (QNX-Windows) utilizando los protocolos de comunicación TCP e IP.

Posteriormente se procedió a caracterizar estadísticamente y reconstruir los tiempos de ejecución y los tiempos de transmisión y recepción (tiempos de transporte) existentes en el proceso de telecontrol simulado.

La reconstrucción de los tiempos de ejecución c_k fue hecha a partir de técnicas basadas en el Método de la Variable Instrumental y con Filtrado Digital Difuso. Mientras que la reconstrucción de los tiempos de transporte fue hecha utilizando el Filtrado de Kalman.

La organización de este resumen de tesis queda conformada de la siguiente manera, En la primera sección se presentó la introducción. En la segunda sección se presenta la medición, caracterización y reconstrucción mediante técnicas de filtrado digital de los tiempos de ejecución; en tanto que en la tercera sección se presenta la medición, caracterización y reconstrucción del tiempo de transporte usando el filtro de Kalman. En la cuarta sección se presentan las conclusiones.

2. Medición, caracterización y reconstrucción de los tiempos de ejecución

El tiempo de respuesta del sistema de control en tiempo real depende en gran parte del comportamiento de los tiempos de ejecución $c_{i,k}$ de cada instancia $j_{i,k}$ de cada tarea en tiempo real J_i , por esa razón modelar las instancias y las tareas no es sencillo ya que cada una de ellas necesita una representación de acuerdo a su propia dinámica, pues esta variación hace que los Sistemas de control en Tiempo Real puedan no cumplir con sus plazos $d_{i,k}$, provocando que sean poco predecibles, mal dimensionados o poco tolerantes a fallos [6].

Para dar solución a este problema se plantea reconstruir el comportamiento de la dinámica de los tiempos de ejecución a partir de la medición y caracterización estadística de los tiempos de ejecución $c_{i,k}$. Entonces, el desarrollo de este trabajo, el tiempo de ejecución $c_{i,k}$ se definió de la siguiente manera.

Definición 1 (Tiempo de ejecución en un sistema de telecontrol en tiempo real)

El tiempo de ejecución $c_k \in \mathbf{R}^+$ en un sistema de telecontrol en tiempo real, es el tiempo en que se procesa la información en el intervalo $k \in \mathbf{Z}^+$ hasta completarse el procesamiento sin considerar los

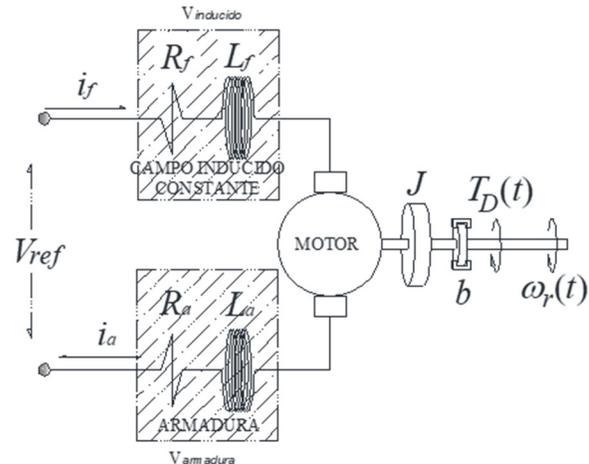


Fig. 2. Diagrama del motor eléctrico de corriente continua con campo serie

bloqueos por lectura o escritura en los canales de comunicación, desalojos del procesador u otro tipo de suspensiones.

2.1. Medición de los tiempos de ejecución

Para hacer posible la medición de los tiempos de ejecución de un proceso, se usó la arquitectura de hardware reportada en [7], desarrollando un banco de pruebas en el cual se programaron 3 procesos concurrentes en la simulación de la dinámica de un motor de corriente continua. En la Figura 2 se puede ver el diagrama electromecánico del motor en estudio.

El modelo matemático en espacio de estados de acuerdo a [7] es (1, 2):

$$\begin{bmatrix} \frac{di_a(t)}{dt} \\ \frac{d\omega_r(t)}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_a}{L_a} & \frac{k_a i_f}{L_a} \\ \frac{k_a i_f}{J} & -\frac{b}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a(t) \\ \omega_r(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_a} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ref} \\ T_D \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$Y(t) = \begin{bmatrix} i_a(t) \\ \omega_r(t) \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Cuyas variables, valores y unidades se pueden observar en la Tabla 1 [7].

El modelo discreto que representa el comportamiento del motor fue obtenido mediante el método de diferencias finitas [7]. En (3) se muestra la aproximación numérica para la velocidad angular $\omega_r(k)$ y en (4) se muestra la aproximación para la corriente de armadura $i_a(k)$:

$$\omega_r(k) \approx \frac{Tk_a i_f i_a(k) - TT_D + J\omega_r(k-1)}{J + Tb}, \quad (3)$$

$$i_a(k) \approx \frac{-Tk_a i_f \omega_r(k) + TV_{ref} + L_a i_a(k-1)}{L_a + TR_a}, \quad (4)$$

donde T representa el tiempo de muestreo, que para este caso fue de una unidad temporal [UT]. La respuesta de la velocidad angular $\omega_r(k)$ y la corriente de armadura $i_a(k)$ del motor de corriente continua, se puede observar en la Figura 3.

Para el desarrollo del banco de pruebas, se programaron 3 tareas concurrentes para la simulación de la dinámica de un motor de corriente continua. En donde una tarea en tiempo real designada como J_1 hizo el cálculo de la corriente de armadura i_k . La tarea en tiempo real J_2 realizó el cálculo de la velocidad angular ω_k . En forma adicional, se propuso aplicar una acción de control de tipo proporcional al modelo discreto del motor de corriente continua (Ver figura 4).

Debido a esto se agregó la tarea en tiempo real J_3 que se encarga de calcular el Voltaje de corrección V_k generado por la acción de control proporcional. El valor de Kp mostrado en la figura 4 es la ganancia del controlador K al cual se le puede asignar el rango de valores denotados en la Tabla 1. De tal forma que el esquema de tareas en tiempo real concurrentes para este caso de estudio, se puede ver en la Figura 5.

Para la medición de los tiempos de ejecución, las consideraciones teóricas se muestran en [8], adicionalmente se usaron los métodos de medición mencionados en [9]. Lo que permitió obtener los tiempos de ejecución $c_{1,k}$ de la tarea en tiempo real J_1 , que pueden ser visualizados en la Figura 6.

Las tareas J_2 y J_3 tienen un comportamiento semejante y fueron publicadas en [10].

Tabla 1. Variables del modelo del motor de corriente continua

Momento de Inercia	J	1 kg*m ²
Coef. Fricción viscosa	b	1 N*m*s/rad
Cte. Construcción	k_a	0.05
Corriente de campo	i_f	20 A
Inductancia de armadura	L_a	0.001 H
Resistencia de armadura	R_a	3 Ω
Voltaje de referencia	V_{ref}	110 V
Par debido a la carga	T_D	0 – 25 N*m
Ganancia del controlador	K	1.36 - 1.7

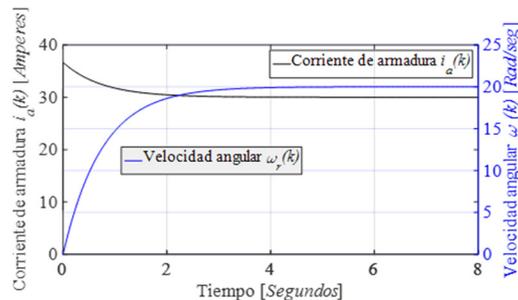


Fig. 3. Respuesta de $\omega_r(k)$ e $i_a(k)$ del motor de corriente continua

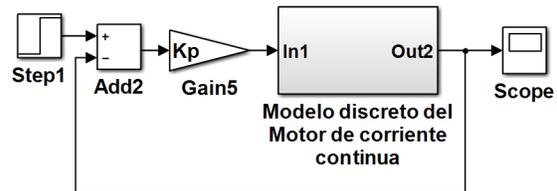


Fig. 4. Diagrama a bloques del sistema de control aplicado al modelo del motor de corriente continua

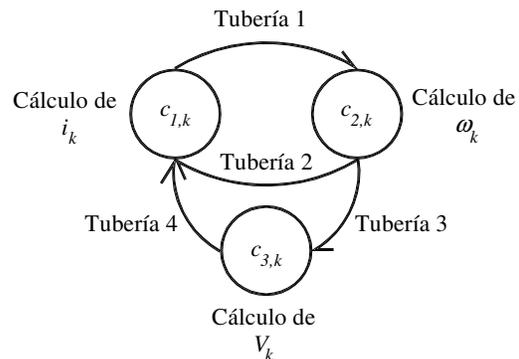


Fig. 5. Esquema de TTR concurrentes y su mecanismo de comunicación en el Sistema Operativo de Tiempo Real QNX 6. 5 Neutrino

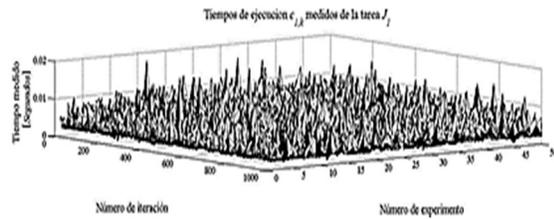


Fig. 6. Medición de los tiempos de ejecución $c_{1,k}$, (1000 instancias y 50 repeticiones del experimento)

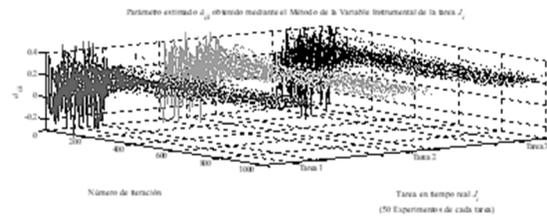


Fig. 7. Parámetros estimados $\hat{a}_{1,k}$, $\hat{a}_{2,k}$ y $\hat{a}_{3,k}$ de las tareas en tiempo real concurrentes J_1 , J_2 y J_3

2.2. Caracterización de los tiempos de ejecución

Para utilizar algún método de reconstrucción para los tiempos de ejecución $c_{i,k}$ de una tarea J_i , se requiere que la información emitida por el sistema sea un proceso estocástico, estacionario en sentido débil, lineal y con función de distribución de probabilidad gaussiana [11].

Un proceso estocástico puede ser estacionario en sentido débil si para todo tiempo es estable en media ($E\{c_{i,k}\} = \mu = cte$) y en autocovarianza (es decir $E\{(c_{i,k} - \mu)(c_{i,k-1} - \mu)\} = \gamma_k$). Lo cual fue cumplido en su totalidad (leer [10]) de acuerdo a [11], al obtener un comportamiento estable en el primer momento de probabilidad $E\{c_{i,k}\}$ de los tiempos de ejecución $c_{i,k}$ medidos de las tareas en tiempo real concurrentes J_1 , J_2 y J_3 .

Para la condición de ser estable en autocovarianza $E\{(c_{i,k} - \mu)(c_{i,k-1} - \mu)\}$, de igual manera se observó que al inicio de la evolución del sistema su valor es variante, pero posteriormente el valor se conserva dentro de un rango. Lo que permitió concluir que los tiempos de ejecución $c_{i,k}$ medidos de las tareas en tiempo real concurrentes J_1 , J_2 y J_3 son estacionarios en sentido débil y puede ser reconstruidos.

2.3. Reconstrucción de los tiempos de ejecución

Para el modelado del tiempo de ejecución $c_{i,k}$ de las instancias de una TTR J_i con base en [12], en [6] utilizaron un modelo autoregresivo de promedios móviles ARMA de orden (1,1) presentado en [13] para modelar y reconstruir a los tiempos de ejecución de tres tareas en tiempo real, el cual se muestra en (5, 6):

$$x_{i,k+1} = \hat{a}_{i,k} x_{i,k} + v_{i,k}, \quad (5)$$

$$c_{i,k} = x_{i,k} + h_{i,k} + w_{i,k}, \quad (6)$$

en donde $c_{i,k}$ es el tiempo de ejecución de la k -ésima instancia de la i -ésima tarea en tiempo real, $\hat{a}_{i,k}$ es el parámetro del sistema, $v_{i,k}$ es el ruido interno de la computadora, $w_{i,k}$ es el ruido externo a la computadora, $h_{i,k}$ es el tiempo de ejecución de referencia y $x_{i,k}$ es el estado interno del modelo. Para conocer la dinámica del parámetro $\hat{a}_{i,k}$ de la expresión (5), es necesario realizar el proceso de su estimación en línea con ecuaciones recursivas. Las unidades de los estados son segundos.

El proceso de estimación de acuerdo a [14], se basa en monitorear los estados que emite el sistema (en este caso los tiempos de ejecución de una tarea de tiempo real concurrente) para seleccionar el estimador adecuado y extraer la información necesaria para describir el parámetro $\hat{a}_{i,k}$ del sistema tipo caja negra que representa el comportamiento interno del sistema en el que se realiza la ejecución de la tarea con el uso de filtros digitales en su configuración de estimadores de parámetros; para ello se propuso el Método de la Variable Instrumental (MVI) reportado en [10] y Filtrado Digital Difuso (FDD) mostrado en [15].

a. Reconstrucción de los tiempos de ejecución a partir de la estimación del parámetro $\hat{a}_{i,k}$ mediante el Método de Variable Instrumental (MVI)

El Método de Variable Instrumental (MVI) es una herramienta que en [16], se comparó con otros estimadores de parámetros, tales como Mínimos Cuadrados Recursivo (MSM) y el Método del Gradiente Recursivo (MGR). En estos trabajos después de realizar un estudio de convergencia local y global, se concluyó que la mejor alternativa

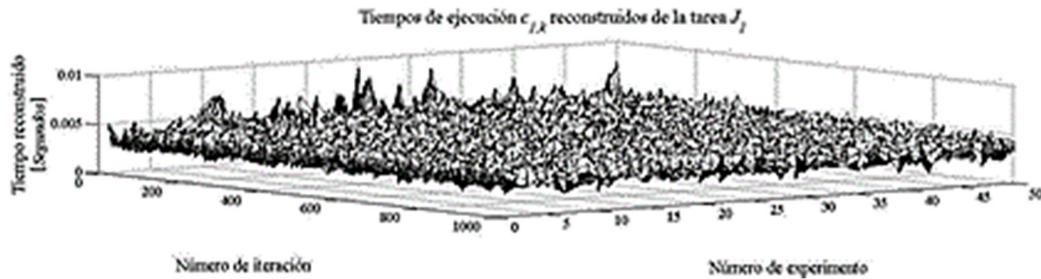


Fig. 8. Reconstrucción de los tiempos de ejecución $c_{i,k}$

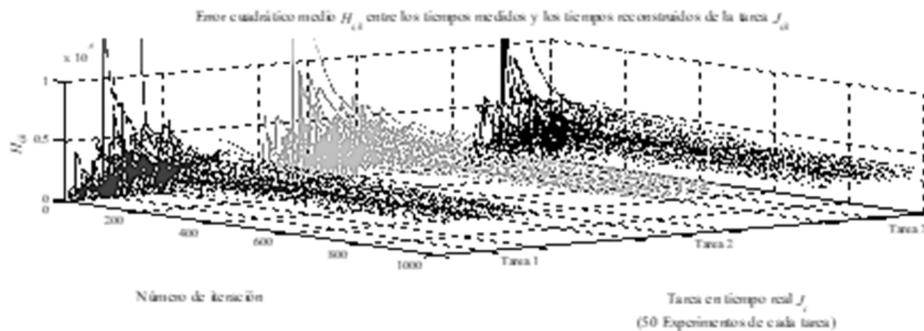


Fig. 9. Error cuadrático medio entre los tiempos de ejecución $c_{i,k}$

para la estimación de parámetros en los sistemas estocásticos con perturbaciones no correlacionadas entre sí es el Método de la Variable Instrumental.

Este estimador de parámetros se utilizó para esta sección para estimar los parámetros del sistema necesarios para modelar los tiempos de ejecución $c_{i,k}$ de una instancia $j_{i,k}$ de una tarea en tiempo real J_i a partir del modelo autoregresivo de promedios móviles ARMA de orden (1,1) y fue mostrado en [10] con resultados satisfactorios. Para la estimación de los parámetros del sistema $\hat{a}_{1,k}$, $\hat{a}_{2,k}$ y $\hat{a}_{3,k}$ de las tareas en tiempo real J_1 , J_2 y J_3 en estudio, que describen a los tiempos de ejecución convergen a una región de valores entre 0.16 y 0.32 unidades en la instancia como se puede ver en la Figura 7.

Esto significa que a partir de los estados observables del sistema (los tiempos de ejecución $c_{1,k}$, $c_{2,k}$ y $c_{3,k}$ de las tareas en tiempo real concurrente J_1 , J_2 y J_3) ha sido extraída la información necesaria para estimar el parámetro a del sistema tipo caja negra que representa el

comportamiento interno en el que se realiza la ejecución del sistema.

Se observa que la reconstrucción de los tiempos de ejecución $c_{1,k}$, de la tarea en tiempo real J_1 es satisfactoria (Ver Figura 8), pero visualmente no se puede agregar más información para asegurar una reconstrucción exitosa, lo que conlleva a usar criterios como el error cuadrático medio para validar este resultado.

Para el caso del error cuadrático medio entre los tiempos de ejecución reales $c_{i,k}$ y tiempos de ejecución reconstruidos $\hat{c}_{i,k}$ para la tarea en tiempo real concurrente J_i , se va describiendo la convergencia del filtro mediante (7, 8) hasta encontrar el mínimo error de $H_{i,k}$ (ver Figura 9):

$$e_{i,k} = \hat{c}_{i,k} - c_{i,k}, \tag{7}$$

$$H_{i,k} = \left[\frac{1}{k} \left((k-1)H_{i,k-1} + e_{i,k}^2 \right) \right]^{\frac{1}{2}}. \tag{8}$$

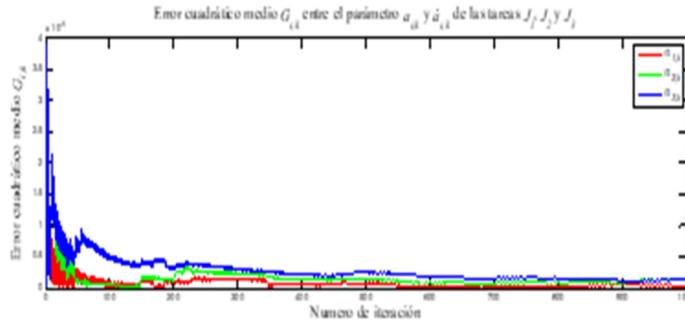


Fig. 10. Error cuadrático medio $G_{i,k}$ calculado entre el parámetro del sistema $a_{i,k}$ y el parámetro estimado del sistema reconstruido $\hat{a}_{i,k}$ para las TTR J_1, J_2 y J_3

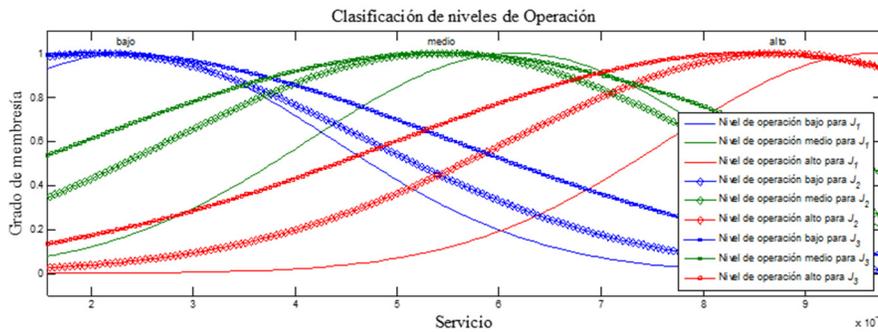


Fig.11. Error cuadrático medio $G_{i,k}$ calculado entre el parámetro del sistema $a_{i,k}$ y el parámetro estimado del sistema reconstruido $\hat{a}_{i,k}$ para las TTR J_1, J_2 y J_3

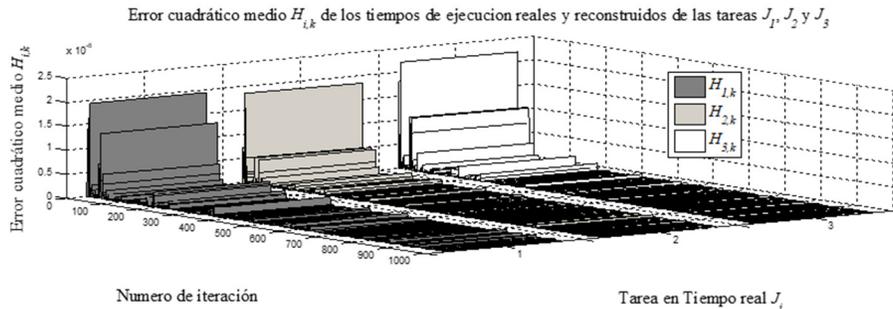


Fig. 12. Error cuadrático medio $H_{i,k}$ calculado entre los tiempos de ejecución reales y tiempos de ejecución reconstruidos para las Tareas en Tiempo Real J_1, J_2 y J_3 con 1000 instancias

En la Figura 9 se observa que la reconstrucción del tiempo de ejecución $\hat{c}_{i,k}$ tiene una convergencia en casi todos los puntos, pues el error cuadrático medio $H_{i,k}$ converge a valores muy pequeños, lo que permite describir la calidad de la reconstrucción del tiempo de ejecución $\hat{c}_{i,k}$.

Pues a medida que se obtengan valores cada vez más pequeños de $H_{i,k}$ durante el proceso de reconstrucción, la diferencia descrita por la ecuación (7), converge a valores cercanos a 0, lo que permite establecer que la dinámica de los tiempos de ejecución $\hat{c}_{i,k}$ reconstruidos es similar a

la de los tiempos de ejecución $c_{i,k}$ medidos, con lo que se valida la reconstrucción lograda a través del algoritmo computacional propuesto.

b. Reconstrucción de los tiempos de ejecución a partir de la estimación del parámetro $\hat{a}_{i,k}$ mediante Filtrado Digital Difuso (FDD)

El filtro difuso es de tipo adaptativo, con una estructura que clasifica sus respuestas en diferentes niveles de operación. En este caso fue usado para la selección del parámetro más adecuado $\hat{a}_{i,k}$ de una base de conocimiento, utilizando para ello los conectores lógicos si-entonces [17].

Esto con la finalidad de actualizar los pesos del filtro para describir por medio de un modelo ARMA a la dinámica de una tarea en tiempo real. Cabe aclarar que este desarrollo fue mostrado en [15] con buenos resultados.

Siendo el problema de este trabajo la estimación del parámetro $\hat{a}_{i,k}$ de la ecuación (5) para las tres tareas mencionadas anteriormente de solo un experimento. Las funciones de membresía de la base del conocimiento del filtro difuso, están limitadas por el error cuadrático medio descrito en (9) el cual describirá la convergencia del filtro hasta encontrar el mínimo error de $G_{i,k}$ entre el parámetro del sistema $a_{i,k}$ y el parámetro estimado del sistema reconstruido $\hat{a}_{i,k}$ para las tres tareas J_1 , J_2 y J_3 . [18, 19]:

$$G_{i,k} = E\{(e_{i,k})^2\}^{1/2}. \quad (9)$$

El error $e_{i,k}$ en la estimación del parámetro se muestra en (10) y la aproximación del parámetro para cada instancia se muestra en (11):

$$e_{i,k} = \hat{a}_{i,k} - a_{i,k}, \quad (10)$$

$$a_{i,k} \xrightarrow[k \rightarrow \delta]{} a \quad (11)$$

δ es el número total de instancias de un proceso. El objetivo en la selección de los parámetros es obtener una disminución dinámica del error entre los tiempos de ejecución reales $c_{i,k}$ y la reconstrucción de los tiempos $\hat{c}_{i,k}$ por el modelo ARMA. Los diferentes niveles de operación dentro del filtro difuso deben estar dentro del criterio de error descrito en (9) a partir de (12) y se visualiza en la Figura 10:

$$G_{i,k} = \left[\frac{1}{k} \left((k-1)G_{i,k-1} + e_{i,k}^2 \right) \right]^{1/2}. \quad (12)$$

En la Figura 10 se aprecia el comportamiento asintótico de las curvas $G_{i,k}$ y su convergencia a un valor muy cercano a cero, demostrando que el filtro difuso funciona de manera adecuada. En los tres casos pertenecientes a las tres tareas en tiempo real, el error de estimación es de aproximadamente 1×10^{-3} Segundos; esto muestra que la reconstrucción a través del filtro difuso es satisfactoria y asegura una reconstrucción de los tiempos de ejecución exitosa.

En el filtro difuso se emplean tres niveles de operación representados por funciones de tipo gaussiano, ya que de acuerdo con [18], por medio de ellas se tiene una mejor aproximación a un proceso de referencia en comparación con otro tipo de funciones como las triangulares. En la Figura 11 se presentan los niveles de operación (bajo, medio y alto) para las TTR J_1 , J_2 y J_3 que permiten obtener la estimación del parámetro $\hat{a}_{i,k}$. El filtro difuso va seleccionando de manera dinámica los parámetros que ajustan al modelo ARMA y de esta forma lograr la mejor aproximación a los tiempos de ejecución de acuerdo a [17]. De los resultados obtenidos, se observó que a partir de la estimación del parámetro $\hat{a}_{i,k}$ a través del filtro difuso, los tiempos de ejecución reconstruidos $\hat{c}_{i,k}$ son muy próximos a los tiempos de ejecución reales $c_{i,k}$ para las TTR J_1 , J_2 , y J_3 en todos los valores de k , pero se considera que este argumento no es suficiente, lo que conlleva a usar el error cuadrático medio para validar este resultado.

Para el caso del error cuadrático medio entre los tiempos de ejecución reales $c_{i,k}$ y tiempos de ejecución reconstruidos $\hat{c}_{i,k}$ para las TTR J_1 , J_2 y J_3 se va describiendo la convergencia del filtro mediante el empleo de (7, 8) hasta encontrar el mínimo error de $H_{i,k}$ (Ver Figura 12).

En la Figura 12 y de acuerdo a (8), el filtro tiene una convergencia en casi todos los puntos; se observan las respuestas de los errores $H_{1,k}$, $H_{2,k}$ y $H_{3,k}$, destacándose que estos convergen a valores muy pequeños: $1,398 \times 10^{-7}$ Segundos, $1,774 \times 10^{-7}$ Segundos y $6,525 \times 10^{-8}$ Segundos para $c_{1,k}$, $c_{2,k}$ y $c_{3,k}$ respectivamente, lo que permite describir la calidad de la reconstrucción pues a medida que se obtengan valores cada vez más pequeños de $H_{i,k}$

durante el proceso de filtrado difuso, la diferencia descrita por la ecuación (32), converge a valores cercanos a 0.

Esto permite establecer que la dinámica de los tiempos de ejecución reconstruidos es similar a la de los tiempos de ejecución medidos, con lo que se valida la reconstrucción lograda a través del algoritmo computacional utilizado.

3. Medición, caracterización y reconstrucción de los tiempos de transporte

La cuantificación de los tiempos de transporte de información en Internet ha sido objeto de estudio debido a que la dinámica de su comportamiento influye en el desempeño de las aplicaciones desarrolladas para trabajar en Internet, debido al incremento en la infraestructura tecnológica, pues provoca un aumento de tráfico soportado por la red global debido a la integración de Tecnologías de la Información y Comunicación (TIC's) en forma de servicios multimedia.

Por esa razón se ha tratado de modelar el tráfico de información en Internet con el fin de mejorar el diseño de redes de acceso y productos de Internet, así como de crear diseños eficientes de esquemas de control de tráfico y de esa manera reducir indirectamente el tiempo de transporte en Internet [20].

El tiempo de transporte τ_k en un sistema de telecontrol en tiempo real, se puede definir de la siguiente manera:

Definición 2 (Tiempo de transporte en un sistema de telecontrol en tiempo real). El tiempo de transporte $\tau_k \in \mathbf{R}^+$ en un sistema de telecontrol en tiempo real es la suma algebraica del tiempo de transmisión $\tau_{Tx,k} \in \mathbf{R}^+$ y el tiempo de recepción $\tau_{Rx,k} \in \mathbf{R}^+$ en el intervalo $k \in \mathbf{Z}^+$. De tal manera que:

$$\tau_k = \tau_{Tx,k} + \tau_{Rx,k}, \quad (13)$$

donde el tiempo de transmisión $\tau_{Tx,k}$ y el tiempo de recepción $\tau_{Rx,k}$ se definen a continuación.

Definición 3 (Tiempo de transmisión en un sistema de telecontrol en tiempo real). El tiempo de transmisión $\tau_{Tx,k} \in \mathbf{R}^+$ en un sistema de

telecontrol en tiempo real es el tiempo en que transcurre en el envío de información desde el cliente de telecontrol hasta el servidor de telecontrol en el intervalo $k \in \mathbf{Z}^+$.

Definición 4 (Tiempo de recepción en un sistema de telecontrol en tiempo real). El tiempo de recepción $\tau_{Rx,k} \in \mathbf{R}^+$ en un sistema de telecontrol en tiempo real es el tiempo en que transcurre en el envío de información desde el servidor de telecontrol hasta el cliente de telecontrol en el intervalo $k \in \mathbf{Z}^+$.

En este sentido la presente sección se encuentra orientada a la reconstrucción de los tiempos de transmisión $\tau_{Tx,k}$, así como los tiempos de recepción $\tau_{Rx,k}$, para obtener la reconstrucción del tiempo de transporte τ_k . Para el caso de la reconstrucción de la dinámica de los tiempos de transmisión $\tau_{Tx,k}$, así como los tiempos de recepción $\tau_{Rx,k}$, se usará el filtro de Kalman, donde la condición de operación de cualquier filtro es asegurar que el comportamiento de los ruidos asociados a la entrada y salida del sistema sean independientes entre sí, para ello se mide el nivel de dependencia [21, 22].

3.1. Medición de los tiempos de transporte

Para la obtención de los tiempos de transporte de información del protocolo TCP se consideró la arquitectura de software reportada en [7]. La particularidad de la arquitectura de software para el servidor planteada en este trabajo consiste en brindar módulos que pueden usarse para obtener la medición de los tiempos de transmisión $\tau_{Tx,k}$ y los tiempos de recepción $\tau_{Rx,k}$ presentados en el envío y recepción de información.

Aunado a ello, los tiempos de transporte de información medidos pueden ser redireccionadas a una base de datos para su análisis posterior o se pueden enviar, empleando *sockets* al circuito virtual de comunicación basado en el protocolo TCP, como una cadena de caracteres de 8 bytes. Esta información puede ser leída y/o graficada por clientes basados en otros sistemas operativos. Las mediciones fueron hechas desde las 0 horas del día 8 de Diciembre del 2014 hasta las 0 horas del día 9 de Diciembre del mismo año obteniéndose cerca de 85000 lecturas registradas, cuyos

tiempos de transmisión y recepción se pueden apreciar en la Figura 13.

3.2. Caracterización de los tiempos de transporte

Para conocer el nivel de dependencia de variables aleatorias y determinar su dependencia se analizan los ruidos asociados mediante el concepto de momento de covarianza de dos variables aleatorias, de tal manera que si la medida de dependencia es igual a 0 se considera que las dos variables aleatorias son independientes, y en caso de que sea igual a una constante se considera que existe dependencia funcional entre las variables aleatorias [22].

Entonces para el caso de la covarianza del ruido de entrada $Q_{T_x,k}$ y la covarianza del ruido de salida $R_{T_x,k+1}$ suministrado al sistema, permite concluir que los tiempos involucrados tienen una independencia funcional, lo que hace que el filtro de Kalman sea una alternativa viable para reconstruir los tiempos de transporte.

3.3. Reconstrucción de los tiempos de transporte

El filtro de Kalman es un procedimiento matemático que opera por medio de un mecanismo de predicción y corrección (Ver Figura 14). El algoritmo predice el nuevo estado a partir de su estimación previa añadiendo un término de corrección proporcional al error de predicción, donde este es minimizado estadísticamente.

Entonces para la reconstrucción de los tiempos de transporte medidos se usará la versión escalar del filtro de Kalman, debido a que se tienen dos vectores de medición que corresponden a los tiempos de transporte de transmisión de información $\tau_{T_x,k}$ y a los tiempos de transporte de recepción de información $\tau_{T_x,k}$, cuyo volumen de datos es muy extenso y afecta al desempeño de la reconstrucción elevando de manera exponencial su tiempo de cálculo. Entonces tomando en consideración a [22], las ecuaciones mostradas en (5, 6) se reescriben quedando de la siguiente manera en (14, 15) respectivamente:

$$x_{k+1} = ax_k + bu + v_k, \quad (14)$$

$$y_k = cx_k + w_k, \quad (15)$$

donde x_k es el estado interno del sistema, a es el parámetro del sistema, b es el coeficiente de la entrada del sistema, u es la entrada al sistema, v_k es el ruido asociado a la entrada del sistema, y_k es la salida del sistema que corresponderá a los tiempos de transporte medidos, c es el coeficiente del estado interno del sistema y w_k es el ruido asociado a la salida del sistema. La predicción del estado interno del sistema \hat{x}_{k+1} se define en (16) como:

$$\hat{x}_{k+1} = a\hat{x}_k + bu, \quad (16)$$

donde \hat{x}_k es expresada en (17):

$$\hat{x}_k = \hat{g}_k + K_k [y_k - c\hat{g}_k] \quad (17)$$

Siendo K_k la ganancia K de Kalman y está definida en (18) por:

$$K_{k+1} = j_{k+1}c[R_{k+1} + c^2j_{k+1}]^{-1}, \quad (18)$$

De tal manera que j_{k+1} es:

$$j_{k+1} = [a^2P_k + Q_k], \quad (19)$$

donde Q_k es la covarianza del ruido asociado a la entrada del sistema, la cual es definida en (20):

$$Q_k = E\{v_k^2\}. \quad (20)$$

Cabe aclarar que P_{k+1} que se define como la varianza del error de identificación y está dada en (21):

$$P_{k+1} = [1 - K_{k+1}c]j_{k+1}, \quad (21)$$

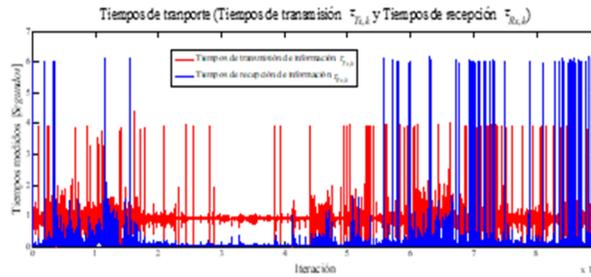


Fig. 13. Tiempos de recepción y transmisión usando el protocolo TCP

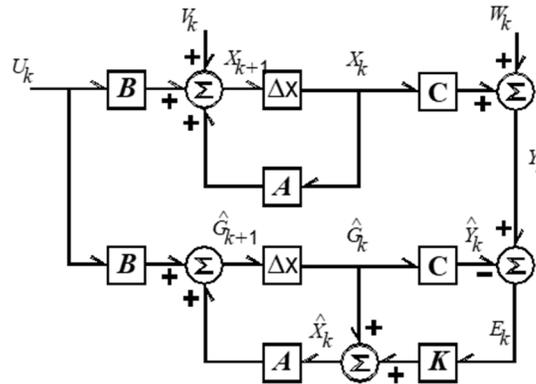


Fig. 14. Diagrama a bloques del Filtrado de Kalman

donde R_{k+1} es la covarianza del ruido asociado a la salida del sistema, el cual está dado por (22):

$$R_{k+1} = E \{w_{k+1}^2\}. \tag{22}$$

a. Reconstrucción de los tiempos de transmisión $\tau_{Tx,k}$ y recepción $\tau_{Rx,k}$ usando el filtro de Kalman

Al asegurar la independencia lineal de los ruidos asociados al sistema de entrada $Q_{Tx,k}$ y $Q_{Rx,k}$, así como de los ruidos asociados a la salida del sistema $R_{Tx,k+1}$ y $R_{Rx,k+1}$ es posible usar (18) para obtener la ganancia de Kalman que permitirá la reconstrucción de los tiempos de transmisión $\tau_{Tx,k}$ y de recepción $\tau_{Rx,k}$. El resultado de la ganancia de Kalman $K_{Tx,k}$ y $K_{Rx,k}$ a lo largo de la evolución del sistema se puede observar en la Figura 15 (línea negra y línea roja respectivamente).

De la reconstrucción de los tiempos de transmisión $\tau_{Tx,k}$ y de los tiempos de recepción $\tau_{Rx,k}$ través del uso del filtro de Kalman, se observó que los resultados obtenidos son muy próximos a los

tiempos medidos en todos los valores de k , pero se considera que este argumento no es suficiente, lo que motiva el uso del error cuadrático medio para validarlo.

Para el caso del error cuadrático medio entre los tiempos de transmisión de información reales y reconstruidos se puede describir la convergencia del filtro mediante el empleo de (23, 24) hasta encontrar el mínimo error de $H_{Tx,k}$.

$$e_{Tx,k} = \tau_{Tx,k}^* - \tau_{Tx,k}, \tag{23}$$

$$H_{Tx,k} = \left[\frac{1}{k} ((k-1)H_{Tx,k-1} + e_{Tx,k}^2) \right]^{\frac{1}{2}}. \tag{24}$$

Entonces en la Figura 16 (línea azul) y de acuerdo a (24), el filtro de Kalman tiene una convergencia en casi todos los puntos, pues el error cuadrático medio $H_{Tx,k}$ converge a valores muy pequeños: 0.0102 Segundos, para los tiempos de transmisión de información $\tau_{Tx,k}$, lo que permite describir la calidad de la reconstrucción pues a medida que se obtengan valores cada vez más pequeños de $H_{Tx,k}$ durante el proceso de

reconstrucción usando el filtrado de Kalman, la diferencia descrita por la ecuación (24) converge a valores cercanos a 0 (Ver Figura 16), lo que permite establecer que la dinámica de los tiempos de transmisión reconstruidos es similar a la de los tiempos de transmisión medidos, con lo que se valida la reconstrucción lograda a través del algoritmo.

Para el caso del error cuadrático medio entre los tiempos de recepción de información reales y reconstruidos se puede describiendo la convergencia del filtro mediante el empleo de (25, 26) hasta encontrar el mínimo error de $H_{R_x,k}$.

$$E_{R_x,k} = \tau_{R_x,k}^* - \tau_{R_x,k}, \quad (25)$$

$$H_{R_x,k} = \left[\frac{1}{k} \left((k-1)H_{R_x,k-1} + e_{R_x,k}^2 \right) \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (26)$$

Por lo tanto en la Figura 16 (línea roja) y de acuerdo a la ecuación (26), el filtro de Kalman tiene una convergencia en casi todos los puntos, pues el error cuadrático medio $H_{R_x,k}$ converge a valores muy pequeños: 0.011 *Segundos*, para los tiempos de recepción de información $\tau_{R_x,k}$, lo que permite describir la calidad de la reconstrucción pues a medida que se obtengan valores cada vez más pequeños de $H_{R_x,k}$ durante el proceso de reconstrucción usando el filtrado de Kalman, la diferencia descrita por la ecuación (26), converge a valores cercanos a 0, lo que permite establecer que la dinámica de los tiempos de recepción reconstruidos es similar a la de los tiempos de recepción medidos, con lo que se valida la reconstrucción lograda a través del algoritmo.

b. Obtención del tiempo de transporte τ_k del sistema de telecontrol en tiempo real

Para el tiempo de transporte τ_k se usará la definición 2 mostrada en este trabajo dada por (13). Entonces, para el tiempo de transporte medido τ_k , se sumarán los tiempos de transmisión $\tau_{T_x,k}$ y recepción $\tau_{R_x,k}$ (reales y reconstruidos). En ambos casos, se observó que los tiempos de transporte τ_k obtenidos a partir de la medición, son muy próximos a los tiempos de transporte reconstruidos τ_k^* en todos los valores de k , pero se considera que este argumento no es suficiente, lo

que conlleva a usar medidas descriptivas como el primer y segundo momento de probabilidad y el error cuadrático medio para validar este resultado.

Para el primer momento de probabilidad de los tiempos de transporte medidos $E\{\tau_k\}$ y reconstruidos $E\{\tau_k^*\}$ se observó que al inicio de la evolución del sistema la trayectoria de las curvas de ambos tiempos de transporte, tienen la misma convergencia, teniendo una aproximación cercana al 100%.

El comportamiento del segundo momento de probabilidad de los tiempos medidos $E\{\tau_k\}^2$ y de los tiempos reconstruidos $E\{\tau_k^*\}^2$, de igual manera que para el primer momento de probabilidad se puede observar que hay en el segundo momento de probabilidad, una convergencia aproximada del 100% para ambos casos.

Para validar los resultados mostrados, se usará el error cuadrático medio, definido a partir del error obtenido de (27, 28):

$$e_{\tau_k} = \tau_k^* - \tau_k, \quad (27)$$

$$H_{\tau_k} = \left[\frac{1}{k} \left((k-1)H_{\tau_k-1} + e_{\tau_k}^2 \right) \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (28)$$

En la Figura 16 (línea negra) se puede observar la gráfica que muestra el comportamiento de esta medida descriptiva. En ella se ve que la reconstrucción del tiempo de transporte τ_k^* tiene una convergencia en casi todos los puntos, pues el error cuadrático medio H_{τ_k} converge a valores muy pequeños: 0.01 a 0.015 *Segundos*.

Para los tiempos de transporte τ_k , lo que permite describir la calidad de la reconstrucción pues a medida que se obtengan valores cada vez más pequeños de H_{τ_k} durante el proceso de reconstrucción, la diferencia descrita por la ecuación (28), converge a valores cercanos a 0, lo que permite establecer que la dinámica de los tiempos de transmisión reconstruidos es similar a la de los tiempos de transmisión medidos, con lo que se valida la reconstrucción lograda a través del algoritmo computacional.

c. Tiempo de telecontrol $T_{Tc,k}$ en tiempo real

Tomando en consideración la Figura 1, el tiempo de telecontrol $T_{Tc,k}$ en un sistema de telecontrol en tiempo real, se considera como la suma algebraica del tiempo de ejecución c_k y el

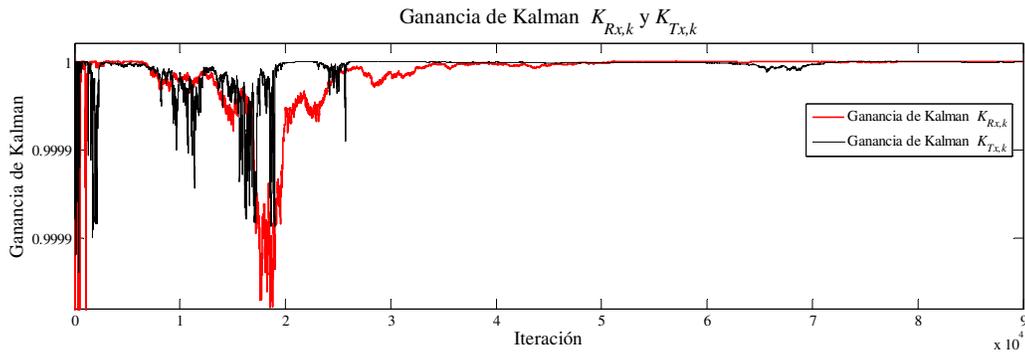


Fig.15. Ganancia de Kalman temporal para la reconstrucción de los tiempos de recepción $\tau_{Rx,k}$

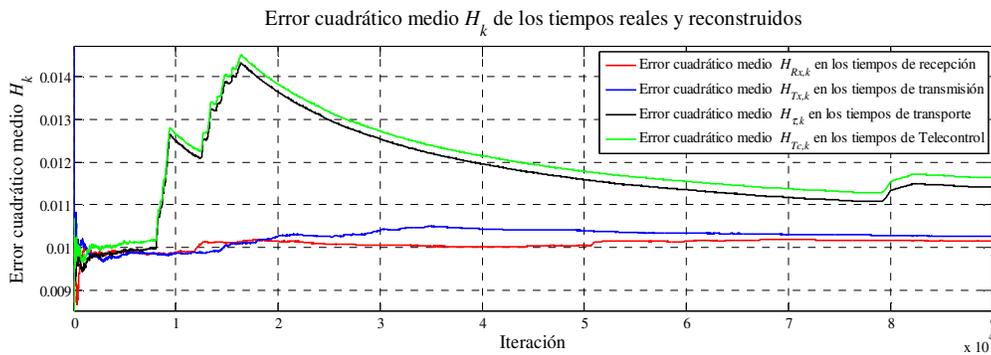


Fig.11. Error cuadrático medio H_k

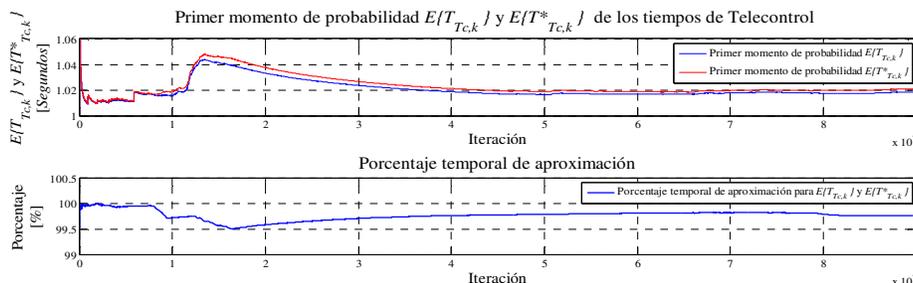


Fig. 12. Primer momento de probabilidad $E\{T_{Tc,k}\}$ y $E\{T_{Tc,k}^*\}$ de los tiempos de telecontrol

tiempo de transporte τ_k , se propone la siguiente definición para el tiempo de telecontrol $T_{Tc,k}$.

Definición 5 (Tiempo de telecontrol en tiempo Real).

El tiempo de telecontrol en tiempo real $T_{Tc,k} \in \mathbf{R}^+$, es la suma algebraica del tiempo de ejecución $c_k \in \mathbf{R}^+$ y el tiempo de transporte $\tau_k \in \mathbf{R}^+$ en el intervalo $k \in \mathbf{Z}^+$. De tal manera que:

$$T_{Tc,k} = c_k + \tau_k. \tag{29}$$

Entonces con el fin de cuantificar el tiempo de telecontrol que existe en los sistemas de control basados en esquemas de comunicación cliente – servidor se tomó en consideración a (29) y así determinar tiempo de telecontrol $T_{Tc,k}$ que existe en los sistemas de tiempo real y que llegan a afectar el comportamiento del sistema controlado.

En el caso del tiempo de telecontrol medido se incluye la suma de los tiempos de transmisión $\tau_{Tx,k}$, los tiempos de recepción $\tau_{Rx,k}$ los cuales forman a

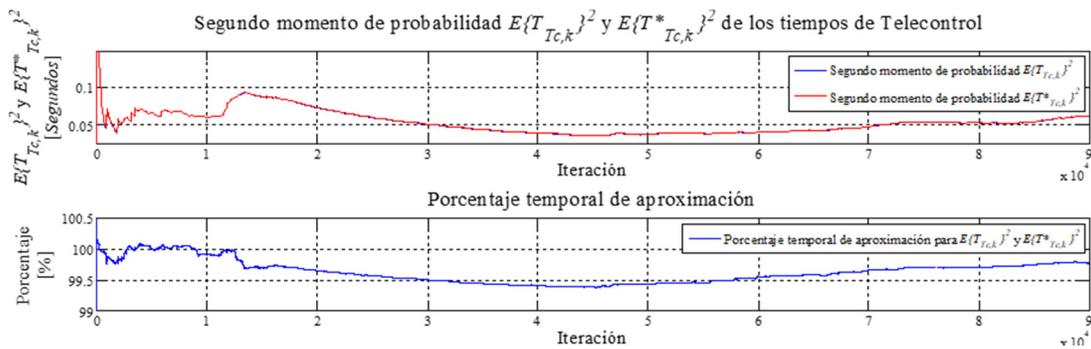


Fig. 18. Segundo momento de probabilidad $E\{T_{Tc,k}\}^2$ y $E\{T^*_{Tc,k}\}^2$ de los tiempos de telecontrol

los tiempos de transporte τ_k y los tiempos de ejecución c_k .

Para el resultado de la suma algebraica de los tiempos obtenidos a partir de las reconstrucciones presentadas en este trabajo. Cabe señalar que para los tiempos de transmisión $\tau^*_{Tx,k}$ y los tiempos de recepción $\tau^*_{Rx,k}$ se usarán las reconstrucciones hechas a partir del filtro de Kalman, mientras que para los tiempos de ejecución c_k se usará la reconstrucción hecha a partir del método de la variable instrumental.

En ambos casos, se observó que los tiempos de telecontrol $T^*_{Tc,k}$ obtenidos a partir de la reconstrucción, son muy próximos a los tiempos de telecontrol medidos $T_{Tc,k}$ en todos los valores de k , pero de igual forma que con los casos anteriores, se considera que este argumento no es suficiente, lo que conlleva a usar nuevamente medidas descriptivas tal y como el primer y segundo momento de probabilidad y el error cuadrático medio para validar este resultado.

Para el primer momento de probabilidad de los tiempos de telecontrol medidos $E\{T_{Tc,k}\}$ y reconstruidos $E\{T^*_{Tc,k}\}$ se puede observar en la Figura 17 (Línea azul y línea roja respectivamente), que desde el inicio de la evolución del sistema, la trayectoria de las curvas de ambos tiempos de telecontrol, tienden a converger una región cercana a un segundo, y el porcentaje de aproximación de los tiempos reconstruidos a los medidos es cercana al 100%.

Para el caso del comportamiento del segundo momento de probabilidad de los tiempos de telecontrol medidos $E\{T_{Tc,k}\}$ y reconstruidos $E\{T^*_{Tc,k}\}$, la dinámica se puede apreciar en la

Figura 18 (Línea azul y línea roja respectivamente) y en ella se percibe que el porcentaje de aproximación oscila entre el 99.5% y el 100% del tiempo de telecontrol reconstruido $T^*_{Tc,k}$ de con respecto a $T_{Tc,k}$ debido a que los valores del segundo momento de probabilidad de ambos tiempos de telecontrol convergen de manera satisfactoria.

Para asegurar esto, se usará el error cuadrático medio denotado por (30, 31):

$$e_{Tc,k} = T^*_{Tc,k} - T_{Tc,k}, \tag{30}$$

$$H_{Tc,k} = \left[\frac{1}{k} \left((k-1)H_{Tc,k-1} + e_{Tc,k}^2 \right) \right]^{\frac{1}{2}}. \tag{31}$$

En la Figura 16 (línea verde), se puede observar que la reconstrucción del tiempo de telecontrol $T^*_{Tc,k}$ tiene una convergencia en casi todos los puntos, el error cuadrático medio $H_{Tc,k}$ converge a valores muy pequeños: 0.011 Segundos que va descendiendo conforme va evolucionando el sistema, lo que permite describir la calidad de la reconstrucción del tiempo de telecontrol $T^*_{Tc,k}$ pues a medida que se obtengan valores cada vez más pequeños de H_{τ_k} durante el proceso de reconstrucción, la diferencia descrita por la ecuación (31), converge a valores cercanos a 0, lo que permite establecer que la dinámica de los tiempos de telecontrol reconstruidos es similar a la de los tiempos de telecontrol medidos, con lo que se valida la reconstrucción lograda a través del algoritmo computacional utilizado.

4. Conclusiones

Un sistema de telecontrol en tiempo real es una forma de control de sistemas en donde se considera que los tiempos de comunicación existentes así como los tiempos de ejecución de las tareas o acciones de los sistemas participantes (sistema controlado y sistema controlador), influyen en la respuesta de ambos sistemas, provocando un efecto no deseado en el sistema controlado.

El hecho de medir los tiempos involucrados en el proceso de telecontrol permite conocer su dinámica de comportamiento mediante el empleo de medidas descriptivas, tal y como el primer y segundo momento de probabilidad, de lo cual se concluye que los tiempos de ejecución tienen una dinámica totalmente diferente a la de los tiempos de transporte. Por esa razón se utilizan para su reconstrucción métodos diferentes.

Para los tiempos de ejecución, se observó que al ser un proceso estocástico estacionario en sentido débil, permitió el uso del método de la variable instrumental y del filtrado digital difuso como estimadores del parámetro $\hat{a}_{i,k}$ del modelo de tiempos de ejecución basado en ARMA de orden (1, 1). De las reconstrucciones obtenidas mediante el método de la variable instrumental, se observó que el error cuadrático medio $H_{i,k}$ tiene una convergencia en casi todos los puntos a valores muy pequeños, lo que permite describir la calidad de la reconstrucción del tiempo de ejecución $\hat{c}_{i,k}$ como aceptable. Para el caso de la reconstrucción mediante el filtrado digital difuso, el filtro tiene una convergencia en casi todos los puntos en el error cuadrático medio a valores muy pequeños, lo que permite describir la calidad de la reconstrucción de igual manera aceptable.

Para el caso de los tiempos de transporte, el comportamiento de la dinámica de los tiempos de transmisión y recepción del sistema telecontrolado, se observó que son de tipo no estacionario, debido a que el primer momento de probabilidad no permanece constante conforme va evolucionando el sistema. Cabe mencionar que, para la reconstrucción de estos tiempos, se trató de usar tanto el Método de Variable Instrumental y el Filtro Digital Difuso como primeras opciones, pero no se obtuvieron resultados satisfactorios, debido a la naturaleza estocástica de los tiempos

de comunicación. Por esa razón se propuso usar el filtrado de Kalman para la reconstrucción de los tiempos de transmisión y recepción involucrados en el proceso de telecontrol de sistemas en tiempo real por Internet.

De las reconstrucciones obtenidas para los tiempos de transmisión y recepción, se verificó que el error cuadrático medio obtenido a partir de su análisis, sea muy aproximado a las mediciones reales. Para la obtención del tiempo de telecontrol, se observó que esta forma de análisis en forma separada, determinará los límites de las restricciones temporales de los sistemas de telecontrol en tiempo real, tal y como el tiempo de ejecución c_k , el plazo d_k y los tiempos de respuesta tardíos r_k existentes en el procesamiento, así como en la comunicación de sistemas de control.

En este sentido, la contribución principal del artículo fue proponer una metodología de reconstrucción de tiempos (ejecución, transmisión y recepción) en un sistema de telecontrol en tiempo real por internet, basándose en la medición, caracterización estadística por momentos de probabilidad.

Que en comparación con [2], el modelo reportado sirve para representar a los tiempos de codificación y compresión (identificado como el tiempo de ejecución en nuestro trabajo) así como el tiempo de transmisión, pero no toma en consideración el tiempo de recepción debido al alcance del modelo. Mientras que en comparación con [3], aunque el modelo reportado fue desarrollado bajo el esquema cliente – servidor sirve para modelar a los tiempos transmisión y recepción utilizando el protocolo de comunicación BlueZ (para la tecnología inalámbrica de comunicación Bluetooth 2.0) pero no fue desarrollado para el protocolo TCP.

En [4, 5] al realizar un análisis de modelos existentes concluyen que se han usado modelos en donde no se toma en consideración la variabilidad de los tiempos involucrados. Lo cual en este trabajo fue considerado y fue motivo para usar el Método de la Variable Instrumental, Filtrado digital difuso y el filtro de Kalman con buenos resultados.

Referencias

1. **Antonini, M., De Luise, A., Ruggieri, M., & Teotino, D. (2005).** Satellite Data Collection and Forwarding systems. *Aerospace and Electronic Systems Magazine IEEE*, Vol. 20, No. 9, pp. 25–29. DOI: 10.1109/MAES.2005.1514771.
2. **Casilari, E. (1998).** *Caracterización y modelado de tráfico de video VBR*. Tesis de Doctorado Universidad de Málaga, pp. 1-406.
3. **Luque, J. (2010).** *Modelado del retardo de transmisión en Bluetooth 2.0+EDR*. Tesis de Doctorado Universidad de Málaga, pp. 1–320.
4. **Rincón, D. (1998).** *Introducción a los modelos de tráfico para redes de banda ancha*. Ramas de estudiantes del IEEE, pp. 41–48.
5. **Alzate, M. & Peña, N. (2019).** Modelos de Tráfico en Análisis y Control de Redes de Comunicaciones. *Revista Ingeniería*, Vol. 9, No. 1, pp. 63–87. DOI: 10.14483/23448393.2744.
6. **Guevara, P., Medel, J., & Delgado, G. (2011).** Description of execution time dynamics for a set of concurrent real-time tasks. *Revista Facultad de Ingeniería: Universidad de Antioquía*, Vol. 61 pp. 123–131.
7. **Valdez, J., Guevara, P., & Delgado, G. (2012)** Arquitectura de un sistema para Telecontrol por Internet para la Simulación en Tiempo Real de un Motor de Corriente Continua. *Memorias del VIII Congreso Internacional "Tendencias Tecnológicas En Computación 2012"*, pp. 81–89.
8. **Krten, R. (1998)** Getting started with QNX™ 4. *PARSE Software Devices*
9. **Valdez, J., Guevara, P., & Beltrán, L. (2012).** Métodos de Medición de Tiempos de Ejecución en el Sistema Operativo de Tiempo Real QNX 6.5 Neutrino. *Memorias del XIII Congreso Nacional de Ingeniería Electromecánica y de Sistemas XIII – CNIES*, pp. 2–6.
10. **Valdez, J., Guevara, P., & Delgado, G. (2014).** Execution Times Reconstruction in a LTI System Real-time Simulation. *Revista IEEE América Latina*. Vol. 12, No. 2, pp. 277–284. DOI: 10.1109/TLA.2014.6749549
11. **Montañés, A. (2008).** *Tema 1. Procesos estacionarios*. Curso de Doctorado: Series temporales, Universidad de Zaragoza.
12. **Liu, C. & Layland, J. (1973).** Scheduling algorithms for multiprogramming in hard-real-time environment. *Journal of the ACM*, Vol. 20, No. 4, pp. 46–61. DOI: 10.1145/321738.321743.
13. **Medel, J., Guevara, P., & Cruz, D. (2005)** Matricial estimation for start times with stochastic behavior by periodic real time tasks in a concurrent system. *Proceedings of the 7th International Conference on Mathematical Methods and Computational Techniques in Electrical Engineering (MMACTE'05)*, pp. 214–217.
14. **Medel, J. (2002).** Análisis de Dos Métodos de Estimación para Sistemas Lineales Estacionarios e Invariantes en el Tiempo con Perturbaciones Correlacionales con el Estado Observable del Tipo: Una Entrada por Salida. *Computación y Sistemas*, Vol. 5, No. 3, pp. 215–222.
15. **Valdez, J., Delgado, G., Guevara, P., & García, J. (2014).** Reconstrucción de la dinámica de los tiempos de ejecución de tareas en tiempo real empleando filtrado digital difuso. *Revista Facultad de Ingeniería de la Universidad de Antioquía*, Vol. 70, pp. 155–166.
16. **Söderström, T. & Stoica, P. (1988).** On some system identification techniques for adaptive filtering. *IEEE Trans. Circuits and Systems CS*, Vol. 35, No. 4, pp. 457–461. DOI: 10.1109/31.1765.
17. **Valdez, J., García, J., Guevara, P., & Sánchez, J. (2011).** Filtrado Difuso para la Reconstrucción de la Dinámica de Tiempos de Ejecución para n Instancias en una Tarea en Tiempo Real. *IX Congreso Internacional sobre Innovación y Desarrollo Tecnológico (CIINDET'11)*.
18. **Vázquez, S., García, J., & Sánchez, J. (2009).** Descripción del Filtrado Adaptativo Difuso en un DSK TMS320C6713. *Memorias del VII Congreso Internacional sobre Innovación y Desarrollo Tecnológico del (CIINDET'09)*.
19. **García, J., Medel, J., & Sánchez, J. (2011).** Filtrado Neuronal Difuso: Caso MIMO. *Revista Ingeniería e Investigación*, Vol. 31, No. 4, pp. 184–192.
20. **Fuentes, J. (2000).** *Implementación de modelos de tráfico en redes IP*. Proyecto fin de Carrera, Universidad de Málaga, pp. 1–27.
21. **Haykin, S. (1991).** *Adaptive filter theory*. Prentice Hall information and system sciences series, pp. 210–215.
22. **Gustafsson, F. (2000).** *Adaptive filtering and change detection*. John Wiley & Sons, LTD, Linköping, pp. 1–492.

Article received on 21/09/2016; accepted on 14/11/2018.
Corresponding author is Pedro Guevara López.