

Evaluación de planificaciones en TSN ante variaciones de TE

Alitzel Torres^{1,2}, Antonio Ramírez², José Luis Briz¹, Juan Segarra¹

¹ Afiliación: Grupo de Investigación en Arquitectura de Computadores (gaZ)

Instituto de Investigación en Ingeniería de Aragón (I3A)

Universidad de Zaragoza, Mariano Esquillor s/n, 50018, Zaragoza, España.

Tel. +34-976762707, e-mail: a.torres@unizar.es

² Afiliación: CINVESTAV Unidad Guadalajara.

Resumen

Se estudian los efectos del error de tiempo (TE) sobre planificaciones en Redes Sensibles al Tiempo (TSN). Se analiza la influencia del signo y la magnitud del TE en las ventanas de transmisión, extendiendo el modelo de reloj afin hacia fluctuaciones estocásticas no lineales que el protocolo gPTP no elimina.

Introducción

La planificación de flujos con restricciones temporales en Redes Sensibles al Tiempo (TSN) se realiza mediante el mecanismo *Time-Aware Shaper* (IEEE 802.1Qbv [1]), regulando su transmisión a través de *Gate Control Lists* (GCLs). Dicha planificación es muy sensible a incertidumbres de sincronización y a errores temporales dependientes del hardware, pues cada nodo opera con su propio reloj local cuya desviación respecto al tiempo de referencia constituye el Error de Tiempo (TE) [2].

Las GCLs se sintetizan suponiendo que todos los nodos comparten un tiempo global común; en la práctica, el TE desplaza las ventanas de transmisión respecto a los instantes previstos. Una estimación conservadora del TE lleva a infrautilizar recursos de red, mientras que una optimista puede generar planificaciones óptimas en teoría, pero que incumplen plazos al ser desplegadas. El correcto ajuste paramétrico del planificador complica a menudo el despliegue y puesta a punto del sistema.

En [3] se presenta el desarrollo preliminar de un banco de pruebas modular basado en Redes de Petri Continuas Temporizadas (TCPN) que evalúa la robustez de planificaciones bajo un modelo afin del reloj, más allá de la comprobación de factibilidad convencional. El presente trabajo extiende ese análisis estudiando los efectos del TE con un modelo de reloj no lineal con fluctuaciones estocásticas.

Relojes, TE y sincronización

El tiempo local τ' de un nodo se relaciona con el tiempo global τ mediante $\tau' = Z(\tau) = x_0 + (1 + y_0)\tau + \phi(\tau)$, donde x_0 es la desviación inicial de tiempo,

y y_0 la desviación de frecuencia y $\phi(\tau)$ la componente de ruido aleatorio del oscilador. El TE se define como $x(\tau) = Z(\tau) - \tau$. Omitiendo $\phi(\tau)$ se obtiene el modelo afin, ampliamente utilizado en la literatura; los relojes reales, sin embargo, presentan fluctuaciones aleatorias debidas a ruido físico e imperfecciones del oscilador que este modelo no captura.

El protocolo gPTP (IEEE 802.1AS [4]) compensa periódicamente la desviación de tiempo x_0 y la de frecuencia y_0 de cada nodo respecto al transmisor de tiempo de referencia mediante marcas temporales en hardware. No obstante, dicha compensación no es perfecta: el TE residual presenta un componente constante (cTE) y otro dinámico (dTE) dominado por las fluctuaciones estocásticas del oscilador. La sincronización reduce el TE pero no lo elimina, por lo que el desplazamiento de las ventanas de transmisión persiste en la práctica.

Cuando dicho desplazamiento supera el margen de la ventana planificada, la trama no logra transmitirse en el instante previsto, produciéndose una *violación de ventana*. El análisis de estas violaciones revela que no sólo la magnitud del TE, sino también su dirección geométrica, juega un papel determinante. Cuando dos nodos adyacentes presentan signos opuestos, sus efectos se suman, maximizando el desplazamiento relativo de las ventanas; cuando son del mismo signo, la desalineación se mantiene acotada. Adicionalmente, si x_0 e y_0 de un mismo nodo tienen signos opuestos, el impacto sobre la planificación puede transitar entre regímenes moderados y críticos dentro de un mismo intervalo de sincronización. La Figura 1 ilustra un ejemplo de este comportamiento.

Simulación y caso de estudio

El simulador de [3] modela cada nodo como un módulo TCPN independiente, interconectados siguiendo la topología de la red, e incluye un módulo de control que abre y cierra las *gates* según la GCL correspondiente. Su arquitectura modular permite incorporar el modelo de reloj de cada nodo escalando las tasas de disparo de la TCPN. En [3] se evalúan

dos planificaciones bajo el modelo afín y se muestra que, aunque ambas consideran margen de TE, una planificación con esperas en cola absorbe mejor las desviaciones de reloj que una sin esperas, a costa de mayor latencia extremo a extremo.

Empleamos el mismo modelo TCPN incorporando el modelo de reloj no lineal en el escalado de las tasas de disparo, aplicado a una TSN con seis flujos, cuya planificación permite esperas en cola sin contemplar margen para el TE. La simulación revela violaciones en el primer ciclo para los flujos s_2 y s_4 y en ciclos posteriores para s_5 y s_6 (Figura 2). Éstas se deben a la ausencia de holgura, ventanas consecutivas sin espera y combinaciones críticas de signos de reloj que, sumadas al ruido acumulado, generan desviaciones relativas entre nodos adyacentes que superan el margen de la ventana.

Conclusiones

Se ha estudiado el impacto del TE sobre planificaciones en TSN, mostrando que no sólo su magnitud, sino también su signo (y, en particular, la combinación de signos entre nodos adyacentes) determinan la aparición de violaciones de ventana. El modelo no lineal revela que el ruido estocástico del oscilador induce violaciones incluso cuando los

parámetros nominales son nulos, lo cual el modelo afín no anticipa. Estos resultados destacan la necesidad de considerar el TE en el diseño de planificaciones y de emplear modelos de reloj realistas para evaluar su validez.

Agradecimientos

Financiación MICIU/AEI/10.13039/501100011033 (PID2022-136454NB-C22) y Gobierno de Aragón (grupo T58_23R), España. A. Torres cuenta con financiación de SECIHTI (1141966), México.

REFERENCIAS

- [1]. IEEE. *IEEE Std 802.1Qbv-2015: Enhancements for Scheduled Traffic*. IEEE, 2016.
- [2]. ITU-T. *G.8260: Definitions and Terminology for Synchronization in Packet Networks*. Rev. + Am. 1. UIT, 2022.
- [3]. TORRES, A. et al. TSN Schedule Verification with Parametric Variation Based on TCPN. *18th WODES*, 2026. Aceptado para publicación.
- [4]. IEEE. *IEEE Std 802.1AS-2025: Timing and Synchronization for Time-Sensitive Applications*. IEEE, 2025.

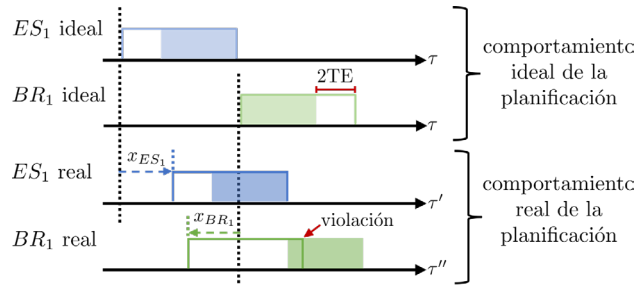


Figura 1: Violación de ventana debida a desviaciones de reloj en los nodos ES_1 y BR_1 ; adaptada de [2].

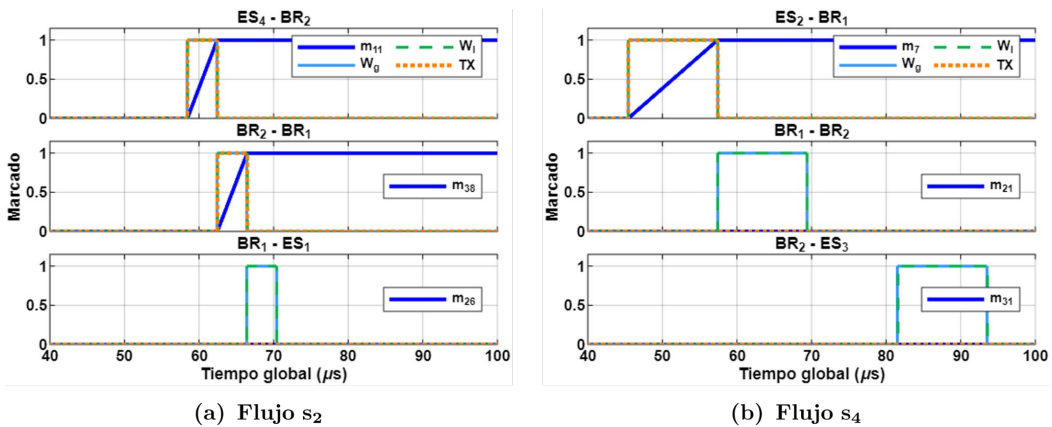


Figura 2: Algunos resultados. Evolución del marcado de la TCPN y las violaciones ocurridas para flujos s_2 y s_4 .