Aplicación de Métodos Cuantitativos para la Caracterización de Internet y la Optimización de su Funcionamiento

Dr. Ing. Claudio Risso

Dra. Ing. Cristina Mayr

Dr. Ing. Eduardo Grampín

Dr. Ing. Eduardo Canale

MSc. Ing. Pablo Cuello

Ing. José Restaino
MSc. (en curso)

Ing. Carlos Martínez Cagnazzo
MSc. (en curso)

Resumen de la investigación

Internet es una red de redes. Consta de un conjunto de miles de Sistemas Autónomos (AS) que intercambian millones de anuncios de accesibilidad de prefijos de red mediante el Protocolo de Puerta de Enlace de Borde (BGP). Esto ocurre en sus dos variantes: eBGP entre diferentes ASes e iBGP dentro de un mismo AS.

Garantizar una visibilidad completa, la diversidad de rutas, la ausencia de bucles, la optimización y la seguridad, no es un problema trivial. Esto nos ha llevado a realizar estudios de investigación y proponer soluciones prácticas, concretas y aplicadas a casos reales. En ello, hemos utilizado diferentes enfoques detallados a continuación: (a) el uso del routing dentro de un AS mediante la reducción de costos; (b) la ubicación óptima de reflectores de ruta con un diseño basado en overlay; (c) posibles agrupamientos de prefijos de IP para reducir la dimensión y complejidad del problema; (d) el uso de datos públicos; (e) la aplicación de técnicas para simular su comportamiento junto a modelos probabilísticos.

Antecedentes, problemática y relevancia del estudio

Desde mediados de los años noventa, Internet ha integrado progresivamente todas las formas de comunicación en el conglomerado tecnológico más extenso, distribuido y complejo jamás creado por la humanidad. Ese crecimiento se sustentó en la flexibilidad de su arquitectura estratificada con protocolos que permiten adaptaciones mediante extensiones, unidos a una comunidad técnica ágil, basada en la delegación de responsabilidades y la interoperabilidad a través de estándares. Actualmente, Internet es un mosaico de sistemas autónomos interconectados y organizados en capas superpuestas. Sin embargo, esa modularidad dificulta la coordinación global de recursos y parámetros, limitando la posibilidad de una optimización automatizada a escala global.

Marco metodológico y diseño del estudio

La línea de investigación desarrollada por este grupo se basa en la confección de modelos cuantitativos orientados a representar y resolver diversos subproblemas inherentes a las prácticas operativas y tecnológicas de Internet.

Dichos modelos matemáticos permiten capturar el comportamiento esperado de la red o de segmentos específicos de ella, según las configuraciones de la infraestructura y los ajustes de los protocolos implementados. Posteriormente, mediante técnicas numéricas, se busca alcanzar diseños optimizados en distintas dimensiones del funcionamiento, tales como costos, calidad de servicio o seguridad. Nuestro trabajo se alinea tras la metodología, siendo cada problema específico un caso de aplicación del *framework*.

Aplicaciones concretas de la metodología

Entre los problemas resueltos en este marco destaca el **“Diseño Integrado de Redes”**, específicamente cómo optimizar el despliegue de redes implementadas mediante capas superpuestas (overlays), o sea: en un stack de infraestructura con protocolos.

Un ejemplo es el diseño de la red IP/MPLS de un proveedor de servicios (ISP), minimizando el costo asociado al consumo y/o arrendamiento de transporte óptico, construyendo también una topología capaz de sostener una matriz de tráfico dada frente a escenarios simples de falla física (ver Figura 1).

Otro caso es (a topología dada), diseñar el overlay de reflectores de rutas iBGP para un sistema autónomo (AS) incluyendo sus adyacencias. Este caso presenta el objetivo de minimizar la cantidad de reflectores y sesiones necesarias, garantizando un ruteo BGP-óptimo, incluso frente la caída de un ASBR (router de borde de siste

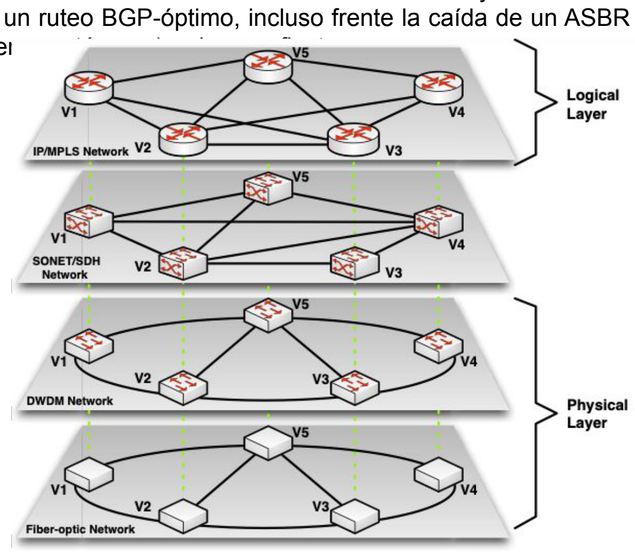

Figura 1 – Diseño de Overlay

Necesidad de datos consolidados

En este marco, la resolución de cada instancia particular de un problema requiere un conjunto de datos como insumo. En el diseño de un overlay IP/MPLS para un ISP, dicha información suele estar disponible por parte del propio operador. En el caso del overlay de iBGP, es necesario capturar y estructurar la distribución de actualizaciones eBGP en cada router de borde del sistema autónomo (ASBR), tarea de gran complejidad, o bien simularla a partir de una representación realista de la topología global de ASes en Internet.

La reconstrucción de características de Internet a partir de fuentes de datos públicas constituye otra línea de extenso trabajo, esencial para alimentar con información precisa las optimizaciones aplicadas sobre los modelos. En la Figura 2, se muestra la matriz de adyacencias de Internet a mayo de 2025 reconstruida a partir de los repositorios de RIS-RIPE y Route-Views, para los 85640 AS anunciados por BGP, totalizado 1,315,776/2=657,888 adyacencias.

Líneas de desarrollo actuales, futuras y conclusiones

El desarrollo sostenido de modelos y la construcción de repositorios precisos con datos estructurales de Internet permitirán generar una sinergia que facilite la expansión de aplicaciones dentro de este enfoque metodológico.

Entre las líneas de trabajo actualmente en curso se destaca el ajuste estadístico de la matriz de adyacencias de Internet. Dado que las capturas de BGP disponibles a través de RIPE-RIS y Route-Views representan sólo una fracción del total de sistemas autónomos (AS) y combinan adyacencias de peering con otras de tránsito pasa a ser necesario: (a) integrar información de fuentes complementarias; (b) aplicar un proceso de maximización de la verosimilitud. Estas acciones permitirían estimar de forma separada las matrices de peering y tránsito.

Una aplicación concreta de estos resultados apunta a diseñar estrategias para asegurar los updates de BGP mediante el despliegue optimizado de tecnologías existentes como RPKI (Resource Public Key Infrastructure) mediante el uso de ROAs (Route Origin Authorizations) y ROV (Route Origin Validation) para su posterior verificación. Este despliegue optimizado permitiría consultar la información de RPKI y decidir si un anuncio de ruta BGP es legítimo o no. En otras palabras, se busca determinar dónde y cómo priorizar la implementación de esas tecnologías con el fin de mitigar incidentes como Route Leaks y Hijacks.

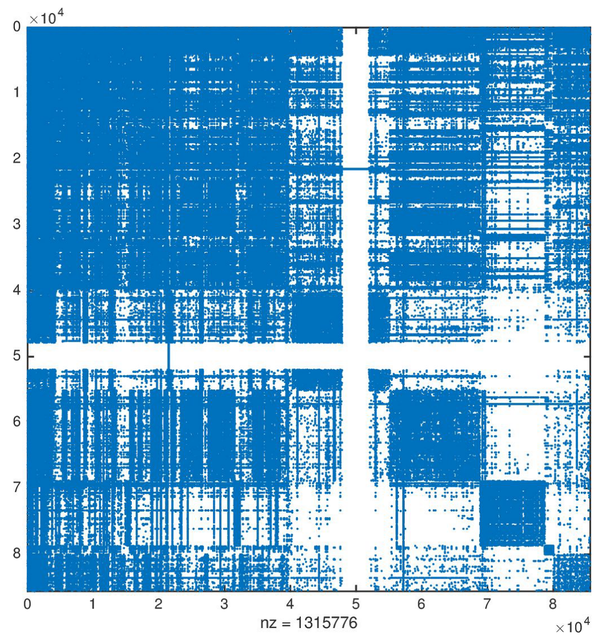

Figura 2 – Matriz de adyacencias de Internet

Afiliación

Universidad de la República (Facultad de Ingeniería).

Universidad de Montevideo, (Facultad de Ingeniería).

Administración Nacional de Telecomunicaciones (ANTEL)

LACNIC

Contactos

crisso@fing.edu.uy

investigacionaplicada@lacnic.net

Reconocimientos

Estas investigaciones han contado con el apoyo económico del “Programa de Desarrollo de las Ciencias Básicas” (PEDECIBA, Uruguay), la “Comisión Sectorial de Investigación Científica” (CSIC, UdelaR, Uruguay) e inicialmente del “Programa FRIDA” (LACNIC). Adicionalmente, las mismas han sido parte de la colaboración desarrollada por LACNIC con grupos de investigación e instituciones académicas regionales en el marco del **Proyecto de Colaboración Efectiva para Investigación Aplicada (LACNIC)**.

Citación de esta publicación

C. Risso, C. Mayr, E. Grampín, E. Canale, P. Cuello, J. Restaino, C. Martínez Cagnazzo. “Aplicación de Métodos Cuantitativos para la Caracterización de Internet y la Optimización de su Funcionamiento” [Presentación de póster]. Presentado en: LACNIC 44-LACNOG 2025, 6-10 de octubre de 2025, San Salvador, El Salvador.