

OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS
ESPAÑA



(11) Número de publicación: **2 978 140**

(21) Número de solicitud: 202330057

(51) Int. Cl.:

H04L 47/24 (2012.01)
H04L 12/28 (2006.01)
H04W 16/00 (2009.01)
H04W 40/00 (2009.01)
H04W 84/00 (2009.01)

(12)

PATENTE DE INVENCIÓN CON EXAMEN

B2

(22) Fecha de presentación:

27.01.2023

(43) Fecha de publicación de la solicitud:

05.09.2024

Fecha de modificación de las reivindicaciones:

04.12.2024

Fecha de concesión:

10.01.2025

(45) Fecha de publicación de la concesión:

17.01.2025

(73) Titular/es:

UNIVERSIDAD DE GRANADA (100.00%)
Hospital Real, Avda. del Hospicio s/n
18071 Granada (Granada) ES

(72) Inventor/es:

CALEYA SÁNCHEZ, Julia;
PRADOS GARZÓN, Jonathan;
AMEIGEIRAS GUTIÉRREZ, Pablo;
CHINCHILLA ROMERO, Lorena;
MUÑOZ LUENGO, Pablo y
LÓPEZ SOLER, Juan Manuel

(74) Agente/Representante:

ESCUDERO PRIETO, Nicolás E.

(54) Título: **MÉTODO DE CONFIGURACIÓN DE REDES SENSIBLES AL RETARDO BASADAS EN PLANIFICADORES CON CONFORMACIÓN DE TRÁFICO ASÍNCRONO, Y CON CALIDAD DE SERVICIO DETERMINISTA**

(57) Resumen:

Método de configuración de redes sensibles al retardo basadas en planificadores con conformación de tráfico asíncrono, y con calidad de servicio determinista.

La invención se refiere a un método de configuración de redes sensibles al retardo, TSN, basadas en planificadores con conformación de tráfico asíncrono, ATS, de una pluralidad de flujos de tráfico, donde el retardo de encolado de paquete para un flujo dado viene determinado por un criterio de ordenación para calidad de servicio determinista. Ventajosamente, dicho método comprende realizar, de forma iterativa en niveles de prioridad creciente: ordenar los retardos de encolado de paquete para la pluralidad de flujos de tráfico; asignar un mismo nivel de prioridad a la pluralidad de flujos; calcular el retardo de encolado de paquetes en el peor de los casos para el nivel de prioridad asignado; seleccionar el flujo con el requisito de retardo de encolado de paquete más estricto para el nivel de prioridad; y verificar que dicho retardo de encolado de paquetes en el peor de los casos es igual o inferior al retardo de encolado de paquete.

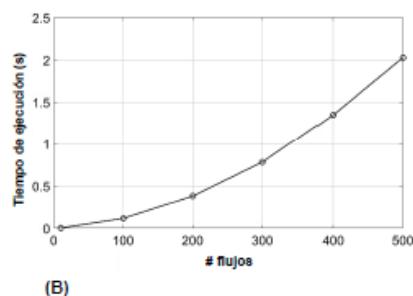


FIG. 2

ES 2 978 140 B2

Aviso: Se puede realizar consulta prevista por el art. 41 LP 24/2015.

Dentro de los seis meses siguientes a la publicación de la concesión en el Boletín Oficial de la Propiedad Industrial cualquier persona podrá oponerse a la concesión. La oposición deberá dirigirse a la OEPM en escrito motivado y previo pago de la tasa correspondiente (art. 43 LP 24/2015).

DESCRIPCIÓN**MÉTODO DE CONFIGURACIÓN DE REDES SENSIBLES AL RETARDO BASADAS EN PLANIFICADORES CON CONFORMACIÓN DE TRÁFICO ASÍNCRONO, Y CON 5 CALIDAD DE SERVICIO DETERMINISTA****CAMPO DE LA INVENCIÓN**

La presente invención se refiere a un método de configuración de redes sensibles al retardo 10 (TSN, del inglés “*Time-Sensitive Networking*”), basadas en planificación con conformación de tráfico asíncrono (ATS, del inglés “*Asynchronous Traffic Shaper*”). La invención resulta aplicable, de forma preferente, a cualquier red de comunicación cableada, aunque sin limitación a otros tipos, para proporcionar conectividad a nivel de enlace de datos o superior, con calidad de servicio determinista (del inglés “*Deterministic Quality of Service*”, 15 también denominado como “*Deterministic QoS*”).

ANTECEDENTES DE LA INVENCIÓN

En la actualidad, Ethernet es la tecnología cableada más popular para proporcionar 20 conectividad a nivel de enlace de datos (capa 2 del modelo OSI, del inglés “*Open Systems Interconnection*”) por su flexibilidad, rendimiento, escalabilidad, costes reducidos y facilidad de operación. Sin embargo, esta tecnología no incluye la funcionalidad necesaria para proporcionar un transporte de flujos de tráfico de red con calidad de servicio (QoS, del inglés “*Quality of Service*”) determinista, donde dicha QoS determinista se interpreta, en el 25 ámbito de la invención, como una garantía de transporte de los flujos de tráfico bajo unos requisitos predefinidos de rendimiento en términos de retardo, en función de la configuración y de la carga de tráfico de la red.

La QoS determinista es, asimismo, una capacidad que está cobrando cada vez más 30 relevancia, al ser un requisito indispensable para proporcionar conectividad en multitud de casos de uso emergentes como, por ejemplo, en la “Industria 4.0”, cirugía remota, producción de audio y vídeo, dominio de transporte en redes móviles, o redes eléctricas inteligentes (“*smart grids*”). Para satisfacer las necesidades de estos casos de uso, en la última década se ha desarrollado la tecnología de las redes sensibles al retardo (en inglés, 35 “*Time-Sensitive Networking*”, o TSN). En este contexto, TSN comprende, principalmente un conjunto de desarrollos sobre el estándar Ethernet IEEE 802.1Q, planteados como

extensiones de las capacidades de la tecnología Ethernet para, entre otras, dar soporte a la QoS determinista. Se prevé que TSN se convierta en la principal tecnología cableada para implementar las redes industriales del futuro.

5 Una de las características clave de TSN para proporcionar garantías de QoS determinista es la presencia de mecanismos específicos de control de tráfico. Estos mecanismos arbitran y gestionan la transmisión de los paquetes en los puertos de salida de los conmutadores TSN, que son dispositivos de red de nivel de enlace de datos (capa 2) que interconectan distintos segmentos de red y que cumplen con la funcionalidad requerida en

10 los estándares TSN. Se pueden distinguir, en este ámbito, dos tipos de mecanismos de control: síncronos y asíncronos.

Los mecanismos síncronos, como por ejemplo aquellos basados en planificadores de paquetes de tipo *“Time-Aware Shaper”* (TAS), requieren que todos los conmutadores TSN

15 estén sincronizados de forma precisa. No obstante, sincronizar los dispositivos TSN dificulta la escalabilidad de la red e incrementa el coste de la misma.

Como alternativa a los planificadores síncronos, se han propuesto también tecnologías de planificadores de tipo *“Asynchronous Traffic Shaper”* (ATS). Al contrario que las redes TSN

20 síncronas, las redes TSN basadas en ATS son más adecuadas para escenarios de gran escala y, en general, para casos de uso en los que no se requiere sincronización para garantizar una QoS determinista.

Encontrar configuraciones válidas para las redes TSN (esto es, configuraciones que

25 cumplen con todos los requerimientos deterministas de rendimiento de los flujos de tráfico de red a ser acomodados) supone un gran desafío técnico a nivel computacional. Ello se debe, principalmente, a la gran complejidad de los mecanismos de control de tráfico y a la flexibilidad ofrecida por los estándares TSN para configurarlos. Así pues, en los últimos

30 años ha surgido, en el campo de la invención, la necesidad de desarrollar soluciones autónomas y escalables para encontrar configuraciones adecuadas de estas redes. Esta necesidad es, actualmente, un requisito fundamental para que la tecnología TSN asíncrona pueda ser explotada y, por tanto, adoptada.

Ante el problema técnico anterior, se han propuesto diferentes alternativas en la literatura,

35 que abordan la configuración de redes TSN basadas en ATS, presentándose un resumen de las mismas a continuación:

En el artículo de J. Specht and S. Samii, “*Synthesis of queue and priority assignment for asynchronous traffic shaping in switched ethernet*” (2017 IEEE Real-Time Systems Symposium (RTSS), 2017, p. 178–187) se aborda la configuración de las redes basadas en planificadores de tipo UBS (del inglés, “*Urgency-Based Scheduler*”), en los cuales se basa el ATS definido en los estándares TSN. Las solución propuesta en este trabajo se basa en el uso de teorías de satisfacibilidad módulo (o SMT, del inglés “*Satisfiability Modulo Theories*”) para encontrar configuraciones factibles de la red (es decir, aquellas que cumplan con los requisitos de retardo de todos los flujos de tráfico a acomodar). Por tanto, las características y requisitos de los flujos de tráfico tienen que ser conocidos a priori, es decir, antes de ejecutar el proceso de optimización. SMT es un método exacto para encontrar soluciones factibles en un problema de optimización que presenta una complejidad exponencial con el tamaño de la entrada. En consecuencia, la solución propuesta no escala bien con el número de flujos de tráfico a acomodar y, eventualmente, para un número de flujos suficientemente grande la búsqueda de una configuración factible se vuelve ineficiente.

Otra alternativa conocida es la de J. Prados-Garzón, T. Taleb y M. Bagaa en “*LEARNET: Reinforcement Learning Based Flow Scheduling for Asynchronous Deterministic Networks*” (ICC 2020 - 2020 IEEE International Conference on Communications (ICC), 2020, p. 1-6). En ella se propone una solución basada en aprendizaje por refuerzo (o RL, del inglés “*Reinforcement Learning*”). Dicha solución asume que los flujos llegan de forma dinámica a la red, y donde sus características y requisitos no son conocidos a priori. Ante una petición para acomodar un nuevo flujo de tráfico, la solución busca la configuración óptima para minimizar su retardo y el retardo de los flujos previamente acomodados (solución “*online*”). El principal problema de esta solución es su baja capacidad de generalización, es decir, la solución depende de la topología de la red y se ha de entrenar de forma específica para cada escenario donde se quiera aplicar. Estos entrenamientos requieren una gran cantidad de datos y necesitan largos períodos de tiempo para lograr la convergencia del agente RL (del orden de varias semanas, o incluso meses, dependiendo de la escala de la red).

Finalmente, en Prados-Garzón, T. Taleb and M. Bagaa, “*Optimization of Flow Allocation in Asynchronous Deterministic 5G Transport Networks by Leveraging Data Analytics*” (IEEE Transactions on Mobile Computing, 2021, doi: 10.1109/TMC.2021.3099979) se propone una solución que combina métodos heurísticos y exactos, basados en optimización lineal y convexa. Dicha solución trata de buscar una configuración a largo plazo de la red TSN

basada en ATS (solución “*offline*”), de modo que se minimice la probabilidad de rechazo de flujo. El escenario de aplicación de esta solución son, principalmente, redes de transporte implementadas con TSN asíncrono para proporcionar conectividad entre los componentes funcionales de las redes móviles públicas. Al igual que en otras alternativas 5 conocidas, la solución propuesta en este trabajo se basa en un método de optimización exacto (optimizadores lineales y convexos), lo que hace que la complejidad computacional crezca exponencialmente con el número de flujos de tráfico a acomodar.

En el contexto anterior, sería deseable encontrar algoritmos mejorados, de complejidad 10 computacional reducida con respecto al número de flujos de tráfico a acomodar, y que permitan su utilización tanto en soluciones *offline* (que se refiere a buscar una configuración a priori a largo plazo) como *online* (que se refiere a hacer una actualización de la configuración siempre que cambien las condiciones de la red, por ejemplo, la llegada de un nuevo flujo). La presente invención se plantea como una solución a los problemas 15 anteriores, mediante un novedoso método de configuración de redes TSN basadas en ATS, que consigue minimizar el número de niveles de prioridad respecto a las técnicas conocidas, bajo requisitos de QoS determinista.

DESCRIPCIÓN BREVE DE LA INVENCIÓN

Como se ha descrito, la invención propuesta permite automatizar el proceso de configuración de las redes TSN basadas en ATS. De este modo, la eficiencia y los costes de operación de estas redes pueden reducirse sustancialmente. Este objetivo se realiza, 20 en un primer objeto de la invención, mediante un método de configuración de una red sensible al retardo, TSN, basada en planificadores con conformación de tráfico asíncrono, ATS, que comprenden una pluralidad de flujos de tráfico, donde el retardo de encolado de paquete para un flujo dado viene determinado por el siguiente criterio de ordenación para calidad de servicio determinista:

$$R_i = D_i - \frac{l_i}{C_e},$$

30 y donde R_i es el retardo de encolado de paquete para el flujo i , D_i es el requisito de retardo exigido del flujo i conocido, según la clase de tráfico de dicho flujo, l_i es el tamaño máximo de paquete del flujo i y C_e es la capacidad del enlace a considerar en la red.

De forma ventajosa, el método de la invención comprende, preferentemente, la realización 35 de los siguientes pasos:

a) se ordenan los retardos de encolado de paquete R_i para la pluralidad de flujos i de tráfico, del flujo más estricto al más laxo;

b) se asigna un mismo nivel de prioridad, p , a la pluralidad de flujos i ;

c) se calcula el retardo de encolado de paquetes en el peor de los casos, Q_p , para

5 el nivel de prioridad p asignado,

d) se selecciona el flujo i con el requisito de retardo de encolado de paquete, R_{m_p} , más estricto para el nivel de prioridad p , siendo m_p el índice del flujo con la restricción del retardo de encolado más estricto asignado al nivel de prioridad p ;

e) si se cumple una condición de retardo donde $Q_p \leq R_{m_p}$, entonces los flujos i

10 pueden ser asignados a ese nivel de prioridad p , finalizándose la configuración de la red;

f) en caso de no cumplirse la condición de retardo, entonces se realiza un particionado de los flujos i , añadiéndose un nivel de prioridad superior, $p-1$;

g) se repiten los pasos b)-f), adaptados a cada nivel de prioridad superior $p-1$ añadido, para todos aquellos flujos que no cumplen con la condición de retardo del paso

15 e), hasta que dicha condición de retardo se cumple para todos los flujos i , en sus correspondientes niveles de prioridad asignados.

En una realización preferente de la invención, Q_p viene dado por:

$$Q_p = \frac{\sum_{\forall i} b_e^i}{C_e}$$

20 donde $\sum_{\forall i} b_e^i$ es la suma del tamaño máximo de ráfaga de paquetes de todos los flujos.

En otra realización preferente de la invención, Q_p viene dado por:

$$Q_p = \frac{\sum_{\forall s \in \mathcal{S}_1 \cup \dots \cup \mathcal{S}_p} b_s + \sum_{\forall s \in \mathcal{S}_{p+1} \cup \dots \cup \mathcal{S}_8} l_s}{C - \sum_{\forall s \in \mathcal{S}_1 \cup \dots \cup \mathcal{S}_{p-1}} r_s} ,$$

25 donde $\sum_{\forall s \in \mathcal{S}_1 \cup \dots \cup \mathcal{S}_p} b_s$ es el sumatorio de todos los tamaños máximos de ráfaga de paquetes de los flujos i que pertenecen a los niveles superiores de prioridad hasta el nivel p , inclusive, y donde $\sum_{\forall s \in \mathcal{S}_{p+1} \cup \dots \cup \mathcal{S}_8} l_s$ es el tamaño máximo de los paquetes del conjunto de flujos i de los niveles de prioridad inferior al nivel de prioridad p hasta el número máximo de niveles de prioridad, C_e es la capacidad de transmisión del enlace y $\sum_{\forall s \in \mathcal{S}_1 \cup \dots \cup \mathcal{S}_{p-1}} r_s$ es el sumatorio de todas las tasas de datos agregadas del conjunto de flujos que pertenecen a todos los niveles de prioridad superior al nivel p .

En otra realización aún más preferente de la invención, Q_p incluye, además, el tamaño mínimo de paquete del conjunto de flujos con el mismo nivel de prioridad $\min_{s \in S_p} l_s$:

$$5 \quad Q_p = \frac{\sum_{s \in S_1 \cup \dots \cup S_p} b_s + \vee_{s \in S_{p+1} \cup \dots \cup S_8} l_s - \min_{s \in S_p} l_s}{C - \sum_{s \in S_1 \cup \dots \cup S_{p-1}} r_s}.$$

Un segundo objeto de la invención se refiere a un conmutador TSN que comprende medios hardware de control de tráfico adaptados para realizar un método según cualquiera de las realizaciones preferentes descritas en el presente documento.

10

Un tercer objeto de la invención se refiere a una red de comunicación que comprende una pluralidad de conmutadores TSN según cualquiera de las realizaciones preferentes descritas en el presente documento.

15 Un cuarto objeto de la invención se refiere a un programa de ordenador que implementa un método según cualquiera de las realizaciones preferentes descritas en el presente documento.

20 Un quinto objeto de la invención se refiere a una señal portadora que implementa un método según cualquiera de las realizaciones preferentes descritas en el presente documento.

25 Como se ha descrito previamente, las aplicaciones de la invención se extienden a cualquier ámbito en el que se requiera una red cableada para proporcionar conectividad de capa 2 o superior con QoS determinista. Más preferentemente, la invención puede aplicarse ventajosamente a los siguientes escenarios:

30 Redes TSN industriales: Se espera que las redes TSN sustituyan a las redes cableadas actuales para proporcionar conectividad de ultra fiable y de baja latencia en los distintos sectores industriales. Por ejemplo, en el contexto de la industria manufacturera, la cuarta revolución industrial, conocida popularmente como Industria 4.0, consiste en explotar las Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC) para conseguir una mayor eficiencia en los procesos de producción industrial. En este contexto, TSN es una firme candidata para proporcionar conectividad entre los componentes de la tecnología operacional de las 35 fábricas inteligentes. Otros sectores que adoptarán o se espera que adopten TSN son la

industria de producción de audio y vídeo, producción energética y producción de sistemas autónomos, entre otras.

TSN para el transporte en redes móviles (celulares): Las futuras redes móviles (quinta generación en adelante) proporcionarán acceso radio a una gran variedad de servicios con características en sus perfiles de tráfico de red y requisitos muy heterogéneos. En este contexto, se espera que TSN implemente la conectividad de capa 2 en las redes de transporte (redes que sirven para interconectar los distintos componentes funcionales de una red móvil) al dar soporte a los servicios con QoS determinista y permitir su coexistencia con otros tipos de tráfico. Esto se traduce en usar una sola infraestructura de red para implementar toda la red de transporte que se traduce en una reducción en los costes de despliegue y operación. En este escenario, las redes TSN basadas en ATS (las consideradas en la invención propuesta) cobran especial relevancia al no necesitar que los conmutadores TSN estén sincronizados entre sí. La sincronización impone un límite en el tamaño de la red (escalabilidad) y además es costosa de implementar.

La invención descrita en este documento es aplicable a todos los escenarios mencionados para posibilitar la configuración eficiente y escalable de las redes TSN basadas en ATS. Más preferentemente, la invención resulta de aplicación a redes TSN basadas en ATS en una arquitectura centralizada, es decir, donde los conmutadores TSN pueden ser configurados y controlados remotamente por un controlador (comúnmente llamado controlador TSN), lógicamente centralizado. Por un lado, este controlador recopila y compone los requisitos de los distintos flujos a acomodar en la red a través de un protocolo de configuración específico de la aplicación, como por ejemplo OPC-UA. Por otro lado, usando como entrada estos requisitos e información topológica de la red, este controlador TSN ejecuta algoritmos (como el que implementa el método de la invención) para computar configuraciones en la red TSN de forma autónoma. Estas configuraciones son posteriormente aplicadas en la red mediante la configuración individualizada de los distintos conmutadores TSN a través de un protocolo de gestión de red como puede ser RESTCONF, NETCONF y/o SNMP, aunque sin limitación a otros.

Respecto a las ventajas técnicas de la invención, ésta posibilita la priorización del tráfico en un planificador de ATS definido en la enmienda IEEE P802.1Qcr a las especificaciones de Ethernet IEEE 802.1Q. Así, la invención propuesta permite priorizar un número arbitrario de flujos de tráfico de red en un ATS, de modo que se garanticen los requisitos de retardo máximos para los mismos. La ejecución del método de la invención encuentra, de este

modo, la solución óptima en términos del número mínimo de niveles de prioridad necesarios para cumplir con los requerimientos de retardo de los flujos y, además, tiene una complejidad computacional reducida y escalable con respecto al número de flujos a priorizar. También cabe mencionar que el método encuentra solución siempre que la 5 misma exista (quedando, por tanto, fuera del ámbito de protección de la invención aquellos casos en los que la red no permite una solución factible en cuanto a que todos los flujos cumplan con sus requisitos de retardo y que presenta, además, complejidad reducida). Asimismo, el método de la invención se puede complementar con mecanismos de establecimiento de rutas en la red y de distribución de retardo para configurar redes TSN, 10 basadas en ATS de forma escalable y completamente automatizada.

En cuanto a los beneficios económicos, la invención propuesta permite reducir los costes de operación de las redes TSN basadas en ATS, gracias a la automatización del proceso de configuración (al no necesitar intervención humana para llevar a cabo la priorización de 15 los flujos de tráfico). Además, los operadores de dichas redes también harían un mejor aprovechamiento de los recursos de red dado que el método es capaz de acomodar los flujos de tráfico de red en los niveles de prioridad existentes siempre que sea posible. En otras palabras, la tasa de éxito del método propuesto para encontrar una priorización válida para un conjunto de flujos (que cumpla con los requisitos de retardo máximo para todos y 20 cada uno de los flujos) es la máxima posible. Esto se traduce en una menor tasa de rechazo de flujo que se traduce directamente en beneficios económicos para el operador de la red TSN basada en ATS.

DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS

25 La Figura 1 representa un diagrama (a) de prioridades obtenido con el método de la invención, en una realización preferente de la misma, donde se compara con un método (b) basado en fuerza bruta (entendida como una búsqueda exhaustiva de todos los casos posibles de priorización de los flujos), para nueve escenarios de simulación.

30 La Figura 2 muestra los resultados de tiempo de ejecución obtenidos en el ejemplo de la Figura 1, representados en función del número de flujos, donde la Figura 2A muestra los tiempos de ejecución basados en fuerza bruta, y la Figura 2B muestra los tiempos de ejecución obtenidos según el método de la invención, para una realización preferente de la 35 misma.

DESCRIPCIÓN DETALLADA DE LA INVENCIÓN

El objeto de la invención se refiere, según lo descrito en apartados precedentes, a un método de configuración de una red TSN basada en ATS que permite, ventajosamente,

5 encontrar la correcta asignación de prioridades de un número arbitrario de flujos de tráfico de dicha red, de modo que se garanticen los requisitos de retardo máximos de los flujos, bajo QoS determinista. La invención permite, así, obtener la solución óptima de priorización para un conjunto de flujos en un único enlace del ATS.

10 Preferentemente, el método propuesto considera que las características y requisitos de rendimiento deterministas de los flujos de tráfico son conocidos a priori. Esta situación suele ser la más común en la realidad cuando se quieren acomodar comunicaciones críticas. Concretamente, las características de cada clase de tráfico que deben conocerse de antemano para la realización del método de la invención se desglosan en la Tabla 1, a

15 continuación:

Notación	Descripción
r_q	Velocidad de datos agregada de los flujos con clase de tráfico ' q '.
b_q	tamaño máximo de ráfaga de paquetes de los flujos con clase de tráfico ' q '.
l_q	Tamaño de paquetes de los flujos con clase de tráfico ' q '.
D_q	Retardo "extremo a extremo" de los flujos con clase de tráfico ' q '.
S_a	Flujo ' a '.
$S = S_a \cup \dots \cup S_v$	Conjunto de todos los flujos.
$\hat{s} = \min_{s \in S \setminus P} R_s$	Flujo con el requisito de retardo de encolado más estricto.
$S_P = S_a \cup \dots \cup S_d$	Conjunto de los flujos pertenecientes a la prioridad ' p '.
\hat{s}	Flujo con el requisito de retardo de encolado más estricto de la prioridad ' p '.

Tabla 1

Asimismo, se define $b_q > l_q$ como el tamaño máximo de ráfaga de paquetes (en inglés, 20 "burstiness") que un flujo puede generar en un momento determinado.

Con la parametrización anterior, se consideran las siguientes variables de decisión:

- R_i es el retardo de encolado de paquetes requerido de los flujos i . Ha de observarse, además, que $R_i = D_i - \frac{l_i}{C}$, donde C es la capacidad de enlace.

5 • Q_p es el retardo de encolado de paquetes en el peor de los casos para el nivel de prioridad p .

• c_p es el índice del flujo que posee una restricción de retardo de encolado de paquetes más laxa asignada al nivel de prioridad p .

• m_p es el índice del flujo que posee una restricción de retardo de encolado de paquetes 10 más estricta asignada al nivel de prioridad p .

Sin pérdida de generalidad, el método de la invención asume que los diferentes flujos se ordenan de acuerdo con sus restricciones de retardo de encolado de paquetes R_i , es decir, $R_a \leq R_b \leq R_c \leq \dots \leq R_s$, donde s es el número de flujos que deben acomodarse.

15 Asimismo, se considera con carácter general un TSN asíncrono que comprende una pluralidad de flujos S ($S_a, S_b, S_c, \dots, S_z$). En este contexto, el problema de asignación de prioridades abordado por el método de la invención se basa, principalmente, en encontrar la configuración óptima de prioridades mínimas (P_s) si existen salidas en un ATS para los 20 diferentes flujos. Bajo la presente propuesta, el método se basa en la minimización del número de prioridades mediante el incremento del número de flujos asignados a una prioridad específica.

Existen Q tipos o clases de tráfico en la red. Para ellos, el método parte de la suposición 25 de que todos los flujos con el mismo tipo de tráfico q tienen las mismas características de tráfico, como se ha descrito previamente.

Formalmente, el problema de la asignación de prioridad abordado por el método de la invención puede formularse de la siguiente manera:

30

$$\text{minimizar } \left\{ \max_{s \in S} P_s \right\} \quad (1)$$

$$Q_{Ps} \leq R_{ms} \quad \forall s \in S \quad (2)$$

$$P_s \in [1, 2, \dots, 8] \text{ entero.} \quad (3)$$

En la ecuación (3) anterior se ha considerado, como ejemplo, que el número máximo de prioridades que se emplea en la red sea de ocho. No obstante, el experto en la materia entenderá que este número se puede generalizar a un número arbitrario ' P_s '.

5 En el contexto anterior, el método de la invención comprende la realización de los siguientes pasos, en cualquier orden técnicamente posible:

Los flujos individuales deben clasificarse de acuerdo con el siguiente criterio de clasificación:

10

$$R_i = D_i - \frac{l_i}{C_e} \quad \forall i \in \mathcal{S}, \quad (4)$$

es decir, D_i es el requisito de retardo de paquetes para el flujo ' i ', l_i es el tamaño máximo del paquete para el flujo ' i ', C_e es la capacidad de enlace y R_i es el retardo de encolado de

15 paquetes requerido para el flujo ' i '. Los valores se ordenan de menor a mayor para determinar el orden en que se colocan los flujos para calcular su prioridad.

El retardo de encolado de paquetes (Q_p) en el peor de los casos (w_c), también denominada como WCQD (del inglés “worst case queuing delay”), para una prioridad ' p ' dada debe ser

20 inferior al requisito de retardo de encolado de paquetes para el flujo en ese nivel con el criterio de ordenación más estricto:

$$Q_p = \frac{\sum_{\forall i} b_e^i}{C_e} \quad \text{donde} \quad Q_p \leq R_a, \quad (5)$$

25 y donde $\sum_{\forall i} b_e^i$ es la suma del tamaño máximo de ráfaga de paquetes de todos los flujos y R_a es el requisito de retardo de encolado de paquetes para el flujo ' a ', que es el flujo con el mayor requisito de retardo de encolado de paquetes según el criterio de ordenación. Si no se cumple que el retardo de encolado de paquetes en el peor de los casos (w_c) del nivel de prioridad (Q_p) es menor, estos flujos no pueden compartir prioridad y deben modificarse.

30

Suponiendo que la ecuación (4) no se cumple, debe existir un flujo ' f ' para el cual se satisface que $Q_p \leq R_f$ bajo el supuesto de que todos los flujos con menor requerimiento (R_a, R_b, \dots, R_e) se acomodan en un nivel de prioridad más alto.

35

$$Q_p = \frac{\sum_{\forall i} b_e^i}{C_e - \sum_{\forall i \in P_0} r^i} \quad \text{donde} \quad Q_p \leq R_f, \quad (6)$$

y donde $\sum_{i \in P_0} r^i$ es la velocidad de datos agregada de cada uno de los flujos de nivel de prioridad superior y R_f es el retardo de encolado de paquetes requerido para los flujos con el retardo más bajo según el criterio de clasificación. Asimismo, en realizaciones adicionales de la invención, la ecuación (6) anterior puede tener en cuenta otros factores, tales como el tamaño máximo de los paquetes del conjunto de flujos con niveles de prioridad inferior:

$$10 \quad Q_p = \frac{\sum_{s \in \mathcal{S}_1 \cup \dots \cup \mathcal{S}_p} b_s + \vee_{s \in \mathcal{S}_{p+1} \cup \dots \cup \mathcal{S}_8} l_s}{C - \sum_{s \in \mathcal{S}_1 \cup \dots \cup \mathcal{S}_{p-1}} r_s}, \quad (7)$$

donde $\sum_{s \in \mathcal{S}_1 \cup \dots \cup \mathcal{S}_p} b_s$ es el sumatorio de todos los tamaños máximos de ráfaga de paquetes de los flujos i que pertenecen a los niveles superiores de prioridad hasta el nivel p , inclusive, y donde $\vee_{s \in \mathcal{S}_{p+1} \cup \dots \cup \mathcal{S}_8} l_s$ es el tamaño máximo de los paquetes del conjunto de flujos i de los niveles de prioridad inferior al nivel de prioridad p hasta el número máximo de niveles de prioridad, C es la capacidad de transmisión del enlace y $\sum_{s \in \mathcal{S}_1 \cup \dots \cup \mathcal{S}_{p-1}} r_s$ es el sumatorio de todas las tasas de datos agregadas del conjunto de flujos que pertenecen a todos los niveles de prioridad superior al nivel p .

20 Aún más preferentemente, la expresión de Q_p puede incluir también el tamaño mínimo de paquete del conjunto de flujos con el mismo nivel de prioridad $\min_{s \in \mathcal{S}_p} l_s$:

$$25 \quad Q_p = \frac{\sum_{s \in \mathcal{S}_1 \cup \dots \cup \mathcal{S}_p} b_s + \vee_{s \in \mathcal{S}_{p+1} \cup \dots \cup \mathcal{S}_8} l_s - \min_{s \in \mathcal{S}_p} l_s}{C - \sum_{s \in \mathcal{S}_1 \cup \dots \cup \mathcal{S}_{p-1}} r_s}. \quad (8)$$

25 Resultados

Se ha comprobado el correcto funcionamiento del método de la invención, comparando la priorización resultante para un conjunto de flujos con la priorización obtenida con la solución propuesta en el artículo de J. Prados-Garzón, L. Chinchilla-Romero, P. 30 Ameigeiras, P. Muñoz and J. M. Lopez-Soler, “*Asynchronous Time-Sensitive Networking for Industrial Networks*” (2021 Joint European Conference on Networks and Communications & 6G Summit (EuCNC/6G Summit), 2021, pp. 130-135, doi: 10.1109/EuCNC/6GSummit51104.2021.9482597). Los escenarios que se han analizado se han generado de forma aleatoria, donde se incrementa el número de flujos de la red 35 variando también los requisitos deterministas de cada uno de los flujos, es decir, la tasa de

datos, el tamaño máximo de ráfaga de paquetes, el tamaño de paquete y el retardo exigido. Asimismo para cada escenario también se modifica la utilización de la red y la capacidad de los enlaces. Cada uno de los escenarios se ha simulado tanto para el método de la invención como para una búsqueda exhaustiva (fuerza bruta). En la Figura 1 se observa 5 cómo se obtienen los mismos resultados de priorización para ambos métodos (señalados como (a) y (b), respectivamente, en la figura). En esta simulación se han considerado nueve escenarios aleatorios mientras que se incrementa el número de flujos existente en la red.

También se puede comprobar que el método de la invención tiene una complejidad 10 computacional reducida, según se muestra en la Figura 2. En ella se representa el tiempo de ejecución del método de fuerza bruta utilizado en el ejemplo de la Figura (Fig. 2A), y éste se compara con el método de la invención (Fig. 2B). El rendimiento del método implementado es, como se aprecia, superior al obtenido con el método de fuerza bruta para un mismo escenario, con igual asignación de prioridades. Se comprueba que el tiempo de 15 ejecución del método de la invención para obtener unos resultados de asignación es inferior al tiempo empleado por la fuerza bruta.

REIVINDICACIONES

1.- Método implementado por ordenador para la configuración de una red sensible al retardo, TSN, basada en planificadores con conformación de tráfico asíncrono, ATS, que 5 comprenden una pluralidad de flujos de tráfico, donde el retardo de encolado de paquete para un flujo dado viene determinado por el siguiente criterio de ordenación para calidad de servicio determinista:

$$R_i = D_i - \frac{l_i}{C_e},$$

donde R_i es el retardo de encolado de paquete para el flujo i , D_i es el requisito de retardo 10 exigido del flujo i conocido, según la clase de tráfico de dicho flujo, l_i es el tamaño máximo de paquete del flujo i y C_e es la capacidad del enlace que conforma la red;

y **caracterizado por que** comprende la realización de los siguientes pasos:

a) se ordenan los retardos de encolado de paquete R_i para la pluralidad de flujos i de tráfico, del flujo más estricto al más laxo;

15 b) se asigna un mismo nivel de prioridad, p , a la pluralidad de flujos i ;

c) se calcula el retardo de encolado de paquetes en el peor de los casos, Q_p , para el nivel de prioridad p asignado,

d) se selecciona el flujo i con el requisito de retardo de encolado de paquete, R_{m_p} , más estricto para el nivel de prioridad p , siendo m_p el índice del flujo con la restricción del

20 retardo de encolado más estricto asignado al nivel de prioridad p ;

e) si se cumple una primera condición de que $Q_p \leq R_{m_p}$, entonces los flujos i son asignados a ese nivel de prioridad p , finalizándose la configuración de la red;

f) en caso de no cumplirse la primera condición, entonces se realiza un particionado de los flujos i , añadiéndose un nivel de prioridad superior, $p-1$;

25 g) se repiten los pasos b)-f), adaptados a cada nivel de prioridad superior $p-1$ añadido, para todos aquellos flujos que no cumplen con la condición de retardo del paso e), hasta que dicha condición de retardo se cumple para todos los flujos i , en sus correspondientes niveles de prioridad asignados.

30 2.- Método según la reivindicación anterior, donde Q_p viene dado por

$$Q_p = \frac{\sum_{\forall i} b_e^i}{C_e},$$

y donde $\sum_{\forall i} b_e^i$ es la suma del tamaño máximo de ráfaga de paquetes de todos los flujos.

3.- Método según la reivindicación 1, donde Q_p viene dado por:

5

$$Q_p = \frac{\sum_{\forall s \in \mathcal{S}_1 \cup \dots \cup \mathcal{S}_p} b_s + \vee_{\forall s \in \mathcal{S}_{p+1} \cup \dots \cup \mathcal{S}_8} l_s}{C - \sum_{\forall s \in \mathcal{S}_1 \cup \dots \cup \mathcal{S}_{p-1}} r_s},$$

donde $\sum_{\forall s \in \mathcal{S}_1 \cup \dots \cup \mathcal{S}_p} b_s$ es el sumatorio de todos los tamaños máximos de ráfaga de paquetes de los flujos i que pertenecen a los niveles superiores de prioridad hasta el nivel

10 p , inclusive, y donde $\vee_{\forall s \in \mathcal{S}_{p+1} \cup \dots \cup \mathcal{S}_8} l_s$ es el tamaño máximo de los paquetes del conjunto de flujos i de los niveles de prioridad inferior al nivel de prioridad p hasta el número máximo de niveles de prioridad, C es la capacidad de transmisión del enlace y $\sum_{\forall s \in \mathcal{S}_1 \cup \dots \cup \mathcal{S}_{p-1}} r_s$ es el sumatorio de todas las tasas de datos agregadas del conjunto de flujos que pertenecen a todos los niveles de prioridad superior al nivel p .

15

4.- Método según la reivindicación anterior, donde Q_p incluye, además, el tamaño mínimo de paquete del conjunto de flujos con el mismo nivel de prioridad $\min_{\forall s \in \mathcal{S}_p} l_s$:

20

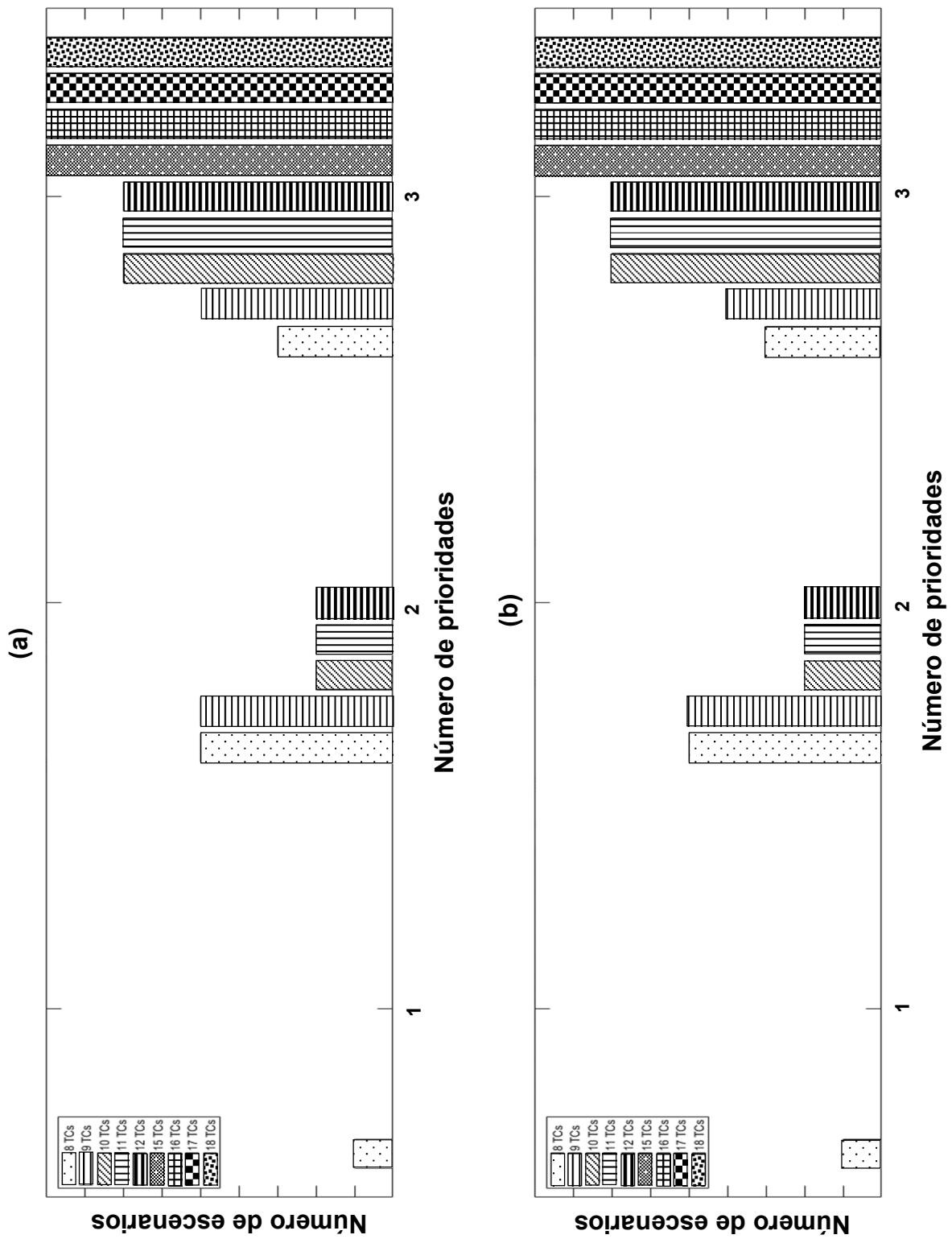
$$Q_p = \frac{\sum_{\forall s \in \mathcal{S}_1 \cup \dots \cup \mathcal{S}_p} b_s + \vee_{\forall s \in \mathcal{S}_{p+1} \cup \dots \cup \mathcal{S}_8} l_s - \min_{\forall s \in \mathcal{S}_p} l_s}{C - \sum_{\forall s \in \mathcal{S}_1 \cup \dots \cup \mathcal{S}_{p-1}} r_s}.$$

5.- Conmutador TSN que comprende medios hardware de control de tráfico adaptados para realizar un método según cualquiera de las reivindicaciones anteriores.

25 6.- Red de comunicación que comprende una pluralidad de conmutadores TSN según la reivindicación anterior.

7.- Programa de ordenador que implementa un método según cualquiera de las reivindicaciones 1-4.

30 8.- Señal portadora que implementa un método según cualquiera de las reivindicaciones 1-4.

**FIG. 1**

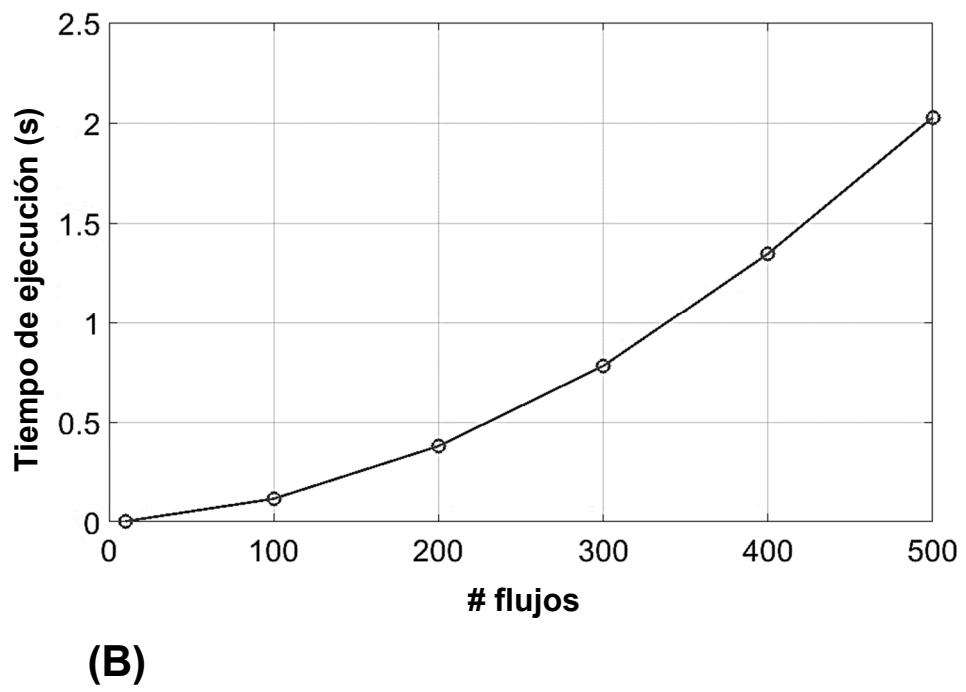
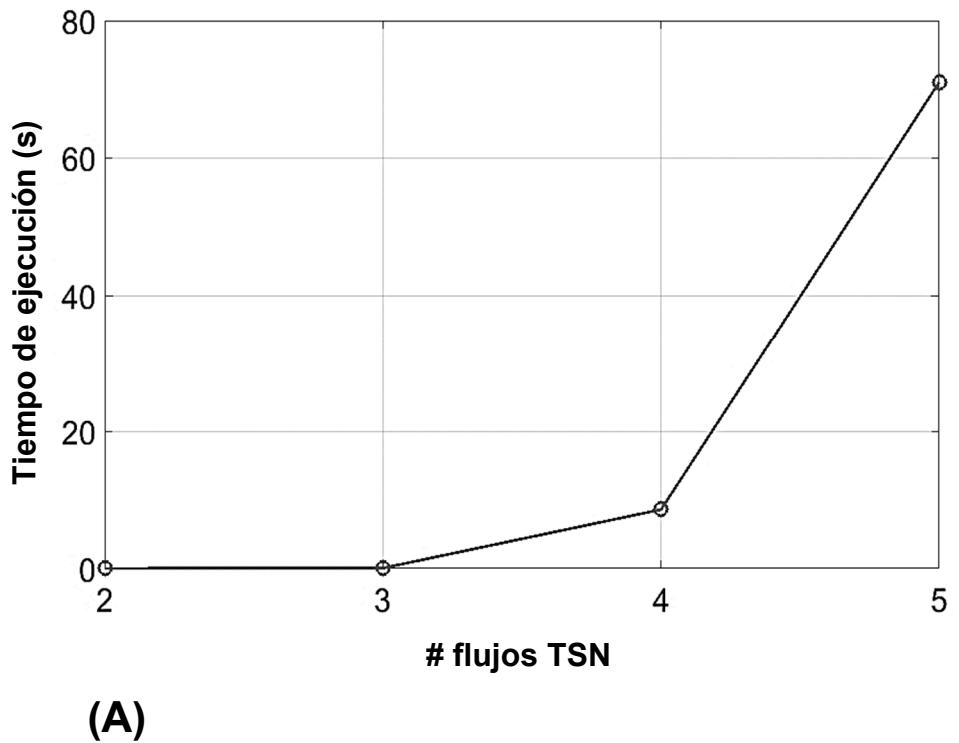


FIG. 2