

A First-Principles Approach to Understanding the Internet's Router-level Topology

(Un enfoque basado en los primeros principios para comprender la topología a nivel de enrutador de Internet)

Introducción

Arranca hablando sobre el problema de cómo se entiende y modela la topología del internet a nivel enrutadores (routers).

En los últimos años, los estudios se habían concentrado en medir y reproducir estadísticas globales, como la **distribución de grados** (cuantos enlaces tiene cada nodo, por ejemplo: si un router tiene 3 conexiones \Rightarrow grado = 3; si otro tiene 100 \Rightarrow grado = 100), que suele mostrar una **cola pesada (heavy tail)** o seguir una **ley de potencia (power law)**.

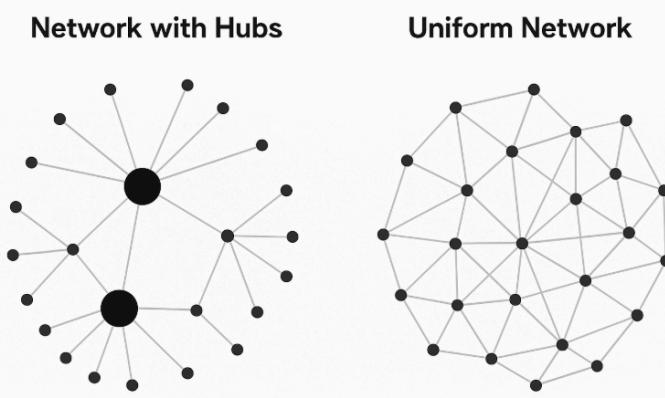
- **Cola pesada:** Esto se produce cuando
 - la mayoría de los nodos tienen pocos enlaces (1, 2, 3...),
 - pero existe una pequeña cantidad de nodos con muchísimos enlaces (decenas, cientos o miles)
- **Ley de potencia:** Es una forma matemática particular de cola pesada, en donde
 - dice que la probabilidad de que un nodo tenga grado k es proporcional a $k^{-\lambda}$ donde λ es un número positivo (como 2 o 3).
 - No hay un “tamaño típico” sino que, hay muchos chicos y unos pocos muy grandes.

Todas las leyes de potencia tienen cola pesada, pero **no todas las colas pesadas siguen una ley de potencia exacta**.

Los **hubs** son nodos con muchísimas conexiones comparado con el resto. Por ejemplo, la mayoría de los routers se conectan sólo a algunos vecinos cercanos, pero algunos routers “centrales” (por ejem, los del backbone de un ISP grande) tienen cientos o miles de enlaces.

Esta era una razón de porqué la gente decía que internet era “**Scale-free**”, porque las redes scale-free son justamente aquellas donde:

- **hay muchos nodos con pocos enlaces,**
- **y unos pocos hubs con muchísimos enlaces** (cola pesada / ley de potencia).



En los últimos años, esta mirada estadística llevó a que muchos estudios se centraran en reproducir métricas globales, como la distribución de grados o la supuesta ley de potencia, utilizando generadores de grafos aleatorios. Sin embargo, los autores del paper sostienen que este enfoque es **incompleto y engañoso**: existen múltiples tipologías distintas que

pueden compartir la misma distribución de grados, y muchos modelos aleatorios carecen de sentido práctico desde el punto de vista de la ingeniería de redes.

Decían algo como: “Si mis simulaciones producen una red con la misma forma de distribución de grados que las mediciones reales, entonces mi modelo representa al Internet.”

Estos modelos eran como intentar entender el diseño de una ciudad **solo mirando la distribución de tamaños de los edificios**, sin tener en cuenta calles, materiales o reglas de construcción.

Por ello, el trabajo plantea **cambiar el enfoque**. En lugar de limitarse a describir el Internet mediante estadísticas globales, propone un **modelo basado en primeros principios**, que incorpore las **restricciones tecnológicas y económicas reales** que influyen en el diseño de redes. Este nuevo enfoque busca comprender la topología del Internet a partir de las **decisiones de diseño reales**: la capacidad de los enlaces, las limitaciones físicas de los routers, los costos asociados y la demanda de los usuarios.

De esta manera, los autores buscan resolver la confusión existente en torno a las leyes de potencia y las “redes scale-free” mediante **modelos simples pero realistas**, que respeten las condiciones prácticas del diseño de redes y permitan analizar métricas más significativas, como el **rendimiento** y la **probabilidad de la red**.

En resumen, la propuesta combina teoría de grafos con fundamentos de ingeniería para obtener una comprensión más fiel y explicativa de la estructura de Internet.

Una forma más simple de explicar la introducción:

1. Qué hacían los estudios previos

Durante los años 2000, muchos trabajos académicos intentaban **modelar la topología de Internet** (cómo están conectados routers o sistemas autónomos). Pero en lugar de basarse en información detallada del diseño real (que es difícil de obtener), **usaban modelos teóricos** apoyados en estadísticas globales observadas, principalmente:

- **Distribución de grados** (cuántas conexiones tiene cada nodo).
- **Ajuste a una ley de potencia** (“hay pocos nodos con muchas conexiones, y muchos con pocas”).

Entonces, decían algo como:

“Si mis simulaciones producen una red con la misma forma de distribución de grados que las mediciones reales, entonces mi modelo representa al Internet.”

Y para lograr eso, usaban **generadores de grafos aleatorios**, por ejemplo:

- **Barabási-Albert (preferential attachment)**: los nodos nuevos se conectan a los más populares.
- **PLRG (Power-Law Random Graph)**: se asignan grados al azar según una ley de potencia y se conectan aleatoriamente.
- **BRITE, Inet, GT-ITM**, entre otros.

Estos generadores producen redes “bonitas” desde el punto de vista estadístico (tienen cola pesada, cumplen la ley de potencia), **pero sin ningún fundamento físico, económico o tecnológico real**.

2. Qué problema trae eso

El problema es que:

- **Dos redes con igual distribución de grados pueden ser completamente distintas** en estructura, rendimiento y costos.
- **Un generador aleatorio puede crear topologías imposibles** (routers con más enlaces de los que podrían tener físicamente, o con conexiones que no tienen sentido en términos de costo o distancia).
- **El modelo no explica las causas**, solo imita una forma matemática.
- Por tanto, **las conclusiones que se sacaban (sobre vulnerabilidad, robustez, etc.) eran poco confiables**.

En corto: Estos modelos eran como intentar entender el diseño de una ciudad **solo mirando la distribución de tamaños de los edificios**, sin tener en cuenta calles, materiales o reglas de construcción.

3. Qué proponen los autores como solución

Ellos dicen:

“Necesitamos un modelo que parte de primeros principios, es decir, de cómo realmente se diseñan redes en la práctica, no solo de estadísticas globales.”

Por eso, su propuesta incorpora:

- **Restricciones tecnológicas** (número de puertos, capacidad, tipo de enlace).
- **Factores económicos** (costo, geografía, demanda de usuarios).
- **Criterios de rendimiento** (eficiencia, redundancia, robustez).

Y muestran que, **aun con un modelo simple pero basado en esas restricciones reales**, se pueden obtener topologías **más coherentes, explicativas y cercanas a la realidad** que las generadas por puro azar.

2 BACKGROUND AND RELATED WORK

Grafo AS Autonomous System graph: Representa el **nivel de organización** de Internet: cómo se interconectan los grandes “bloques administrativos” (ISP, universidades, empresas, etc.).

Es el mapa “de alto nivel”.

- Cada **AS** es un conjunto de routers bajo un mismo control administrativo.
- Los **enlaces entre AS** representan acuerdos de interconexión (peering o tránsito).
- Se obtiene generalmente del **enrutamiento BGP (Border Gateway Protocol)**, que anuncia las rutas entre AS.

Grafo a nivel de enrutador (Router-level graph): Representa la **conectividad física real** entre routers dentro de los AS o entre ellos.

Cada nodo es un **router**, y cada enlace es un **enlace físico directo (capa 2)**.

- Muestra cómo se **construyen realmente** las redes internas de los ISPs.
- Refleja **limitaciones tecnológicas** (cantidad de puertos, capacidad de los enlaces, latencia, geografía).

- Su obtención es **difícil**, porque hay que usar mediciones activas (como *traceroute*) para inferirlo.
- Tiene muchísimos más nodos que el grafo AS (millones vs miles).

Entender la estructura del Internet es difícil porque está formada por miles de redes independientes, llamados **ISPs o Sistemas Autónomos (AS)**.

Por eso, los investigadores usan mediciones indirectas, y según cómo se midan, se obtienen dos tipos de topologías:

- el **grafo AS**, que muestra cómo se conectan las redes o empresas entre sí,
- y el **grafo a nivel de enrutador**, que muestra las conexiones físicas reales entre routers.

Al principio se usaban **modelos aleatorios** como *Erdős–Rényi* o *Waxman*, pero no reflejaban la jerarquía ni la redundancia del Internet real.

Luego aparecieron modelos más estructurados, como los **GT-ITM**, que sí incluían niveles de red.

En 1999, **Faloutsos et al.** descubrieron que el Internet parecía seguir una **ley de potencia**: muchos nodos con pocas conexiones y unos pocos con muchísimas, llamados *hubs*. Desde entonces se popularizaron generadores de topologías que replicaban esa estadística, como **BA**, **BRITE** o **PLRG**.

- **BA** → modelo de *Barabási–Albert* (basado en conexión preferencial).
- **BRITE** → generador de topologías desarrollado en Boston University, usado para simulaciones de redes.
- **PLRG** → *Power-Law Random Graph*, un modelo probabilístico diseñado para generar grafos con ley de potencia.

Estos modelos creaban redes con hubs muy conectados, pero también muy vulnerables a ataques o fallos.

El problema es que esos modelos son **puramente estadísticos**: describen la forma de la red, pero **no explican por qué** se construye así ni consideran restricciones físicas o económicas.

Por eso, los autores de este paper proponen abandonar esa visión y **volver a un modelo basado en principios reales de ingeniería**, que tome en cuenta la capacidad de los routers, los costos y la demanda.

3 A FIRST PRINCIPLES APPROACH

El objetivo es dejar de mirar solo estadísticas globales y centrarse en **las restricciones prácticas que enfrentan los ingenieros** al diseñar redes reales.

En vez de asumir que los grados altos aparecen mágicamente, se preguntan:

“¿Qué es lo realmente importante cuando se construye la topología de un ISP?”

Y encuentran dos factores clave que como mínimo, debe incluir:

1. La **tecnología de enrutamiento** y;
2. La **economía de la red**.

Ambos factores, junto con un uso más preciso de la estadística y la teoría de grafos, permiten interpretar de manera más sólida las mediciones experimentales.

En otras palabras, los autores proponen pasar de un análisis puramente descriptivo a un modelo **causal**, donde la estructura del Internet se derive de las **decisiones de diseño** y no de procesos aleatorios.

3.1 Technology Constraints

Cada router tiene **límites físicos y de diseño** que condicionan su grado de conectividad.

No puede tener enlaces infinitos ni ancho de banda ilimitado: existe un **compromiso entre número de conexiones y velocidad por conexión**.

Por ejemplo, un router troncal (core) puede tener pocos enlaces, pero cada uno es de gran capacidad, mientras que un router de borde puede tener muchos enlaces, pero de baja velocidad.

“Podemos ver, un gráfico que compara el grado y el ancho de banda de un router CISCO, podemos observar que a medida que crece el grado, y mientras sea menor a 15, el router ofrece un ancho de banda Total cada vez mayor, y conserva el ancho de banda de sus enlaces. Pasado ese límite, hasta llegar a 120 (número de conexiones máximo para ese router), este se ve saturado, por lo que su rendimiento comienza a disminuir.”

Estas limitaciones crean una “**región factible**”: un espacio de posibilidades realistas donde se puede diseñar la topología.

Los autores remarcan que este tipo de restricción, aunque sencilla, tiene un efecto enorme sobre la forma final de la red, y puede explicar por qué aparecen grados altos y bajos sin necesidad de suponer una ley de potencia pura.

3.2 Economic Considerations

A la tecnología se suman los **costos**.

Instalar y mantener enlaces físicos es caro, sobre todo los de alta velocidad o larga distancia.

Por eso, los ISPs tienden a **minimizar costos mediante la agregación de tráfico**: muchos usuarios de baja capacidad se conectan a un nodo intermedio, donde sus flujos se **multiplexan** en un mismo enlace de mayor velocidad que conecta con el núcleo de la red.

Este proceso hace que la topología adopte **una estructura jerárquica de forma natural**:

- en el **borde**, muchos routers económicos manejan grandes cantidades de conexiones lentas;
- hacia el **núcleo**, el tráfico agregado se concentra en pocos routers de alta capacidad y enlaces troncales rápidos.

La jerarquía no es un diseño impuesto, sino una **consecuencia directa de la optimización técnica y económica**: se busca transportar el mismo volumen de información con el menor número de enlaces costosos posibles.

Ejemplos como las redes troncales **Abilene** y **CENIC** muestran este patrón, con una malla central de alto rendimiento y nodos periféricos que se agrupan a su alrededor.

3.3 Heuristically Optimal Networks

Combinando ambos factores, **tecnología y economía**, los autores plantean un modelo de red **heurísticamente óptimo**.

El **núcleo** se construye como una **malla flexible de enrutadores de alta velocidad y baja conectividad**, que transportan **tráfico altamente agregado** a través de **enlaces de gran ancho de banda**.

Este núcleo en malla **se apoya** en una **estructura jerárquica en forma de árbol en los bordes**, cuyo propósito es **agregar tráfico mediante alta conectividad** y canalizarlo hacia el núcleo.

De esta combinación surge una topología **eficiente y escalable**, que **refleja con realismo las mediciones observadas** en redes reales.

Además, el paper advierte que algunas mediciones pueden **sobreestimar la conectividad real** de la red.

Esto ocurre porque ciertas herramientas de medición detectan dispositivos de **Capa 2**, como switches Ethernet o equipos MPLS, y los interpretan como si fueran enrutadores de Capa 3. En consecuencia, algunos nodos parecen tener miles de conexiones cuando en realidad son **artefactos de medición**, no verdaderos routers de alto grado.

Conclusión capítulo 3

En síntesis, el enfoque de primeros principios propone **integrar** la teoría de grafos, la estadística y los fundamentos de ingeniería.

Las distribuciones de tipo ley de potencia no se descartan, pero se reinterpretan:

no son una “ley universal” del Internet, sino **el resultado emergente** de restricciones reales (técnicas, económicas y de diseño) que guían cómo los ISPs construyen sus redes.

Este enfoque permite entender la topología de Internet **no solo como una forma matemática**, sino como una consecuencia directa de la realidad tecnológica que la sustenta.

4. TOPOLOGY METRICS

4.1 Commonly-used Metrics

En los estudios anteriores sobre topología de Internet, se solía caracterizar la estructura de una red usando métricas **puramente estadísticas o estructurales**, como:

- la **distribución de grados** (cuántos enlaces tiene cada nodo),
- la **expansión** (qué tan bien conectados están los nodos, medida en saltos),
- la **resiliencia** (capacidad de seguir funcionando ante fallas, rutas alternativas),
- la **distorsión** (cómo se representa un árbol dentro del grafo),
- o la **jerarquía** (cuánto se concentra el tráfico en unos pocos nodos o enlaces).

Los autores critican que todas estas métricas son **insuficientes o ambiguas** para analizar redes reales:

Distribución de grados: Dos redes pueden tener la misma distribución (por ejemplo, una ley de potencia) y ser completamente diferentes desde el punto de vista estructural.

Esto se demuestra al reconfigurar los enlaces sin alterar los grados, una técnica conocida como *degree-preserving rewiring*.

Así, la métrica no distingue si los nodos más conectados están en el núcleo o en los bordes.

Expansión, resiliencia y distorsión: Si bien ayudan a entender la conectividad global, sus valores pueden ser **idénticos en topologías muy distintas**, como una red totalmente conectada o una topología en estrella.

Por eso, son poco discriminativas y no reflejan las limitaciones reales del diseño.

Jerarquía: Estas métricas intentan capturar la concentración del tráfico, pero lo hacen sin considerar los **límites físicos de capacidad o ancho de banda** de los routers, por lo que su interpretación es superficial.

En resumen, las métricas tradicionales **describen la forma del grafo**, pero **no explican su comportamiento ni su rendimiento real**.

Por eso, los autores plantean la necesidad de introducir medidas **funcionales**, basadas en lo que la red realmente hace: transportar tráfico.

4.2 Performance-Related Metrics

En esta sección, los autores proponen métricas que reflejan la **función principal de una red**: mover información de manera eficiente, dadas sus restricciones tecnológicas y económicas.

1. Rendimiento máximo (throughput):

Mide la **capacidad total de transporte** de la red bajo condiciones de tráfico intenso.

Se asume un modelo de demanda proporcional al tamaño de los nodos (*modelo gravitacional*), y se calcula cuánto tráfico puede circular sin saturar routers ni enlaces.

Este enfoque tiene en cuenta las limitaciones físicas de cada nodo y permite comparar distintas topologías en igualdad de condiciones.

2. Utilización de los routers:

Evaluá qué tan cerca está cada router de su límite técnico (la “frontera eficiente” entre ancho de banda y grado máximo).

Si un router opera cerca de ese límite, se considera bien aprovechado; si está muy por debajo, la red tiene recursos ociosos.

Esta métrica muestra que las redes diseñadas con el enfoque de primeros principios (como el modelo HOT) **utilizan mejor la capacidad disponible** que las redes generadas aleatoriamente.

3. Distribución del ancho de banda de los usuarios finales:

Analiza cuánta capacidad de red recibe cada usuario, según su posición en la topología.

En redes realistas, la distribución es naturalmente desigual: muchos usuarios con conexiones lentas y unos pocos con conexiones muy rápidas.

Los autores destacan que su modelo reproduce esta asimetría de forma coherente con la realidad observada en ISPs.

Estas métricas permiten medir algo que los modelos puramente estructurales ignoran: **la eficiencia funcional** de la red al cumplir su propósito real, transportar tráfico bajo limitaciones físicas.

4.3 Likelihood-Related Metric

Hasta ahora, se había mostrado que dos redes pueden compartir las mismas estadísticas globales (por ejemplo, la misma distribución de grados) y, sin embargo, ser completamente diferentes en su estructura o eficiencia.

Para distinguirlas, los autores introducen una nueva métrica llamada **verosimilitud** (*likelihood*), que **tiene una base matemática**.

Esta métrica surge de una **fórmula de probabilidad** que estima **qué tan probable es que una red específica haya sido generada al azar**, dentro de un modelo de grafo aleatorio conocido como **General Random Graph (GRG)**.

En este modelo, cada par de nodos tiene una cierta probabilidad de estar conectado, dependiendo de sus grados esperados, y la verosimilitud se calcula como el **producto de todas esas probabilidades** para la red completa.

Luego, se normaliza (dividiendo por el valor máximo posible) para obtener una medida comparativa $I(g)$ entre 0 y 1.

En términos simples:

- Si la estructura de una red encaja bien con lo que el modelo aleatorio predeciría, su **verosimilitud es alta**.
→ Es una red “típica”, que podría haberse formado sin intervención humana.
- Si la red muestra conexiones difíciles de que ocurran por azar, por ejemplo, una jerarquía ordenada o una malla optimizada, su **verosimilitud es baja**.
→ Es una red “poco probable”, pero diseñada con propósito.

Ejemplo simple:

Dos redes con los mismos grados pueden organizarse distinto:
en una, los nodos grandes se conectan entre ellos (alta verosimilitud);
en la otra, los nodos grandes se conectan con pequeños formando jerarquías (baja verosimilitud).

Ambas tienen los mismos números, pero estructuras opuestas.

El análisis muestra que:

- Las **redes generadas aleatoriamente** tienen **alta verosimilitud** (porque son fáciles de producir estadísticamente), pero **bajo rendimiento**.
- Las **redes reales de ingeniería** (como las de los ISPs) tienen **baja verosimilitud**, porque son poco probables en un modelo aleatorio, pero **muy eficientes** en su función.

Por eso, los autores proponen evaluar las topologías en dos dimensiones:

Rendimiento (performance) y **Verosimilitud (likelihood)**.

Las redes reales se ubican en el cuadrante **bajo likelihood / alto performance**, mientras que las redes aleatorias caen en **alto likelihood / bajo performance**.

En conclusión: La verosimilitud se calcula a partir de una fórmula probabilística, y permite cuantificar cuán “natural” o “diseñada” es una red según su estructura de conexiones.

5. COMPARING TOPOLOGIES

En esta parte, los autores ponen a prueba su modelo comparándolo con redes reales y con modelos puramente aleatorios. Analizan tres casos: una red real (Abilene, la red académica de EE.UU.), una red aleatoria que reproduce la misma distribución de grados (*Power Law Random Graph*), y una red generada con su modelo de *primeros principios* (HOT).

Abilene (red real): una red de alto rendimiento que conectaba universidades en Estados Unidos. Representa una topología real de ingeniería, diseñada por humanos bajo restricciones tecnológicas y económicas.

PLRG (Power Law Random Graph): un grafo aleatorio generado matemáticamente para reproducir la misma distribución de grados que Internet, es decir, mantiene la estadística de cuántos enlaces tiene cada nodo, pero sin considerar factores técnicos o económicos.

HOT (Heuristically Optimized Topology): el modelo propuesto por los autores, que incorpora principios reales de diseño —como límites de ancho de banda, costos, y jerarquía de routers— buscando representar cómo un ISP organiza su red.

Los resultados se evalúan con dos ejes principales: **rendimiento y verosimilitud**. El rendimiento mide cuánta carga o tráfico puede soportar la red antes de saturarse, mientras que la verosimilitud mide qué tan probable sería que esa red surgiera al azar. Lo que encuentran es que las redes reales, al igual que las del modelo HOT, tienen **baja verosimilitud pero alto rendimiento**. Es decir, no se parecen a redes aleatorias: son poco probables desde el punto de vista estadístico, pero mucho más eficientes desde la ingeniería. En cambio, las redes aleatorias son las más “probables” de generar, pero funcionan peor: alcanzan menos capacidad y presentan cuellos de botella antes.

En la última parte, los autores discuten las implicancias: concluyen que imitar solo estadísticas globales, como la ley de potencia o la distribución de grados, **no alcanza para explicar la estructura real de Internet**. Las topologías reales reflejan un equilibrio entre **limitaciones tecnológicas, costos y rendimiento**, no una simple propiedad matemática. En síntesis, el Internet no es un producto del azar, sino el resultado de un proceso de diseño optimizado por ingenieros y operadores que buscan eficiencia bajo restricciones reales.

6. DISCUSSION

Los autores resumen el aporte principal del paper: proponen una **nueva manera de entender y modelar la topología del Internet**, basada no en estadísticas abstractas, sino en los **principios reales de ingeniería** que guían su construcción.

Hasta ese momento, muchos trabajos habían tratado de describir el Internet simplemente ajustando sus propiedades globales, por ejemplo, imitando la **ley de potencia** en la distribución de grados.

El problema es que esos modelos eran **puramente descriptivos**: podían parecerse en números, pero **no explicaban por qué** la red era como era, ni reproducían su comportamiento real.

El enfoque de este paper es construir modelos **desde los primeros principios (first principles)**:

partiendo de las **limitaciones tecnológicas** (como el ancho de banda y la capacidad de los routers), las **restricciones económicas** (costos de instalación y mantenimiento), y los **requisitos funcionales** (fiabilidad, agregación de tráfico, rendimiento).

A partir de esas condiciones mínimas, se obtiene de manera natural una red **jerárquica y eficiente**, muy parecida a las observadas en la práctica.

Y con los resultados finales se confirma:

las redes generadas con este enfoque, el modelo **HOT**, muestran **mayor rendimiento, mejor aprovechamiento de los recursos y una estructura coherente con las redes reales** (como Abilene o los ISP comerciales), mientras que los modelos puramente aleatorios pueden reproducir distribuciones similares, pero **no el comportamiento funcional**.

En síntesis:

Entender Internet requiere mirar más allá de la forma del grafo.

Su estructura es el resultado de decisiones de diseño, no del azar.

Traducción al español:

Abstract

Una comprensión detallada de las múltiples facetas de la estructura topológica de Internet es fundamental para evaluar el rendimiento de los protocolos de red, la eficacia de las técnicas propuestas para **proteger la red de intrusiones y ataques maliciosos**, y para desarrollar **diseños mejorados** para la provisión de recursos. Estudios previos de topología se han centrado en la interpretación de mediciones o en descripciones fenomenológicas y la evaluación de las propiedades de la teoría de grafos de los generadores de topología.

Proponemos un **enfoque complementario** que **combina un uso más preciso de la estadística y la teoría de grafos** con una teoría de primeros principios de la topología a **nivel de enrutador**, que **refleja las limitaciones y las compensaciones prácticas**. Si bien existe una compensación inevitable entre la complejidad y la fidelidad del modelo, un desafío consiste en **discernir, de la lista aparentemente interminable de cuestiones tecnológicas y económicas potencialmente relevantes**, las características más esenciales para una sólida comprensión de los fundamentos intrínsecos de la topología de red.

Sostenemos que los modelos muy simples que incorporan restricciones tecnológicas estrictas sobre el ancho de banda y la conectividad de los enrutadores y enlaces, junto con modelos abstractos de la demanda del usuario y el rendimiento de la red, pueden abordar

con éxito este desafío y resolver aún más gran parte de la confusión y la controversia que ha rodeado la generación y evaluación de topologías.

Introduction

Recientemente, la atención sobre la estructura topológica a gran escala de Internet se ha centrado en la conectividad de los componentes de red, ya sean máquinas en el grafo a nivel de enrutador [26, 10] o subredes completas (Sistemas Autónomos) en el grafo a nivel de sistema autónomo [24, 14]. Una característica particular de la conectividad de red que ha generado un debate considerable es la prevalencia de **distribuciones de cola pesada** en el grado de los nodos (por ejemplo, el número de conexiones) y si estas distribuciones se **ajustan o no a leyes de potencia** [23, 31, 16, 32]. Esta estadística macroscópica ha influido notablemente en la generación y evaluación de topologías de red. En la actualidad, las distribuciones de grado y otras estadísticas a gran escala son métricas populares para evaluar la representatividad de una topología dada [42], y los generadores de topología propuestos se evalúan a menudo en función de su capacidad para reproducir los mismos tipos de estadísticas macroscópicas, especialmente las distribuciones de grado de tipo ley de potencia [11].

Sin embargo, desde nuestro punto de vista, esta perspectiva es **incompleta** y requiere correcciones. En primer lugar, existen numerosos grafos con la misma distribución de grados de nodo, algunos de los cuales pueden considerarse opuestos desde la perspectiva de la ingeniería de redes. Además, existen diversos modelos de grafos aleatorios que pueden generar una distribución de grados determinada, y algunos de estos modelos **carecen** por completo de **significado intrínseco para la red**. Finalmente, proponemos un enfoque centrado principalmente en comprender la alta variabilidad observada en las mediciones relacionadas con la topología y en conciliarla con la realidad del diseño de ingeniería. Desde esta perspectiva, la reproducción de construcciones matemáticas abstractas, como las distribuciones de ley de potencia, resulta en gran medida secundaria. En este artículo, consideramos un enfoque basado en principios fundamentales para comprender la topología de Internet a nivel de enrutador, donde **los nodos representan enrutadores y los enlaces indican la conectividad de un salto entre ellos**. Más específicamente, cuando en adelante nos refiramos a la conectividad a nivel de enrutador, siempre hablaremos de la Capa 2, especialmente cuando la distinción entre los problemas de la Capa 2 y la Capa 3 sea importante para comprender la naturaleza de la conectividad real a nivel de enrutador (es decir, el grado de nodo) y sus limitaciones físicas. Para cuestiones de topología a nivel de enrutador, como el rendimiento, la fiabilidad y la robustez ante la pérdida de componentes, la conectividad física entre enrutadores es más importante que la conectividad virtual definida por las capas superiores de la pila de protocolos (por ejemplo, IP, MPLS). Además, utilizamos aquí la noción de «enfoque de primeros principios» para describir un intento de identificar algunos requisitos funcionales mínimos y limitaciones físicas necesarios para desarrollar modelos sencillos de la topología a nivel de enrutador de Internet que sean, a la vez, ilustrativos, representativos, esclarecedores y coherentes con la realidad de la ingeniería. Lejos de ser exhaustivo, **este intento se centra en considerar aspectos muy básicos específicos de la red**, pero puede mejorarse fácilmente si se descubre que algunos requisitos funcionales o limitaciones físicas nuevos o menos obvios desempeñan un papel fundamental. Asimismo, en el proceso de desarrollo de modelos de conectividad a nivel de enrutador de Internet que sean “lo más simples posible, pero no más

simples”, nos centramos en los ISP o AS individuales como bloques de construcción fundamentales de Internet, que se diseñan en gran medida de forma aislada y luego se conectan de acuerdo con consideraciones tanto de ingeniería como comerciales.

Si bien existen varios factores importantes que contribuyen al diseño de la topología a nivel de enrutador de un ISP (por ejemplo, la tecnología disponible, la viabilidad económica, las demandas de los clientes, la redundancia y la geografía), y aunque las opiniones varían sobre cuáles y cuántos de estos factores son relevantes, aquí nos centramos en algunas consideraciones tecnológicas y económicas críticas que, según afirmamos, permiten comprender los tipos de topologías de red posibles. En esencia, argumentamos la importancia de considerar explícitamente las compensaciones básicas a las que se enfrentan los diseñadores de redes al construir redes reales. Paralelamente, demostramos que los modelos de conectividad a nivel de enrutador cuya construcción está limitada por estadísticas macroscópicas, pero que por lo demás se rige por la aleatoriedad, son inherentemente defectuosos. Con este fin, introducimos las nociones de rendimiento de red y probabilidad de red como un nuevo medio para discernir diferencias importantes entre topologías de red generadas y reales. De este modo, demostramos que incorporar detalles de diseño fundamentales es crucial para la comprensión y evaluación de la topología de Internet.

Este artículo está organizado de la siguiente manera. En la **Sección 2**, revisamos **enfoques previos para generar topologías realistas**, así como algunas de las métricas utilizadas para comprender y evaluar dichas topologías. En la **Sección 3**, presentamos un **enfoque alternativo para comprender la estructura de la topología que incorpora explícitamente la capacidad de los enlaces, las limitaciones de la tecnología de enrutamiento y diversas restricciones económicas presentes en la construcción de redes reales**. Posteriormente, en la **Sección 4**, analizamos varias métricas (por ejemplo, rendimiento y probabilidad) para comparar redes, en particular aquellas con la **misma distribución de grados**. Presentamos **nuestros hallazgos** en la **Sección 5** y concluimos en la **Sección 6** con una **discusión** sobre las **implicaciones y limitaciones** del enfoque de primeros principios propuesto.

2 BACKGROUND AND RELATED WORK

Comprender las propiedades estructurales a gran escala de Internet ha demostrado ser un problema complejo. Dado que Internet es un conjunto de miles de redes más pequeñas, cada una bajo su propio control administrativo, no existe un único punto de referencia desde el cual se pueda obtener una visión completa de su topología. Además, como la red no se presta de forma natural a la inspección directa, la tarea de «descubrir» la topología de Internet se ha dejado en manos de investigadores experimentales que desarrollan métodos más o menos sofisticados para inferirla a partir de mediciones de red adecuadas. Debido a la complejidad del conjunto de protocolos de red, existen multitud de mediciones posibles, cada una con sus propias ventajas, desventajas e idiosincrasias, y cada una da como resultado una visión distinta de la topología de la red.

Dos topologías de red que han recibido una atención significativa por parte de estos enfoques experimentales son el **grafo AS** (que representa la interconexión organizativa entre subredes) y el **grafo a nivel de enrutador de Internet**. A pesar de las dificultades

asociadas a la recopilación e interpretación rigurosas de mediciones de redes relacionadas con la topología, los importantes esfuerzos de la comunidad de redes están dando como resultado una visión emergente de las propiedades estadísticas a gran escala de estas topologías [23, 26, 19, 10, 40, 41].

El desarrollo de modelos abstractos, pero bien fundamentados, para la evaluación y generación de topologías de red ha seguido el trabajo de los **empiristas**. El primer generador de topología popular utilizado para la simulación de redes fue el modelo de **Waxman** [44], una variación del grafo aleatorio clásico de **Erdős-Rényi** [21].

Posteriormente, se abandonó el uso de este tipo de modelo de grafo aleatorio en favor de **modelos** que introducen explícitamente **una estructura no aleatoria, en particular jerarquía y localidad, como parte del diseño de la red** [20, 12, 48]. El argumento a favor de este enfoque se basaba en que la inspección de redes reales muestra que, si bien **no son aleatorias, sí presentan ciertas características jerárquicas evidentes**. Este enfoque argumentaba además que un **generador de topologías** debería reflejar los **principios de diseño de uso común**. Por ejemplo, para lograr los objetivos de rendimiento deseados, **la red debe cumplir con ciertos requisitos de conectividad y redundancia, propiedades que no se garantizan en topologías de red aleatorias**. Estos principios se integraron en los Modelos de **Topología de Interconexión de Redes de Georgia Tech (GT-ITM)**.

Estos generadores de topología estructural fueron los modelos estándar en uso hasta que Faloutsos et al. [23] reportaron relaciones de ley de potencia en la conectividad de los grafos a nivel de sistema autónomo (AS) y de enrutador de Internet. Desde entonces, la identificación y explicación de las leyes de potencia se ha convertido en un tema cada vez más relevante en la literatura reciente sobre topología de redes [47, 16, 31, 45]. Dado que los generadores de topología GT-ITM no logran producir leyes de potencia en el grado de los nodos, a menudo se han abandonado en favor de **nuevos modelos que replican explícitamente estas estadísticas** observadas.¹ Ejemplos de estos generadores incluyen el generador de topología a **nivel de AS** de INET [28], BRUTE [30], BA [47], AB [3], GLP [11], PLRG [2] y el generador de **ley de potencia** de CMU [36].

Cada uno de los generadores de topología basados en el grado mencionados utiliza uno de los siguientes tres métodos de generación probabilística. **El primer método** es el de **conexión preferencial** [7], que establece que (1) **el crecimiento de la red se produce mediante la adición secuencial de nuevos nodos, y (2) cada nodo recién añadido se conecta preferentemente con algunos nodos existentes**, de modo que es más probable que se conecte con un nodo que ya tenga muchas conexiones. En consecuencia, **los nodos de alto grado tienden a obtener cada vez más conexiones**, lo que resulta en una distribución de grado nodal que sigue una **ley de potencia**. Para un modelo definido con precisión que incorpora las características clave de la conexión preferencial y que permite un análisis matemático riguroso, remitimos al lector a [8] y las referencias allí citadas. **El segundo método** generacional se debe a Chung y Lu [17], quienes consideraron un **modelo general de grafos aleatorios (GRG)** con una secuencia de grados esperados dada. La construcción se lleva a cabo asignando **primero a cada nodo su grado (esperado)** y luego **insertando aristas entre los nodos de forma probabilística, según una probabilidad proporcional al producto de los grados de los dos extremos dados**. Si la secuencia de grados de nodo esperada asignada sigue una ley de potencia, la distribución de grados de nodo del grafo generado exhibirá la misma ley de potencia. **El método de**

tercera generación, el **Grafo Aleatorio de Ley de Potencia (PLRG)** [2], también intenta replicar una secuencia de grados dada (con ley de potencia). Esta construcción implica formar un conjunto L de nodos que contenga tantas copias distintas de un vértice dado como grado tenga dicho vértice, elegir una correspondencia aleatoria de los elementos de L y aplicar una función a dicha correspondencia en un (multi)grafo apropiado.

Una de las características más importantes de las **redes con distribuciones de grados con ley de potencia**, generadas según uno de estos mecanismos probabilísticos, es que **tienden a tener unos pocos nodos centrales altamente conectados**, a través de los cuales fluye prácticamente todo el tráfico. En las **redes generadas por conexión preferencial**, los **nodos centrales** suelen ser **nodos añadidos al principio del proceso de generación**. Tanto en el modelo GRG como en el PLRG, los nodos con un grado alto (esperado) tienen mayor probabilidad de conectarse a otros nodos de alto grado, formando así un clúster central. Al utilizar estos modelos para representar Internet, la presencia de estos nodos centrales altamente conectados se ha considerado su talón de Aquiles, ya que la conectividad de la red es muy vulnerable a ataques dirigidos a los nodos centrales de alto grado [4]. De manera similar, se ha argumentado que estos nodos centrales de alto grado son una de las principales razones de la propagación epidémica de gusanos y virus informáticos [37, 9]. La presencia de nodos centrales altamente conectados en una red con una distribución de grados de ley de potencia es la esencia de los denominados **modelos de redes libres de escala**, un tema recurrente en el estudio de redes complejas, especialmente entre investigadores inspirados por la física estadística [34].

Sin embargo, este énfasis en las leyes de potencia y los consiguientes esfuerzos por generarlas y explicarlas mediante métodos basados en el grado no han estado exentos de críticas. Por ejemplo, existe un argumento antiguo, aunque poco conocido, originario de Mandelbrot, que afirma brevemente que las distribuciones de tipo ley de potencia deberían surgir de forma ubicua por razones puramente matemáticas y estadísticas, y por lo tanto no requieren una explicación especial. Estas distribuciones constituyen una hipótesis nula parsimoniosa para datos de alta variabilidad (es decir, cuando las estimaciones de varianza no convergen), al igual que las gaussianas lo son para datos de baja variabilidad (es decir, donde las estimaciones de momentos convergen de forma robusta y donde las estimaciones de media y varianza tienden a describir adecuadamente las mediciones), aunque los datos no sean necesariamente gaussianos (véase [29, pp. 79-116] para más detalles). Otra deficiencia más conocida es que los métodos basados en el grado para la generación de topología producen modelos meramente descriptivos que, en general, no son capaces de proporcionar explicaciones físicas correctas para la estructura general de la red [45]. Se afirma que, sin comprender los factores que impulsan el despliegue y el crecimiento de las redes, resulta difícil identificar las fuerzas causales que afectan las propiedades de las redes a gran escala, e incluso más difícil predecir las tendencias futuras en su evolución. Sin embargo, a falta de ejemplos concretos de dichos modelos alternativos, los métodos basados en el grado siguen siendo representaciones populares de la estructura de Internet a gran escala.

Este artículo retoma los argumentos previos de [6] a favor de la necesidad de considerar explícitamente los factores técnicos que impulsan el despliegue y el crecimiento de las redes. En esencia, transmite para las redes basadas en el grado un mensaje similar al que [48] transmitió para los modelos de grafos aleatorios [44], populares entre los investigadores

de redes a principios de la década de 1990. Si bien [48] identificó y comentó las limitaciones inherentes de las diversas construcciones que involucran grafos aleatorios de tipo Erdös-Rényi, nuestro trabajo señala deficiencias similares y características poco realistas al trabajar con grafos probabilísticos basados en el grado.

3 A FIRST PRINCIPLES APPROACH

Un desafío clave al usar características estadísticas a gran escala para caracterizar algo tan complejo como la topología de un ISP o de Internet en su conjunto radica en la dificultad de comprender **hasta qué punto una característica observada** en particular es **"fundamental"** para su estructura. Aquí, consideramos un enfoque complementario para analizar la topología de red, en el que exploramos algunas de las limitaciones prácticas y las compensaciones que influyen en la construcción de redes reales. En esencia, nos preguntamos: "**¿Qué es realmente importante en la construcción de la topología?**" y argumentamos que, **como mínimo**, es necesario **considerar** el papel de la **tecnología de enrutamiento** y **la economía de la red en el proceso de diseño de la red de un ISP**.

Esperamos que incluso una comprensión preliminar de los factores clave, combinada con un uso más preciso de la estadística y la teoría de grafos, pueda proporcionar una perspectiva más coherente tanto con las mediciones observadas como con los principios de ingeniería que rigen la red.

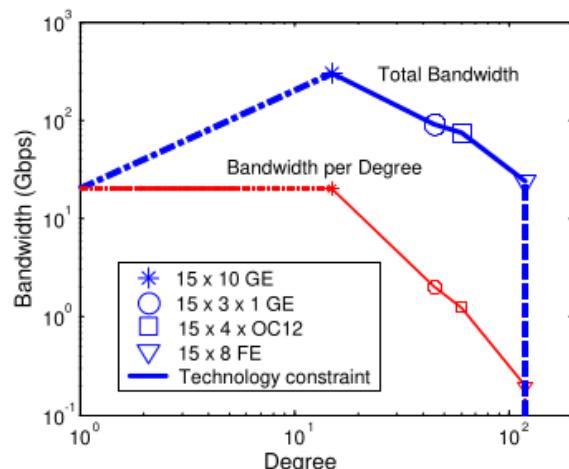


Figura 1: Limitaciones tecnológicas del router de conmutación Gigabit Cisco 12416 (GSR): degree (grado) vs. Bandwidth (ancho de banda) (junio de 2002). Cada punto en la gráfica corresponde a una combinación diferente de tarjetas de línea e interfaces para el mismo router. Este router tiene 15 ranuras para tarjetas de línea disponibles. Cuando el router se configura con menos de 15 conexiones, el rendimiento por grado está limitado por la velocidad máxima de la tarjeta de línea (10 Gbps) y el ancho de banda total aumenta con el número de conexiones, mientras que el ancho de banda por grado permanece constante (líneas de puntos y rayas). Cuando el número de conexiones es mayor que 15, el ancho de banda total del router y el ancho de banda por grado disminuyen a medida que aumenta el número total de conexiones (líneas continuas), hasta un máximo de 120 conexiones posibles para este router (línea punteada). Estas tres líneas definen conjuntamente la región factible para la configuración de este router.

El diseño se ve afectado por las afirmaciones actuales, a veces contradictorias, sobre la topología real de Internet. En particular, dado el énfasis actual en la presencia de leyes de potencia en la conectividad de Internet a nivel de enrutador, es importante comprender si dicha variabilidad es plausible y, de ser así, dónde podría encontrarse dentro de la topología general. Afortunadamente, esta explicación es posible si se considera la importancia de la tecnología de enrutadores y la economía de redes en el proceso de diseño.

3.1 Technology Constraints

Al considerar la topología física de Internet, se observa que las limitaciones de la tecnología subyacente de los enrutadores influyen significativamente en la conectividad de la red. Según la tecnología empleada en la interconexión del propio enrutador, este tiene un número máximo de paquetes que puede procesar en una unidad de tiempo. Esto limita el número de conexiones (es decir, el grado del nodo) y la velocidad de conexión (es decir, el ancho de banda) en cada enrutador. Esta limitación crea una «**región factible**» y una «**frontera eficiente**» correspondiente de posibles combinaciones de ancho de banda y grado para cada enrutador. Es decir, un enrutador puede tener pocas conexiones de alto ancho de banda o muchas de bajo ancho de banda (o alguna combinación intermedia). En esencia, esto significa que los enrutadores deben respetar una forma de conservación del flujo en el tráfico que pueden gestionar. Si bien siempre es posible configurar el enrutador para que opere por debajo de la frontera eficiente (subutilizando así su capacidad), no es posible sobrepasarla (por ejemplo, mediante muchas conexiones de alto ancho de banda). La figura 1 muestra las limitaciones tecnológicas del Cisco 12416 GSR, uno de los routers más caros y con mayor ancho de banda disponibles en el catálogo de productos de Cisco de 2002.

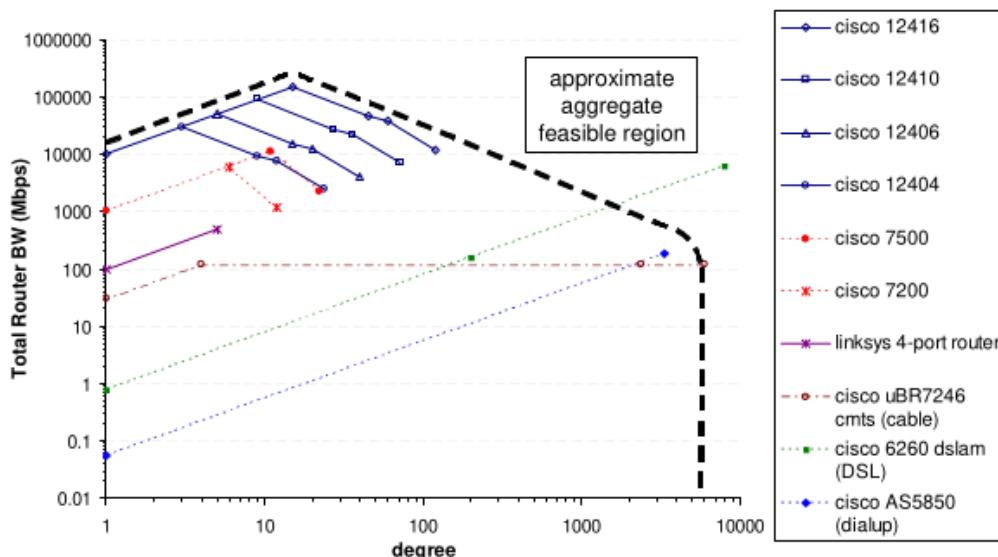


Figura 2: Resumen de las limitaciones de la tecnología de enrutadores. Además de la serie Cisco 12000 GSR, también se muestran las limitaciones de la serie Cisco 7000, algo más antigua. La tecnología de acceso compartido para cable de banda ancha ofrece un servicio comparable al DSL cuando el número total de usuarios es de aproximadamente 100, pero solo puede proporcionar un servicio equivalente al de acceso telefónico cuando el número de usuarios es de aproximadamente 2000. También se incluye el enrutador Linksys de 4 puertos, una tecnología LAN popular que admite hasta 5 conexiones Ethernet de 100 MB. Cabe destacar que los límites de

esta tecnología, menos costosa, se encuentran dentro del rango factible para los enrutadores de red central.

Aunque los ingenieros amplían constantemente los límites con el desarrollo de nuevas tecnologías de enrutamiento, cada modelo de enrutador tiene un límite que representa su región factible. Los arquitectos de red se enfrentan a la disyuntiva entre capacidad y coste al seleccionar un enrutador, y también deben decidir la cantidad y la velocidad de las conexiones al configurarlo. Hasta que las nuevas tecnologías amplíen este límite, **la única forma de generar un mayor rendimiento es construir redes de enrutadores**. La Internet actual cuenta con numerosos modelos de enrutadores, cada uno con tecnologías potencialmente diferentes y su propia región factible. Sin embargo, estas tecnologías aún presentan limitaciones en su capacidad para equilibrar el ancho de banda total y el número de conexiones. Consideremos una visión general de las diferentes tecnologías (Figura 2), utilizadas tanto en el núcleo como en el borde de la red. Las tecnologías de borde difieren en su diseño, ya que están concebidas para dar soporte a un gran número de usuarios finales a velocidades fijas (DSL, acceso telefónico) o variables (cable). Pueden soportar un número mucho mayor de conexiones (más de 10 000 para DSL o acceso telefónico), pero a velocidades significativamente menores. En conjunto, estas limitaciones individuales constituyen una restricción general en el diseño de topología disponible.

No afirmamos que las limitaciones tecnológicas impidan fundamentalmente la posibilidad de enrutadores de alto grado y gran ancho de banda, sino simplemente que los productos disponibles recientemente en el mercado no han admitido dichas configuraciones. Si bien esperamos que las empresas continúen innovando y ampliando el rango factible para la configuración de enrutadores, queda por ver si la viabilidad económica (incluidas la configuración y la gestión) de estos productos permitirá su amplia implantación en Internet.

3.2 Economic Considerations

Aún más importantes que las consideraciones técnicas que afectan al uso de enrutadores son las **consideraciones económicas del diseño y despliegue de redes, impulsadas por las demandas de los clientes** y que, en última instancia, **dirigen los tipos de tecnologías que desarrollan los proveedores de red**. Por ejemplo, el coste de instalar y operar enlaces físicos en una red puede representar la mayor parte del coste total de la infraestructura, y dado que estos costes tienden a aumentar con la distancia del enlace, existe un enorme incentivo práctico para diseñar redes cableadas que puedan soportar el tráfico utilizando el menor número de enlaces. La capacidad de compartir costes mediante la multiplexación es un factor fundamental en el diseño de las tecnologías de red, y la disponibilidad de estas tecnologías permite una topología de red en la que el tráfico se agrega en todos los niveles de la jerarquía de red, desde la periferia hasta el núcleo.

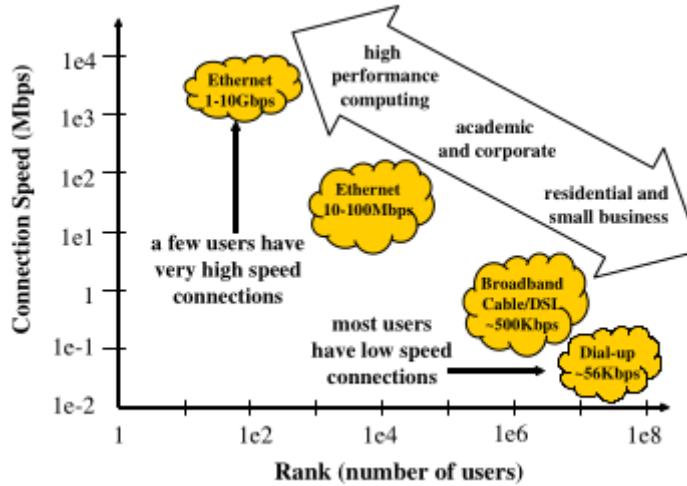


Figura 3: Imagen general del ancho de banda de conexión de los usuarios finales a Internet. La mayoría de los usuarios de Internet actuales tienen conexiones relativamente lentas (56 Kbps), mientras que solo una pequeña proporción dispone de conexiones de alta velocidad (10 Gbps).

El desarrollo de estas tecnologías también ha seguido las demandas de los clientes, cuya disposición a pagar por el ancho de banda de la red varía considerablemente (Figura 3). Por ejem-

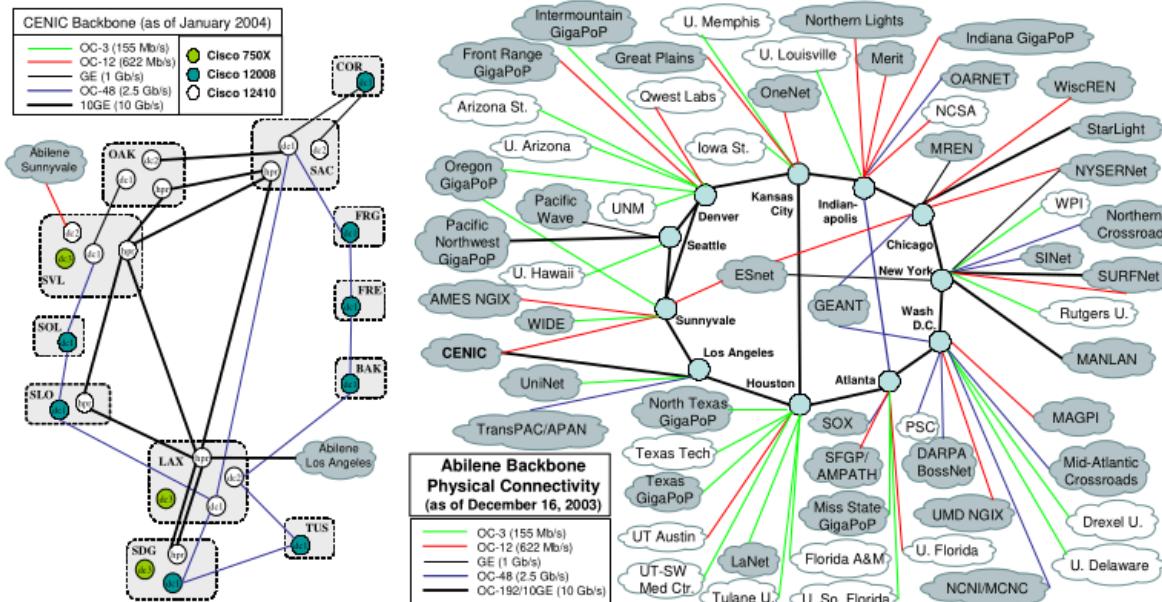


Figura 4: Redes CENIC y Abilene. (Izquierda): Red troncal CENIC. La red troncal CENIC se compone de dos redes troncales en paralelo: una red de alto rendimiento (HPR) que da soporte al sistema de la Universidad de California y otras universidades, y la red digital de California (DC) que da soporte a iniciativas educativas K-12 y gobiernos locales. La conectividad dentro de cada punto de presencia (POP) se proporciona mediante tecnologías de capa 2, y no se muestra la conectividad con el borde de la red. (Derecha): Red Abilene. Cada nodo representa un enrutador, y cada enlace representa una conexión física entre Abilene y otra red. Las redes de usuarios finales se representan en blanco, mientras que las redes pares

(otras redes troncales y puntos de intercambio) se representan en gris. Cada enrutador tiene solo unas pocas conexiones de alto ancho de banda; sin embargo, cada conexión física puede admitir muchas conexiones virtuales que dan la apariencia de una mayor conectividad a las capas superiores de la pila de protocolos de Internet. ESnet y GEANT son otras redes troncales.

plo, Casi la mitad de los usuarios de Internet en Norteamérica aún utilizan conexiones de acceso telefónico (generalmente de 56 kbps), solo alrededor del 20 % tiene acceso de banda ancha (de 256 kbps a 6 Mbps) y existe un número reducido de usuarios con grandes necesidades de ancho de banda (10 Gbps) [5]. Una vez más, la gestión rentable de este tráfico tan diverso requiere que la agregación se realice lo más cerca posible del borde de la red y se ve respaldada por una característica común de estas tecnologías de borde: su capacidad para soportar una alta conectividad y agregar el tráfico de los usuarios antes de enviarlo al núcleo. Dada la variabilidad en la densidad de población, no solo es plausible, sino incluso previsible, que exista una amplia variabilidad en la conectividad de los nodos de la red.

Por lo tanto, un análisis más detallado de los aspectos tecnológicos y económicos del diseño en el **núcleo** y el **borde** de la red ofrece una explicación coherente sobre los factores (como la demanda del mercado, los costos de los enlaces y las limitaciones de los equipos) que parecen regir el desarrollo y la provisión de las redes centrales de los ISP. Las compensaciones que un ISP debe hacer entre lo tecnológicamente factible y lo económico viable suelen generar mapas de conectividad a nivel de enrutador, donde la capacidad de los enlaces individuales tiende a aumentar, mientras que el grado de conectividad tiende a disminuir a medida que uno se desplaza desde el borde de la red hacia su núcleo. En primera aproximación, los enrutadores centrales tienden a ser rápidos (tienen alta capacidad), pero solo unas pocas conexiones de alta velocidad; y los enrutadores de borde suelen ser más lentos en general, pero tienen muchas conexiones de baja velocidad. Dicho de otro modo, los enlaces de larga distancia dentro del núcleo tienden a ser relativamente pocos, pero su capacidad suele ser alta.

3.3 Heuristically Optimal Networks

Las sencillas consideraciones tecnológicas y económicas mencionadas anteriormente sugieren que un diseño razonablemente «bueno» para la red de un único ISP consiste en un núcleo construido como una malla flexible de enrutadores de alta velocidad y baja conectividad que transportan un tráfico altamente agregado a través de enlaces de gran ancho de banda. En consecuencia, este núcleo en malla se apoya en una estructura jerárquica en forma de árbol en los bordes, cuyo propósito es agregar tráfico mediante alta conectividad. Nos referiremos a este diseño como **heurísticamente óptimo** para reflejar su coherencia con las consideraciones de diseño reales.

Como evidencia de que este diseño heurístico comparte características cualitativas similares con el Internet real, consideraremos la conectividad real a nivel de enrutador del Internet, tal como existe para las redes educativas de Abilene y CENIC (Figura 4). La Red de Abilene es la red troncal de Internet para la educación superior y forma parte de la iniciativa Internet [1]. Está compuesta por conexiones de alta velocidad entre enrutadores centrales ubicados en 11 ciudades de EE. UU. y transporta aproximadamente el 1 % de

todo el tráfico en Norteamérica⁵. La red troncal de Abilene es una malla con conexiones dispersas, cuya conectividad a clientes regionales y locales se proporciona mediante una redundancia mínima. Abilene se basa en routers Juniper T640, configurados para tener desde cinco conexiones (en Los Ángeles) hasta doce...

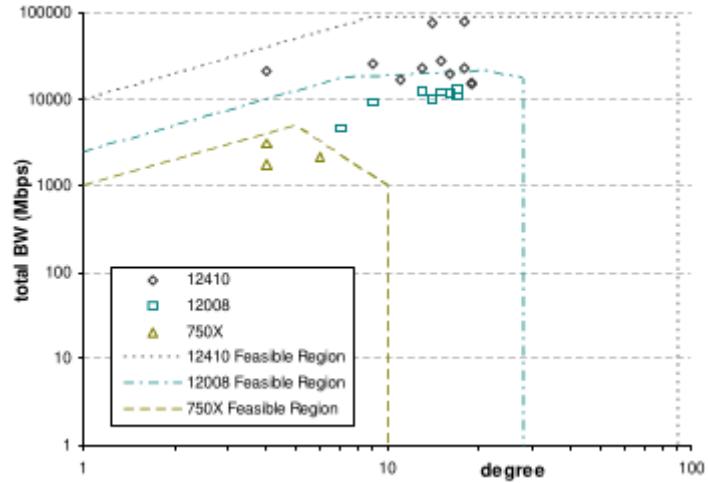


Figura 5: Configuración de los routers CENIC a enero de 2004. Desde la publicación del catálogo de Cisco[43], la introducción de una nueva tarjeta de línea (compatible con 10 interfaces 1GE) ha modificado el rango de rendimiento del router modelo 12410. Dado que este router dispone de nueve ranuras, puede alcanzar un máximo de 90 Gbps con nueve tarjetas de línea 10GE o nueve tarjetas de línea 10x1GE. Si bien el rango de rendimiento puede seguir cambiando, su alcance y las implicaciones para la configuración y el despliegue del router se mantendrán prácticamente iguales.

...conexiones (en Nueva York). Abilene mantiene conexiones de interconexión con otras redes de educación superior (tanto nacionales como internacionales), pero no se conecta directamente a Internet comercial.

Centrándonos en el nivel regional, consideramos California, donde la Corporación para Iniciativas de Redes Educativas en California (CENIC) actúa como ISP para las universidades y colegios del estado [18]. Su red troncal está compuesta de manera similar por una malla dispersa de enrutadores conectados por enlaces de alta velocidad (Figura 4). Aquí, las **políticas de enrutamiento**, los enlaces físicos redundantes y el uso de redes privadas virtuales respaldan la entrega robusta de tráfico a las redes perimetrales de los campus. Se encuentran observaciones similares al examinar (cuando está disponible) la información relacionada con la topología de los **ISP comerciales globales, nacionales o regionales**.

En vista de estudios de medición recientes [26, 19, 40], es importante reconocer que el uso de tecnologías en capas distintas a IP afectará lo que pueden medir los experimentos tipo traceroute. Por ejemplo, el uso de medios compartidos en la capa 2 (por ejemplo, Ethernet, anillos FDDI), ya sea en el borde de la red o en los puntos de intercambio entre ISP, puede dar la apariencia de nodos de alto grado. De manera completamente diferente, el uso de conmutación de etiquetas multiprotocolo (MPLS) en niveles superiores de la pila de protocolos también puede dar la ilusión de conectividad de un solo salto en las capas inferiores cuando, de hecho, **no la hay**. Abilene es un punto de partida ideal para

comprender las topologías heurísticamente óptimas, porque dentro de su red troncal no hay diferencia entre la topología de la capa de enlace y lo que ve IP.

En contraste, el uso de Ethernet y otras tecnologías de commutación de capa de enlace dentro de los POP de CENIC dificulta la interpretación y visualización de la conectividad física intra-CENIC, pero la inferencia de la conectividad real de capa de enlace se facilita enormemente al conocer las configuraciones de los enruteadores CENIC individuales, como se muestra en la Figura 5. El grado en que los nodos de alto grado observados en estudios similares a traceroute se deben a efectos en los POP o en los proveedores de intercambio de Internet (IXP), en contraposición a los efectos de agregación de bordes, no está claro a partir de los estudios de medición actuales.

También recordamos que el énfasis en este documento está en un diseño de red razonable a nivel de un solo ISP. Sin embargo, reconocemos que Internet en general es una colección de miles de AS que se interconectan en ubicaciones selectas. Por lo tanto, una cuestión importante que no se aborda en este documento es comprender cómo la estructura a gran escala de Internet se relaciona con el diseño de red heurísticamente óptimo de los ISP individuales. Especulamos que existirán restricciones tecnológicas y factores económicos similares en los puntos de interconexión entre ISP, pero que la complejidad de la gestión del enruteamiento puede surgir como una consideración adicional. Como resultado, esperamos que los enruteadores de borde vuelvan a tener unas pocas conexiones físicas de ancho de banda relativamente alto que admitan grandes cantidades de tráfico agregado. A su vez, se espera que la alta conectividad física a nivel de enruteador se limite estrictamente al borde de la red.

4. TOPOLOGY METRICS

4.1 Commonly-used Metrics

Las métricas previas para comprender y evaluar las topologías de redes se han basado principalmente en **magnitudes de la teoría de grafos y sus propiedades estadísticas**, como la distribución del grado de los nodos, la expansión, la resiliencia, la distorsión y la jerarquía [11, 42]. Sin embargo, aquí sostendremos que estas métricas son inherentemente inadecuadas para captar las compensaciones esenciales de las redes diseñadas explícitamente.

Distribución de grados de nodos. En general, existen muchas redes que tienen la misma distribución de grados de nodos, como lo demuestra el proceso de reconexión que conserva los grados. Esta operación de reconexión en particular reorganiza las conexiones existentes de tal manera que los grados de los nodos involucrados en la reorganización no cambian, dejando invariable la distribución general de grados de nodos resultante. En consecuencia, dado que la red se puede reconectar paso a paso para que los nodos de alto grado aparezcan en el núcleo de la red o en sus bordes, es evidente que topologías radicalmente diferentes pueden tener una y la misma distribución de grados (por ejemplo, distribución de grados de ley de potencia). De esta manera, la reconexión que conserva los grados es un medio para moverse dentro de un "espacio de grafos de red" general, todos con la misma distribución general de grados.

Expansión, resiliencia, distorsión. Introducidas en [42], estas métricas tienen como objetivo diferenciar aspectos importantes de la topología. La **expansión** mide la capacidad de un nodo para alcanzar otros nodos dentro de una distancia determinada (medida en saltos); la **resiliencia** refleja la existencia de rutas alternativas; y la **distorción** es una métrica de la teoría de grafos que refleja la manera en que un árbol de expansión puede integrarse en la topología. Para cada una de estas tres métricas, una topología se caracteriza como "Baja" (B) o "Alta" (A). Sin embargo, los valores cuantitativos de expansión, resiliencia y distorsión presentados en [42] no siempre son fáciles de interpretar al comparar topologías cualitativamente diferentes. Por ejemplo, los valores medidos de expansión para las topologías a nivel de sistema autónomo (AS) y a nivel de enrutador muestran una diferencia relativamente grande (Figura 2(d) en [42]); no obstante, ambos se clasifican como "Altos", lo que sugiere que los generadores basados en grados se comparan favorablemente con las topologías medidas. En contraste, se podría argumentar que Tiers genera topologías cuyos valores de expansión coinciden razonablemente bien con los del grafo medido a nivel de enrutador (Figura 2(g) en [42]), pero Tiers se clasifica con una expansión "Baja". Estos problemas al interpretar estas métricas dificultan su uso para evaluar las diferencias en las topologías de manera consistente y coherente.

No obstante, estas métricas se han utilizado en [42] para comparar las topologías medidas a nivel de sistema autónomo (AS) y a nivel de enrutador (RL) con las topologías resultantes de varios generadores, incluidos los métodos basados en grados (PLRG, BA, BRITE, BT, INET) y los métodos estructurales (Tiers y Transit-Stub de GT-ITM), así como varias topologías "canónicas" (por ejemplo, aleatoria, de malla, de árbol, de grafo completo). Se observó que las redes AS, RL y basadas en grados fueron las únicas redes consideradas que comparten valores "HHL" para expansión, resiliencia y distorsión, respectivamente. Además, de las topologías canónicas, esta caracterización de "alta densidad" (HHL) sólo la compartía el grafo completo (todos los nodos conectados entre sí). Sin embargo, una topología canónica que no se consideró fue la topología de "estrella" (es decir, con un único nodo central), que según sus métricas también se caracterizaría como "HHL", lo que explica por qué los grafos basados en grados (con nodos centrales de alto grado) se ajustan a esta descripción. No obstante, el hecho de que tanto un grafo completo como una estrella puedan tener la misma caracterización ilustra la incompletitud de este grupo de métricas para evaluar la topología de red.

Jerarquía. Para evaluar la jerarquía, [42] considera la distribución de los "valores de enlace", que pretenden imitar el grado de agregación del tráfico de red en unos pocos enlaces (presumiblemente, enlaces troncales). Sin embargo, la afirmación de que los generadores basados en grados, como PLRG, reproducen mejor las características jerárquicas observadas en las topologías medidas se basa nuevamente en una evaluación cualitativa. Según esta evaluación, los generadores estructurales anteriores (p. ej., Tiers en GT-ITM) crean jerarquías «estrictas», mientras que los generadores basados en grados, al igual que las topologías medidas, generan jerarquías «moderadas». Esta evaluación se basa en un modelo donde el tráfico de extremo a extremo sigue las rutas más cortas, pero ignora las limitaciones de la red para soportar simultáneamente dicho tráfico.

Desde la perspectiva de este trabajo, estas métricas previas parecen insuficientes para captar lo que realmente importa en las topologías de red reales. Muchas carecen de una interpretación directa en redes y todas dependen en gran medida de criterios cualitativos, lo

que hace que su aplicación sea algo subjetiva. A continuación, utilizamos la experiencia adquirida en estudios previos para desarrollar métricas coherentes con nuestra perspectiva basada en principios fundamentales. En particular, consideramos varias medidas novedosas para comparar topologías que, según mostramos, proporcionan una comparación mínima pero sorprendente entre redes probabilísticas basadas en grados y redes inspiradas en el diseño de ingeniería.

4.2 Performance-Related Metrics

Reconociendo que el propósito principal de construir una red es soportar eficazmente la demanda de tráfico total proyectada, consideramos varios métodos para evaluar su rendimiento.

Rendimiento de la red. Definimos el rendimiento de la red como el rendimiento máximo en condiciones de tráfico intenso, basado en un modelo gravitacional [38]. Es decir, consideramos los flujos en todos los pares origen-destino de los enrutadores de borde, de manera que el flujo X_{ij} entre el origen i y el destino j sea proporcional al producto de la demanda de tráfico x_i , x_j en los extremos i , j : $X_{ij} = \alpha x_i x_j$, donde α es una constante. Calculamos el rendimiento máximo en la red bajo la restricción de ancho de banda del grado del enrutador.

$$\begin{aligned} \max_{\alpha} \quad & \sum_{ij} \alpha x_i x_j \\ \text{s.t.} \quad & RX \leq B, \end{aligned}$$

Donde X es un vector obtenido al apilar todos los flujos $X_{ij} = \alpha x_i x_j$ y R es la matriz de enrutamiento (definida de tal manera que $R_{kl} = \{0, 1\}$ dependiendo de si el flujo l pasa o no por el enrutador k). Utilizamos el enrutamiento por ruta más corta para obtener la matriz de enrutamiento y definimos B como el vector que consta de todos los anchos de banda de los enrutadores según la restricción de ancho de banda de grado (Figura 2). Debido a la falta de información pública disponible sobre la demanda de tráfico para cada punto final, asumimos que la demanda de ancho de banda en un enrutador es proporcional a la demanda agregada de cualquier host final conectado a él. Esta suposición permite una buena utilización del ancho de banda de los enrutadores de nivel superior⁶. Si bien otras métricas de rendimiento pueden ser dignas de consideración, afirmamos que el rendimiento máximo alcanzado utilizando el modelo de gravedad proporciona una medida razonable de la red para proporcionar una asignación justa de ancho de banda.

Utilización del enrutador. Al calcular el rendimiento máximo de la red, también obtenemos el flujo de tráfico total a través de cada enrutador, al que denominamos utilización del enrutador. Dado que los enrutadores están limitados por la región factible en cuanto a ancho de banda y grado, la topología de la red y el conjunto de flujos máximos determinarán la ubicación exacta de cada enrutador dentro de dicha región. Los enrutadores cercanos al límite de la red se utilizan de forma más eficiente, mientras que un enrutador en el límite se satura con el tráfico que lo atraviesa. Para los ISP reales, el objetivo no es maximizar el rendimiento, sino proporcionar ciertas garantías de nivel de servicio (por ejemplo, fiabilidad), y modelar patrones de tráfico típicos requeriría consideraciones adicionales (como el sobreaprovisionamiento de la red) que no se abordan aquí. Nuestro propósito no es

reproducir el tráfico real, sino evaluar la capacidad bruta de transporte de topologías seleccionadas bajo patrones de tráfico y limitaciones tecnológicas razonables.

Distribución del ancho de banda para el usuario final. Además de la utilización de los enruteadores, cada conjunto de flujos máximos también genera un conjunto de anchos de banda que se entregan a los usuarios finales de la red. Si bien no es una medida estricta del rendimiento, consideramos como medida secundaria la capacidad de una red para satisfacer las demandas realistas de los usuarios finales.

4.3 Likelihood-Related Metric

Para diferenciar entre grafos g que tienen el mismo conjunto de vértices V y la misma distribución de grados o, equivalentemente, la misma secuencia de grados de nodo $\omega = (\omega_1, \dots, \omega_n)$, donde ω_k denota el grado del nodo k , considere la métrica

$$L(g) = \sum_{(i,j) \in E(g)} \omega_i \omega_j, \quad (1)$$

donde $E(g)$ representa el conjunto de aristas (con $(i, j) \in E(g)$ si existe una arista entre los vértices i y j). Esta métrica (determinista) está estrechamente relacionada con trabajos previos sobre assortatividad [33]; sin embargo, para los fines de este artículo, requerimos una renormalización apropiada para el estudio de todos los grafos conexos simples con conjunto de vértices V y la misma secuencia de grados de nodo ω . Para ello, definimos la métrica normalizada.

$$l(g) = (L(g) - L_{\min}) / (L_{\max} - L_{\min}), \quad (2)$$

Donde L_{\max} y L_{\min} son los valores máximo y mínimo de $L(g)$ entre todos los grafos conexos simples g con conjunto de vértices V y una misma secuencia de grados de nodos ω . Nótese que, por ejemplo, el **grafo L_{\max} se genera fácilmente mediante la siguiente heurística:** ordenar los nodos de mayor a menor grado y conectar sucesivamente el nodo de mayor grado con otros nodos de alto grado en orden descendente hasta que cumpla con su requisito de grado. Al repetir este proceso con nodos en orden descendente de grado, se obtiene un grafo con conjunto de vértices V que tiene el mayor valor posible de $L(g)$ entre todos los grafos con secuencia de grados de nodos ω . Una demostración formal de que esta construcción intuitiva produce un grafo L_{\max} emplea la desigualdad de reordenamiento [46]. De ello se deduce que los grafos g con valores altos de $L(g)$ son aquellos con nodos de alto grado conectados entre sí y nodos de bajo grado conectados entre sí. Por el contrario, los grafos g con nodos de alto grado conectados a nodos de bajo grado tienen necesariamente valores $L(g)$ más bajos. Por lo tanto, existe una relación explícita entre los grafos con valores $L(g)$ altos y los grafos con una topología "libre de escala", en el sentido de que presentan un núcleo central; es decir, los nodos de alta conectividad forman un clúster en el centro de la red.

Las métricas $L(g)$ y $l(g)$ también permiten una interpretación más tradicional como verosimilitud y verosimilitud relativa, respectivamente, asociadas al modelo general de grafos aleatorios (GRG) con una secuencia de grados esperada dada, considerado en [17]. El modelo GRG se centra en grafos aleatorios con una secuencia de grados de nodo esperada dada $\omega = (\omega_1, \dots, \omega_n)$ para los vértices $1, \dots, n$. La arista entre los vértices i y j se elige de forma independiente con probabilidad p_{ij} , donde p_{ij} es proporcional al producto

ω_i/ω_j . Esta construcción es general, ya que puede generar grafos con una distribución de grados de nodos que sigue una ley de potencia si la secuencia de grados esperados ω se ajusta a dicha ley, o bien puede generar los grafos aleatorios clásicos de Erdős-Rényi [21] tomando la secuencia de grados esperados ω como (pn, pn, \dots, pn) . Como resultado de elegir cada arista $(i, j) \in E(g)$ con una probabilidad proporcional a $\omega_i \omega_j$, en el modelo GRG, a los distintos grafos se les asignan probabilidades diferentes. De hecho, si denotamos por $G(\omega)$ el conjunto de todos los grafos generados por el método GRG con una secuencia de grados esperada ω dada, y definimos la verosimilitud de un grafo $g \in G(\omega)$ como el logaritmo de la probabilidad de dicho grafo, condicionado a que la secuencia de grados real sea igual a la secuencia de grados esperada ω , se puede demostrar que esta última es proporcional a $L(g)$, lo cual justifica nuestra interpretación posterior de la métrica $I(g)$ como verosimilitud relativa de $g \in G(\omega)$. Sin embargo, para los fines de este artículo, simplemente utilizamos la métrica $I(g)$ para diferenciar entre redes con la misma distribución de grados, y una explicación detallada de cómo esta métrica se relaciona con nociones como autosimilitud de grafos, verosimilitud, assortatividad y «libre de escala» se presentará en otra publicación.

5. COMPARING TOPOLOGIES

En esta sección, comparamos las características de varios grafos de redes diferentes utilizando las métricas descritas anteriormente. Nuestro objetivo es demostrar que las redes con la misma distribución de grados de nodos (ley de potencia) pueden (1) tener características muy diferentes y (2) parecer engañosamente similares desde una perspectiva que sólo considera las propiedades de la teoría de grafos.

5.1 A First Example

Nuestra primera comparación se realiza entre cinco redes resultantes de la conexión preferencial (PA), el método GRG con una secuencia de grados de nodo esperada dada, un diseño óptimo heurístico genérico, un diseño heurístico inspirado en Abilene y un diseño subóptimo heurístico. En todos los casos, las redes presentadas tienen la misma distribución de grados de ley de potencia. Si bien algunos de los métodos no permiten la construcción directa de una distribución de grados seleccionada, podemos utilizar el recableado con preservación de grados como un método efectivo (aunque algo artificial) para obtener la topología dada. En particular, primero generamos la red PA, luego reorganizamos los enrutadores y enlaces para obtener redes diseñadas heurísticamente manteniendo la misma distribución de grados. Finalmente, generamos una topología adicional según el método GRG. Lo más importante aquí son las topologías y sus diferentes características, no el proceso ni el algoritmo específico que las generó.

Conexión Preferencial (CP). La red CP se genera mediante el siguiente proceso: se comienza con 3 nodos totalmente conectados y, en pasos sucesivos, se añade un nuevo nodo al grafo, de manera que este nuevo nodo se conecte a los nodos existentes con una probabilidad proporcional al grado del nodo actual. Finalmente, se genera una red con 1000 nodos y 1000 enlaces. Nótese que esta estructura inicial es esencialmente un árbol. Este árbol se amplía añadiendo sucesivamente enlaces adicionales según [3]. Es decir, en cada paso, se elige un nodo al azar y se conecta a los demás nodos con una probabilidad proporcional al grado del nodo actual. La topología CP resultante se muestra en la Figura

6(b) y tiene una distribución de grados aproximada de ley de potencia, como se muestra en la Figura 6(a).

Método del Grafo Aleatorio General (GAG). Se utiliza la secuencia de grados de la red CP como grado esperado para generar otra topología mediante el método GAG. Cabe destacar que **este generador de topología no garantiza la obtención de un grafo conexo**, por lo que seleccionamos el componente gigante de la estructura resultante e ignoramos los bucles, como en [42]. Para asegurar la distribución de grados adecuada, añadimos enrutadores de aristas de grado uno a este componente gigante. Dado que el número total de enlaces en el componente gigante suele ser mayor que el número de enlaces en un grafo PA equivalente con el mismo número de nodos, el número de enrutadores de aristas que podemos añadir es menor que en el grafo original. La topología resultante se muestra en la Figura 6(c), y si bien resulta difícil visualizar todos los detalles de la red, una característica clave es la presencia de nodos centrales altamente conectados.

Topología Heurísticamente Óptima (HOT). Obtenemos nuestro grafo HOT mediante una reconexión heurística, no aleatoria y que conserva el grado de los enlaces y enrutadores en el grafo PA. Seleccionamos 50 de los nodos de menor grado en el centro para que actúen como enrutadores centrales, y también seleccionamos los demás nodos de mayor grado conectados a cada núcleo como enrutadores de puerta de enlace. Ajustamos las conexiones entre los enrutadores de puerta de enlace de manera que su ancho de banda agregado hacia un nodo central se distribuya de forma casi equitativa. El número de enrutadores de borde ubicados en el borde de la red se ajusta al grado de cada puerta de enlace. La topología resultante se muestra en la Figura 6(d). En este modelo, existen tres niveles de jerarquía de enrutadores, cada uno de los cuales se corresponde aproximadamente (comenzando en el centro de la red y avanzando hacia los bordes) con la red troncal, las puertas de enlace regionales/locales y los enrutadores de borde. Por supuesto, existen otros diseños posibles con características diferentes. Por ejemplo, podríamos haber reorganizado la red para tener un número diferente de enrutadores centrales, siempre que mantuviéramos nuestro enfoque heurístico de usar enrutadores de bajo grado (y alto ancho de banda) en la construcción del núcleo de la red.

Topología inspirada en Abilene. Afirmamos que el diseño de la red troncal de Abilene es heurísticamente óptimo. Para ilustrarlo, construimos una versión simplificada de Abilene en la que reemplazamos cada una de las nubes de red perimetrales de la Figura 4 con un único enrutador de puerta de enlace que admite varios hosts finales. Asignamos los hosts finales a los enrutadores de puerta de enlace de manera que se obtenga la misma ley de potencia aproximada en la distribución general del grado de los nodos. La topología resultante con esta distribución del grado de los nodos se ilustra en la Figura 6(d).

Topología subóptima. Para fines comparativos, incluimos una red diseñada heurísticamente que no se ha optimizado para el rendimiento (Figura 6(f)). Esta red tiene un núcleo de enrutadores en cadena, pero, nuevamente, presenta la misma distribución general del grado.

Rendimiento. Para cada una de estas redes, imponemos la misma restricción tecnológica a los enrutadores que no son de borde. En particular, y para adaptarnos a estas redes simples, utilizamos un enrutador ficticio basado en el Cisco GSR 12410, pero modificado

para que el número máximo de puertos que puede gestionar coincida con el grado máximo generado anteriormente (véase la línea punteada en la figura 7(b-f)). De este modo, cada una de estas redes tiene el mismo número de nodos y enlaces que no son de borde, así como la misma distribución de grados entre dichos nodos. En conjunto, estas suposiciones garantizan el mismo «coste» total (medido en enrutadores) para cada red. Utilizando el índice de rendimiento definido en la sección 4.2, calculamos el rendimiento de estas cinco redes. Entre las redes diseñadas heurísticamente, el modelo HOT alcanza los 1130 Gbps y la red inspirada en Abilene alcanza los 395 Gbps, mientras que la red subóptima alcanza solo los 18,6 Gbps. Para los gráficos generados aleatoriamente, PA y GRG alcanzan solo 11,9 Gbps y 16,4 Gbps respectivamente, un rendimiento aproximadamente 100 veces inferior al de la red HOT. La principal razón del bajo rendimiento de los modelos PA y GRG radica precisamente en

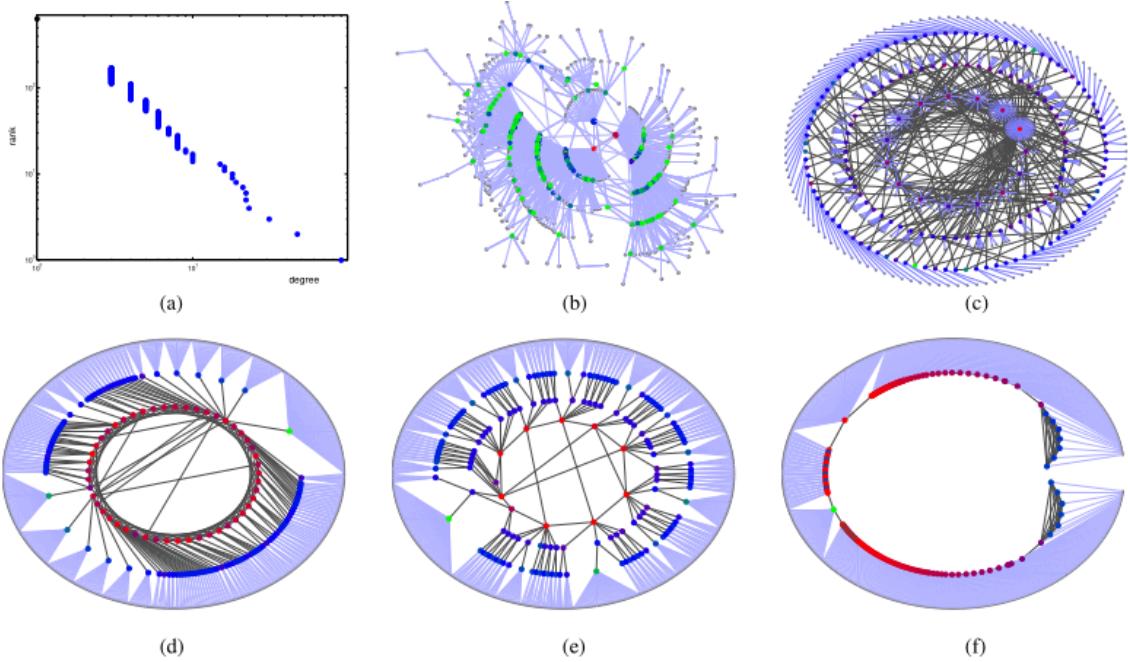


Figura 6: Cinco redes con la misma distribución de grados de nodo. (a) Distribución común de grados de nodo (grado frente a rango en escala log-log); (b) Red resultante de la conexión preferencial; (c) Red resultante del método GRG; (d) Topología heuristicamente óptima; (e) Topología inspirada en Abilene; (f) Topología diseñada de forma subóptima.

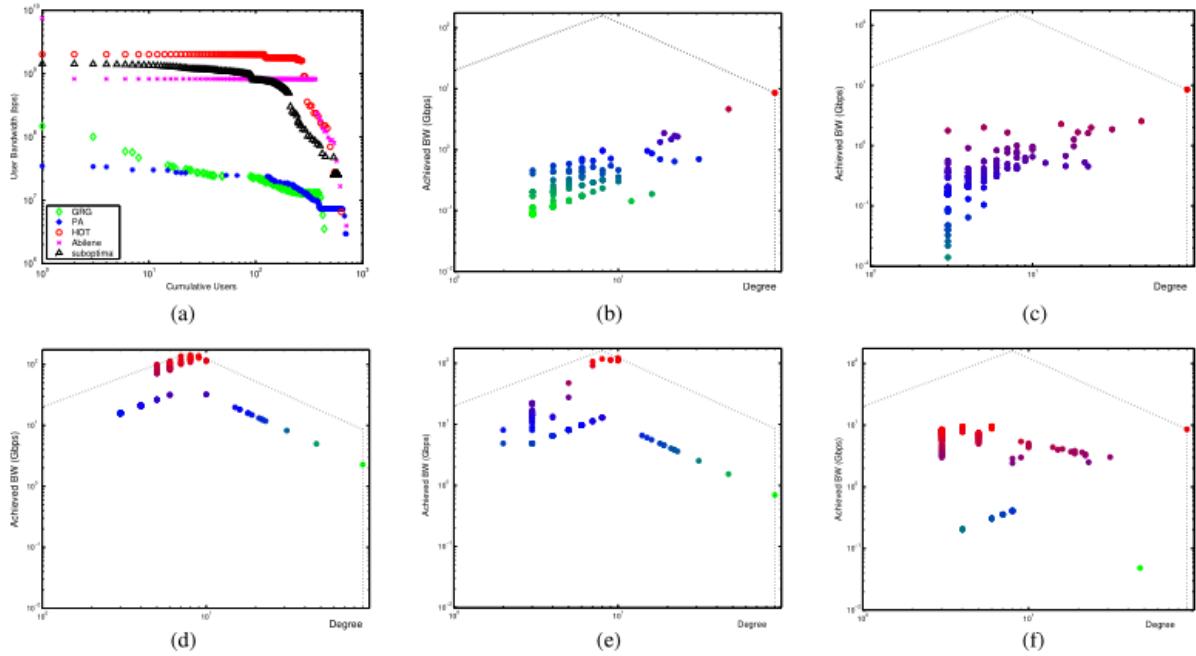


Figura 7: (a) Distribución del ancho de banda de los usuarios finales; (b) Utilización de enrutadores para la red PA; (c) Utilización de enrutadores para la red GRG; (d) Utilización de enrutadores para la topología HOT; (e) Utilización de enrutadores para la topología inspirada en Abilene; (f) Utilización de enrutadores para un diseño de red subóptimo. La escala de colores de cada enrutador en cada gráfico indica su ancho de banda, de forma similar a los enrutadores de la Figura 6.

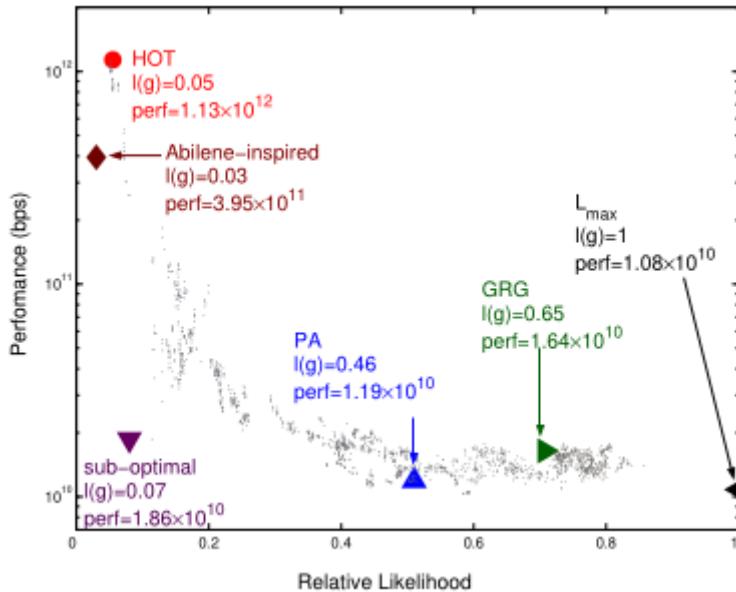


Figura 8: Rendimiento frente a probabilidad para cada topología, además de otras redes que tienen la misma distribución de grados de nodo obtenida mediante el reconectado aleatorio por pares de enlaces.

la presencia de los "hubs" altamente conectados, que generan cuellos de botella de bajo ancho de banda. El núcleo en malla del modelo HOT, similar al de Internet, agrega el tráfico y lo distribuye entre múltiples enrutadores de alto ancho de banda. Calculamos la distribución del ancho de banda de los usuarios finales y la utilización de los enrutadores

cada red alcanza su máximo rendimiento. La figura 7(a) muestra que la red HOT puede soportar usuarios con una amplia gama de necesidades de ancho de banda, mientras que los modelos PA y GRG no. La figura 7(d) muestra que los enrutadores alcanzan una alta utilización en la red HOT, mientras que, cuando los "hubs" de alto grado se saturan en las redes PA y GRG, el resto de los enrutadores quedan subutilizados (figuras 7(b)(c)). Las redes generadas por estos dos métodos probabilísticos basados en grados son esencialmente iguales en términos de su rendimiento.

Rendimiento frente a probabilidad. En la Figura 8 se observa un marcado contraste al graficar simultáneamente el rendimiento frente a la probabilidad para los cinco modelos. La red HOT presenta un alto rendimiento y una baja probabilidad, mientras que las redes PA y GRG presentan una alta probabilidad pero un bajo rendimiento. Esto se interpreta como:

Un proceso de diseño cuidadoso que incorpore explícitamente las restricciones tecnológicas puede generar topologías de alto rendimiento, pero estas son extremadamente raras desde la perspectiva de un grafo probabilístico. En contraste, las redes con distribución de grado de ley de potencia equivalentes, construidas mediante construcciones probabilísticas genéricas basadas en el grado, dan como resultado topologías más probables, pero con un rendimiento deficiente. La red Lmax "más probable" (también graficada en la Figura 8) tiene un rendimiento deficiente.

Esta perspectiva se amplía si se considera el proceso de reconexión aleatoria por pares que conserva el grado como un medio para explorar el espacio de grafos con la misma distribución de grado general. En la Figura 8, cada punto representa una red diferente obtenida mediante reconexión aleatoria. A pesar de que todos estos grafos tienen la misma distribución de grado general, observamos que un gran número de estas redes tienen una probabilidad relativamente alta y un rendimiento bajo. Todos estos grafos, incluidas las redes PA y GRG, son consistentes con los denominados modelos «libres de escala», ya que contienen nodos centrales altamente conectados. El hecho de que existan muy pocos grafos de alto rendimiento en este espacio indica que sería difícil encontrar un diseño relativamente bueno mediante reconexión aleatoria. Observamos también que una baja probabilidad no garantiza por sí sola una red de alto rendimiento, como demuestra la red de la figura 6(f), que muestra la posibilidad de identificar redes probabilísticamente raras y de bajo rendimiento. Sin embargo, según la evidencia actual, parece imposible construir, con la tecnología existente, una red que sea a la vez de alto rendimiento y alta probabilidad.

5.2 A Second Example

La figura 6 muestra que grafos con la misma distribución de grados de nodo pueden tener estructuras muy diferentes, sobre todo en lo que respecta a los detalles de ingeniería. Asimismo, un mismo diseño de red troncal puede soportar diversas distribuciones de ancho de banda para el usuario final y, en general, la variabilidad en la demanda de ancho de banda del usuario final determina la variabilidad de los grados de nodo en la red resultante. Para ilustrarlo, consideremos el ejemplo sencillo de la figura 9, donde la misma red troncal admite distintos tipos de variabilidad en el ancho de banda del usuario final en el borde (y, por lo tanto, genera distintas distribuciones de grados de nodo). La red de la figura 9(a) proporciona un ancho de banda uniformemente alto a los usuarios finales; la red de la figura 9(b) soporta una demanda de ancho de banda muy variable; y la red de la figura 9(c)

proporciona un ancho de banda uniformemente bajo. Por consiguiente, desde una perspectiva de ingeniería, no solo no existe necesariamente una relación implícita entre la distribución de grados de una red y su estructura troncal, sino que tampoco existe una relación implícita entre la estructura troncal de una red y su distribución de grados general.

6. DISCUSSION

Los ejemplos analizados en este artículo ofrecen una nueva perspectiva sobre el espacio de todos los grafos posibles de un tamaño determinado, sujetos a restricciones estadísticas macroscópicas comunes, como una distribución de grados de nodo (ley de potencia) dada. Por un lado, al observarlos en términos de la métrica de verosimilitud (relativa), se aprecia una región densa que evita los extremos del eje de verosimilitud y está poblada por grafos resultantes de procesos de generación aleatoria, como PA y GRG. Si bien es posible identificar detalles específicos de cada una de estas configuraciones «genéricas» o «probables», al analizarlas desde la perspectiva de la mayoría de las estadísticas macroscópicas consideradas actualmente, todas se asemejan mucho y resultan difíciles de distinguir. Sus núcleos de red contienen nodos de alta conectividad que facilitan la generación de la distribución de grados de ley de potencia deseada. En vista de esto, no sorprende que los teóricos que consideran métodos probabilísticos para generar grafos con distribuciones de grados de nodo de ley de potencia y que se basan en descripciones estadísticas de las propiedades globales del grafo «descubran» estructuras características de los modelos basados en grados.

Sin embargo, la situación cambia drásticamente al considerar el rendimiento de la red como una segunda dimensión y representar los grafos como puntos en el plano probabilidad-rendimiento. Los grafos «genéricos» o «probables», que conforman gran parte del espacio de configuración total, tienen un rendimiento tan deficiente que resulta completamente irrealista que puedan representar de forma razonable un sistema altamente sofisticado como un ISP o Internet en su conjunto. En contraste, observamos que incluso modelos simples, diseñados y optimizados heurísticamente, que concilian las compensaciones entre los costes de enlace, las limitaciones del enrutador y la demanda de tráfico de usuarios, dan como resultado configuraciones con alto rendimiento y eficiencia. Al mismo tiempo, estos diseños son altamente «no genéricos» y extremadamente improbables de obtener mediante cualquier método de generación de grafos aleatorios. Sin embargo, también son «frágiles», en el sentido de que incluso una pequeña cantidad de reconexión aleatoria destruye sus características altamente diseñadas y da como resultado un rendimiento deficiente y una pérdida de eficiencia. Claramente, esto no es sorprendente: ¡no se puede esperar poder reconectar aleatoriamente el grafo de conectividad a nivel de enrutador de Internet y mantener una red de alto rendimiento!

Una característica importante del diseño de redes que no se ha abordado aquí es la robustez de la red ante el fallo de nodos o enlaces. Si bien las discusiones previas sobre robustez han presentado

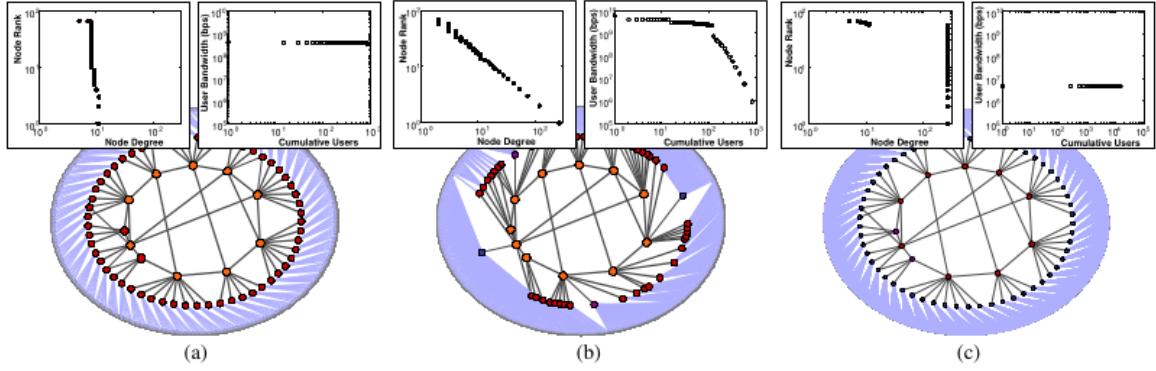


Figura 9: Distribución del grado de nodo y anchos de banda de los usuarios finales para varias topologías que tienen la misma estructura central: (a) usuarios finales con ancho de banda uniformemente alto, (b) usuarios finales con ancho de banda altamente variable, (c) usuarios finales con ancho de banda uniformemente bajo.

como se menciona en la literatura [4, 42], hemos optado por centrarnos en el análisis del rendimiento y la probabilidad, que consideramos más sencillo y revelador. Si bien nuestro enfoque basado en primeros principios no impide la incorporación de la robustez, hacerlo requeriría abordar cuidadosamente los problemas específicos de la red relacionados con el diseño de Internet. Por ejemplo, la robustez debe definirse en función de su impacto en el rendimiento de la red, debe ser coherente con las diversas restricciones económicas y tecnológicas existentes, y debe incluir explícitamente las características específicas de la red que proporcionan robustez en la Internet real (por ejemplo, la redundancia de componentes y el control de retroalimentación en el enrutamiento IP). Las nociones simplistas de teoría de grafos sobre clústers conectados [4] o resiliencia [42], aunque interesantes, resultan insuficientes para abordar las características relevantes para la red real.

Estos hallazgos parecen indicar que el enfoque basado en primeros principios propuesto, junto con sus implicaciones, es tan inmediato, especialmente desde una perspectiva de redes, que no merece la pena documentarlo. Pero entonces, **¿por qué la literatura sobre redes, centrada en la generación, validación y comprensión de diseños de red, está dominada por modelos generativos que priorizan la aleatoriedad sobre el diseño y el «descubrimiento» de estructuras que, en principio, deberían surgir de estos modelos probabilísticos sin necesidad de una explicación especial?** Creemos que la respuesta radica en la ausencia de un enfoque metodológico concreto para comprender y evaluar estructuras como la topología a nivel de enrutador de Internet. Partiendo de [12, 48], este trabajo presenta dicho enfoque y lo ilustra con modelos alternativos que representan un claro cambio de paradigma en cuanto a la identificación y explicación de las relaciones de causa y efecto presentes en estructuras gráficas diseñadas a gran escala.

Otra crítica que se puede hacer al enfoque presentado en este artículo es el uso casi exclusivo de modelos simplificados y una dependencia muy limitada de grafos reales a nivel de enrutador (por ejemplo, basados en datos derivados de Mercator, Skitter o Rocketfuel). Sin embargo, como se ilustra, nuestros modelos simplificados son lo suficientemente ricos como para resaltar algunos de los aspectos clave de nuestro enfoque basado en principios fundamentales. A pesar de su naturaleza caricaturesca, transmiten un mensaje muy claro:

los esfuerzos por desarrollar mejores generadores de redes basados en grados son cuestionables, principalmente debido a su incapacidad inherente para ocupar la esquina superior izquierda del plano probabilidad-rendimiento, donde deben ubicarse los modelos a nivel de enrutador, similares a los de Internet, para alcanzar un nivel de rendimiento aceptable. Al mismo tiempo, los modelos de juguete considerados son lo suficientemente simples como para representar visualmente su diseño «no genérico», permitir una comparación directa con sus contrapartes aleatorias y explicar la crucial relación entre probabilidad y rendimiento. Si bien experimentar con grafos reales a nivel de enrutador será un aspecto importante del trabajo futuro, inferir grafos precisos a nivel de enrutador y anotarlos con capacidades reales de enlaces y nodos constituye un tema de investigación en sí mismo, a pesar del progreso significativo que se ha logrado recientemente en esta área con proyectos como Rocketfuel, Skitter o Mercator.

Cualquier trabajo sobre generación y evaluación de topologías de Internet corre el riesgo de ser considerado incompleto o demasiado preliminar si no ofrece el producto definitivo: **un generador de topologías**. En este sentido, nuestro trabajo no es diferente, pero con razón. Como documento metodológico, abre una nueva línea de investigación para identificar las fuerzas causales que actualmente influyen en las propiedades de las redes a gran escala o que podrían desempeñar un papel fundamental en la configuración de las redes futuras. Este aspecto del trabajo requiere una estrecha colaboración y retroalimentación de ingenieros de redes, para quienes todo el enfoque resulta obvio. Al mismo tiempo, el documento plantea un enfoque en gran medida independiente de la literatura existente y que solo puede beneficiarse de la retroalimentación constructiva de la comunidad investigadora. En cualquier caso, esperamos que siente las bases para un diálogo fructífero entre investigadores y profesionales de redes, tras el cual el desarrollo de un generador de topologías radicalmente diferente se perfila como un importante problema de investigación abierto.

Finalmente, no afirmamos que los resultados obtenidos para la topología a nivel de enrutador de (partes de) Internet se apliquen a redes lógicas o virtuales definidas sobre la infraestructura física en capas superiores de la pila de protocolos, donde las restricciones físicas tienden a tener menor relevancia, o ninguna (por ejemplo, grafos AS, grafos web, redes P2P).

Tampoco sugerimos que se apliquen directamente a redes construidas con tecnologías fundamentalmente diferentes (por ejemplo, redes de sensores). Sin embargo, incluso en estos casos, creemos que las metodologías que consideran explícitamente aspectos tecnológicos, económicos u otros aspectos clave relevantes pueden proporcionar información similar sobre lo que importa al diseñar, comprender o evaluar las topologías correspondientes.