

ESTUDIO COMPARATIVO DE GESTIÓN DE REDES CENTRADAS EN INFORMACIÓN Y REDES IP

Yosdalys Villar Domínguez¹

¹Centro de Operaciones de la Red, Empresa de Telecomunicaciones de Cuba S.A, calle 19 e/ B y C, Plaza de la
Revolución, La Habana, Cuba

¹e-mail: yosdalys.villar@etecsa.cu

RESUMEN

La arquitectura tradicional de redes IP ha sustentado el desarrollo de Internet durante décadas, pero enfrenta crecientes limitaciones ante las demandas de aplicaciones emergentes como el IoT masivo, las redes vehiculares y los servicios 6G. En este artículo se presenta un análisis comparativo, sustentado en la literatura científica, entre los modelos de gestión de redes IP y las arquitecturas centradas en información, que emergen como alternativa para una Internet más eficiente y flexible. Se abordan aspectos fundamentales como direccionamiento, enrutamiento, control de tráfico, monitoreo, seguridad, escalabilidad y estrategias de despliegue. El estudio identifica los principales desafíos de gestión en ambos paradigmas, destacando cómo el modelo ICN permite una gestión nativa del contenido, mayor eficiencia en la distribución, seguridad a nivel de datos y soporte a la movilidad. Además, se analizan casos de uso en entornos dinámicos como IoT e IoV, así como escenarios de integración híbrida IP-ICN mediante tecnologías como SDN. Este trabajo proporciona una visión clara del estado del arte y resalta las oportunidades y retos que deben abordarse para una transición efectiva hacia redes centradas en contenido.

PALABRAS CLAVES: Gestión de redes, Redes Centradas en Información (ICN), Redes IP, Internet de las Cosas (IoT), Internet de los Vehículos (IoV).

MANAGEMENT COMPARATIVE STUDY OF INFORMATION-CENTRIC NETWORK AND IP NETWORKS

ABSTRACT

Traditional IP network architecture has supported Internet development for decades, but it faces increasing limitations in the face of emerging application demands such as massive IoT, vehicular networks, and 6G services. This article presents a comparative analysis, based on scientific literature, between IP network management models and information-centric architectures, which are emerging as an alternative for a more efficient and flexible Internet. Fundamental aspects such as addressing, routing, traffic control, monitoring, security, scalability, and deployment strategies are addressed. The study identifies the main management challenges in both paradigms, highlighting how the ICN model enables native content management, greater distribution efficiency, data-level security, and mobility support. In addition, use cases in dynamic environments such as IoT and IoV are analyzed, as well as hybrid IP-ICN integration scenarios using technologies such as SDN. This work provides a clear overview of the state of the art and highlights the opportunities and challenges that must be addressed for an effective transition to content-centric networks.

INDEX TERMS: Network management, Information-Centric Networks (ICN), IP networks, Internet of Things (IoT), Internet of Vehicles (IoV).

1. INTRODUCCIÓN

El paradigma de comunicación basado en el Protocolo de Internet (IP, siglas del término en inglés Internet Protocol) ha sido la columna vertebral de la conectividad global durante décadas. Sin embargo, la evolución hacia aplicaciones como el Internet de las Cosas (IoT, siglas del término en inglés Internet of Things) masivo, la computación en el borde, los vehículos autónomos y las redes 6G [1] ha expuesto las limitaciones del modelo IP original, diseñado para comunicaciones punto a punto estáticas. Estos nuevos escenarios demandan baja latencia, alta movilidad y seguridad granular, requisitos difíciles de satisfacer con una arquitectura centrada en la ubicación del host [2].

El uso moderno de Internet está abrumadoramente orientado al contenido. Los usuarios y las aplicaciones buscan acceder a datos específicos, por ejemplo, un video en 4K, un conjunto de datos para inteligencia artificial, una actualización de firmware para un dispositivo IoT, sin preocuparse por el servidor que los aloja. Para hacer frente a esta realidad, se han implementado soluciones superpuestas como las Redes de Distribución de Contenidos (CDN, siglas del término en inglés Content Distribution Networks), que intentan acercar el contenido al usuario. No obstante, estas soluciones representan optimizaciones reactivas que operan sobre la arquitectura IP, añadiendo complejidad de gestión, centralización y costos operativos sin resolver el problema arquitectónico subyacente de la comunicación basada en la ubicación [3], [4].

Como respuesta proactiva a estos desafíos, la comunidad investigadora ha madurado el paradigma de las Redes Centradas en Información (ICN, siglas del término en inglés Information-Centric Networking). ICN propone un cambio fundamental: pasar de preguntar "¿dónde está el host?" a preguntar "¿qué contenido busco?" [5]. En las arquitecturas ICN, como la prominente Red de Datos Nombrados (NDN, siglas del término en inglés Named Data Networking), la comunicación se basa en el intercambio de paquetes de interés y de datos, donde los nombres del contenido son los elementos enrutables de la red. Este enfoque habilita de forma nativa funcionalidades que en IP son complejas o ineficientes: el almacenamiento en caché universal dentro de la red (in-network caching), una distribución de datos eficiente a múltiples receptores (multicast), y un modelo de seguridad centrado en los datos mismos, donde cada fragmento de contenido es criptográficamente firmado y verificable independientemente de su origen o la ruta que tomó [6].

Esta transición arquitectónica tiene profundas implicaciones para la gestión de la red. Mientras que la gestión en redes IP se ha consolidado en torno a protocolos como SNMP (siglas del término en inglés Simple Network Management Protocol) y modelos más recientes como las Redes Definidas por Software (SDN, siglas del término en inglés Software Defined Networks) para centralizar el control sobre la infraestructura, la gestión en ICN debe operar sobre nuevos principios [7], [8]. La gestión del estado de los cachés, la monitorización del rendimiento basada en la popularidad del contenido, la aplicación de políticas de seguridad sobre datos nombrados y la orquestación de recursos de computación y almacenamiento dentro de la red representan un conjunto de desafíos y oportunidades radicalmente nuevos [6], [9].

El presente artículo de revisión bibliográfica aborda esta brecha crítica mediante un análisis comparativo de los modelos de gestión en redes IP tradicionales y en arquitecturas ICN. Luego de un estudio de los fundamentos básicos de las redes IP tradicionales y las ICN indagando en la literatura científica reciente, se identifican, categorizan y contrastan los mecanismos, herramientas y desafíos asociados a la gestión en ambos paradigmas. Además, se ofrece una síntesis clara del estado del arte, ilustrando las ventajas, los retos pendientes y las futuras líneas de investigación en la gestión de redes, en el contexto de la posible evolución de Internet hacia un modelo centrado en la información.

2. METODOLOGÍA DE BÚSQUEDA BIBLIOGRÁFICA

Para la realización de este estudio se consultaron diversas bases de datos científicas reconocidas en el ámbito de las telecomunicaciones y la ingeniería de redes, las cuales permiten acceder a literatura revisada y documentos técnicos validados. Las principales bases consultadas fueron Scopus y SciELO. Complementariamente, se revisaron libros, tesis, informes técnicos y recomendaciones oficiales de organismos reguladores del sector telecomunicaciones.

Preguntas de investigación formuladas

La búsqueda bibliográfica se guió por las siguientes preguntas de investigación, que orientaron la identificación de estudios pertinentes para el análisis comparativo:

PI1: ¿Cuáles son las principales diferencias en los modelos de gestión entre redes IP tradicionales y redes centradas en información?

PI2: ¿Qué desafíos y oportunidades presenta la gestión de redes centradas en información frente a las arquitecturas IP convencionales?

PI3: ¿Qué metodologías y técnicas de gestión se emplean en redes ICN?

PI4: ¿Cómo se aborda la escalabilidad, seguridad y calidad de servicio en redes ICN comparado con redes IP?

PI5: ¿Qué casos de uso y aplicaciones emergentes refuerzan la adopción de redes centradas en información?

Palabras clave utilizadas

Para la búsqueda, se emplearon palabras clave que permitieron filtrar documentos directamente relacionados con la temática objeto de estudio. Algunas de las palabras clave y frases utilizadas fueron:

- "Gestión de redes".
- "Redes centradas en información" (*Information-Centric Networking*, ICN).
- "Redes IP" (*IP Networks*).
- "Enrutamiento basado en contenido".
- "Internet de las cosas" (IoT).
- "Redes vehiculares" (IoV, *Internet of Vehicles*).
- "*Software Defined Networks*" (SDN).
- "*Caching en red*" (*in-network caching*).

Metodología de selección de artículos

La metodología de selección de artículos se basó en evaluar de forma rigurosa la pertinencia, calidad y actualidad de las fuentes encontradas. Se seleccionaron aquellos trabajos que abordaban directamente la gestión de redes IP tradicionales y redes centradas en información, asegurando que el contenido fuera relevante y aportara información detallada sobre mecanismos de gestión, escalabilidad, seguridad, calidad de servicio y casos de uso. Además, se priorizaron publicaciones recientes, de los últimos 10 años, para reflejar los avances más actuales del campo. La calidad científica fue otro criterio fundamental, por lo que se incluyeron solo documentos publicados en revistas y conferencias indexadas. También se integraron libros, estándares y documentos técnicos reconocidos para obtener una perspectiva más completa. Cada artículo fue leído con atención, haciendo énfasis en su resumen, introducción y conclusiones para verificar su adecuación al objeto de estudio y descartando duplicados o textos con contenido redundante.

3. FUNDAMENTOS DE LAS REDES IP TRADICIONALES Y LAS ICN

Principales características de las redes IP

Los principales conceptos de las redes IP giran en torno al uso del Protocolo de Internet como base para la identificación, el direccionamiento y la transmisión de datos en entornos digitales, siendo el modelo predominante en el funcionamiento de Internet y las redes corporativas actuales. En esta sección se abordan, de forma general, los principales conceptos y características de las redes IP tradicionales.

Identificación y direccionamiento:

El direccionamiento IP constituye la base de la identificación en estas redes: cada dispositivo conectado recibe una dirección IP única, que funciona como identificador lógico y facilita la localización dentro de la red. Existen dos versiones principales: IPv4, con 32 bits de longitud, permitiendo alrededor de 4.300 millones de direcciones únicas, e IPv6, con 128 bits (un espacio virtualmente inagotable). En el caso de las direcciones IPv4, se dividen en cinco clases: A, B, C, D y E. Cada clase tiene una máscara de subred predeterminada diferente y cumple distintas funciones [10]. La asignación de direcciones puede realizarse de manera estática, asignando una IP fija, o dinámica, utilizando protocolos como DHCP (siglas del término en inglés *Dynamic Host Configuration Protocol*), que automatizan la entrega y gestión de direcciones. También pueden ser públicas, para comunicación a través de Internet, o privadas, para el uso interno en LAN (siglas del término en inglés *Local Area Network*), conforme a lo especificado en la RFC 1918 [11].

Transmisión de datos:

La información en una red IP viaja fragmentada en paquetes o datagramas, cada uno con un encabezado que especifica las direcciones de origen y destino. El encaminamiento de estos paquetes se realiza de manera independiente, permitiendo que puedan seguir rutas distintas hasta llegar a su destino, donde los datos se reensamblan en el orden correcto. IP es un protocolo no orientado a conexión y opera bajo el principio de "mejor

esfuerzo”, no garantiza la entrega de los paquetes ni el orden de llegada, ni asegura la integridad de los datos; la corrección de errores y la confiabilidad recaen en protocolos de nivel superior como TCP (siglas del término en inglés Transmission Control Protocol) o UDP (siglas del término en inglés User Datagram Protocol). Esto otorga a las redes IP gran flexibilidad, aunque implica la necesidad de mecanismos adicionales para mitigar pérdidas, duplicados o errores [12].

Esquemas de encaminamiento y enrutamiento:

El enrutamiento en redes IP es el proceso por el cual los routers determinan la ruta óptima que seguirán los paquetes desde el origen al destino calculados en tablas de enrutamiento y protocolos como OSPF (siglas del término en inglés Open Shortest Path First) y BGP (siglas del término en inglés Border Gateway Protocol), esenciales para la eficiencia y la escalabilidad de Internet [13], [14].

Protocolo TCP/IP y arquitectura en capas:

El modelo de arquitectura en capas TCP/IP, que sustenta las redes IP tradicionales, consta de cuatro capas principales, cada una con funciones y protocolos específicos que facilitan la comunicación entre dispositivos en redes heterogéneas. Este modelo es la base de la operatividad de Internet y de la mayoría de las redes modernas. Las capas del modelo TCP/IP se organizan jerárquicamente, cada una con funciones específicas que facilitan la comunicación en redes. Primero, la Capa de Acceso a la Red (o de interfaz de red) es la más baja y se encarga de la transmisión física de los datos dentro de una red local, gestionando cómo se envían los bits a través de cables o señales inalámbricas e interactuando con hardware como tarjetas de red y switches. Luego, la Capa de Internet es responsable del direccionamiento lógico y el enrutamiento de los paquetes a través de diferentes redes, usando direcciones IP para enviar la información desde el origen al destino, independientemente de la ruta o tecnología física subyacente.

Después, la Capa de Transporte asegura la transferencia de datos entre aplicaciones, ofreciendo servicios de comunicación confiables mediante TCP o servicios rápidos y sin conexión con UDP, manejando el control de errores, flujo y segmentación de los datos. Finalmente, la Capa de Aplicación es la más alta y contiene los protocolos y servicios con los que interactúan directamente las aplicaciones del usuario, como HTTP (siglas del término en inglés Hypertext Transfer Protocol) para la web, SMTP (siglas del término en inglés Simple Mail Transfer Protocol) para correo electrónico o DNS (siglas del término en inglés Domain Name System) para resolución de nombres, proporcionando las interfaces necesarias para que las aplicaciones transmitan y reciban datos de la red [15], [16].

Principales características de las ICN

El modelo de las redes centradas en información representa un cambio en la arquitectura de comunicaciones, diseñado para resolver limitaciones fundamentales del protocolo IP en escenarios modernos. Se sustenta en pilares conceptuales que redefinen la gestión de redes. A continuación, se detallan estos componentes esenciales respaldados por la literatura científica reciente, destacando los principales estándares y recomendaciones de los principales organismos reguladores en el sector de las telecomunicaciones. En la Fig. 1 se muestran algunas de las recomendaciones más relevantes de la ITU (siglas del término en inglés International Telecommunication Union) asociadas a las ICN [17].

Nomenclatura y esquemas de nombres:

En las ICN, la información se identifica y solicita mediante nombres de contenido en lugar de direcciones de red. Los esquemas de nomenclatura pueden ser jerárquicos, similares a rutas de archivos o URLs (siglas del término en inglés Uniform Resource Locator), lo que facilita la agregación y el enrutamiento eficiente, o planos, basados en identificadores únicos derivados de funciones hash. El esquema jerárquico permite que los nombres de contenido sean humanamente legibles y fáciles de recordar. A pesar de ello, la longitud variable del nombre puede hacer que este resulte extremadamente largo y, además, no garantiza su singularidad. En el caso del esquema de nombres planos se genera un nombre de longitud fija, imposible de leer por los usuarios y más difícil de recordar, garantizando la autenticidad e integridad de la información haciéndola más segura. La elección del esquema de nombres impacta directamente en la escalabilidad, la eficiencia del enrutamiento y la seguridad del sistema, ya que los nombres constituyen la base para la localización, recuperación y autenticación de los datos [6], [18].

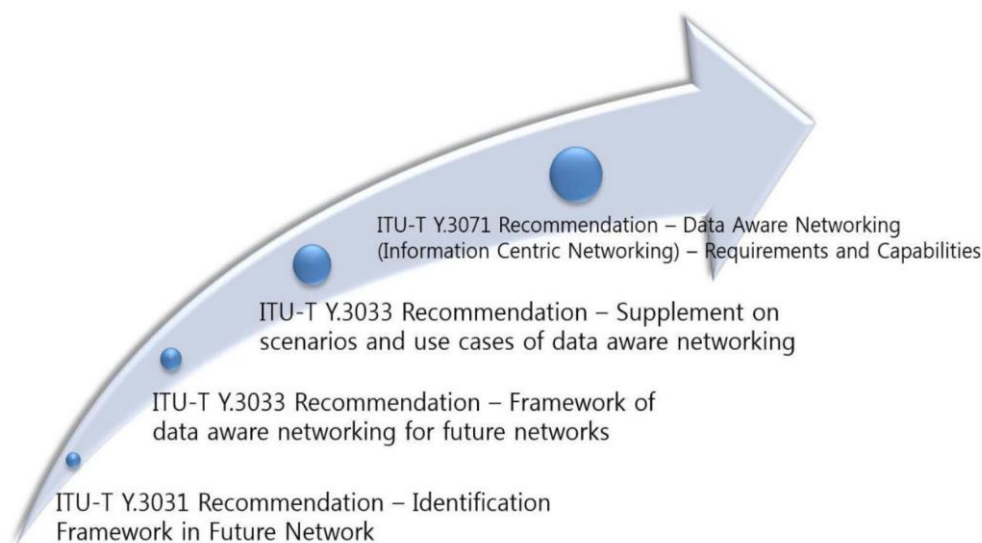


Figura 1. Recomendaciones relevantes de la ITU sobre las ICN [17].

Enrutamiento y reenvío:

El enrutamiento en redes centradas en información se basa en la búsqueda y entrega de datos identificados por nombres, no por localización física. Los nodos de la red mantienen tablas de enrutamiento que asocian prefijos de nombres con interfaces de reenvío, permitiendo que las solicitudes de contenido (Interest Packets) sean encaminadas hacia cualquier nodo que pueda satisfacerlas. Este enfoque permite el acceso eficiente a múltiples copias del mismo contenido, soportando la movilidad de los usuarios y la replicación dinámica de la información. Existen dos enfoques principales: el enrutamiento por resolución de nombres, donde se consulta una infraestructura distribuida para localizar el contenido, y el enrutamiento directo por nombre, que utiliza tablas de prefijos para reenviar solicitudes de manera eficiente. La capacidad de enrutar en función del nombre del contenido, y no de la ubicación, habilita la entrega flexible, la adaptación a fallos y la optimización de rutas según la disponibilidad y proximidad de los datos [6], [19]. La Fig. 2, muestra el enrutamiento por nombre empleado por las redes de datos nombrados, basado en una figura obtenida de [6].

Seguridad:

La seguridad en ICN se fundamenta en la protección del contenido más que en la protección de los canales de comunicación. Los mecanismos incluyen la autenticación y verificación de la integridad de los datos mediante firmas digitales, así como el cifrado de contenido para garantizar la confidencialidad. Sin embargo, la ubicuidad del almacenamiento en caché introduce nuevos desafíos, como ataques de contaminación de caché, envenenamiento de contenido y problemas de control de acceso. Se han propuesto mecanismos de control de acceso basados en cifrado, atributos y sesiones, pero la gestión eficiente de la privacidad y la autenticación sigue siendo un área activa de investigación [20], [21].

Paradigma publicación/suscripción:

Las ICN operan bajo un modelo de publicación/suscripción, donde los productores publican contenido asociado a nombres y los consumidores expresan intereses por esos nombres. Cuando un usuario solicita un contenido, la red busca y entrega el dato desde el nodo más cercano que lo posea. Este modelo facilita la diseminación eficiente y el soporte nativo para multicast y movilidad, ya que múltiples consumidores pueden recibir el mismo contenido desde diferentes puntos de la red [6].

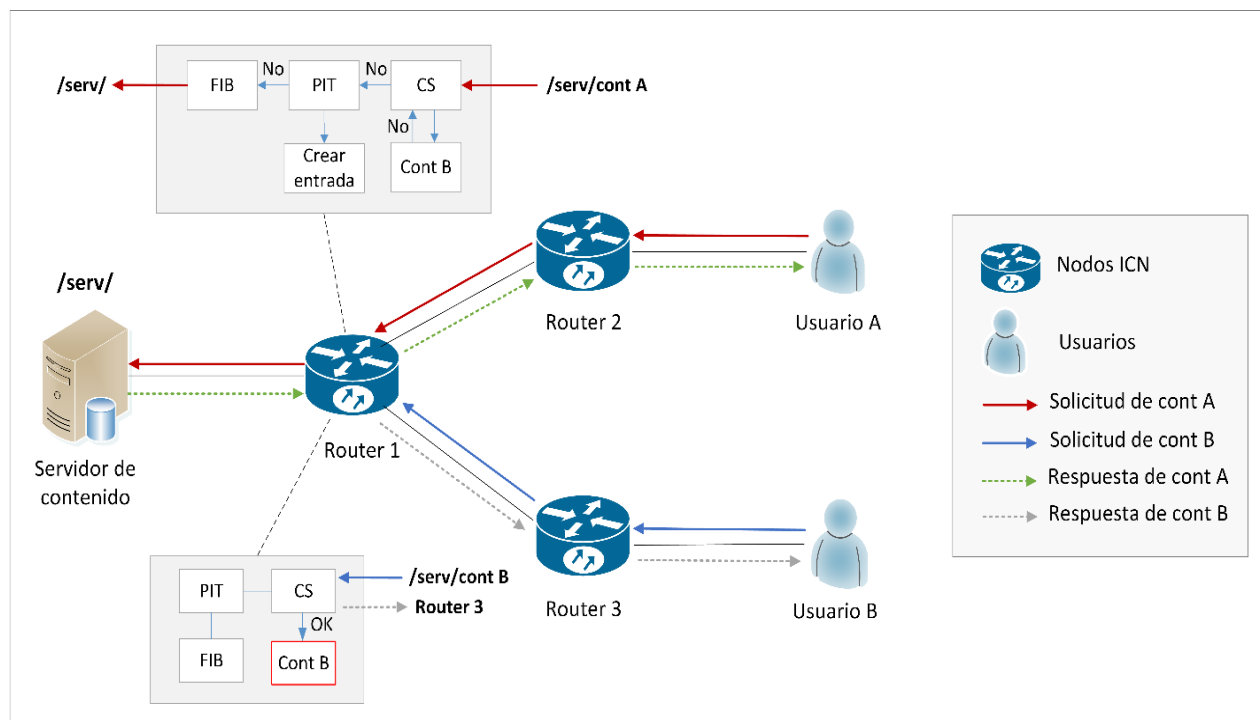


Figura 2. Enrutamiento por nombre en las redes centradas en contenido [6].

4. GESTIÓN DE LAS REDES IP TRADICIONALES Y LAS ICN

La gestión de redes constituye un aspecto fundamental tanto en las arquitecturas basadas en IP como en las redes centradas en información. La comparación entre ambas trasciende lo puramente arquitectónico, extendiéndose a implicaciones críticas en la gestión operativa, escalabilidad y eficiencia de las infraestructuras de red. Mientras las redes IP se fundamentan en un modelo centrado en hosts y ubicación, donde la gestión gira en torno a la conectividad punto a punto y la asignación jerárquica de direcciones, las ICN adoptan un modelo orientado a la información, priorizando el contenido como entidad primaria. Este cambio de paradigma introduce transformaciones radicales en los mecanismos de administración de redes, desde el aprovisionamiento de recursos hasta la seguridad y la adaptación a servicios emergentes. En esta sección, se analizan estas diferencias desde una perspectiva de gestión, basado en la literatura científica reciente, destacando ventajas, desafíos y consideraciones prácticas para operadores de red.

Arquitectura y modelo de gestión

Modelo de direccionamiento y encaminamiento:

En redes IP, la gestión de la conectividad depende intrínsecamente de direcciones jerárquicas (IPv4/IPv6) que combinan identidad y ubicación. Esto obliga a implementar mecanismos complejos como NAT (siglas del término en inglés Network Address Translation), DHCP y protocolos de enrutamiento dinámico como OSPF y BGP para manejar movilidad o cambios topológicos. En contraste, las ICN utilizan nombres de contenido persistentes y desagregados de la ubicación, simplificando la movilidad y el multi-homing. Los routers ICN, por ejemplo, en NDN, emplean tres estructuras clave para la gestión del flujo: Content Store (CS), Pending Interest Table (PIT) y Forwarding Information Base (FIB). Esto elimina la necesidad de gestionar tablas de estado por flujo en enrutadores intermedios, pero introduce complejidad en la gestión de cachés distribuidos y resolución de nombres [22].

Gestión de topología y servicios:

Las redes IP requieren una configuración manual intensiva para definir políticas de encaminamiento, VLANs (siglas del término en inglés Virtual Local Area Network) o QoS (siglas del término en inglés Quality of Service). Las ICN,

al apoyarse en resolución de nombres y encaminamiento basado en información, permiten una gestión más dinámica. Por ejemplo, el modelo publicación/suscripción en arquitecturas como PURSUIT¹ (siglas del término en inglés Proactive and Reactive Routing System for User-centric Information) o NDN facilita la distribución multicast nativa, reduciendo la sobrecarga administrativa para aplicaciones de difusión. No obstante, esto exige gestionar sistemas de resolución y actualizaciones de prefijos de nombres de forma escalable [23].

Gestión de identificadores, direcciones vs. nombres de contenido

La gestión de las redes IP se fundamenta en la administración de direcciones IP (asignación, segmentación, subneteo y resolución mediante DNS). Esta asignación implica retos como el agotamiento de direcciones, la complejidad del direccionamiento jerárquico, la movilidad de nodos y la traducción de direcciones (NAT), así como la necesidad de herramientas especializadas de administración de direcciones IP (IPAM, por las siglas del término en inglés IP Address Management) [24], [25]. El modelo ICN sustituye las direcciones por nombres de contenido, lo que desplaza el foco de la gestión hacia la administración jerárquica y estructural de los espacios de nombres. Esta gestión implica el diseño de convenciones de nomenclatura, la resolución eficiente de nombres y la sincronización del espacio de nombres entre dominios y nodos, aspectos críticos para la escalabilidad y la interoperabilidad de la red [24], [26].

Enrutamiento y reenvío

El enrutamiento en las redes IP se basa en la conectividad entre dispositivos, utilizando protocolos como OSPF y BGP, donde la gestión implica la actualización y optimización constante de tablas de enrutamiento. La resiliencia frente a fallos y cambios topológicos requiere mecanismos complejos y una supervisión activa por parte de los administradores [27].

En las ICN el enrutamiento se fundamenta en el nombre del contenido. Los nodos gestionan tablas que asocian prefijos de nombre con interfaces de reenvío, habilitando la búsqueda eficiente del contenido y la entrega desde cualquier ubicación disponible. La adopción de múltiples copias del contenido hace imprescindible el diseño de políticas de agregación, sincronización y actualización de estos prefijos, así como mecanismos de resolución ante particiones o cambios en la topología [28], [24].

Gestión y control del tráfico

El tráfico en redes IP se gestiona principalmente a través de protocolos de control y mecanismos de QoS, lo que implica configurar colas, prioridades y políticas a nivel de dispositivo y segmento de red. La detección y resolución de congestiones depende de mecanismos de extremo a extremo y técnicas como el control de congestión basado en la ventana de congestión² y notificación explícita de congestión³ (ECN, siglas del término en inglés Explicit Congestion Notification). Sin embargo, en las redes ICN el control del tráfico se realiza mediante la gestión de solicitudes de contenido y el almacenamiento en caché en la red. Las estrategias incluyen control de congestión en los enrutadores, asignación de prioridades a intereses y optimización de rutas para distribución eficiente. La gestión del caché presenta un desafío particular en cuanto a la consistencia, popularidad y reemplazo de contenido, con impacto directo en el rendimiento y la eficiencia de la red [29], [27].

Operaciones de red y escalabilidad

Gestión de tráfico y congestión:

Las redes IP dependen de protocolos de transporte y mecanismos de QoS como DiffServ⁴ (abreviatura del término en inglés Differentiated Services) gestionados centralizadamente o mediante configuraciones estáticas. Las ICN

¹ Propuesta de arquitectura para Internet que supera las limitaciones del modelo IP tradicional, con un diseño flexible y enfocado en la información.

² Ajusta dinámicamente la cantidad de datos que el emisor envía antes de recibir un *acknowledgement* (ACK), aumentando la ventana para usar el ancho de banda y reduciéndola al detectar congestión para evitar saturar la red.

³ Mejora el control por ventana de congestión evitando pérdidas; en lugar de descartar paquetes, los enrutadores los marcan al detectar congestión, y el receptor notifica al emisor para reducir la velocidad de envío.

⁴ Mecanismo de QoS que marca los paquetes con un código en el encabezado IP, clasificándolos en distintas clases de servicio para que los enrutadores gestionen el tráfico según su prioridad.

integran control de congestión y balanceo de carga en la capa de red, aprovechando el multi-path inherente y el caching in-network. Esto reduce la necesidad de supervisar flujos individuales, pero demanda políticas para gestionar estados de PIT y CS y evitar desbordamientos en entornos de alta movilidad [22].

Escalabilidad de tablas de encaminamiento:

La proliferación de direcciones IP ha saturado las tablas de encaminamiento en routers de núcleo, requiriendo técnicas de agregación complejas. En las ICN, los nombres planos o jerárquicos permiten agregación flexible basada en prefijos, mejorando la escalabilidad. Sin embargo, la gestión de actualizaciones de prefijos y la sincronización de cachés distribuidos plantea desafíos en redes masivas IoT, donde la tasa de generación de contenidos es elevada [30].

Gestión del rendimiento, calidad de servicio y calidad de la experiencia

Los principales desafíos asociados con los modelos de QoS basados en IP y MPLS (siglas del término en inglés Multiprotocol Label Switching) se derivan de la limitada capacidad de la red para reconocer la información. Sin embargo, las ICN pueden mitigar en gran medida estas limitaciones, ya que la red identifica el contenido solicitado mediante un esquema de direccionamiento específico. Esta función nativa de identificación de contenido de las arquitecturas ICN simplifica el proceso de mapeo de la información a los requisitos de QoS, y la necesidad de una inspección exhaustiva de paquetes se reduce significativamente o incluso se elimina. Además, la descripción de QoS puede añadirse a los fragmentos de contenido utilizando el espacio de nombres de contenido con una sobrecarga mínima. No obstante, los distintos modelos ICN pueden adoptar diferentes enfoques de QoS, cada uno con características distintivas según su diseño arquitectónico. En la Fig. 3, se muestra un esquema que ilustra las métricas de QoS y QoE (siglas del término en inglés Quality of Experience) en redes tradicionales y en ICN [22].

Por ejemplo, la arquitectura PURSUIT proporciona capacidades de enrutamiento que facilitan rutas similares a IntServ⁵ (abreviatura del término en inglés Integrated Services) sin necesidad de sobrecarga de señalización, lo cual resulta útil para escalar redes. Las arquitecturas CCN y NDN admiten la nomenclatura jerárquica y legible de los contenidos, lo que facilita considerablemente la diferenciación entre diferentes tipos de datos, es decir, clases de QoS, que la arquitectura actual de Internet. Además, el balanceo de carga a nivel de fragmento en la comunicación multitrayecto de CCN y PURSUIT puede resultar en una transmisión multimedia mucho mejor y una QoE más alta en comparación con TCP/IP [22].

Seguridad y gestión de accesos

Control de acceso y autenticidad:

Las redes IP confían en protocolos perimetrales como IPsec (abreviatura del término en inglés Internet Protocol security), TLS (siglas del término en inglés Transport Layer Security) y firewalls basados en direcciones, gestionados mediante ACLs (siglas del término en inglés Access Control Lists) complejas. Las ICN incorporan seguridad a nivel de dato mediante enlaces digitales y cifrado integrado, donde cada paquete es autenticable. Esto simplifica la gestión de políticas de acceso basadas en nombres, pero complica la revocación de contenidos y la gestión de claves descentralizada.

Aislamiento y cumplimiento normativo:

La gestión de políticas en IP se basa en VLAN o VPN (siglas del término en inglés Virtual Private Networks). En ICN, el namespace jerárquico permite definir ámbitos de contenidos, denominados "scopes" para aislar dominios administrativos o aplicar políticas de cumplimiento, por ejemplo, GDPR (siglas del término en inglés General Data Protection Regulation), reduciendo la sobrecarga de configuración [23].

⁵ Arquitectura de QoS que garantiza la transmisión al reservar recursos en cada nodo para cada flujo de datos.

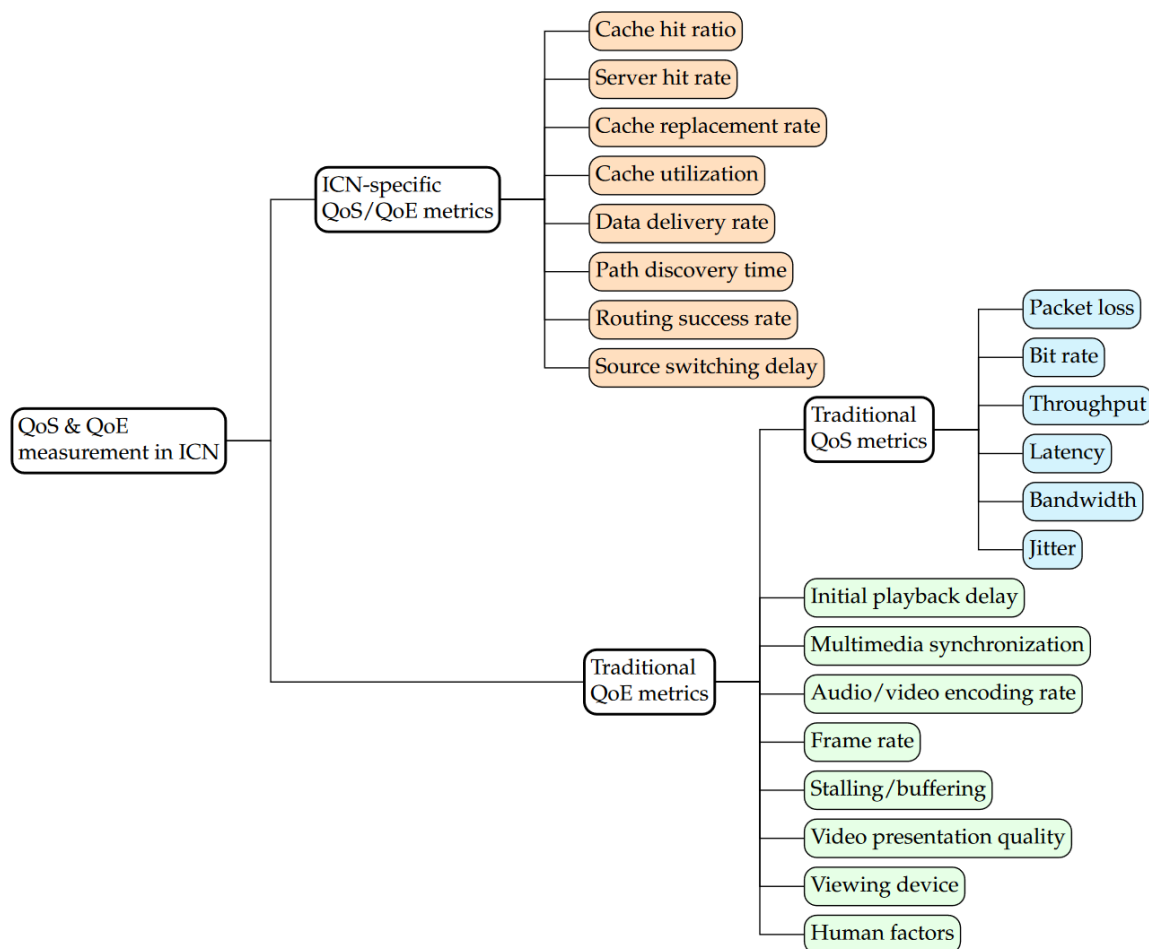


Figura 3. Métricas de QoS y QoE en redes tradicionales e ICN [22].

Escalabilidad y flexibilidad en la gestión

En la arquitectura de las redes IP, el crecimiento de la red exige mecanismos adicionales de agregación de rutas, técnicas de subneteo y políticas de transición, como el paso de IPv4 a IPv6, involucrando una gestión cada vez más compleja y propensa a errores manuales [25]. En contraste, la escalabilidad en las redes ICN se fundamenta en la eficiencia del espacio de nombres, la replicación masiva del contenido y el desacoplamiento entre productores y consumidores. Se requieren soluciones sofisticadas para la sincronización, agregación y particionamiento de nombres, así como para la automatización de la gestión [24], [26], [27]

Estrategias de despliegue y gestión híbrida

Migración e interoperabilidad:

El reemplazo total de IP por ICN es inviable a corto plazo. Estrategias como IP-over-ICN, por ejemplo, usando PURSUIT, permiten crear "islas ICN" gestionadas internamente por nombres, mientras mantienen interoperabilidad con IP mediante NAP (siglas del término en inglés Network Access Points). Estos NAP traducen protocolos IP a operaciones ICN, aprovechando multicast y caching para optimizar tráfico. Esto permite una gestión gradual, donde operadores pueden priorizar servicios críticos como streaming e IoT en ICN mientras mantienen IP para legacy [23].

Gestión unificada con SDN:

La integración de SDN es clave para gestionar redes híbridas IP-ICN. Los controladores SDN pueden orquestar FIB en ICN y flujos OpenFlow en IP de forma coordinada, potenciando la optimización de recursos. Algunos proyectos

como SRSC (siglas del término en inglés SDN-based Routing for CCN) demuestran reducciones de un 40% en latencia mediante gestión centralizada de políticas [31].

5. CASOS DE USO Y APLICACIONES DE LAS ICN

En los últimos años, las ICN han surgido como una arquitectura innovadora que redefine la forma en que se gestiona y distribuye la información en redes de comunicación, especialmente en entornos altamente dinámicos y móviles como el Internet de Vehículos (IoV, siglas del término en inglés Internet of Vehicle). La transición desde el modelo tradicional centrado en hosts hacia un paradigma centrado en el contenido ofrece ventajas significativas en términos de eficiencia, movilidad, seguridad y escalabilidad. Este cambio ha habilitado el desarrollo de aplicaciones avanzadas que aprovechan el almacenamiento en caché distribuido, el enrutamiento basado en nombres y la integración con tecnologías como la computación en el borde y la inteligencia artificial. En consecuencia, las ICN están demostrando un gran potencial para transformar escenarios complejos de redes vehiculares inteligentes, facilitando casos de uso que requieren baja latencia, alta confiabilidad y adaptabilidad, y abriendo nuevas posibilidades para la mejora de la seguridad vial, la cooperación entre vehículos y la optimización del tráfico, entre otros.

En [32] se realiza una revisión exhaustiva de la integración de las ICN con tecnologías emergentes como la computación en el borde y la inteligencia artificial para habilitar soluciones avanzadas en el contexto de IoV. Según el estudio realizado por los autores, las aplicaciones principales de las ICN en el contexto del IoV se fundamentan en permitir comunicaciones vehiculares inteligentes mediante el acceso eficiente y directo a contenidos por nombre, facilitando la movilidad de productores y consumidores de información y el intercambio local de datos críticos. Además, las ICN apoyan la percepción cooperativa y la conducción autónoma al facilitar la cooperación y el intercambio de datos entre vehículos para alertas de seguridad y toma de decisiones colaborativas. La capacidad intrínseca de caching dentro de la red optimiza la distribución del contenido, reduce latencia y la carga en el núcleo, lo cual es esencial para aplicaciones de alta demanda y en entornos móviles. También dan soporte a aplicaciones con exigencias de baja latencia y alta fiabilidad, integrando edge computing para mejorar la experiencia y eficiencia. Finalmente, estas arquitecturas incorporan mecanismos avanzados de seguridad y gestión inteligente, usando tecnologías como Blockchain e inteligencia artificial para proteger la integridad y privacidad de los datos, optimizar recursos, movilidad y la detección de anomalías, posicionando a las ICN como infraestructura clave para el desarrollo de redes vehiculares inteligentes.

Por otro lado, el trabajo realizado en [33] propone un prototipo de ICN diseñado para integrar dispositivos IoT. La arquitectura se basa en un nodo de convergencia ICN-IoT que separa funcionalmente las capacidades avanzadas de ICN, como reenvío de paquetes y almacenamiento en caché, de las tareas básicas de los dispositivos IoT, abordando así la heterogeneidad y limitaciones de recursos típicas de estos entornos. La principal ventaja de esta arquitectura radica en su capacidad para descargar tareas complejas, como el routing o el almacenamiento temporal desde los dispositivos IoT de recursos limitados hacia nodos ICN más potentes, optimizando así el rendimiento y la eficiencia energética. Para la gestión de redes, este enfoque simplifica operaciones al centralizar tareas críticas en nodos especializados, reduciendo la sobrecarga en dispositivos periféricos y promoviendo arquitecturas más resilientes y adaptables a entornos IoT dinámicos.

Como paradigma para una Internet del futuro, la convergencia entre las ICN y el cómputo en la red (INC, siglas del término en inglés In-Network Computing) como respuesta a los retos de aplicaciones emergentes en 6G, por ejemplo, realidad extendida (XR, siglas del término en inglés Extended Reality), vehículos autónomos y gemelos digitales, constituye un amplio camino con numerosas aplicaciones en estos entornos, donde los modelos tradicionales de cloud y edge computing resultan insuficientes para satisfacer demandas de ultra-baja latencia, escalabilidad y adaptabilidad dinámica. INC, habilitado por ICN, permite que tareas computacionales y de procesamiento se ejecuten directamente dentro de los nodos de red y no solo en servidores dedicados, logrando una ejecución dinámica, distribución más eficiente de cargas y respuestas en tiempo real más cerca de la fuente de datos. Así lo ilustra [34] con un estudio que obtiene como resultado que la integración profunda entre INC e ICN representa un paso decisivo para habilitar casos de uso avanzados, escalables y resilientes que no serán factibles bajo arquitecturas IP tradicionales.

En la recomendación RFC 9269 de IRTF (siglas del término en inglés *Internet Research Task Force*) se realiza un análisis de la integración de las ICN en redes móviles 4G para optimizar la entrega de contenido [35]. Ante la

ineficiencia del transporte IP unicast actual y los desafíos de implementación de la tecnología eMBMS⁶ (siglas del término en inglés Evolved Multimedia Broadcast Multicast Service) basada en LTE (siglas del término en inglés Long Term Evolution) para multicast, ICN ofrece ventajas clave como multicast a nivel de red, movilidad sin anclaje y almacenamiento en caché local en dispositivos de borde. La conclusión subraya que las ICN son viables en el plano de usuario 4G, especialmente con la computación en el borde, y su adopción en arquitecturas 5G podría amplificar sus ventajas, requiriendo validación experimental en entornos reales.

Los diferentes escenarios de aplicaciones analizados evidencian la capacidad de las ICN para transformar redes vehiculares, IoT y redes de quinta y sexta generación mediante distribución eficiente de contenido y caching descentralizado. Se espera que las ICN jueguen un papel esencial en soportar la proliferación masiva de dispositivos IoT y escenarios dinámicos como el IoV, ofreciendo mecanismos avanzados de enrutamiento basado en nombres y entrega de contenido con menor latencia y mayor resiliencia. Además, la alineación de las ICN con paradigmas emergentes de redes del futuro permitirá cubrir limitaciones del modelo IP actual, facilitando una arquitectura más flexible y capaz de tolerar fallos con una seguridad reforzada que proteja la integridad y privacidad de los datos. Estos avances apuntan hacia redes inteligentes y conscientes del contenido capaces de soportar aplicaciones críticas en contextos de alta movilidad y demanda variable, como comunicaciones vehiculares, servicios multimedia de alta demanda y computación en el borde distribuida [19], [6], [17].

6. CONCLUSIONES

La comparación entre la gestión de redes IP tradicionales y las arquitecturas centradas en información revela un cambio paradigmático en la forma en que se conciben, operan y optimizan las redes modernas. Mientras las redes IP se han consolidado como base de la conectividad global, presentan crecientes limitaciones para enfrentar los retos de aplicaciones emergentes que requieren baja latencia, alta movilidad, eficiencia en la distribución de contenido y seguridad granular. En contraste, las ICN introducen un enfoque innovador al centrar la arquitectura en el contenido, lo cual transforma profundamente los mecanismos de direccionamiento, enrutamiento, gestión del tráfico, seguridad y monitoreo. Las capacidades nativas de caching en red, enrutamiento por nombre y seguridad a nivel de datos permiten una gestión más eficiente, resiliente y adaptada a las exigencias actuales y futuras. Sin embargo, la transición hacia ICN no está exenta de desafíos, incluyendo la interoperabilidad con redes IP, la gestión escalable de espacios de nombres y la necesidad de herramientas especializadas para monitoreo y control. La coexistencia de ambos modelos, apoyada por tecnologías como SDN y estrategias de despliegue híbrido, se perfila como una vía viable en el corto y mediano plazo. En este contexto, ICN se proyecta como una arquitectura clave para el futuro de Internet, especialmente en entornos como IoT, IoV y redes 6G, donde se requiere una gestión de red más inteligente, consciente del contenido y capaz de adaptarse dinámicamente a contextos altamente variables.

REFERENCIAS

- [1] L. Dong y R. Li, «Interworking Between IP and ICN with New IP», en *Mobile Multimedia Communications*, J. Wang, Ed., Cham: Springer Nature Switzerland, 2025, pp. 411-420. doi: 10.1007/978-3-031-60347-1_34.
- [2] S. O. Amin, Q. Zheng, R. Ravindran, y G. Wang, «Leveraging ICN for Secure Content Distribution in IP Networks», en *Proceedings of the 24th ACM international conference on Multimedia*, en MM '16. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, oct. 2016, pp. 765-767. doi: 10.1145/2964284.2973838.
- [3] J. C. Lema, A. J. V. Neto, F. de O. Silva, y S. T. Kofuji, «Network Function Virtualization in Content-Centric Networks», en *Workshop de Pesquisa Experimental da Internet do Futuro (WPEIF)*, SBC, may 2019, pp. 31-37. doi: 10.5753/wpeif.2019.7696.
- [4] I. Moiseenko y D. Oran, «TCP/ICN: Carrying TCP over Content Centric and Named Data Networks», en *Proceedings of the 3rd ACM Conference on Information-Centric Networking*, en ACM-ICN '16. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, sep. 2016, pp. 112-121. doi: 10.1145/2984356.2984357.
- [5] C. Gündoğan, T. C. Schmidt, M. Wählisch, C. Scherb, C. Marxer, y C. Tschudin, «Information-Centric Networking (ICN) Adaptation to Low-Power Wireless Personal Area Networks (LoWPANs)», Internet Engineering Task Force, Request for Comments RFC 9139, nov. 2021. doi: 10.17487/RFC9139.
- [6] A. L. B. Acea y C. A. Calderón, «Las redes centradas en información como arquitectura de Internet del futuro», *Rev. Cuba. Transform. Digit.*, vol. 3, n.º 3, Art. n.º 3, sep. 2022.

⁶ Tecnología estándar que facilita la transmisión eficiente de contenido multimedia y datos a múltiples usuarios simultáneos mediante servicios de *broadcast* y *multicast*.

- [7] Z. Liu, J. Zhu, J. Zhang, y Q. Liu, «Routing algorithm design of satellite network architecture based on SDN and ICN», *Int. J. Satell. Commun. Netw.*, vol. 38, n.º 1, pp. 1-15, 2020, doi: 10.1002/sat.1304.
- [8] A. Peñasco y M. Méndez-Garabetti, «Sistema de Acceso y Autenticación en Redes Definidas por Software».
- [9] B. Nour, F. Li, H. Khelifi, H. Moun gla, y A. Ksentini, «Coexistence of ICN and IP Networks: An NFV as a Service Approach», en *2019 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, dic. 2019, pp. 1-6. doi: 10.1109/GLOBECOM38437.2019.9013881.
- [10] «Understanding IPv4 Address Classes and Their Uses - LARUS». Disponible en: <https://larus.net/blog/understanding-ipv4-address-classes-and-their-uses/>
- [11] R. Moskowitz, D. Karrenberg, Y. Rekhter, E. Lear, y G. J. de Groot, «Address Allocation for Private Internets», Internet Engineering Task Force, Request for Comments RFC 1918, feb. 1996. doi: 10.17487/RFC1918.
- [12] B. Oviedo *et al.*, «Visualizador de tráfico de red de comunicación basadas en la Arquitectura TCP/IP», *Rev. Univ. Soc.*, vol. 11, n.º 2, pp. 193-202, jun. 2019.
- [13] «Comprensión de la Redistribución de Rutas OSPF en BGP», Cisco. Disponible en: https://www.cisco.com/c/es_mx/support/docs/ip/border-gateway-protocol-bgp/5242-bgp-ospf-redis.html
- [14] D. Ravikumar, M. Prasath, N. U. Kumar, V. Devi, y P. Vijayalakshmi, «Internet security protocol for secure data transmission using OSPF and BGP», *AIP Conf. Proc.*, vol. 2463, n.º 1, may 2022, doi: 10.1063/5.0080354.
- [15] L. A. Marrone, *Paradigma TCP/IP*. Editorial de la Universidad Nacional de La Plata (EDULP), 2023. doi: 10.35537/10915/153750.
- [16] J. Rimari Vicente, «Redes Físicas El modelo OSI, el modelo TCP/ IP, protocolos de transmisión, componentes de la red, tarjetas, cables, conectores, equipos de red: modem, hub, switch, sus diferencias, seguridad en la red. Seguridad física y lógica de la Red.», dic. 2022, Disponible en: <https://repositorio.une.edu.pe/entities/publication/repositorio.une.edu.pe>
- [17] K. Yu *et al.*, «Information-Centric Networking: Research and Standardization Status», *IEEE Access*, vol. 7, pp. 126164-126176, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2938586.
- [18] K. Delvadia, N. Dutta, y G. Ghinea, «An Efficient Routing Strategy for Information Centric Networks», en *2019 IEEE International Conference on Advanced Networks and Telecommunications Systems (ANTS)*, GOA, India: IEEE, dic. 2019, pp. 1-6. doi: 10.1109/ANTS47819.2019.9118123.
- [19] M. Jahanian, «The Role of Naming in Information-Centric Networks», UC Riverside, 2021. Disponible en: <https://escholarship.org/uc/item/6px1c5cd>
- [20] R. Tourani, S. Misra, T. Mick, y G. Panwar, «Security, Privacy, and Access Control in Information-Centric Networking: A Survey», *IEEE Commun. Surv. Tutor.*, vol. 20, n.º 1, pp. 566-600, 2018, doi: 10.1109/COMST.2017.2749508.
- [21] E. Bardhi, M. Conti, R. Lazzeretti, y E. Losiouk, «Security and Privacy of IP-ICN Coexistence: A Comprehensive Survey», 11 de julio de 2023, *arXiv*: arXiv:2209.02835. doi: 10.48550/arXiv.2209.02835.
- [22] N. Sadat y R. Dai, «A Survey of Quality-of-Service and Quality-of-Experience Provisioning in Information-Centric Networks», *Network*, vol. 5, n.º 2, Art. n.º 2, jun. 2025, doi: 10.3390/network5020010.
- [23] J. Benseny, D. Lagutin, H. Hämmäinen, y D. Trossen, «Feasibility of IP-over-ICN», *Telecommun. Syst.*, vol. 73, n.º 1, pp. 27-46, ene. 2020, doi: 10.1007/s11235-019-00593-5.
- [24] M. N. Ali, A. T. Zahary, y M. A. Areqi, «IP and ICN Networking in D2D_IoT Communications: A Comparative Study», *Sanaa Univ. J. Appl. Sci. Technol.*, vol. 2, n.º 2, pp. 158-167, may 2024, doi: 10.59628/jast.v2i2.940.
- [25] M. Al-Khalidi, R. Al-Zaidi, y M. Hammoudeh, «Network Mobility Management Challenges, Directions, and Solutions: An Architectural Perspective», *Electronics*, vol. 11, n.º 17, Art. n.º 17, ene. 2022, doi: 10.3390/electronics11172696.
- [26] «IRTF Information-Centric Networking Research Group (ICNRG)». Disponible en: <https://www.irtf.org/icnrg.html>
- [27] M. Conti, A. Gangwal, M. Hassan, C. Lal, y E. Losiouk, «The Road Ahead for Networking: A Survey on ICN-IP Coexistence Solutions», *IEEE Commun. Surv. Tutor.*, vol. 22, n.º 3, pp. 2104-2129, 2020, doi: 10.1109/COMST.2020.2994526.
- [28] Y. 1 Xu *et al.*, «An Effective Transmission Scheme Based on Early Congestion Detection for Information-Centric Network», 2021, doi: 10.3390/electronics10182205.
- [29] P. C.n., H. S. Vimala, y S. J., «A systematic survey on content caching in ICN and ICN-IoT: Challenges, approaches and strategies», *Comput. Netw.*, vol. 233, p. 109896, sep. 2023, doi: 10.1016/j.comnet.2023.109896.
- [30] P. ijmr us U. Approved, «A Comparative Study of ICN Routing Protocols», feb. 2018. Disponible en: https://www.academia.edu/35916663/A_Comparative_Study_of_ICN_Routing_Protocols

- [31] B. Iaes, «Comparative performance analysis of software-defined networking vs conventional IP networks using IGP protocols», *Bull. Electr. Eng. Inform.*, may 2025, doi: 10.11591/EEI.V14I3.9063.
- [32] «Convergence of Information-Centric Networks and Edge Intelligence for IoV: Challenges and Future Directions». Disponible en: <https://www.mdpi.com/1999-5903/14/7/192>
- [33] M. Gutierrez-Gaitan, C. Gomez-Pantoja, y D. Ruete, «Prototyping an Information-Centric Network for IoT».
- [34] M. Amadeo y G. Ruggeri, «Exploring In-Network Computing with Information-Centric Networking: Review and Research Opportunities», *Future Internet*, vol. 17, n.º 1, Art. n.º 1, ene. 2025, doi: 10.3390/fi17010042.
- [35] P. Suthar, M. Stolic, A. Jangam, D. Trossen, y R. Ravindran, «Experimental Scenarios of Information-Centric Networking (ICN) Integration in 4G Mobile Networks», Internet Engineering Task Force, Request for Comments RFC 9269, ago. 2022. doi: 10.17487/RFC9269.

SOBRE LOS AUTORES

Yosdalys Villar-Domínguez, Ingeniera en Telecomunicaciones y Electrónica, Centro de Operaciones de la Red, Empresa de Telecomunicaciones de Cuba S.A ETECSA, La Habana, Especialista B en Telemática, yosdalys.villar@etecsa.cu. ORCID 0009-0001-9954-2998

CONFLICTO DE INTERESES

No existe conflicto de intereses. El autor autoriza la distribución y uso de su artículo.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

- **Autor 1:** 100 % de conceptualización, preparación, creación y desarrollo del artículo, revisión crítica de cada una de las versiones del borrador del artículo, contribución a la idea y organización del artículo.

Esta revista provee acceso libre inmediato a su contenido bajo el principio de hacer disponible gratuitamente investigación al público. Los contenidos de la revista se distribuyen bajo una licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 Unported License. Se permite la copia y distribución de sus manuscritos por cualquier medio, siempre que mantenga el reconocimiento de sus autores y no se haga uso comercial de las obras.

