

# Modelado y reconstrucción de tiempos de transporte para sistemas de telemetría en tiempo real con SBC y RT-Linux

Jose Luis Cano-Rosas<sup>1</sup>, Pedro Guevara-López<sup>1,\*</sup>, Jorge S. Valdez-Martínez<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Instituto Politécnico Nacional, ESIME Culhuacan,  
Mexico

<sup>2</sup> Universidad Tecnológica Emiliano Zapata del Estado de Morelos,  
Mexico

lucskyr@gmail.com, pguevara@ipn.mx, jorgevaldez@utez.edu.mx

**Resumen.** Este trabajo presenta un modelo para la reconstrucción de la dinámica temporal del sistema de telemetría en tiempo real, donde el tiempo de recepción  $\mathcal{T}_{R_{x,k}}$  y el tiempo de transmisión  $\mathcal{T}_{T_{x,k}}$  conforman el tiempo de transporte  $\mathcal{T}_k$ , permitiendo su dimensionamiento y optimización. El estudio inicia en un banco de pruebas [12] actualizado con tecnología de computadoras de placa reducida y un sistema operativo de tiempo real, desarrollado para obtener mediciones con técnicas computacionales de alta precisión. Se analizan las restricciones temporales del proceso de telemetría y se emplea el algoritmo de filtro de Kalman para la reconstrucción de su comportamiento. El argumento central establece que los tiempos del proceso de telemetría en un esquema cliente-servidor sobre internet son afectados por diversos factores (infraestructura, topología de red, horario, día, mes, códigos maliciosos, interferencias electromagnéticas, protocolos de comunicación, etc.), generando una variabilidad temporal que impacta las restricciones del sistema en tiempo real. En conclusión, este trabajo garantiza el correcto dimensionamiento del sistema de comunicación en tiempo real, asegurando su funcionamiento óptimo bajo condiciones prediseñadas.

**Palabras clave.** Filtro de Kalman, modelado y reconstrucción, restricción temporal, telemetría, tiempo real, tiempos de transporte.

## Modeling and Reconstruction of Transport Times for Real-Time Telemetry Systems with SBC and RT-Linux

**Abstract.** This manuscript presents a model for reconstructing the temporal dynamics of a real-time

telemetry system, where the reception time  $\mathcal{T}_{R_{x,k}}$  and the transmission time  $\mathcal{T}_{T_{x,k}}$  constitute the transport time  $\mathcal{T}_k$ , enabling system sizing and optimization. The study is based on a testbed [12] updated with single-board computers and a real-time operating system, designed to obtain precise measurements. Temporal constraints in real-time telemetry are analyzed, and the Kalman filter algorithm is used to reconstruct its behavior. This work argues that telemetry process times in an internet-based client-server scheme are affected by various factors (infrastructure, network topology, time of day, electromagnetic interference, protocols, etc.), causing variability that impacts temporal constraints and system performance. In conclusion, proper system sizing is ensured to optimize real-time communication and guarantee its optimal operation.

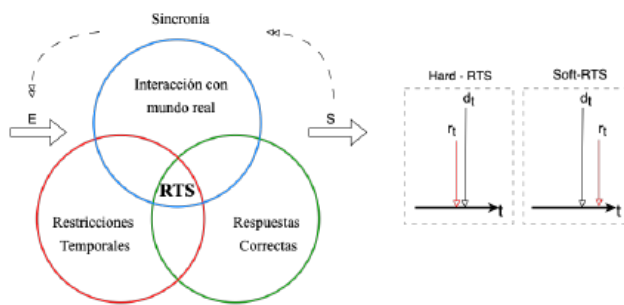
**Keywords.** Characterization, Kalman filter, real-time, reconstruction, telemetry, timing constrains, transport time.

## 1. Introducción

En la era moderna, el mundo ha evolucionado a tal grado que el ser humano se ha tomado el tiempo necesario para lograr los avances científicos y tecnológicos en todos los campos de investigación. Un área específica en el estudio de las comunicaciones y electrónica son las telecomunicaciones, donde los diferentes tipos de comunicación remota son actualmente la base de este estudio concerniente al envío y recepción de la información. De acuerdo con lo anterior, un tema de gran impacto en esta área es la telemetría, donde



**Fig. 1.** Diagrama general de Sistema en Tiempo Real para telemetría



**Fig. 2.** Diagrama general de Sistema en Tiempo Real y su clasificación

los distintos sistemas y subsistemas de hardware y software que integran esta tecnología, son instalados y configurados con extrema precisión para lograr óptimos resultados en la medición remota, que permite monitorear, analizar y evaluar las variables de los sistemas medidos a través de sensores, con el firme propósito de planear y mejorar el comportamiento de los mismos; sin embargo, la necesidad de acceder a los datos de esta medición remota en forma expedita, ha llevado a sus límites el conocimiento de frontera que hace posible la telemetría en tiempo real; –como ejemplo esquematizado se puede apreciar la figura 1– que depende totalmente de entornos diversos y sus variables físicas medidas.

Los sistemas en tiempo real (STR) o RTS (*Real-time Systems*) por sus siglas en inglés son sistemas con características rigurosamente específicas donde los plazos o restricciones temporales son críticos para su correcto funcionamiento.

Estos plazos al ser naturalmente estrictos en su cumplimiento, son la base para determinar el funcionamiento del sistema y así clasificarlo en dos tipos, Hard-RTS o Soft-RTS, ver figura 2.

En adición a la idea, otra forma de comprender estos conceptos es; que el plazo es el límite de tiempo más significativo y debe cumplirse de manera absoluta, pero también puede ser relativo, lo que permite cierta aceptación en la entrega de los resultados. Es decir, pueden tolerar un exceso en el tiempo de respuesta, con una penalización de tiempo de respuesta por el incumplimiento del plazo para los No críticos (Soft-RTS); o la respuesta fuera de término no tiene valor alguno, y produce la falla del sistema para los críticos (Hard-RTS).

Por lo tanto, garantizar la absoluta sincronía de la salida con respecto a la entrada de estos es lo más importante, cabe destacar que también cuentan con entradas y salidas simples, múltiples o una combinación de ambas, lo cual determina su complejidad. Incluso tienen una amplia aplicación en la industria en general, constantemente están evolucionando para adaptarse a los nuevos entornos que surgen con el paso del tiempo, por ejemplo en el mundo de los deportes motorizados, los medios de comunicación, la medicina, electrónica, computación, robótica, educación especializada, etcétera. Y ahora pueden utilizar la internet como canal de comunicación aprovechando su infraestructura.

## 2. Trabajos relacionados

Con base en [23, 24], se atiende el tema desde un enfoque particularmente interesante, con absoluta contribución en la realización de este trabajo de investigación, donde también se demuestra en gran medida el sustento teórico y experimental presentado posteriormente; en paralelo con lo anterior se ha desarrollado, el modelado y reconstrucción de los tiempos de transporte para sistemas de telemetría en tiempo real; que responde cuestiones específicas de frontera implicadas en la comunicación, esencialmente consideradas para garantizar el dimensionamiento en el uso óptimo de recursos a consumir y por consecuente permitirse planear el diseño de sistemas de telemetría en tiempo

real que utilizan procesos de tiempo real con características específicas.

El modelado y reconstrucción de sistemas es una técnica utilizada para representar, analizar y comprender sistemas complejos. Entiéndase a un sistema complejo según [20] como el resultado de la interacción de elementos cuyos vínculos producen cambios no visibles para el observador respecto a su interacción. Estos sistemas pueden ser de naturaleza física, como máquinas o dispositivos, o sistemas abstractos.

Adicionalmente [18] menciona que en la actualidad se desarrolla una teoría propia para esta clase de sistemas, ya que cada vez se encuentran más ejemplos de sistemas lineales en los que no se aplica la representación en el espacio de estados, incluyendo situaciones en las que las matrices dinámicas del sistema son inherentemente rectangulares. Cuando se desconocen los valores asumidos por los estados de un sistema dinámico dado con comportamiento aleatorio, una herramienta de gran utilidad práctica que nos permite obtener estimaciones a priori y a posteriori de estos estados es el filtro de Kalman.

Actualmente el campo aeroespacial de investigación demanda medidas robustas en la comunicación que realiza telemetría, esto es de suma importancia con referencia al tema del presente trabajo ya que como se argumenta en [9] la arquitectura Zero-Trust (ZT) se relaciona con los sistemas de telemetría en tiempo real basados en RT-Linux porque complementa el determinismo temporal con seguridad por diseño: mientras RT-Linux garantiza ejecución predecible, baja latencia y cumplimiento de los plazos en la adquisición, transmisión y procesamiento de datos, ZT introduce autenticación continua, verificación criptográfica e integridad del firmware y de los mensajes, permitiendo que la telemetría no solo sea oportuna sino también confiable frente a amenazas como spoofing o manipulación de datos; el principal reto de esta integración es gestionar el impacto de los mecanismos de seguridad en métricas críticas como latencia, jitter y tiempos de transporte, lo que da lugar a un enfoque de co-diseño entre planificación en tiempo real y dimensionamiento de sistemas cibernéticos. Para la cuestión respecto a las

plataformas de implementación [16] describe exactamente el tipo de problemas y soluciones que aparecen en sistemas de telemetría en tiempo real implementados sobre SBC con RT-Linux, el trabajo relaciona directamente esta aplicación ya que demuestra que el desempeño temporal no depende únicamente del kernel en tiempo real por ejemplo, con PREEMPT\_RT, sino también de la optimización de los protocolos de comunicación y de toda la pila software-hardware.

En este contexto, las extensiones propuestas reducen latencia y jitter en la transmisión de datos, lo que mejora la calidad y sincronización de la telemetría; sin embargo, al no garantizar un límite superior de retardo, el sistema resultante se clasifica como de tiempo real no crítico, lo cual es consistente con muchas arquitecturas de adquisición y monitoreo en SBC industriales.

Un complemento para aplicaciones vigentes respecto a los trabajos futuros propuestos en esta investigación es la revisión de [6] que afirma en sus resultados los modelos híbridos, donde el filtro de Kalman y la red neuronal no solo pueden adoptarse sucesivamente, sino que también pueden mezclarse en la estructura, divididos en dos tipos: las ecuaciones y/o los parámetros del modelo de espacio de estado y se entrenan mediante una red neuronal para el filtro de Kalman en la que los parámetros de esta se actualizan mediante el mismo, esto demuestra que los modelos híbridos superan al modelo único del filtro de Kalman o la red neuronal en cuanto a precisión y generalización, verificando que la eficacia de las ecuaciones de espacio de estado del filtro de Kalman se puede establecer mediante una red neuronal en sistemas no lineales.

Por otra parte en [4] se observa la aplicación de sistemas híbridos donde interactúan tres sistemas descritos como plataformas heterogéneas que concatena tecnologías de visualización ejecutando algoritmos de aprendizaje profundo bajo el sistema operativo Linux y un dominio en tiempo real crítico que ejecuta funciones de control y supervisión bajo el sistema operativo freeRTOS, ambos en un MPSoC ZCU104 de Xilinx conformando una arquitectura de entornos de ejecución aislados.

En cuanto al desarrollo de sistemas de telemetría existen avances en las comunicaciones utilizando

como medio la internet donde la tecnología del Internet Industria de las Cosas IIoT por sus siglas en ingles demanda sistemas modernos con énfasis en alta velocidad, fiables, escalables y seguros entre los dispositivos por ello [25] propone dos análisis primero la sincronización temporal en openSAFETY para comprender plenamente los parámetros temporales interrelacionados y ofrecer algunas pautas prácticas para ajustar la aplicación de seguridad y segundo el rendimiento del protocolo a través de UDP sobre Ethernet en condiciones de red normales y degradadas, lo que permite tener una perspectiva de referencia para comparación entre los distintos protocolos de comunicación que se encuentran a la vanguardia y el descrito la propuesta del trabajo desarrollado en la presente investigación.

Por lo tanto el objetivo principal de esta labor es proporcionar una representación simplificada y estructurada del sistema real, lo que permite a los diseñadores, ingenieros o analistas comprender el funcionamiento, predecir su comportamiento y evaluar diferentes escenarios sin necesidad de manipular el sistema real directamente. Existen diferentes tipos de modelos de sistemas, y la elección del tipo de modelo dependerá del propósito del análisis y la naturaleza del sistema que se esté estudiando. La implementación de las distintas técnicas sirve como una herramienta crucial en diversos campos, como la ingeniería, la ciencia con gran impacto en la planificación estratégica. Ayuda a tomar decisiones fundamentadas y a identificar posibles mejoras o problemas potenciales en el sistema estudiado, que para este caso son los tiempos de transporte en sistemas de telemetría en tiempo real utilizando la infraestructura de red local e internet con el protocolo de comunicación TCP/IP.

### 3. Modelado de tiempos de transporte para sistemas de telemetría en tiempo real

El modelado protagoniza la parte teórica del trabajo de investigación, utilizando herramientas matemáticas que asisten la descripción el pensamiento lógico alusivo al recurso de tiempo que consume el transporte de información, en el proceso de medición remota en tiempo real

de una variable, adquirida por un sensor y enviada a través de un medio de comunicación exclusivo con infraestructura de red TCP/IP por Internet, considerando la complejidad que esto representa, ya que, por su naturaleza este medio tiene características complejas propias de un proceso impredecible.

#### 3.1. Marco de referencia

Actualmente, los sistemas en tiempo real pueden utilizar internet aprovechando su infraestructura como canal de comunicación. Por otra parte, el concepto tiempo real se usa de manera indistinta, lo que ocasiona confusión e incertidumbre al momento de usar un dispositivo o aplicación que especifique el término en sus características de operación, cabe mencionar que de acuerdo con la mayoría de definiciones como G. Buttazzo en [3], explican que un sistema en tiempo real es cualquier sistema de procesamiento de información que responde a estímulos de entrada generados estrictamente dentro de un período finito y especificado, este autor también afirma que su funcionamiento garantiza tiempos de respuesta acotados y predecibles. El trabajo de P. Guevara y J.J. Medel en [15] plantea que todo sistema en tiempo real interactúa con el mundo real y el intervalo de tiempo en que se produce su salida es significativo, todo esto sincronizado para emitir respuestas correctas, ver figura 2. Por lo tanto, es preciso decir que para que un sistema sea en tiempo real, es imprescindible que cumpla con tres características esenciales como interactuar con un proceso del mundo real, responder correctamente en el proceso y obedecer estrictamente a un plazo específico.

Considerando de vital importancia los argumentos antes mencionados, se precisa para este caso qué, la entrada del sistema generalmente corresponde a algún instante  $t_1$  del mundo físico y la salida del mismo corresponde a un instante  $t_2$ ; en el caso de un sistema de telecontrol de acuerdo a [23], la diferencia temporal entre la entrada y la salida del sistema, está dada en tiempos de respuesta ocasionados por un tiempo de ejecución  $c_k$ , así como tiempos de transporte  $\tau_k$ , el cual es conformado por los

tiempos de transmisión  $T_{x,k}$  y de recepción  $R_{x,k}$  de información involucrados en el proceso de control del sistema remoto, esto es expresado en las ecuaciones (1 y 2):

$$t_2 = t_1 + c_k + \tau_k, \quad (1)$$

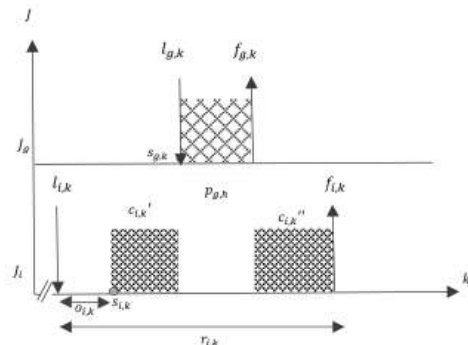
$$t_2 = t_1 + c_k + \tau_{T_{x,k}} + \tau_{R_{x,k}}. \quad (2)$$

Con  $t_2, t_1, c_k, \tau_{T_{x,k}}, \tau_{R_{x,k}} \in R^+$  y  $k \in Z^+$ , todos en unidades temporales (UT).

Estos tiempos  $c_k, \tau_{T_{x,k}}$  y  $\tau_{R_{x,k}}$  al tener un comportamiento variante, deben estar acotados dentro de un intervalo  $(0, d_k]$  para considerarse como una respuesta puntual con  $d_k \in R^+$ , donde  $d_k$  es el plazo impuesto por el sistema físico telemedido para no ser alterado negativamente. *Nótese que el intervalo se encuentra abierto por la izquierda y cerrado por la derecha, ya que, el inicio del tiempo es relativo a la referencia horaria y el término de la tarea incluye el valor del plazo.*

El comportamiento de los tiempos de ejecución  $c_k$  puede fluctuar debido a varios factores computacionales, entre los que destacan  *caching* ,  *pipeline* , la búsqueda de la ruta de ejecución más corta considerando a la exclusión mutua, predicciones y otras interacciones como lo muestran [21] y [2]. Para el caso de los tiempos de transmisión  $\tau_{T_{x,k}}$  y recepción  $\tau_{R_{x,k}}$ , varían con respecto al transcurso temporal a causa de su duración que depende del incremento en la infraestructura tecnológica, de factores estacionales u horarios, factores cíclicos, factores irregulares, y de las normas de comunicación empleadas para el intercambio de información (protocolos) [1]. Lo que provoca un incremento de tráfico soportado por la red global, debido a la integración de Tecnologías de la Información y Comunicación (TIC) en forma de servicios multimedia. Estas variaciones afectan directamente a la dinámica del tiempo de transporte total de los equipos involucrados, comprometiendo el cumplimiento de las restricciones temporales en las instancias de las tareas para procesos en tiempo real.

Es por esta razón que en este trabajo se propone un método con un modelo que permite describir la dinámica de comportamiento de los tiempos involucrados en el proceso de telemetría

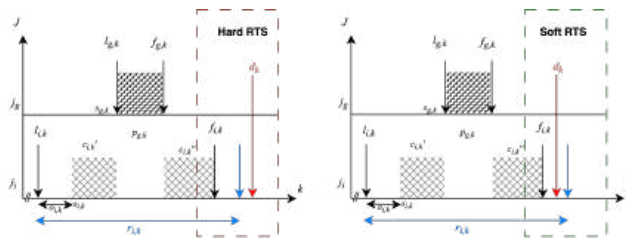


**Fig. 3.** Esquema de restricciones temporales del tiempo de respuesta en un sistema

en tiempo real, en este caso específico del tiempo de recepción  $\tau_{R_{x,k}}$  que junto con el tiempo de transmisión  $\tau_{T_{x,k}}$  conforman al tiempo de transporte  $\tau_k$ . Para lograr esto, se usa como referencia un primer banco de pruebas desarrollado por J. Valdez en [12], el cual tiene como objetivo principal obtener mediante técnicas de mediciones computacionales, los tiempos involucrados en el proceso de telecontrol, con la finalidad de caracterizar la dinámica de esta restricción temporal y determinar si es posible la reconstrucción de su comportamiento usando el filtro de Kalman.

Consecutivamente, se desarrolla un banco de pruebas actualizado con tecnología de placa reducida, con suficiente poder de cómputo y software de fuente abierta, que evita la dependencia de licenciamiento privativo a través de un sistema operativo de tiempo real como RT-Linux y permite la compatibilidad total en la adaptación de hardware de monitoreo y adquisición de datos; así como, la infraestructura de comunicación por internet, y adicionalmente bajo consumo energético.

La principal justificación de este trabajo, es que los tiempos involucrados en el proceso de telemetría en tiempo real, basado en esquemas de comunicación cliente servidor por internet, son susceptibles a un conjunto de factores que afectan a los tiempos de transporte de información –tal como la infraestructura, topologías de red,



**Fig. 4.** Esquemas de restricciones temporales para sistemas en tiempo real, críticos (Hard-RTS) y No críticos (Soft-RTS)

horario, fecha, códigos informáticos maliciosos, interferencias electromagnéticas o protocolos— y a los tiempos de ejecución en los procesos que comprometen la entrega de la información procesada dentro del plazo máximo, (definido por el criterio de H. Nyquist [17] o V. A. Kotelnikov [11]) provocando que tenga una gran variabilidad que podría afectar negativamente las respuestas de tiempo real.

A lo largo de esta investigación se han examinado diferentes perspectivas en la concepción y manejo de los sistemas en tiempo real, adicionalmente, un tema que es considerablemente importante es el tiempo de ejecución de las tarea en estos sistemas.

Una experiencia que se presentó al momento de realizar procedimientos experimentales para la ejecución de tareas en un banco de pruebas con sistema operativo de tiempo real basado en RT-Linux, es que no es posible medir única y exclusivamente el tiempo de ejecución  $c_k$ , ya que, este es afectado aditivamente por un tiempo de operación del planificador y un tiempo de desalojo.

Entonces, esto resulta en el tiempo de respuesta  $r_k$  del sistema. D. González en [7] indica que el tiempo de respuesta  $r_k$  está conformado por la adición del tiempo de operación  $o_k$  tiempo de ejecución  $c_k$  y tiempo de desalojo  $p_k$  como se muestra en la ecuación (3) y el esquema de la Figura 3:

$$r_k = o_k + c_k + p_k. \quad (3)$$

Por lo tanto, para proponer el diseño y desarrollo de un sistema en tiempo real con estas características, es necesario apegarse a las consideraciones antes mencionadas, básicamente

obedeciendo estrictamente la premisa de mantener el tiempo de respuesta  $r_k$  dentro del plazo  $d_k$  para STR críticos y lo más cerca del plazo para STR No críticos, tomando en cuenta las penalizaciones de tiempo de respuesta, asumiendo el riesgo que esto ocasiona ver figura 4, e incluso se considera fundamental, que el valor de prioridad en la ejecución de la tarea afecta negativamente al tiempo de respuesta del sistema, por esta razón no se considera el máximo valor de prioridad a nivel de programación en el sistema operativo de tiempo real:

$$t_2 = t_1 + r_k + \tau_k, \quad (4)$$

$$t_2 = t_1 + r_k + \tau_{T_{x,k}} + \tau_{R_{x,k}}. \quad (5)$$

Entonces de las ecuaciones (1, 2 y 3) se modifican respecto al tiempo de respuesta, el modelo básico inicial acorde a la teoría se expresa en (4 y 5). Por lo tanto:

$$r_k = r_{ck} + r_{sk} \quad (6)$$

$$\tau_k = \tau_{T_{x,k}} + \tau_{R_{x,k}} \quad (7)$$

Ahora se define al tiempo de telemetría en tiempo real  $\tau M_k$  en (10) como la equivalencia de la diferencia temporal entre la entrada y la salida respecto a la adición de los tiempos de respuesta  $r_k$  en (6) del cliente y el servidor mas los tiempos de transporte  $\tau_k$  en (7) de la transmisión y recepción de información:

$$t_2 = t_1 + r_{ck} + \tau_{T_{x,k}} + \tau_{R_{x,k}} + r_{sk}, \quad (8)$$

$$\tau M_k = t_2 - t_1, \quad (9)$$

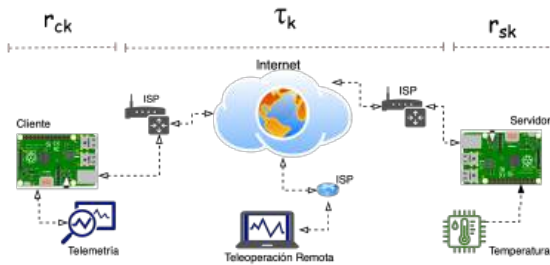
$$\tau M_k = r_{ck} + \tau_{T_{x,k}} + \tau_{R_{x,k}} + r_{sk}. \quad (10)$$

Con  $\tau M_k, t_2, t_1, r_{ck}, r_{sk}, \tau_{T_{x,k}}, \tau_{R_{x,k}} \in R^+$  y  $k \in Z^+$ , todos en unidades temporales (UT).

### 3.2. Planteamiento

El sistema de Telemetría en Tiempo Real (STTR) en estudio ver figura 5, se representa como un esquema cliente-servidor y un canal de comunicación, donde el cliente demanda un tiempo de respuesta  $r_{ck}$  y por su parte el servidor demanda un tiempo de respuesta  $r_{sk}$ .

La comunicación entre cliente y servidor a través de su respectivo canal exige un tiempo de



**Fig. 5.** Esquema general de un sistema de comunicación para telemetría en tiempo real

transporte  $\tau_k$  de tal manera que se obtiene un tiempo de respuesta de telemetría  $\tau M_k$  mostrado en la ecuación (11):

$$\tau M_k = r_{ck} + \tau_k + r_{sk} \quad (11)$$

En el cliente y el servidor, los tiempos de respuesta  $r_{ck}$  y  $r_{sk}$  no son constantes para todo  $k$ , su variación depende del poder de cálculo de las computadoras, de la complejidad temporal de los algoritmos de procesamiento de información, de la prioridad y número de procesos, en ejecución, así como de los algoritmos de planificación de tareas.

En este sentido, y en común acuerdo con J. Valdez en [22] las computadoras con sistemas operativos de tiempo real como QNX RTOS tienen comportamiento estacionario obedeciendo a funciones de distribución gaussiana; sin embargo, los tiempos de transporte  $\tau_k$  muestran comportamiento no estacionario con diferentes funciones de distribución, esto se debe a factores estacionales u horarios, factores cíclicos, factores irregulares, así como de las normas de comunicación empleadas para el intercambio de información (protocolos). Todo esto provoca que la dinámica de los tiempos de respuesta, dependa de diferentes variables con características estadísticas diferentes e independientes, haciendo complicado su modelado y reconstrucción para el análisis de tiempo real, obteniendo mediciones u operaciones erróneas entre cliente y servidor, pérdida de sincronía, pérdida de datos y fallos frecuentes.

Tomando en consideración lo anterior, surgen las siguientes preguntas de investigación.

- ¿Es factible desarrollar un sistema de telemetría en tiempo real con infraestructura de computadoras embebidas e Internet?
- ¿Qué restricciones temporales debe cumplir un sistema de telemetría en tiempo real por Internet?
- ¿Es asequible realizar telemetría de variables remotas de un sistema dinámico en tiempo real por una red con protocolo TCP/IP e Internet?
- ¿Cómo sería la caracterización los tiempos de transporte en un sistema de telemetría en tiempo real para una red con protocolo TCP/IP e Internet?
- ¿Cómo modelar el comportamiento dinámico de los tiempos de transporte de un sistema de Telemetría en tiempo real a través de una red con protocolo TCP/IP e Internet?
- ¿Es viable reconstruir los tiempos de transporte en una red con protocolo TCP/IP e Internet para un sistema de telemetría en tiempo real?

### 3.3. Hipótesis

Es posible argumentar que la infraestructura tecnológica actual en las telecomunicaciones y sus características como la velocidad de transmisión, ancho de banda, etc, permiten implementar un sistema de medición remota que realice telemetría en tiempo real con base en su tiempo de transporte, "los tiempos de transporte tiene un comportamiento estocástico no estacionario y pueden ser reconstruidos a través de técnicas de estimación o identificación, y la propuesta de un modelo que reconstruye el comportamiento del sistema permite el correcto dimensionamiento de estos para su óptimo diseño e implementación".

### 3.4. Justificación

Los tiempos involucrados en el proceso de telemetría en tiempo real, basado en esquemas de comunicación cliente-servidor en redes locales y globales, son susceptibles a un conjunto de factores que afectan a los tiempos de transporte de información tal como, la infraestructura, topologías

de red, horario, fecha, protocolos, etc; en adición los tiempos de respuesta de los sistemas comunicados también afectan, esto comprometen la entrega de la información procesada dentro del plazo máximo, provocando que tenga una gran variabilidad que podría repercutir de forma negativa a las respuestas de tiempo real si no se conoce su dinámica. Por lo tanto, es imprescindible estudiar el comportamiento de los tiempos de transporte, caracterizando y analizando su evolución temporal, en un esquema que representa la dinámica temporal de cada variable del sistema, obteniendo una expresión aproximada del sistema donde se realiza el análisis del cumplimiento de los plazos de acuerdo a sus tiempos de respuesta para comprobar la viabilidad en la implementación de sistemas de telemetría en tiempo real que permiten el buen funcionamiento de los sistemas telecontrolados, evitando sobredimensionamiento con exceso de recursos y garantizando un buen desempeño.

#### 4. Reconstrucción de tiempos de transporte para sistemas de telemetría en tiempo real con SBC y RT-Linux

Este apartado expone primeramente desde un enfoque general la metodología experimental adquirida, que sirve de cimiento para el causal desarrollo de este trabajo, donde se explica la concepción de los tiempos involucrados en el proceso de telecontrol con especial interés en el tiempo de transporte, conformado por el tiempo de transmisión y recepción.

Adicionalmente, se expone el modelo propuesto para la reconstrucción de los tiempos de transporte usando el Filtro de Kalman. Explícitamente, en el apartado 5.2-A, se comprende el fundamento de los tiempos involucrados en el proceso de telecontrol para un esquema cliente-servidor de comunicación, después el apartado 5.3-B, explica de manera general la relación entre los tiempos involucrados en el proceso de telecontrol, el modelo autorregresivo de promedios móviles y el Filtro de Kalman, en cuanto al apartado 5.4-C, presenta el desarrollo del banco de pruebas usado para la medición de los tiempos de transporte en un

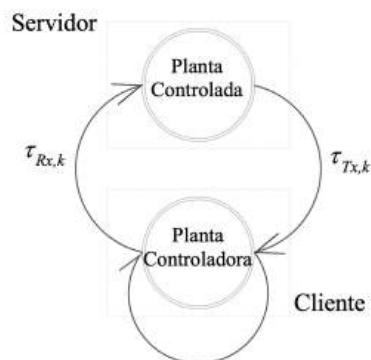


Fig. 6. Diagrama básico de comunicación en el proceso de Telecontrol

sistema de telecontrol, así como, el método de caracterización estadística y reconstrucción a partir del algoritmo de Kalman.

Finalmente, se plantea el desarrollo experimental, donde se documenta el nuevo enfoque comprometido anteriormente, con la actualización de los recursos de hardware y software de fuente abierta propuesto para consolidar el nuevo banco de trabajo a utilizar.

#### 5. Metodología teórico-experimental

Esta sección se aborda con la tabla de variables presentada a continuación, la cual contiene el compendio de expresiones que describen el total de variables utilizadas para el desarrollo de la teoría aplicada en la técnica experimental, constituida por el modelado y reconstrucción de los tiempos de transporte basado en sus restricciones temporales del proceso de telemetría y/o telecontrol.

##### 5.1. Variables teórico experimentales

Esta labor fundamentada en la medición y caracterización de la dinámica del sistema obtenida por la construcción, instalación, configuración y actualización del banco de pruebas propuesto, que en esencia asisten el desarrollo experimental de manera particularmente estructurada para los sistemas de telemetría en tiempo real con SBC y RT-Linux.

**Table 1.** Tabla descriptiva de variables teórico experimentales

Variable	Descripciones
$\tau M_k$	Tiempo de Telemetría
$T_{T_{x,k}}$	Tiempo de Telecontrol
$\tau_k$	Tiempo de Transporte
$\tau_{T_{x,k}}$	Tiempo de Transmisión
$\tau_{R_{x,k}}$	Tiempo de Recepción
$r_k$	Tiempo de Respuesta
$r_{s k}$	Tiempo de Respuesta del Servidor
$r_{c k}$	Tiempo de Respuesta del Cliente
$t_1$	Tiempo inicial de medición
$t_2$	Tiempo final de medición
$X_k$	Vector de estados
$A_k$	Parámetros del sistema
$B_k$	Relación de entrada al sistema
$U_k$	Entrada al sistema
$C_k$	Salida del sistema
$Y_k$	Salidas del sistema
$V_k$	Ruidos asociados a la entrada del sistema
$W_k$	Ruidos asociados a la entrada del sistema
$\hat{G}_k$	Predictor del vector de estados
$\hat{X}_k$	Vector de estados reconstruido
$\hat{Y}_k$	Vector de salidas del sistema reconstruido
$K_k$	Ganancia de Kalman
$P_k$	Covarianza del error de identificación
$J_k$	Derivada del error de identificación
$R_k$	Covarianza del error asociado a la salida
$Q_k$	Covarianza del error asociado a la entrada

### 5.2. A.-Modelado a partir de restricciones temporales en el proceso de telecontrol

En la figura 6 se puede observar el diagrama básico de un sistema de telecontrol en tiempo real, basado en el esquema de comunicación cliente – servidor, así como, la diferencia temporal entre la variable controlada en un proceso y la variable manipulada del sistema de control que está conformada por un tiempo de respuesta  $r_k$ , los tiempos de transmisión  $\tau_{T_{x,k}}$  y de recepción  $\tau_{R_{x,k}}$  de información, es decir, tiempos de transporte  $\tau_k$ .

El tiempo de respuesta  $r_k \in R^+$ , es el tiempo en que se procesa la información en el intervalo  $k \in Z^+$  hasta completarse el procesamiento sin considerar

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

El tiempo de transmisión  $\tau_{T_{x,k}} \in R^+$ , es el tiempo en que transcurre en el envío de información desde el cliente de telecontrol hasta el servidor de telecontrol en el intervalo  $k \in Z^+$ . Mientras que el tiempo de recepción  $\tau_{R_{x,k}} \in R^+$ , es el tiempo que transcurre en el envío de información desde el servidor de telecontrol hasta el cliente de telecontrol en el intervalo  $k \in Z^+$ .

El tiempo de transporte  $\tau_k \in R^+$  en un sistema de telecontrol en tiempo real es la suma algebraica del tiempo de transmisión  $\tau_{T_{x,k}} \in R^+$  y el tiempo de recepción  $\tau_{R_{x,k}} \in R^+$  en el intervalo  $k \in Z^+$ . De tal manera que:

$$\tau_k = \tau_{T_{x,k}} + \tau_{R_{x,k}}. \quad (12)$$

El tiempo de telecontrol en tiempo real  $T_{T_{x,k}} \in R^+$ , es la suma algebraica del tiempo de respuesta  $r_k \in R^+$  y el tiempo de transporte  $\tau_k \in R^+$  en el intervalo  $k \in Z^+$ . Por lo tanto:

$$T_{T_{x,k}} = r_k + \tau_k. \quad (13)$$

Entonces la expresión en (13) se puede reescribir tomando en consideración (12) de la siguiente forma:

$$T_{T_{x,k}} = r_k + \tau_{T_{x,k}} + \tau_{R_{x,k}}. \quad (14)$$

### 5.3. B.-Modelado y reconstrucción de los tiempos de transporte en sistemas de telemetría y telecontrol en tiempo real por internet

De acuerdo a [10], el término de filtro, se usa para describir a un dispositivo implementado analógica o digitalmente y se usa para:

- Atenuar el ruido de los datos de un sistema
- Extraer información de acuerdo a alguna característica del sistema
- Predecir el comportamiento del sistema a analizar
- Reconstruir el comportamiento del sistema a analizar

Cada una de estas acciones definen a un algoritmo de filtrado con sus características específicas, de los cuales el elegido para implementarse en el presente trabajo por su afinidad con el objetivo, es descrito y explicado con total profundidad en [10] y [8], ya que, su comprensión no es trivial. Entonces, el algoritmo de Kalman, es un procedimiento matemático que opera por medio de un mecanismo de predicción y corrección, cuyo algoritmo pronostica el nuevo estado a partir de su estimación previa, añadiendo un término de corrección proporcional al error de predicción. De tal forma, que este último es minimizado estadísticamente al operar bajo un esquema de control tipo observador (mostrado en la figura 7) con sistemas multivariables, discretos, en espacio de estados con comportamiento estocástico y que tienen la forma general expresada por (15 y 16) [8, 5]:

$$X_{k+1} = A_k X_k + B_k U_k + V_k, \quad (15)$$

$$Y_k = C_k X_k + W_k. \quad (16)$$

En donde  $X_k$  es el vector de estados,  $A_k$  es la matriz de parámetros del sistema,  $B_k$  es la matriz que relaciona las entradas al sistema,  $U_k$  es el vector de entradas al sistema,  $V_k$  es el vector de ruidos asociados a la entrada del sistema,  $Y_k$  es el vector de salidas del sistema,  $C_k$  es la matriz de salida del sistema y  $W_k$  es el vector de ruidos asociados a la salida del sistema.

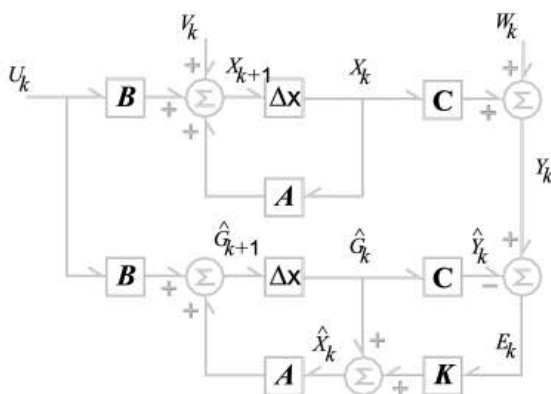


Fig. 7. Diagrama a bloques del algoritmo del Filtro de Kalman en modo Identificador

La predicción del vector de estados  $\hat{G}_{k+1}$  se define como:

$$\hat{G}_{k+1} = A_x \hat{X}_k + B_k U_k. \quad (17)$$

Donde  $\hat{X}_k$  es:

$$\hat{X}_k = \hat{G}_k + K_k [Y_k - C_k \hat{G}_k]. \quad (18)$$

Siendo  $K_k$  la ganancia  $K$  de Kalman, cuyo cálculo contribuye en cada iteración del algoritmo de filtrado a la minimización del error de identificación  $\hat{E}_k$  en el vector de estados y está definida por:

$$K_{k+1} = J_{k+1} C_{k+1}^T [R_{k+1} + C_{k+1} J_{k+1} C_{k+1}^T]^{-1}. \quad (19)$$

donde  $J_{k+1}$  es una matriz derivada de  $P_{k+1}$  la cual es la matriz de covarianza del error de identificación y  $R_{k+1}$  es la matriz de covarianza del error asociado al vector de salidas del sistema, dado por:

$$R_{k+1} = E[W_{k+1} W_{k+1}^T]. \quad (20)$$

de tal manera que,

$$J_{k+1} = A_k P_k A_k^T + Q_k. \quad (21)$$

Donde  $Q_k$ , es la matriz de covarianza del error asociado al vector de entradas del sistema, la cual es definida por:

$$Q_k = E[V_k W_k^T]. \quad (22)$$

Cabe aclarar que  $P_{k+1}$  que se define como la matriz de covarianza del error de identificación está dada por:

$$P_{k+1} = [I - K_{k+1} C_{k+1}] J_{k+1}. \quad (23)$$

Con el análisis anterior, a partir de las ecuaciones 15 y 16, hasta 23, se considera que el filtro de Kalman es un método óptimo en la implementación propuesta para este trabajo.

Debido a su característica algorítmica de tiempo real con aplicación en el dominio de tiempo discreto, permite la reconstrucción de sistemas basados en modelos autorregresivos de promedios móviles ARMA, con comportamiento estocástico, multivariable, en espacio de estados e invariante

en el tiempo, dando lugar a los resultados que se presentarán posteriormente.

Por lo tanto, si el modelo de los tiempos de transporte para telemetría en tiempo real 11, obtenido de la caracterización de las restricciones temporales que se muestran en la figura 4, es similar al modelo de los tiempos de transporte para sistemas de telecontrol en tiempo real mostrados en la expresión 14, entonces se expresa que:

$$\tau M_k = T_{T_{x,k}}. \quad (24)$$

Por otra parte, si  $Y_k$  es el vector de salidas del sistema, es decir, la representación del sensor que obtiene la medición de los tiempos de transporte antes mencionados, entonces esta parte del modelo conforme a 16, se describe de la siguiente manera:

$$\tau M_k \approx C_k X_k + W_k. \quad (25)$$

De tal manera que, con relación directa a las expresiones 17 y 18, el modelo de reconstrucción de tiempos de transporte para telemetría en tiempo real con SBC en RT-Linux, se concibe de la siguiente manera:

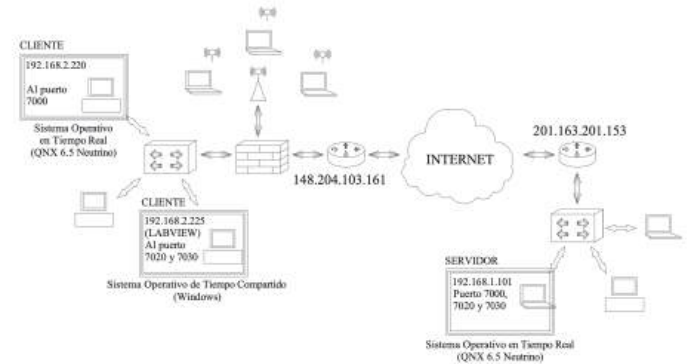
$$\hat{X}_k = A_{k-1} \hat{X}_{k-1} + B_{k-1} U_{k-1} + V_{k-1}, \quad (26)$$

$$\tau \hat{M}_k = C_k \hat{X}_k + W_k. \quad (27)$$

En general, se expresa que la reconstrucción de la dinámica de los tiempos de transporte  $\tau \hat{M}_k$ , en las instancias de la tarea: telemetría de temperatura en tiempo real con SBC en RT-Linux; depende de la medición y caracterización en forma experimental, de la cual se obtiene un modelo con base en su comportamiento dinámico y sus restricciones temporales.

#### 5.4. C - Bancos de pruebas y medición de los tiempos de transporte

Inicialmente, el banco de pruebas se desarrolla en el sistema operativo de tiempo real QNX Neutrino, sin embargo, al ser un sistema propietario que ejerce gastos considerables de licenciamiento, soporte y operación, con baja compatibilidad para hardware y software comercial, es imprescindible pensar en sustituirlo.

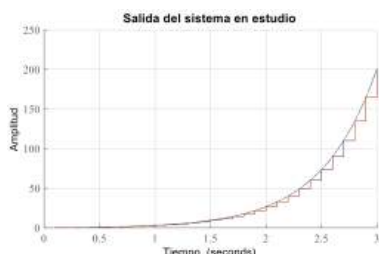


**Fig. 8.** Esquema general de comunicación tipo cliente-servidor para un sistema de telecontrol en tiempo real con SO QNX y conexión programada en ANSI C usando socket( ) mediante protocolo TCP/IP

Por lo tanto, en este trabajo se realiza la actualización como se presenta en la Figura 5, por computadoras embebidas beneficiándose en su totalidad con las bondades de los sistemas de fuente abierta, básicamente su infraestructura, empleando el sistema operativo Raspbian RT-Linux con PREEMPT-RT, aprovechando la portabilidad de ANSI C y los estándares POSIX, para migrar los códigos de programación desarrollados en QNX, adaptándolos sin hacer demasiadas alteraciones que comprometan el avance realizado y que se sustentan en el apartado 6 Desarrollo Experimental de este trabajo.

Entonces, en el primer banco de pruebas construido, se considera que el tiempo de transmisión  $T_{x,k}$  en un sistema de telecontrol en tiempo real; es el tiempo en que transcurre el envío de información desde el servidor hasta el cliente en el intervalo  $k$ , por lo tanto, es importante conocer la dinámica del comportamiento del tiempo de transmisión  $T_{x,k}$ , ya que, determina la aparición de tiempos de respuesta tardíos que afectan el comportamiento del sistema controlado. Razón suficiente, para proponer reconstruir el tiempo de transmisión  $T_{x,k}$  en un **Sistema de Telemetría en Tiempo Real** usando el Filtro de Kalman.

Cabe mencionar, que la condición de operación para usar el Filtro de Kalman y poder reconstruir el comportamiento del tiempo de transmisión  $T_{x,k}$  de un sistema en tiempo real, es asegurar el



**Fig. 9.** Salida de la simulación del sistema de primer orden inestable a partir de (28) y (29)

comportamiento de los ruidos asociados a la entrada y salida del sistema, y también, deben ser independientes entre sí [8]. Para ello, se caracteriza el nivel de dependencia una vez que hayan sido medidos los tiempos de transmisión.

Entonces para la obtención de los tiempos de transporte de información con protocolo TCP/IP, se tomó en consideración la arquitectura de software reportada por J. Valdez en [12], cuyo diagrama de conexión se presenta en la figura 8. El servidor se implementó en un equipo de cómputo con doble núcleo de procesador, que trabaja a una velocidad de 1.6GHz y 4GB de memoria RAM y con el Sistema operativo en tiempo real QNX 6.5 Neutrino. Se desarrolla el programa en lenguaje C que ejecuta tres tareas en tiempo real en el servidor previamente implementado. La primera tarea realiza la comunicación mediante Internet hacia otros equipos de cómputo usando el protocolo TCP/IP, a través del empleo de la función socket() de la biblioteca sys/socket.h [19]. La segunda tarea es simular una planta de un sistema de primer orden inestable cuya función de transferencia se muestra en 28 como modelo en el dominio de Laplace:

$$G(s) = \frac{1}{s-2}. \quad (28)$$

El modelo equivalente de 28, recursivo en tiempo discreto y obtenido a través de la transformada Z se muestra en 29:

$$Y_k = \frac{(e^{2T} - 1)u_{k-1} + 2e^{2T}Y_{k-1}}{2}. \quad (29)$$

Cuyas respuestas de los modelos del sistema simulado, se muestra en la figura 9.

La tercera tarea del servidor, es obtener los datos de la medición de los tiempos involucrados en el proceso de telecontrol, dentro de los cuales se pueden considerar a los tiempos de respuesta  $r_{i,k}$  y a los tiempos de transmisión  $\tau_{T_{x,k}}$  y de recepción  $\tau_{R_{x,k}}$ , estos últimos presentados en el proceso de comunicación, es decir en el envío y recepción de información tomando en cuenta toda la infraestructuras necesaria para realizar la tarea mencionada.

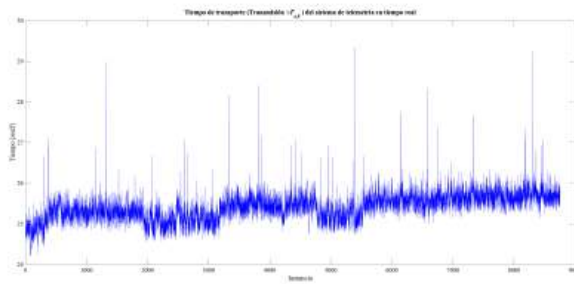
Los tiempos medidos pueden ser redireccionados a una base de datos, para su análisis posterior o en su defecto se envían empleando sockets al circuito virtual de comunicación basado en el protocolo TCP/IP, como una cadena de caracteres de 8 bits. Misma información puede ser leída y/o graficada por clientes basados en otros sistemas operativos. Y en este caso se usó el puerto 7000 y 7020 para enviar los valores obtenidos de la simulación del sistema de primer orden inestable. El puerto 7030 fue usado para enviar la información de los tiempos medidos del sistema de telecontrol en tiempo real.

Los equipos de cómputo que fungieron como cliente, se diseñaron en base a la arquitectura de software de [12] y [13]. El primer cliente tiene las mismas características que el servidor, tanto en la parte de hardware como software. Y se encarga de recibir la información enviada por el servidor en la dirección IP 201. 163. 201. 101 en el puerto 7000, que corresponde a la salida del sistema de primer orden inestable.

Mientras que el segundo cliente está implementado en un sistema operativo de tiempo compartido, y tiene las siguientes características de hardware: con procesador de cuatro núcleos con una velocidad de procesamiento de 3.2Ghz y 8Gb de memoria RAM

El sistema operativo de tiempo compartido que usa es *Windows 7 Ultimate*, y utiliza el software de desarrollo industrial LABVIEW 2009MR de *National Instruments*, debido a que ofrece la posibilidad de interactuar con sistemas físicos mediante el uso de tarjetas de adquisición de datos, así como, supervisar y desplegar con interfaz gráfica la información emitida por los sistemas.

No obstante, para este caso la simulación del proceso mediante el cual se recrea el



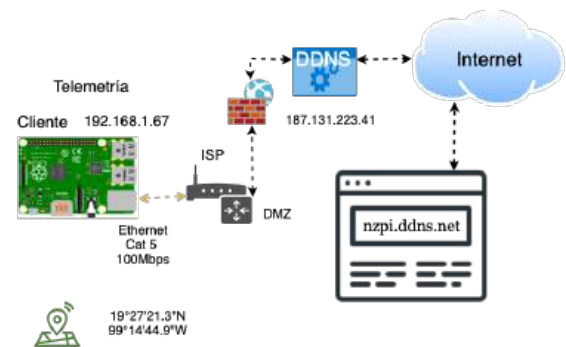
**Fig. 10.** Tiempos de transmisión medidos para sistema de telemetría en tiempo real

comportamiento de un sistema de telecontrol con una planta simulada que ocupa telemetría en un entorno controlado y virtual, en lugar de utilizar datos en tiempo real de sensores o dispositivos reales permite el avance en el desarrollo y muestra una aproximación muy estrecha a la realidad.

De tal forma que, la simulación de telemetría en el sistema telecontrolado es una herramienta poderosa para el diseño, desarrollo y optimización de sistemas de monitoreo y control en diversas aplicaciones, desde la industria manufacturera hasta la exploración espacial, que permite probar diferentes escenarios y condiciones de manera segura y eficiente, lo que puede ahorrar tiempo y recursos en comparación con pruebas en sistemas reales. Sin embargo para comprobar la proyección simulada, en la medida de lo posible, es de extrema necesidad apegarse totalmente a las condiciones del entorno real y desarrollar el sistema propuesto utilizando datos en tiempo real de sensores o dispositivos reales, motivo esencial por el cual se propone específicamente el trabajo presentado en la medición que se muestra en la figura 10 a continuación.

## 6. Desarrollo experimental

Disponiendo de la base del trabajo desarrollado previamente, se continua el proyecto de investigación actualizando el diseño y arquitectura general hacia software y hardware libre, ya que, permite el aprovechamiento de las bondades de los sistemas de fuente abierta, su integración sin



**Fig. 11.** Esquema de infraestructura para cliente de telemetría en tiempo real

cuestiones de gastos excesivos para licenciamiento de software como en sistemas operativos de tiempo real propietarios e interfaces de hardware y software con dispositivos específicos (como: tarjetas de adquisición de datos, tarjetas de comunicación, sensores y actuadores, etc.) de un proveedor exclusivo, dando lugar a la libertad de integración, configuración y desarrollo de sistema en tiempo real de fuente abierta, obteniendo como resultado un banco de trabajo particular diseñado a la medida, estandarizado y adaptable al propósito requerido.

De acuerdo con el esquema mostrado en la Figura 5 como esquema general y específicamente como se observa en la Figura 16, la construcción del banco de trabajo desarrollado para telemetría en tiempo real con computadoras embebidas SBC Raspberry Pi 3B+ y 4B+; con sistema operativo de tiempo real Raspbian PREEMPT-RT de Linux, configuradas como cliente y servidor, respectivamente; utilizando comunicación con protocolo TCP/IP en un esquema de red de área amplia (WAN) con infraestructura de nube en la Ciudad de México y Área Metropolitana; dos diferentes proveedores de servicio de internet ISP y redireccionamiento de puertos configurados para cada dirección IP de cada nodo; adicionalmente, un cliente de monitoreo remoto y teleoperación con conexión segura a través del protocolo de comunicación con acceso remoto por SSH como intérprete de órdenes seguro, previamente instalado y configurado el servicio respectivamente en cada nodo.

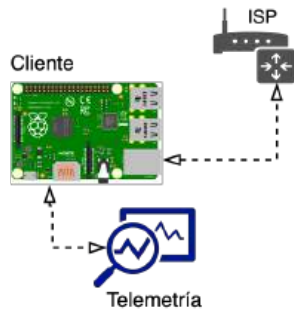


Fig. 12. Adquisición de variable de entrada al servidor

Entonces, para implementar la infraestructura antes descrita como se muestra en la Figura 11 se preparan, instalan y configuran los componentes de hardware como lo son: Una SBC RasPi-3B+ con RTOS conectada a la red local por Ethernet Cat5 con 100Mbps, con IP estática 192.168.1.67 a un ISP residencial con un ancho de banda de 50Mbps para descarga y 10 Mbps para carga, redireccionamiento de conexión remota a través del módem-router apuntando a la IP Pública 187.131.223.41 configurada en la zona desmilitarizada DMZ del router y asignada para la implementación de un nombre de dominio dinámico DDNS, designado como *nzpi.ddns.net*, suministrado por el proveedor NoIP; que hacen referencia al cliente de telemetría que se encuentra físicamente ubicado en las coordenadas de posición global 19°27'21.3"N 99°14'44.9"W pertenecientes al área metropolitana de la CDMX en el municipio de Naucalpan de Juárez; es preciso destacar que toda esta integración de hardware y software es estrictamente necesaria para realizar Telemetría en Tiempo Real con un cliente dedicado para tales fines, en su calidad de nodo remoto.

El nodo cliente conectado y configurado con su respectivo ISP ejecuta el programa "cliente", particularmente desarrollado e implementado principalmente para realizar el enlace por medio de la función *socket()* de la biblioteca *sys/socket.h* ver Figura 13 referente al Proceso Cliente, que establece las reglas de comunicación, donde se indica desde la ejecución del programa la solicitud de conexión al servidor mediante el puerto designado con su dirección específica por donde

se emite el estatus de listo y la orden de inicio en la transmisión, para comenzar a recibir la información de las lecturas adquiridas por el sensor que esta interfazado al servidor, ceñido estrictamente al marco del protocolo TCP/IP que permite enviar y recibir la información por internet, donde para este caso específico, son los datos de telemetría en la lectura del sensor de la variable configurada en el servidor, registradas en un archivo *.txt* que se almacena en la memoria del equipo en la ruta */home/pi/Documents/Client/Ttrans.txt*.

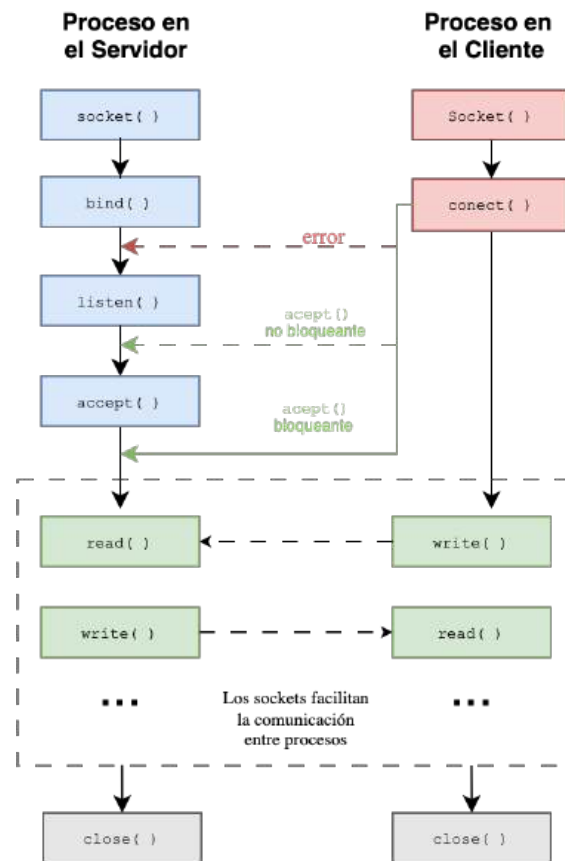
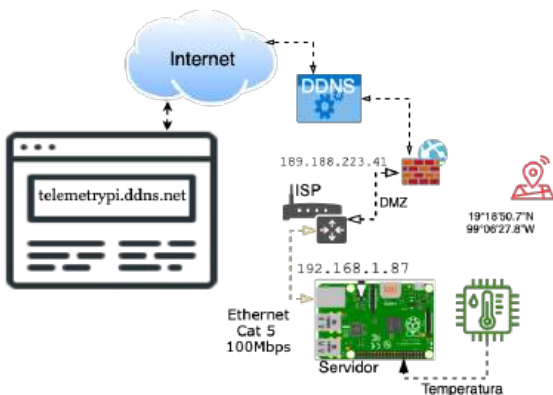


Fig. 13. Diagrama de flujo como Pseudocódigo de la comunicación por socket programada en ANSI C

Por otra parte, en la implementación de la infraestructura que se emplea para el servidor de telemetría como se muestra en la figura 14, se preparan, instalan y configuran los componentes de hardware tales como: Una SBC RasPi-4B+ con RTOS conectada a la red local por Ethernet

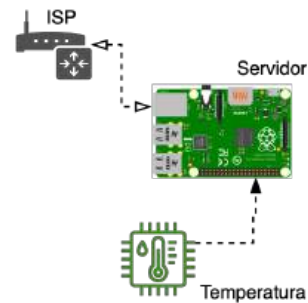


**Fig. 14.** Esquema de infraestructura para servidor de telemetría en tiempo real

Cat5 con 100Mbps, con IP estática 192.168.1.87 a un ISP residencial con un ancho de banda de 50Mbps para descarga y 10 Mbps para carga, redireccionamiento de conexión remota a través del módem-router apuntando a la IP Pública 189.188.243.27 configurada en la zona desmilitarizada DMZ del router y asignada para la implementación de un nombre de dominio dinámico DDNS, designado como *telemetrypi.ddns.net*, suministrado por el proveedor NoIP; este equipo se encuentra ubicado físicamente en 19°18'50.7"N 99°06'27.8"W coordenadas de posición global pertenecientes al interior de la CDMX en la alcaldía Coyoacán.

El nodo servidor conectado y configurado a su respectivo ISP ejecuta el programa “*servidor*” particularmente desarrollado e implementado para ejecutar un proceso que interactúa con el mundo real, midiendo una variable local de temperatura, adquirida con interfaz One-Wire por el sensor digital DS18B20 que funciona en un rango de -55 a 125 °C con precisión de  $\pm 0.5$  y un tiempo de muestreo de 750 ms conectado a los GPIO de la SBC; esta lectura se envía por medio de la conexión de red previamente configurada con la función *socket()* como se muestra en el esquema de la figura 13 respecto al proceso servido, en el puerto designado a su dirección específica, obedeciendo el protocolo TCP/IP a la espera de la petición del cliente.

Finalmente, se realiza la puesta en marcha del banco de trabajo integrado en su totalidad y se



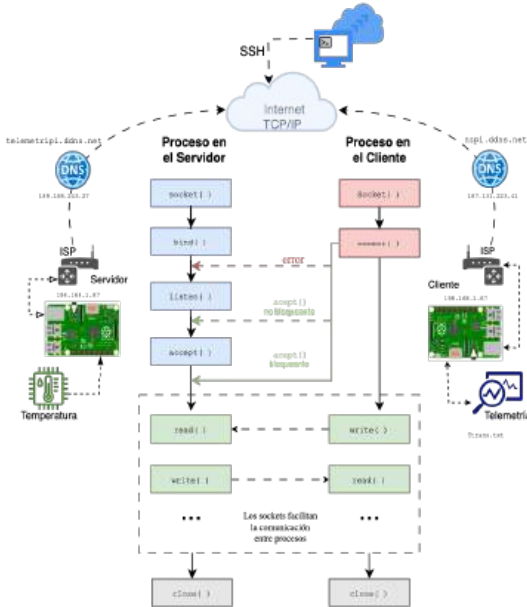
**Fig. 15.** Adquisición de variable de entrada al servidor

obtienen los tiempos de transporte del sistema de Telemetría en Tiempo Real con RT-Linux, almacenando estos datos recibidos en formato de texto para su posterior caracterización y reconstrucción con el modelo propuesto usando el Filtro de Kalman.

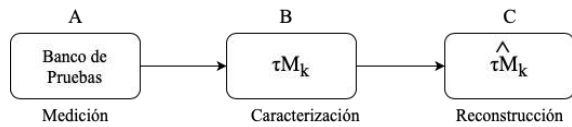
Continuamente se siguen realizando pruebas experimentales del sistema propuesto en diferentes condiciones de operación para finalizar el proyecto de investigación documentando y presentando los resultados que se recaban constantemente.

El proceso de desarrollo aplicado en este trabajo, esta estructurado desde un enfoque de investigación que combina aspectos teóricos y experimentales para abordar las preguntas de investigación desprendidas de la problemática expuesta en el capítulo uno referente al contexto teórico de esta investigación, en esta parte se ha documentado el desarrollo del sistema de telemetría en tiempo real con computadoras de placa reducida y sistema operativo de tiempo real RT-Linux.

De manera gráfica descriptiva se explica la construcción del banco de pruebas en un esquema cliente-servidor por internet, inicialmente pensado para un sistema de telecontrol, que se actualizo eficientemente para esta labor y realiza telemetría en tiempo-real de una variable, que para este caso es temperatura, que de manera como lo presenta el apartado previo denominado desarrollo experimental.



**Fig. 16.** Diagrama general del banco de pruebas para un sistema de telemetría de temperatura en tiempo real en un esquema cliente-servidor con SBC, PREEMPT-RT, Linux y un sensor de temperatura DS18b20



**Fig. 17.** Diagrama a bloques del proceso para reconstrucción de los tiempos de transporte

## 7. Resultados experimentales

Una vez desarrollado el banco de pruebas fundamentado en la metodología experimental, se procedió a realizar los ensayos pertinentes a tres actividades principales, distribuidas en, A-Medición, B-Caracterización y C-Reconstrucción, como se aprecia en la Figura 17. Este procedimiento se encarga de documentar los resultados del proceso de reconstrucción de los tiempos de transporte de los sistemas descritos en 16. Luego entonces, se puntualiza el proceso de cada actividad, presentando en gráficas elaboradas fuera de línea, con los datos obtenidos. Cabe resaltar que los resultados son prometedores ya que sugieren una

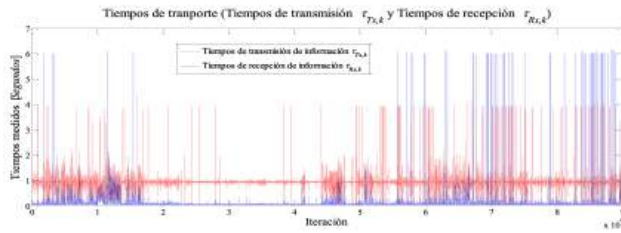
buena convergencia de acuerdo a la reconstrucción realizada, para confirmar la hipótesis planteada en el contexto teórico referente al capítulo 1 de esta tesis, claro está que es bajo ciertas condiciones específicas al momento de resolver las cuestiones de investigación para la *Telemetría en Tiempo Real* de este tipo de sistemas que se abordarán en las próximas conclusiones.

Además, es sumamente importante aclarar que para los sistemas de telemetría y telecontrol en tiempo real, la manera de medir los tiempos de transporte es la misma. Sin embargo, la diferencia sustancial correspondiente a la telemetría en tiempo real, radica en que el tiempo de recepción que se invierte, es solo un *Tic* de confirmación en el envío de información, periodo de tiempo prácticamente despreciable. No obstante, se considera para esta labor, que solo se hace referencia a los tiempos de transmisión del servidor de adquisición de datos al cliente de telemetría.

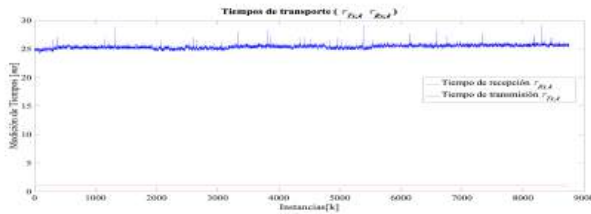
### 7.1. A - Medición

La interfaz gráfica se encarga de leer en la dirección IP 201. 163. 201. 101 en el puerto 7020 y 7030, la información enviada por el servidor. El puerto 7020 de esta dirección IP es el *socket* que se encarga de enviar el valor de la señal de salida del sistema de primer orden en el servidor para ser graficado. Y en el puerto 7030, es el *socket* que se encarga de enviar el valor de la medición del tiempo de transmisión  $T_{T_{x,k}}$  y de recepción  $T_{R_{x,k}}$  de la comunicación entre el cliente y el servidor elaborados en el SOTR QNX 6.5 Neutrino para ser graficado. La información es transportada por Internet en este circuito virtual de comunicación como una cadena de caracteres de 8 bits, es convertida a un formato numérico y graficado usando la interfaz desarrollada, o bien mediante la herramienta de trabajo MATLAB [14], cuyos resultados se pueden apreciar en las figuras 18.

En el caso del sistema de telemetría la comunicación se realiza de manera similar con las características mostradas anteriormente en la figura 16 sin embargo cabe aclarar que para este sistema la medición de los tiempos de transporte se realiza desde el servidor, por lo cual solo se considera que los tiempos de transporte para este



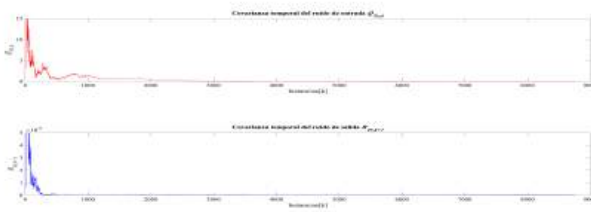
**Fig. 18.** Tiempos de recepción  $\tau_{R_{x,k}}$  y transmisión  $\tau_{T_{x,k}}$  usando el protocolo TCP/IP para Telecontrol



**Fig. 19.** Tiempos de recepción  $\tau_{R_{x,k}}$  y transmisión  $\tau_{T_{x,k}}$  usando el protocolo TCP para Telemetría



**Fig. 20.** Comportamiento temporal de las covarianzas  $Q_{T_{x,k}}$  y  $R_{T_{x,k+1}}$  para Telecontrol



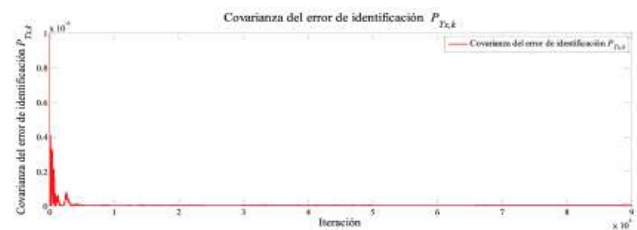
**Fig. 21.** Comportamiento temporal de las covarianzas  $Q_{T_{x,k}}$  y  $R_{T_{x,k+1}}$  para Telemetría

sistema es de mayor importancia el tiempo de transmisión ya que el de recepción es despreciable por ser solo la confirmación de recibido como se muestra en la figura 19.

## 7.2. B - Caracterización de los tiempos de transmisión

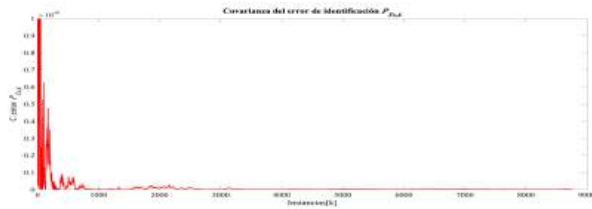
Para el análisis del comportamiento de los tiempos de transmisión  $\tau_{T_{x,k}}$ , es imprescindible conocer el nivel de dependencia de variables aleatorias y determinar si son independientes, por lo cual, se analizan los ruidos asociados mediante el concepto de momento de covarianza de dos variables 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 dichas variables aleatorias. 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, de acuerdo a las figuras 20 y 21, se observa que no existe correlación entre ellas.

Es decir que, en ambos casos se puede observar que al principio de la evolución del sistema el comportamiento de la covarianza tiene valores diferentes de cero lo que permite argumentar que al inicio de la reconstrucción, los ruidos asociados al sistema tanto en la entrada como en la salida, aparentan una cierta dependencia lineal, pero conforme el sistema evoluciona, el comportamiento de la covarianza temporal de los ruidos asociados al sistema, tienden a una región cercana a cero. Con esto se puede asegurar que los ruidos  $Q_{T_{x,k}}$  y  $R_{T_{x,k+1}}$  tienen independencia lineal y permite asegurar que la covarianza del error de identificación tendrá el mismo comportamiento, figuras 22 y 23.

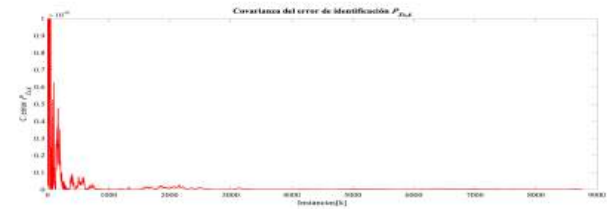


**Fig. 22.** Comportamiento temporal de la covarianza del error de identificación  $P_{T_{x,k}}$  para Telecontrol

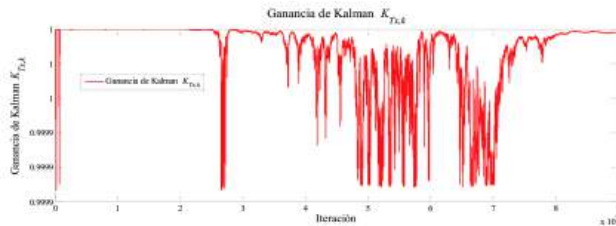
De esto se puede concluir que la condición de operación para usar el algoritmo de Kalman para poder reconstruir el comportamiento del tiempo de



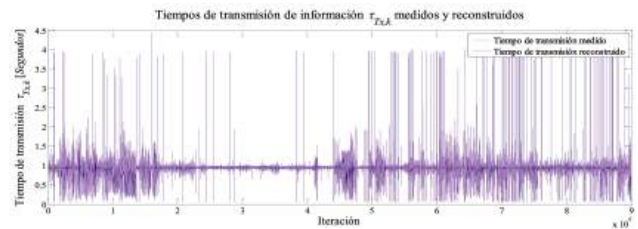
**Fig. 23.** Comportamiento temporal de la covarianza del error de identificación  $P_{T_{x,k}}$  para Telemetría



**Fig. 25.** Ganancia de Kalman temporal para la reconstrucción de los tiempos de transmisión  $\tau_{T_{x,k}}$  en Telemetría



**Fig. 24.** Ganancia de Kalman temporal para la reconstrucción de los tiempos de transmisión  $\tau_{T_{x,k}}$  en Telecontrol



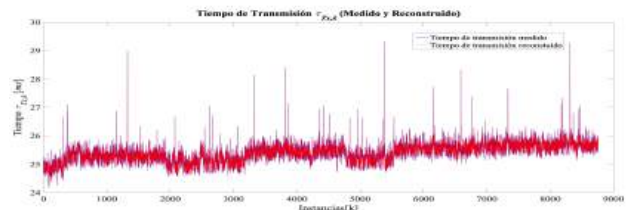
**Fig. 26.** Comparativa de los tiempos de transmisión  $\tau_{T_{x,k}}$  medidos y reconstruidos para Telecontrol

transmisión  $\tau_{T_{x,k}}$  de un sistema de Telemetría y Telecontrol respectivamente en tiempo real ya es cumplida, al asegurar que los ruidos asociados a la entrada y salida del sistema son independientes en forma lineal.

### 7.3. C - Reconstrucción de tiempos de transporte con el Filtro de Kalman

Una vez asegurada la independencia lineal de los ruidos asociados al sistema de entrada  $Q_{T_{x,k}}$  y los ruidos asociados a la salida del sistema  $R_{T_{x,k+1}}$ , es posible usar la ecuación 19 para obtener la ganancia de Kalman que permitirá la reconstrucción de los tiempos de transmisión de información  $\tau_{T_{x,k}}$ . Y el resultado de la ganancia de Kalman  $K_{T_{x,k}}$  a lo largo de la evolución del sistema se puede observar en las figuras 24 y 25 respectivamente.

Y el resultado de la reconstrucción de los tiempos de transmisión de información  $\tau_{T_{x,k}}$  tomando en consideración a la ganancia de Kalman  $K_{T_{x,k}}$  se puede apreciar en las figuras 26 y 27. En estas figuras, se observa que a partir de la reconstrucción de los tiempos de transmisión  $\tau_{T_{x,k}}$  a través del uso del Filtro de Kalman, los tiempos

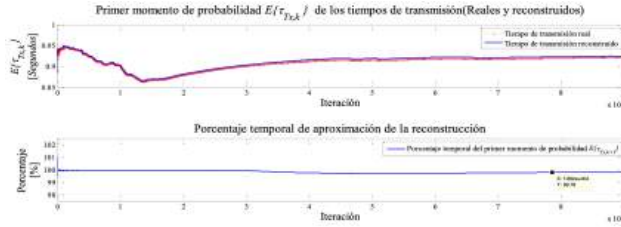


**Fig. 27.** Comparativa de los tiempos de transmisión  $\tau_{T_{x,k}}$  medidos y reconstruidos para Telemetría

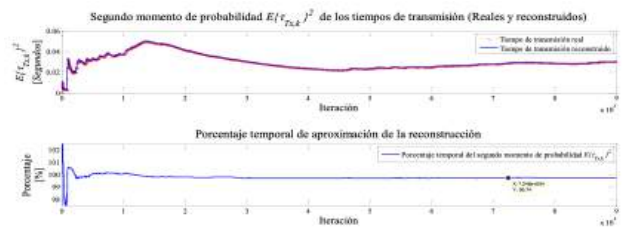
de transporte reconstruidos  $\tau_{T_{x,k}}$  son muy próximos a los tiempos de transporte reales en casi todos los valores de  $k$ , pero se considera que este argumento no es suficiente, lo que conlleva a usar medidas descriptivas tal y como el primer y segundo momento de probabilidad, así como, el error cuadrático medio para validar este resultado que se muestra mas adelante.

El comportamiento del primer momento de probabilidad  $E\{\tau_{T_{x,k}}\}$  de los tiempos de transmisión reales y reconstruidos, se pueden observar en las figuras 28 y 29.

Se observa que al principio de los intentos de comunicación utilizando el protocolo TCP/IP,



**Fig. 28.** Primer momento de probabilidad  $E\{\tau_{T_{x,k}}\}$  de los tiempos de transmisión para Telecontrol



**Fig. 30.** Segundo momento de probabilidad  $E\{\tau_{T_{x,k}}\}^2$  de los tiempos de transmisión para Telecontrol



**Fig. 29.** Primer momento de probabilidad  $E\{\tau_{T_{x,k}}\}$  de los tiempos de transmisión para Telemetría



**Fig. 31.** Segundo momento de probabilidad  $E\{\tau_{T_{x,k}}\}^2$  de los tiempos de transmisión para Telemetría

los tiempos de transmisión  $\tau_{T_{x,k}}$  tienen una convergencia hacia los valores reales de casi el 100% en la mayoría de los puntos. Para el comportamiento del segundo momento de probabilidad  $E\{\tau_{T_{x,k}}\}^2$  de los tiempos de transmisión reales y reconstruidos, se pueden observar en las figuras 30 y 31 respectivamente.

Se observa que al principio de los intentos de comunicación utilizando el protocolo TCP/IP, el segundo momento de probabilidad de los tiempos de transmisión  $\tau_{T_{x,k}}$  reconstruidos tienen una cierta divergencia con respecto a los valores reales, pero una vez que el sistema evoluciona, la convergencia hacia los valores reales es cercana al 100% en casi todos los puntos.

Para el caso del error cuadrático medio entre los tiempos de transmisión de información reales y reconstruidos se hace al describir la convergencia del algoritmo mediante el empleo de (30) y (31) hasta encontrar el mínimo error de  $H_{T_{x,k}}$ :

$$e_{T_{x,k}} = \tau_{T_{x,k}}^* - \tau_{T_{x,k}}, \quad (30)$$

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

Entonces en la figura 32 y de acuerdo a la ecuación (30), el Filtro de Kalman tiene una convergencia en casi todos los puntos, pues el error cuadrático medio  $H_{T_{x,k}}$  converge a valores muy pequeños: 0.0102 [Segundos], para los tiempos de transmisión de información  $\tau_{T_{x,k}}$ , lo que permite describir la calidad de la reconstrucción pues a medida que se obtengan valores cada vez más pequeños de  $H_{T_{x,k}}$  durante el proceso de reconstrucción usando el filtrado de Kalman, la diferencia descrita por la ecuación (31), converge a valores cercanos a 0. Estos resultados permiten 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 utilizado en esta sección.

#### 7.4. Discusión

Para la reconstrucción de la dinámica de los tiempos de transmisión  $\tau_{T_{x,k}}$  empleando el Filtro de Kalman, se presentaron algunos resultados que se mencionan a continuación.

1) Se observó en las referencias bibliográficas presentadas que la cuantificación de los tiempos

de transmisión  $\tau_{T_{x,k}}$  de información en Internet tiene una fuerte dependencia de las aplicaciones desarrolladas para trabajar en internet, así como, de factores que aumentan el tiempo de comunicación, favoreciendo a la aparición de tiempos de respuesta tardíos. Y su modelado se basa en modelos estructurales que dependen del tipo de información que se maneja (voz, vídeo o datos), los cuales toman en consideración el tamaño de información, la cantidad de información enviada, pero estos modelos no estudian la dinámica de los tiempos de transporte, entonces como aportación del presente trabajo es la propuesta de modelado y reconstrucción de la dinámica variante de los tiempos de transmisión  $\tau_{T_{x,k}}$  en el sistema de telemetría en tiempo real utilizando un modelo basado en el Filtro de Kalman.

2) El algoritmo de Kalman cuenta con la capacidad de procesar dinámicamente las variables observables de un sistema, así como sus respectivas variaciones, y a partir de este procesamiento dar una respuesta adecuada de acuerdo con los requerimientos de un proceso, garantizando un correcto funcionamiento. Entonces la reconstrucción a partir del método utilizado, es bastante buena, ya que, los tiempos de transmisión  $\tau_{T_{x,k}}$  reconstruidos en el sistema de telecontrol y telemetría en tiempo real  $k$  son muy próximos a los tiempos de transmisión  $\tau_{T_{x,k}}$  reales para todos los valores de  $k$ , obteniéndose una aproximación cercana al 100 % en el primer y segundo momento de probabilidad, logrando un error cuadrático medio cercano a cero.

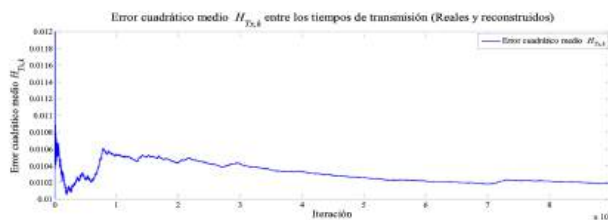


Fig. 32. Error cuadrático medio  $H_{T_{x,k}}$

3) El Modelo de Telemetría en tiempo real para Tiempos de transporte  $\tau_k$  expresado en 12 y descrito como sistema dinámico conformado por procesos estocásticos, no estacionario y variante en el tiempo, en adición con los tiempos de

repuesta  $r_k$  expresado en 6 y que resulta en  $\tau M_k$  expresado en 11, es validado con la reconstrucción de los tiempos de transmisión  $\tau \widehat{M}_k$  presentados en este trabajo, ya que, el filtro de Kalman tiene una respuesta aceptable de acuerdo a los resultados obtenidos.

## 8. Conclusiones y trabajo futuro

Recapitulando la investigación, se observa que el desarrollo de esta tesis en cada una de sus partes refleja el trabajo teórico y experimental realizado para sustentar la afirmación; *Los tiempos de transporte tienen un comportamiento estocástico no estacionario y pueden ser reconstruidos a través de técnicas de estimación e identificación, y la propuesta de un modelo que reconstruye el comportamiento del sistema permite el correcto dimensionamiento de estos para su óptimo diseño e implementación*, en sistemas que soporten estas características, y que con la infraestructura tecnológica comercial actual, es realizable la telemetría en tiempo real. Por lo tanto, es gratificante expresar que, de acuerdo con la experiencia adquirida y con base en los resultados obtenidos, el trabajo es exitoso y finaliza con las siguientes resoluciones.

Entonces, después de realizado el trabajo teórico experimental de investigación, finalmente se comprenden en lo general y en lo particular, el contexto y las diferentes cuestiones respectivamente, que dieron lugar al planteamiento argumentado en la sección 3 apartado 3.2. Por ende, se reafirma que en la actualidad, se puede desarrollar un sistema de telemetría en tiempo real a la medida, con computadoras embebidas, RT-Linux e infraestructura de internet, fundamentado en el modelado y la reconstrucción de los tiempos de transporte, desarrollando e implementando el modelo en conjunto con el filtro de Kalman, que describe a un sistema con tal naturaleza y que garantiza el dimensionamiento y funcionamiento del mismo.

Por otra parte, el modelado usa como referencia las restricciones temporales de un proceso en tiempo real, que puede ejecutar una computadora embebida con sistema operativo de tiempo real como Raspbian PREEMPT-RT; y que dan lugar

a la concepción de las expresiones esenciales expuestas en las ecuaciones 8 y 10, para comprender el comportamiento del sistema que permita realizar su caracterización y posteriormente su reconstrucción.

Adicionalmente, se confirma que, es perfectamente asequible realizar telemetría en tiempo real de variables remotas específicas como; temperatura, nivel de volumen, humedad relativa, flujo, etc, ya que, su tasa de cambio es relativamente lenta tomando como referencia el máximo tiempo de transporte registrado en este trabajo. Sin embargo, para la telemetría en tiempo real por ejemplo, de variables eléctricas, se requiere plantear otro esquema de comunicación que permita registrar una tasa de cambio más rápida, ad hoc al sistema telemedido.

- Implementar otras técnicas de estimación y modelado, basadas en variable instrumental, lógica difusa, factor de olvido exponencial, aprendizaje automático, entre otras.
- Considerar la implementación de la estimación y modelado multivariable.
- Considerar aplicar telemetría en tiempo real multivariable para diferentes tipos de variables.
- Considerar realizar teleoperación y telecontrol con la telemetría especificada en este trabajo para un mejor dimensionamiento.

## Referencias

1. **Antonini, M., De Luise, A., Ruggieri, M., Teotino, D. (2005).** Satellite data collection & forwarding systems. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, Vol. 20, No. 9, pp. 25–29.
2. **Bernat, G., Colin, A., Petters, S. (2003).** pwcet: A tool for probabilistic worst-case execution time analysis of real-time systems. University of York, Department of Computer Science.
3. **Buttazzo, G. C. (2011).** Hard real-time computing systems: predictable scheduling algorithms and applications, Vol. 24. Springer Science & Business Media.
4. **Cittadini, E., Marinoni, M., Biondi, A., Cicero, G., Buttazzo, G. (2023).** Supporting ai-powered real-time cyber-physical systems on heterogeneous platforms via hypervisor technology. *Real-time systems*, Vol. 59, No. 4, pp. 609–635.
5. **Delgado G., G. P. (2014).** Uso del filtro de kalman para la reconstrucción adaptativa del vector de tiempos de ejecución en la simulación en tiempo real de un motor de cc.. XI Congreso Internacional sobre Innovación y Desarrollo Tecnológico CIINDET México.
6. **Feng, S., Li, X., Zhang, S., Jian, Z., Duan, H., Wang, Z. (2023).** A review: State estimation based on hybrid models of kalman filter and neural network. *Systems Science & Control Engineering*, Vol. 11, No. 1, pp. 2173682.
7. **G. Baldovinos, D. L. (2018).** Análisis Experimental de los tiempos de respuesta en RT-Linux para una SBC. Master's thesis, Instituto Politécnico Nacional ESIME Culhuacan.
8. **Gustafsson, F., Gustafsson, F. (2000).** Adaptive filtering and change detection, Vol. 1. Citeseer.
9. **Haswell, H., Murray, V. (2025).** Zero trust architecture for avionics. 2025 AIAA DATC/IEEE 44th Digital Avionics Systems Conference (DASC), IEEE, pp. 1–4.
10. **Haykin, S. (2002).** Adaptive filter theory, ser. Information and System Science. Prentice Hall.
11. **Kotel'nikov, V. A. (2001).** On the transmission capacity of the "ether" and wire in electrocommunications. In *Modern Sampling Theory*. Springer, pp. 27–45.
12. **Martínez, J. S. V., López, P. G. (2019).** Medición, caracterización y reconstrucción de los tiempos de ejecución y transporte para sistemas de telecontrol en tiempo real. *Computación y Sistemas*, Vol. 23, No. 2, pp. 531–546.
13. **Martínez, J. S. V., Tavira, J. V., Colín, J. V. (2016).** Workbench's implementations based in telecontrol system software architecture. 2016

International Conference on Mechatronics, Electronics and Automotive Engineering (ICMEAE), IEEE, pp. 150–155.

14. **MathWorks (2016)**. MATLAB - Página del software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) con un lenguaje de programación propio.
15. **Medel, J. d. J., Guevara, P., Cruz, D. (2007)**. Temas selectos de sistemas en tiempo real. Tareas en Tiempo Real, Vol. 1, pp. 50–54.
16. **Nast, M., Rethfeldt, M., Golatowski, F., Haubelt, C. (2024)**. Improving the real-time capability of mqtt for sensor networks (mqtt-sn) using preempt\_rt. 2024 IEEE 20th International Conference on Factory Communication Systems (WFCS), IEEE, pp. 1–8.
17. **Nyquist, H. (1928)**. Certain topics in telegraph transmission theory. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, Vol. 47, No. 2, pp. 617–644.
18. **Perticarrari, A. L. (2023)**. Filtro de kalman para sistemas singulares estocásticos. Proceeding Series of the Brazilian Society of Computational and Applied Mathematics, Vol. 10, No. 1.
19. **QNX (2012)**. Página de desarrollo del sistema operativo en tiempo real QNX.
20. **Ramírez, S. (1999)**. Perspectivas en las teorías de sistemas. Siglo XXI.
21. **Stappert, F., Altenbernd, P. (2000)**. Complete worst-case execution time analysis of straight-line hard real-time programs. Journal of Systems Architecture, Vol. 46, No. 4, pp. 339–355.
22. **Valdez, J. (2015)**. Medición, Caracterización y Reconstrucción de los Tiempos de Ejecución y Transporte para Sistemas de Telecontrol en Tiempo Real. Ph.D. thesis, PhD Thesis, Instituto Politécnico Nacional. México.
23. **Valdez, J., Delgado, G., Guevara, P., Cano, J. (2019)**. Transmission times reconstruction in a telecontrolled real-time system. IEEE Latin America Transactions, Vol. 17, No. 03, pp. 349–357.
24. **Valdez-Martínez, J. S., Guevara-López, P., Delgado-Reyes, G., González-Baldovinos, D. L., Cano-Rosas, J. L., Calixto-Rodríguez, M., Villanueva-Tavira, J., Buenabad-Arias, H. M. (2022)**. Communication times reconstruction in a telecontrolled client–server scheme: An approach by kalman filter applied to a proprietary real-time operating system and tcp/ip protocol. Mathematics, Vol. 10, No. 20, pp. 3885.
25. **Zafar, S., Sabina, S., Biondi, A., Buttazzo, G. (2025)**. Time synchronization and performance analysis of the opensafety protocol via udp over ethernet. Journal of Systems Architecture, pp. 103605.

Article received on 24/11/2025; accepted on 04/01/2026.

\*Corresponding author is Pedro Guevara-López.