

Preliminares de la adaptación del algoritmo PA-VNE para la reasignación de redes virtuales mapeadas y la selección entre diferentes tipos de métricas¹

Preliminaries in the adaptation of the algorithm PA-VNE for the reallocation of mapped virtual networks and the choice between different types of metrics

N. Alzate, J.R. Amazonas y J.F. Botero

Recibido Junio 05 de 2015 – Aceptado Septiembre 23 de 2015

Resumen — La arquitectura actual de la internet no permite la introducción de innovaciones debido, entre otras razones, a la competencia entre proveedores de servicio. Como una posible solución a este problema, se ha propuesto, la virtualización de red. Para la implementación de esta tecnología se necesita de un algoritmo que pueda ubicar las redes virtuales sobre los

recursos de la red física, de una forma óptima, según las métricas a considerar. Este artículo presenta los avances preliminares de la investigación acerca de la optimización del algoritmo PA-VNE y su implementación en una red definida por software.

Palabras clave — Algebra de Caminos, backtracking, mapeo de redes virtuales, redes definidas por software, relación competitiva, virtualización de redes.

¹Producto derivado del proyecto de investigación “Adaptación del algoritmo NPA-VNE para la reasignación de redes virtuales mapeadas y la selección entre diferentes tipos de métricas”. Presentado por el Grupo de Investigación GIII, de la Facultad de Ciencias Básicas e Ingeniería, avalado por el centro de innovación e investigación de la Universidad Católica de Pereira y presentado como requisito de grado en la maestría en Computación de la Universidad Tecnológica de Pereira.

N. Alzate, docente de la Facultad de Ciencias Básicas e Ingeniería de la universidad Católica de Pereira, Pereira (Colombia); email: nestor.alzate@ucp.edu.co.

J.R. Amazonas, docente del Departamento de Telecomunicaciones e Ingeniería de Control en EPUSP, Sao Paulo (Brasil); email: jra@lcs.poli.usp.br

J.F. Botero, Docente en el Departamento de Ingeniería Electrónica y de Telecomunicaciones de la Universidad de Antioquia, Medellín (Colombia); email: juanf.botero@udea.edu.co

Abstract — the current architecture of the internet does not allow the introduction of innovations, due to, among other reasons, competition between service providers. Network virtualization has been proposed as a possible solution to this problem. For the implementation of this technology, an algorithm that can locate the virtual networks on the physical network resources in an optimal way, according to the metrics to consider, is required. This article presents preliminary research advances about the optimization of the algorithm PA-VNE, and its implementation through a software defined network.

Descriptors — Path Algebra, backtracking, virtual network mapping, software defined network, competitive ratio, network virtualization.

I. INTRODUCCIÓN

La Internet ha cambiado la forma de comunicarnos en todos nuestros ámbitos. Desde su creación ha evolucionado incrementalmente, a través de grandes inversiones en diferentes tecnologías, que dan soporte a diversos servicios distribuidos; en consecuencia, la arquitectura de la internet es robusta y se ha osificado [1] dada la dificultad de concertar cambios globales entre los operadores y partes interesadas en la misma.

“Como resultado, las alteraciones en la arquitectura de la Internet se han limitado a simples actualizaciones y las implementaciones de nuevas tecnologías de red adicionales se han vuelto cada vez más difíciles” [2]. Por ejemplo: IPv6, servicios integrados (IntServ), servicios diferenciados (DiffServ), IP *multicast* y protocolos de enrutamiento seguros.

La virtualización de redes es una propuesta de arquitectura donde múltiples redes heterogéneas cohabitan sobre una misma red sustrato. Esta característica la hace ideal para acelerar la innovación de servicios; específicamente, el modelo de negocios propuesto por la virtualización de red permite superar la actual osificación de la red misma [3-5].

Un problema fundamental para la virtualización de redes consiste en asignar cada una de las peticiones de redes virtuales (VNR) óptimamente sobre los recursos de la red sustrato (SN). Este problema es formalmente conocido mapeo o incrustación de redes virtuales (VNE), por tal motivo los algoritmos que se diseñan para este tipo de problemas son conocidos como algoritmos VNE [6-8].

Dado el nuevo modelo de negocios propuesto para Internet con la intervención de la virtualización de redes [9, 10], un factor para poder obtener la mayor cantidad de ganancia, es lograr la mayor cantidad de asignaciones de las VNR sobre la red sustrato. Con este fin se está investigando el desarrollo de algoritmos que estén en capacidad de reasignar recursos de la SN cuando las VNR sean rechazadas, ya sea porque los recursos están siendo utilizados al máximo o porque los recursos de las SN están fragmentados.

Una limitante en las investigaciones acerca de los algoritmos VNE, es la dificultad para analizar diferentes criterios de optimización simultáneamente, debido a la cantidad y a la linealidad o no de las variables llamadas métricas.

Por otro lado, una nueva arquitectura de red conocida como Redes Definidas por Software (SDN) se ha ganado el interés de los investigadores y de la industria. Este nuevo escenario es ideal para la virtualización de redes debido al desacople entre los planos de control y de datos [11], permitiendo la flexibilidad y programabilidad necesarias para la implementación de la virtualización de redes.

Por estas razones, el propósito de este estudio es abordar los problemas abiertos de la virtualización de redes anteriormente mencionados mediante la ejecución de los siguientes objetivos:

- Diseñar un algoritmo con el fin de reasignar redes virtuales mapeadas cuando una VNR sea rechazada, usando la técnica de *backtracking*, y adaptarlo al algoritmo *Paths Algebra Virtual Network Embedding* (PA-VNE) [12].
- Construir un algoritmo bajo el concepto de relación competitiva que permita evaluar la fragmentación de los recursos de la red sustrato y su adaptación al PA-VNE.
- Integrar un mecanismo de selección de múltiples métricas que serán evaluadas usando el álgebra de caminos en el PA-VNE.
- Implementar la adaptación completa del algoritmo PA-VNE en una red definida por software.

Las técnicas propuestas con las que se pretende afrontar el problema VNE han sido planteadas o investigadas con resultados favorables. Tal es el caso de la recursividad de *backtracking* en [13-17], el álgebra de caminos en [12, 18], la relación competitiva [19-23], así como en [24-32] donde queda evidenciada la conveniencia de utilizar las redes definidas por software para la implementación de la virtualización de redes. Lo que se proyecta hacer con estas técnicas implementadas en el problema VNE, es mejorar la tasa de aceptación del número de redes virtuales mapeadas en la red sustrato, al invocar un algoritmo de marcha atrás cuando una VNR sea rechazada o cuando la relación competitiva indique cierto grado de fragmentación.

Este artículo pretende mostrar el acercamiento conceptual de los algoritmos y tecnologías, así como la revisión de antecedentes, ver Tabla I, que fundamentan el proceso de investigación de la tesis de maestría del primer autor, el resto del artículo está organizado de la siguiente manera: la sección 2 hace un análisis del problema VNE. En la sección 3 se explora el álgebra de caminos. La sección 4 pretende explicar las características del algoritmo PA-VNE. La sección 5 estudia la técnica de *backtracking*. En la sección 6, se realiza un acercamiento teórico acerca de la relación competitiva. La sección 7 muestra los conceptos de las SDN. En la sección 8, se presenta una breve discusión de cómo se han abordado las investigaciones acerca del VNE. La sección 9 presenta los principales desafíos de investigación en el tema de VNE y SDN. La sección 10 presenta las conclusiones de artículo.

TABLA I. TRABAJOS SELECCIONADOS PARA REVISIÓN.

Tema	Artículo	Contribución con base al tema
Backtracking	[14]	Reasignan recursos minimizando los costos globales del mapeo.
	[15]	Maximizan la eficiencia en la utilización del ancho de banda de los enlaces, pensando en la eficiencia de la computación en la nube.
	[16]	Incrementan la tasa de incrustaciones al realizar mapeos de nodos en regiones cercanas, mejorando la utilización de enlaces.
	[17]	Implementan de un algoritmo de búsqueda de subgrafos que cumplan con las restricciones impuestas.
Relación Competitiva - Fragmentación	[19]	Desarrollan un algoritmo que mejora su relación competitiva y que puede ser implementado en diferentes tipos de modelos para su evaluación.
	[20]	Introducen una métrica que mide el grado de fragmentación en la red sustrato.
	[21]	Diseñan un algoritmo que selecciona y reasigna VN dependiendo de la fragmentación que generan en una región de la SN, además de una técnica que reduce el tiempo de disrupción cuando se hacen las reasignaciones.
	[22]	Introducen un algoritmo que mejora los costos computacionales cuando se hacen reasignaciones y remapeos de las NV.
	[23]	Formulan un algoritmo que reconfigura VNR ante cualquier rechazo en la incrustación.
Redes Definidas por Software	[24]	Evidencia la oportunidad que ofrece las SDN para implementar la virtualización de redes.
	[29]	Virtualizan redes usando el protocolo Openflow para un ambiente definido en la nube.
	[30]	Presentan un trabajo donde Virtualizan redes de forma coordinada teniendo en cuenta también la ubicación del controlador dentro de las SDN.
	[32]	Realizan mapeos coordinados usando Openflow en una SDN.

II. MAPEO DE REDES VIRTUALES

La virtualización de redes juega un papel importante al permitir que múltiples arquitecturas de redes heterogéneas cohabiten en una SN [33-36], siendo esta una propuesta llamada a liberar la osificación de internet. El principal desafío de la virtualización de redes reside en garantizar el uso óptimo de los recursos de la red sustrato, cuando se mapean en ella las solicitudes de las redes virtuales [37-40]. Los algoritmos que abordan este tipo de problema se conocen como algoritmos VNE.

El proceso del mapeo se debe llevar a cabo tanto en los nodos, como en los enlaces de la SN, estos mapeos se conocen como *Virtual Node Mapping* (VNoM) y *Virtual Link Mapping* (VLiM), que resuelven el problema de asignar enlaces virtuales a caminos en la red sustrato que conecten a los nodos sustrato, a los que se asignan los nodos virtuales extremos del enlace virtual, respectivamente. Este proceso se ilustra en la Fig 1. La realización de estos mapeos se puede llevar a cabo en etapas separadas [41, 42] o de manera coordinada [43, 44].

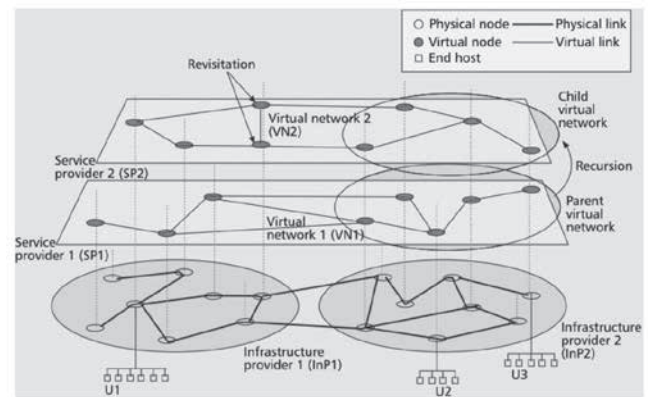


Fig 1. Arquitectura basada en virtualización de red [3].

Cuando se modela el proceso, se deben considerar diferentes tipos de escenarios, además de la acción del mapeo; a continuación se mencionan algunos de ellos:

- El conocimiento del arribo con o sin antelación de las VNR.
- La utilización de los recursos de nodos y enlaces ocultos en el mapeo.
- La posibilidad de sufrir modificaciones en la topología de la SN mientras se realiza el mapeo.
- Considerar la necesidad de planes de respaldo ante cambios en la topología de la SN.
- El grado de fragmentación de los recursos de la SN.
- Determinar si la decisión del mapeo está centralizada o distribuida.

La virtualización de red ha llevado a pensar un nuevo modelo de negocios como se describe en [6]: "Arquitecturas futuras de la internet estarán basadas en un modelo de negocios de infraestructura como un servicio (IaaS) que separa el rol de los Proveedores de Servicios de Internet (ISPs) en dos nuevos roles: el Proveedor de Infraestructura (InP) quien despliega y mantiene los equipos de red y el Proveedor de Servicios (SP), a cargo del despliegue de protocolos de red y de ofrecer servicios extremo a extremo. Incluso, estos roles se pueden definir en tres actores principales, (ver Fig 2): El Proveedor de Redes Virtuales (VNP), que ensambla los recursos virtuales de uno o más InPs, el Operador de Redes Virtuales (VNO) que instala, administra y opera las redes virtuales (VN) de acuerdo con las necesidades del SP, y el SP que está libre de la administración y se concentra en los negocios mediante el uso de las VN para ofrecer servicios personalizados".

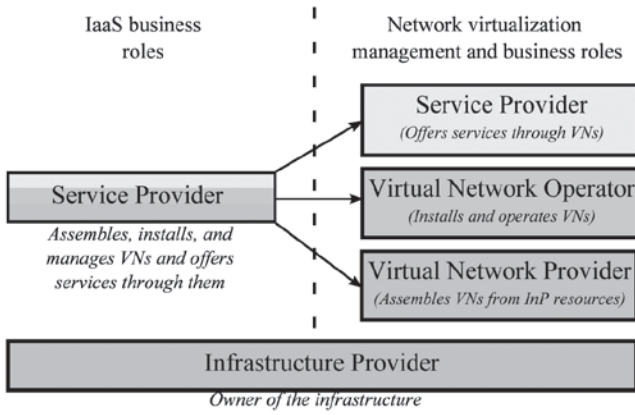


Fig 2. Future Internet Business model [6].

Por tal razón los estudios encaminados a buscar una viabilidad económica y tecnológica para la implementación de redes virtuales son pertinentes.

III. ALGEBRA DE CAMINOS

Un factor importante para la investigación de los algoritmos VNE son las métricas. Se pueden considerar múltiples métricas que apuntan a objetivos de optimización diferentes. Entre los objetivos de optimizaciones podemos nombrar los siguientes:

- Calidad de servicio, donde sus métricas son retrasos, utilización, nivel de estrés, rendimiento, longitud del camino y *jitter*.
- Optimización económica, con métricas de costos, ingresos, relación costo/ingreso y relación de admitidos.
- Poder de supervivencia, siendo sus métricas asociadas, el número de respaldos, disponibilidad y número de migraciones.
- Recursos ambientales con su métrica de eficiencia energética.

Debido al gran número y diversidad de métricas que pueden ser utilizadas en un algoritmo de mapeo de redes virtuales, se ha usado un conocido marco matemático que permite resolver problemas de múltiples restricciones, incluyendo métricas lineales o no lineales e incluso la combinación de ambas. El nombre de este marco matemático es algebra de caminos. Los conceptos usados en [45] sientan las bases matemáticas del algebra de caminos y muestran el desarrollo de una herramienta para la ingeniería de tráfico. En [12] utilizan este marco para solucionar el VLiM al encontrar todos los caminos posibles en la SN dando como resultados mejores y más flexibles incrustamientos.

IV. PA-VNE

El *Paths Algebra Virtual Network Embedding* es una propuesta que utiliza el marco matemático llamado algebra de caminos para la solucionar la etapa VLiM, su flexibilidad y mejor respuesta a las incrustaciones en la red sustrato, son debido a este marco matemático.

Existe una nueva propuesta denominada *New Paths Algebra Virtual Network Embedding* (NPA-VNE), este es un algoritmo desarrollado por Xavier Hesselbach, José Roberto Amazonas, Santi Villanueva y Juan Felipe Botero que está en proceso de publicación. Este algoritmo usa el Algebra de Caminos para encontrar una solución al VLiM y VNoM coordinadamente, a diferencia del funcionamiento de la propuesta anterior.

Se puede introducir el concepto de álgebra de camino a través de un ejemplo, cuando se considera que: “una red es representada por un grafo dirigido $G=(V,A)$, donde V es el conjunto de vértices y A es un conjunto de aristas. Considere el camino simple representado en la Fig. 3. El conjunto de vértices está dado por $V=\{1,2,3,4\}$ y el conjunto de aristas está dado por $A=\{a,b,c\}$. Los nodos de origen y destino son $(s,d)=(1,4)$. Este camino se puede representar ya sea como una sucesión de vértices $p_{1,4}$ o una como una sucesión de aristas $p_{a,c}$.

Cada arista en este ejemplo está caracterizado por una tripleta $(m_1(x), m_2(x), f[m_1(x), m_2(x)])$, donde $m_1(x)$ y $m_2(x)$ son los valores de las métricas m_1 y m_2 en las aristas $x \in A$; $f[m_1(x), m_2(x)]$ es una función de combinación de métricas aplicada a m_1 y m_2 .

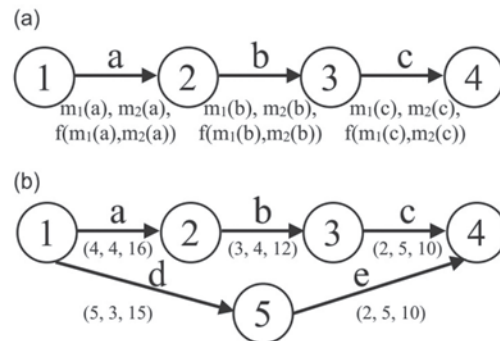


Fig 3. (a) Ejemplo de un camino simple. (b) Ejemplo de dos caminos que se ordenaron.

En general, el álgebra de caminos usa M como el conjunto de métricas m de enrutamiento y F como la función de combinaciones de métricas k .

El conjunto de métricas combinadas de todas las aristas está dado por

$$\bar{C}(P_{a,c}) = \begin{bmatrix} \bar{C}_a \\ \bar{C}_b \\ \bar{C}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_1(a) & m_2(a) & f[m_1(a), m_2(a)] \\ m_1(b) & m_2(b) & f[m_1(b), m_2(b)] \\ m_1(c) & m_2(c) & f[m_1(c), m_2(c)] \end{bmatrix}$$

Una síntesis $S[\bullet]$ es un conjunto de operaciones binarias aplicadas sobre los valores de las métricas combinadas de enlaces a lo largo de un camino, para obtener un resultado que caracteriza este camino, tanto como a las restricciones impuestas por la combinación de métricas le conciernen. Hasta aquí, la síntesis está restringida por el siguiente conjunto: $\{\text{add}(), \text{mult}(), \text{max}(), \text{min}()\}$.

Si el algoritmo de enrutamiento es de una única restricción, solo un valor es obtenido como la síntesis resultante y es llamada la palabra de peso. Si el algoritmo de enrutamiento es de múltiples restricciones, con k restricciones, entonces k valores son obtenidos. En este ejemplo, . La palabra de peso tiene tantas letras como el número de caminos de las aristas. La primera letra corresponde al valor resultante de la síntesis aplicada a todo el camino; la segunda letra corresponde al valor resultante de la síntesis aplicada al subcamino obtenido por deshacer la última arista; la última letra corresponde al valor resultante de la síntesis aplicada al subcamino hecho de solo la primera arista. Cualquier número de letras pueden ser retenidas como el resultado de la síntesis y esto es llamado una abreviación: $\bar{b}_j[S_j]$ representa una abreviación de j -letras; $\bar{b}_\infty[S_\infty]$ representa ninguna abreviación, por ejemplo, cuando todas las letras son tomadas en cuenta.

Ordenando los caminos.

Considere la red representada en la Fig. 3b donde dos caminos conectan el nodo origen 1 al nodo destino 4. Estos caminos son $\alpha = (1,2,3,4) = (a,b,c)$ y $\beta = (1,5,4) = (d,e)$. Cada camino de arista es caracterizada por una tripleta $(m_1(x), m_2(x), f[m_1(x), m_2(x)])$ donde $f[m_1(x), m_2(x)] = m_1(x)xm_2(x)$.

La síntesis que se utilizada en este ejemplo está dada por $S[\cdot] = [\min(\cdot) \max(\cdot) \text{add}(\cdot)]$

TABLA II . RESULTADOS DE LA SÍNTESIS DE LA RED DADA EN FIG. 3B

Camino	S_1 Min	S_2 max	S_3 unión
α	2; 3; 4	5; 4; 4	38; 28; 16
β	2; 5	5; 3	25; 15

TABLA III. ORDENANDO CAMINOS DE LA RED DADA EN LA FIG. 3B.

Abreviación $\bar{b}_j(\bar{S}_j)$	Resultado
$\bar{b}_1[S_1] \bar{b}_1[S_2] \bar{b}_1[S_3]$	$S_1 \Rightarrow \alpha \equiv \beta$ $S_2 \Rightarrow \alpha \equiv \beta$ $S_3 \Rightarrow \alpha < \beta$
$\bar{b}_\infty[S_1] \bar{b}_\infty[S_2] \bar{b}_\infty[S_3]$	$S_1 \Rightarrow 1^{er}as \text{ letras iguales} \Rightarrow \alpha \equiv \beta$
$\bar{b}_1[S_1] \bar{b}_\infty[S_2] \bar{b}_1[S_3]$	$S_1 \Rightarrow \alpha \equiv \beta$ $S_2 \Rightarrow 1^{er}as \text{ letras iguales} \Rightarrow \alpha \equiv \beta$ $S_3 \Rightarrow 2^{as} \text{ letras} \Rightarrow 4 > 3 \Rightarrow \beta < \alpha$

Los resultados de la síntesis se muestran en la Tabla II. Un camino α es peor o menos optimizado que el camino β , si, $S[\alpha] \leq_{ML} S[\beta]$ donde \leq_{ML} es sinónimo de orden léxico multidimensional. En el ejemplo $\leq_{ML} = \{\geq, \leq, \geq\}$ que se traduce por el siguiente orden de relaciones:

Diferentes síntesis también tienen diferentes prioridades. En el ejemplo, las prioridades S_1 , S_2 y S_3 van desde la más alta a la más baja.

La Tabla III resume los resultados obtenidos para los tres diferentes criterios de orden. Es importante darse cuenta que las letras de la síntesis son examinadas desde las más alta prioridad a la síntesis de menor prioridad. Cuando los caminos son considerados equivalentes, entonces examinaremos ya sea la siguiente letra de la misma síntesis o nos desplazamos a la próxima síntesis. Esto se determina por la abreviatura adoptada” [12].

V. BACKTRACKING

Entre las técnicas de diseño de algoritmos el método de *backtracking* o de marcha atrás, es ampliamente utilizado para los problemas de optimización, cuando hay que satisfacer varias restricciones [46-48]. Este método es similar a la búsqueda en profundidad de un grafo y puede adaptarse para encontrar diferentes soluciones: bien sea la primera en encontrarse, todas las soluciones o la mejor entre todas las encontradas. En su ejecución hay dos posibles estados, el de éxito o fracaso. El estado de éxito se logra cuando se ha encontrado el tipo de solución deseada y el estado de fracaso se da cuando la solución parcial no puede ser completada, aquí el algoritmo da vuelta atrás en su recorrido eliminando los nodos que se hubieran agregado en cada etapa a partir de ese nodo.

Sin embargo, se deben usar técnicas más ingeniosas para mejorar el rendimiento de este tipo de algoritmos, si se quiere enfrentar problemas altamente combinatorios, como el problema VNE. Los trabajos encontrados bajo esta perspectiva se relacionan a continuación:

Yuan, et al. [13] exponen un nuevo enfoque para optimizar los recursos de la red sustrato. Su algoritmo denominado WD-VNE utiliza ventanas deslizantes en la cola de solicitudes para el mapeo de los nodos, basado en el grado de conectividad y la capacidad total. El algoritmo utiliza la técnica de *backtracking* para encontrar las soluciones. Las diferentes pruebas muestran mejor desempeño que la mayoría de los algoritmos evaluados.

Fajjari, et al. [14] proponen una estrategia de asignación de recursos para las redes virtuales que mejora complejidad y eficiencia con respecto a propuestas anteriores. Se busca específicamente, usar el ancho de banda no utilizado en los mapeos de los enlaces. Para esto utilizan un algoritmo *backtracking* que genera la topología de la red virtual total, esta se divide en topologías de estrella con el fin dividir el problema y hacer más fácil la búsqueda de recursos libres. Las simulaciones muestran que la estrategia de asignación es más eficiente que las propuestas encontradas en la literatura.

Fajjari, et al. [15] enfrentan el problema de la asignación eficiente de recursos en el *backbone* de la infraestructura de una red en la nube. Con esto se pretende dar cumplimiento a

los requerimientos de los usuarios mientras se maximizan los ingresos del proveedor de servicios. Su estrategia llamada *Backtracking-VNE* garantiza tanto el grado de ocupación de la red como la asignación de recursos a las peticiones de redes virtuales.

Di, et al. [16] encaran el problema de la asignación de recursos en la red sustrato por las solicitudes de las redes virtuales. Crean un algoritmo en línea de mapeo de redes virtuales llamado OVN, que se basa en la técnica de *backtracking* para mejorar la probabilidad de mapeos exitosos. Las pruebas en simulaciones revelan que el algoritmo tiene un aceptable tiempo de ejecución y una mejora en la probabilidad del bloqueo de la red sustrato, lo que implica más incrustaciones de redes virtuales.

Lischka and Karl [17] desarrollaron un algoritmo usando una técnica de la teoría de grafos llamada detección de grafos isomorfos a través de un algoritmo *backtracking*, el cual llamaron vnmFlib. Este algoritmo realiza el mapeo de nodos y enlaces en una sola etapa teniendo en cuenta múltiples métricas y llegadas de solicitudes dinámicas en línea. Se evaluó el algoritmo con respecto a otros, mostrando mejores mapeos en menos tiempo, demostrando también mejor comportamiento en redes de grandes escalas.

VI. RELACIÓN COMPETITIVA

En la ciencia de la computación hay dos tipos de algoritmos: los fuera de línea y en línea. Los algoritmos fuera de línea tienen conocimiento de todos los datos que van a entrar al sistema, en cambio los algoritmos en línea toman decisiones a medida que van llegando los datos sin previo conocimiento de los mismos; los algoritmos en línea tratan con problemas que son difíciles de resolver debido a dos razones: o bien porque el espacio de búsqueda es demasiado grande y complejo para buscar de manera eficiente una solución óptima, o porque el espacio de búsqueda no es completamente conocido y las entradas para el problema se describen gradualmente a lo largo de la ejecución de algoritmo [49], por tal motivo no se conoce si la solución adoptada será la más óptima según las entradas futuras.

El poder evaluar el desempeño entre un algoritmo en línea y uno fuera de línea, es la idea base del concepto conocido como relación competitiva. Este concepto muestra su utilidad en el modelo de negocio IaaS, si deseamos determinar cuál algoritmo realiza más incrustaciones de VNR sobre la SN. Se encontró que son pocos los desarrollos de algoritmos bajo ese concepto para el problema VNE, los siguientes, son algunos casos donde este tipo de algoritmo fue tenido en cuenta:

Even, et al. [19] realizan un algoritmo en línea llamado GVON, este algoritmo lo describe como genérico debido a que soporta VNR de múltiples modelos de tráfico y de enrutamiento, implicando que los recursos de la red pueden ser compartidos entre diferentes solicitudes de diferentes tipos. Al ser un algoritmo en línea utilizaron el concepto

de relación competitiva para probar que su algoritmo no presenta un gran decremento del desempeño en contraste con un algoritmo fuera de línea.

Xing, et al. [20] construyen un algoritmo con base en el concepto de conectividad de la teoría de grafos, con el fin de disminuir la fragmentación de la red sustrato. Para ello diseñaron una métrica llamada RFD para determinar la fragmentación de recursos. Sus resultados muestran una mayor cantidad de asignación de redes virtuales en relación con otros algoritmos VNE.

Wanis, et al. [21] entregan dos desarrollos para mejorar la fragmentación y reasignación de los recursos de la red física. El primer aporte es un método para ubicar y reasignar redes virtuales que generan fragmentación y el segundo es una técnica de migración en línea de las redes virtuales, afectando mínimamente los tiempos de interrupción por estos procesos.

Jmila, et al. [22] abordan el problema de la fragmentación en los nodos de la red sustrato y el costo que involucran las reasignaciones disparadas. Su trabajo es comparado con el algoritmo DVNMA NS y los resultados muestran notables mejorías en la tasas de aceptación de solicitudes de redes virtuales así como una reducción en los tiempos de ejecución del algoritmo.

Phuong Nga, et al. [23] abordan la migración de VN en algoritmos en línea así como los tiempos de la reconfiguración. Proponen un mecanismo reactivo de reconfiguración. Presentan sus resultados comparando su algoritmo con otros que no usan técnicas de reconfiguración.

VII. REDES DEFINIDAS POR SOFTWARE

Por otra parte, las redes definidas por software son una arquitectura de red emergente que maneja los planos de control y de envío de datos por separado. “SDN es un nuevo enfoque para la programabilidad de la red, que se refiere a la capacidad de controlar, modificar y administrar el comportamiento de la red de forma dinámica, a través de software, vía interfaces abiertas, a diferencia de depender de cajas cerradas y de las interfaces definidas por los propietarios” [50]. Estas características ayudarán al avance en investigación e implementación de nuevos protocolos y técnicas, así como en la mejor administración de las redes de datos.

En las redes definidas por software se pueden aislar redes virtuales sobre una misma red sustrato, creando particiones, donde cada una de ellas tiene control de reenvío por separado, esto convierte a las SDN en un escenario ideal para la virtualización de redes [51-56].

Openflow es un estándar abierto para las SDN, que está permitiendo llevarlas a su implementación en el sector de las telecomunicaciones, su auge e importancia se ven reflejados en los centros de pruebas e investigaciones abiertas a la comunidad científica [57], tanto en Europa con

OFELIA (OpenFlow in Europe: Linking Infrastructure and Applications) [58], y en Estados Unidos con GENI (Global Environment for Network Innovations) [59], así como su implementación en los equipos de las grandes compañías de networking [60]. Por los motivos anteriores se propone implementar la adaptación del algoritmo PA-VNE en las SDN con el fin de verificar su funcionalidad en un ambiente ya sea real o emulado.

En la literatura se encontraron diversos trabajos con propuestas similares:

Papagianni, et al. [29] estudian el comportamiento de diferentes algoritmos de mapeo de topologías virtuales en ambientes de computación en la nube sobre redes definidas por software. Para obtener el algoritmo adaptaron uno ya propuesto con los requerimientos de Openflow. Concluyen que su algoritmo mejoró la eficiencia de los valores viables de las cabeceras de las capas 1-4.

Demirci and Ammar [30] plantean una técnica para el mapeo de redes virtuales en redes definidas por software realizando simultáneamente el mapeo de los nodos-enlaces y la ubicación del controlador. Se trazaron dos objetivos para su técnica: el primero es mantener un balance de las cargas en la red sustrato y el segundo minimizar los retardos entre el controlador y los switches. Se basaron en la herramienta de emulación Mininet para evaluar su algoritmo y el FlowVisor [61] como plataforma para la virtualización. Sus resultados muestran que no fue posible optimizar los dos objetivos al mismo tiempo, aunque si sólo se centraban en un único objetivo, el desempeño sí mejoraba.

Drutskoy, et al. [31] desarrollan una solución para la virtualización en redes definidas por software llamada FlowN. Diseñaron una arquitectura utilizando dos enfoques como son las tecnologías de base de datos para el mapeo de redes virtuales sobre la red sustrato y un controlador compartido para cada red virtual. El desarrollo concluye con una herramienta para la capa de virtualización de red que mejora la latencia en comparación con FlowVisor.

Riggio, et al. [32] examinan el problema del mapeo de topologías virtuales sobre las redes definidas por software. El trabajo entrega la evaluación comparativa entre los algoritmos VNE heurísticos en topologías regulares y aleatorias, además crea una técnica nombrada VT-Planner. Los resultados de las mediciones indican que le VT-Planner logra un mejor desempeño y una menor complejidad comparado con los VNE heurísticos evaluados.

VIII. DISCUSIÓN

El problema conocido como VNE ha sido estudiado ampliamente, pero la revisión bibliográfica muestra que la mayoría de los algoritmos propuestos se basan en soluciones que son centralizadas en cuanto a la entidad que toma las decisiones del incrustamiento; igualmente poco se ha tratado con tiempos finitos para las VNR, que liberarían recursos en la SN; además faltan más propuestas que tengan en cuenta una solución alternativa como respaldo en caso de alguna

contingencia. Específicamente hablando de la integración de las técnicas propuestas, además de lo descrito en las secciones anteriores, se puede agregar que una adecuada selección de una técnica de backtracking ayudará a mejorar la tasa de aceptación, debido a que esta técnica permitirá redistribuir las cargas en la SN para aceptar más VN, una síntesis de estos hallazgos se muestra en la Tabla IV. Lo que se hará específicamente, es analizar en qué momentos se aplicará, dado su alto consumo computacional y hasta donde se haría el retroceso para realizar el remapeo de las VNR. Con respecto a la relación competitiva, se está analizando como determinar el grado de fragmentación y consecuentemente encontrar un porcentaje óptimo que sirva como una medida para realizar remapeos con backtracking.

TABLA IV. CLASIFICACIÓN DE TRABAJOS SEGÚN LOS ESCENARIOS VNE.

Artículo	Mapeo Coordinado	Algoritmo en línea	Considera nodos ocultos	Reasignación de recursos	Planes de Respaldo	Fragmentación	Decisiones Centralizadas
[14]	x			x			X
[15]	x			x			x
[16]	x	x		x			
[17]	x	x	x				
[19]	x	x					
[20]	x	x				x	x
[21]	x			x	x	x	
[22]	x	x		x			
[23]	x	x	x	x			
[24]	X		x				
[29]	X						x
[30]	X						x
[32]	X						x

IX. DESAFIOS DE INVESTIGACIÓN

Se encontraron varios caminos para posibles investigaciones relacionadas con el VNE, los cuales son presentados a continuación. Un tema remanente son las investigaciones que consideren la solución al problema VNE de una forma distribuida [6]. Debido a la complejidad computacional de las soluciones, se plantea la necesidad de repartir los recursos necesarios para alcanzar la solución a través de varios nodos. Otro tema es el estudio de la seguridad cuando coexisten diferentes VN en una misma infraestructura [62], esto es debido a que, satisfacer los diferentes requisitos de seguridad de cada uno de los actores involucrados, implica la creación de algoritmos VNE que eviten contradicciones entre esos requisitos, además de considerar los riesgos de seguridad en la coexistencia entre diferentes VN cuando se realicen los mapeos. También se proponen estudios acerca de algoritmos que optimicen la eficiencia energética en las SN [63, 64], en gran medida, pensando en las implementaciones de estos algoritmos en centros de datos, donde el consumo de energía

es muy elevado. Otro desafío se centra en la incursión de las redes ópticas tanto en las SDN como en el VNE [65, 66], entre los retos específicos de este tema, se centra en cómo virtualizar, si existen o no dispositivos electrónicos en los nodos y cómo aprovechar la flexibilidad de las SDN en el aprovisionamiento de ancho de banda dinámico en las redes de área global. Se evidencio también la necesidad de investigación sobre el VNE en centro de datos [67] con el fin de maximizar la capacidad computacional en diferentes tipos de servicios. Nuevos desafíos se han encontrado en una iniciativa que ha evolucionado de la virtualización de redes y que ha sido propuesto desde la industria, dicha iniciativa se denomina Virtualización de Funciones de Red NFV [68, 69], esta iniciativa quiere superar la dependencia que tienen las redes de datos de dispositivos de hardware especializados para funciones específicas, lo que incrementa los costos de inversión y operación de los operadores de la red. Como las NFV evolucionan a partir de las VN, varios de sus desafíos son heredados, encontrando algunas similitudes en los problemas de investigación, es por esta razón que se presenta, en esta sección, este tema. Entre sus desafíos se encuentran la ubicación y asignación de recursos en la SN, la seguridad para las aplicaciones que serán albergadas en un mismo nodo, estudios que encuentre la mejor forma de hacer la combinación de las SDN y las NFV, así como métodos de sincronización entre las diferentes funciones de red.

Particularmente, no se encontró un algoritmo VNE que combine el mapeo de nodos y enlaces coordinadamente, tomando decisiones con el álgebra de caminos, además que utilice la técnica de backtracking y relación competitiva para mejorar la cantidad de VNR aceptadas en la SN.

X. CONCLUSIONES

La revisión conceptual de los temas y de su literatura asociada con los objetivos de este trabajo, evidencia que existen una extensa base de investigación acerca de la virtualización de redes y su problema asociado el VNE, pero aún se requieren más investigaciones que tengan en cuenta la optimización de esta tecnología pensando en el modelo de negocios IaaS. Esto se ve reflejado por los escasos trabajos que intentan resolver problemas que se presentarían en ambientes no simulados, tales como, llegadas de VNR sin previo conocimiento, reconfiguración de las VN en la red sustrato para una mayor cantidad de incrustaciones según prioridades o calidad de servicios, así como su funcionamiento, en los que sé evidencio, sería su ambiente natural, las SDN.

REFERENCIAS

[1] J. Turner, "Virtualizing the Net - a strategy for enabling network innovation [Keynote 2]," in *High Performance Interconnects, 2004. Proceedings. 12th Annual IEEE Symposium on*, 2004, pp. 2-2.

[2] N. M. M. K. Chowdhury and R. Boutaba, "A survey of network virtualization," *Computer Networks*, vol. 54, pp. 862-876, 4/8/ 2010.

[3] N. M. M. K. Chowdhury and R. Boutaba, "Network virtualization: state of the art and research challenges," *Communications Magazine, IEEE*, vol. 47, pp. 20-26, 2009.

[4] O. Braham, A. Amamou, and G. Pujolle, "Virtual Network

Urbanization," in *Communications: Wireless in Developing Countries and Networks of the Future*. vol. 327, A. Pont, G. Pujolle, and S. V. Raghavan, Eds., ed: Springer Berlin Heidelberg, 2010, pp. 182-193.

[5] Z. Sheng, Q. Zhuzhong, W. Jie, L. Sanglu, and L. Epstein, "Virtual Network Embedding with Opportunistic Resource Sharing," *Parallel and Distributed Systems, IEEE Transactions on*, vol. 25, pp. 816-827, 2014.

[6] A. Fischer, J. F. Botero, M. Till Beck, H. de Meer, and X. Hesselbach, "Virtual Network Embedding: A Survey," *Communications Surveys & Tutorials, IEEE*, vol. 15, pp. 1888-1906, 2013.

[7] Z. Zhang, S. Su, Y. Lin, X. Cheng, K. Shuang, and P. Xu, "Adaptive multi-objective artificial immune system based virtual network embedding," *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 53, pp. 140-155, 7// 2015.

[8] X. Guan, B.-Y. Choi, and S. Song, "Energy efficient virtual network embedding for green data centers using data center topology and future migration," *Computer Communications*, 2015.

[9] G. Schaffrath, C. Werle, P. Papadimitriou, A. Feldmann, R. Bless, A. Greenhalgh, *et al.*, "Network virtualization architecture: proposal and initial prototype," presented at the Proceedings of the 1st ACM workshop on Virtualized infrastructure systems and architectures, Barcelona, Spain, 2009.

[10] H. Yoonseon, L. Jian, C. Jae-Yoon, Y. Jae-Hyoung, and J. W. K. Hong, "SAVE: Energy-aware Virtual Data Center embedding and Traffic Engineering using SDN," in *Network Softwarization (NetSoft), 2015 1st IEEE Conference on*, 2015, pp. 1-9.

[11] M. Jammal, T. Singh, A. Shami, R. Asal, and Y. Li, "Software defined networking: State of the art and research challenges," *Computer Networks*, vol. 72, pp. 74-98, 10/29/ 2014.

[12] J. F. Botero, M. Molina, X. Hesselbach-Serra, and J. R. Amazonas, "A novel paths algebra-based strategy to flexibly solve the link mapping stage of VNE problems," *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 36, pp. 1735-1752, 11// 2013.

[13] Y. Yuan, C. Wang, N. Zhu, C. Wan, and C. Wang, "Virtual Network Embedding Algorithm Based Connective Degree and Comprehensive Capacity," in *Intelligent Computing Theories*. vol. 7995, D.-S. Huang, V. Bevilacqua, J. Figueroa, and P. Premaratne, Eds., ed: Springer Berlin Heidelberg, 2013, pp. 250-258.

[14] I. Fajjari, N. Aitsaadi, G. Pujolle, and H. Zimmermann, "Adaptive-VNE: A flexible resource allocation for virtual network embedding algorithm," in *Global Communications Conference (GLOBECOM), 2012 IEEE*, 2012, pp. 2640-2646.

[15] I. Fajjari, N. Aitsaadi, G. Pujolle, and H. Zimmermann, "An optimised dynamic resource allocation algorithm for Cloud's backbone network," in *Local Computer Networks (LCN), 2012 IEEE 37th Conference on*, 2012, pp. 252-255.

[16] H. Di, H. Yu, V. Anand, L. Li, G. Sun, and B. Dong, "Efficient Online Virtual Network Mapping Using Resource Evaluation," *Journal of Network and Systems Management*, vol. 20, pp. 468-488, 2012/12/01 2012.

[17] J. Lischka and H. Karl, "A virtual network mapping algorithm based on subgraph isomorphism detection," presented at the Proceedings of the 1st ACM workshop on Virtualized infrastructure systems and architectures, Barcelona, Spain, 2009.

[18] S. Esriche Fernández, "Network virtualization and traffic engineering in Software-Defined Networks," Master thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, 2014.

[19] G. Even, M. Medina, G. Schaffrath, and S. Schmid, "Competitive and deterministic embeddings of virtual networks," *Theoretical Computer Science*, vol. 496, pp. 184-194, 7/22/ 2013.

[20] L. Xing, L. Hancheng, Z. Wei, and H. Peilin, "VNE-RFD: Virtual network embedding with resource fragmentation consideration," in *Global Communications Conference (GLOBECOM), 2014 IEEE*, 2014, pp. 1842-1847.

[21] B. Wanis, N. Samaan, and A. Karmouch, "Substrate network house cleaning via live virtual network migration," in *Communications (ICC), 2013 IEEE International Conference on*, 2013, pp. 2256-2261.

[22] H. Jmila, I. Houidi, and D. Zeghlache, "RSforEVN: Node reallocation algorithm for virtual networks adaptation," in *Computers and Communication (ISCC), 2014 IEEE Symposium on*, 2014, pp. 1-7.

[23] T. Phuong Nga, L. Casucci, and A. Timm-Giel, "Optimal mapping of virtual networks considering reactive reconfiguration," in *Cloud*

- Networking (CLOUDNET), 2012 IEEE 1st International Conference on*, 2012, pp. 35-40.
- [24] J. F. Botero, "Study, evaluation and contributions to new algorithms for the embedding problem in a network virtualization environment," Thesis Doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya, 2013.
- [25] N. Feamster, J. Rexford, and E. Zegura, "The road to SDN: an intellectual history of programmable networks," *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, vol. 44, pp. 87-98, 2014.
- [26] M. Casado, N. Foster, and A. Guha, "Abstractions for software-defined networks," *Commun. ACM*, vol. 57, pp. 86-95, 2014.
- [27] Y. Jarraya, T. Madi, and M. Debbabi, "A Survey and a Layered Taxonomy of Software-Defined Networking," *Communications Surveys & Tutorials, IEEE*, vol. 16, pp. 1955-1980, 2014.
- [28] R. Guerzoni, R. Trivisonno, I. Vaishnavi, Z. Despotovic, A. Hecker, S. Beker, et al., "A novel approach to virtual networks embedding for SDN management and orchestration," in *Network Operations and Management Symposium (NOMS), 2014 IEEE*, 2014, pp. 1-7.
- [29] C. Papagianni, G. Androulidakis, and S. Papavassiliou, "Virtual Topology Mapping in SDN-Enabled Clouds," in *Network Cloud Computing and Applications (NCCA), 2014 IEEE 3rd Symposium on*, 2014, pp. 62-67.
- [30] M. Demirci and M. Ammar, "Design and analysis of techniques for mapping virtual networks to software-defined network substrates," *Computer Communications*, vol. 45, pp. 1-10, 6/1/2014.
- [31] D. Drutskey, E. Keller, and J. Rexford, "Scalable Network Virtualization in Software-Defined Networks," *Internet Computing, IEEE*, vol. 17, pp. 20-27, 2013.
- [32] R. Riggio, F. De Pellegrini, E. Salvadori, M. Gerola, and R. Doriguzzi Corin, "Progressive virtual topology embedding in OpenFlow networks," in *Integrated Network Management (IM 2013), 2013 IFIP/IEEE International Symposium on*, 2013, pp. 1122-1128.
- [33] H. Wen, P. Tiwary, and T. Le-Ngoc, "Network Virtualization: Overview," in *Wireless Virtualization*, ed: Springer International Publishing, 2013, pp. 5-10.
- [34] N. Fernandes, M. D. Moreira, I. Moraes, L. Ferraz, R. Couto, H. T. Carvalho, et al., "Virtual networks: isolation, performance, and trends," *annals of telecommunications - annales des télécommunications*, vol. 66, pp. 339-355, 2011/06/01 2011.
- [35] X. Chen, C. Li, and Y. Jiang, "Optimization Model and Algorithm for Energy Efficient Virtual Node Embedding," *Communications Letters, IEEE*, vol. 19, pp. 1327-1330, 2015.
- [36] J. Liao, M. Feng, S. Qing, T. Li, and J. Wang, "LIVE: Learning and Inference for Virtual Network Embedding," *Journal of Network and Systems Management*, pp. 1-30, 2015/05/13 2015.
- [37] M. Rahman, I. Aib, and R. Boutaba, "Survivable Virtual Network Embedding," in *NETWORKING 2010*. vol. 6091, M. Crovella, L. Feeney, D. Rubenstein, and S. V. Raghavan, Eds., ed: Springer Berlin Heidelberg, 2010, pp. 40-52.
- [38] M. Melo, J. Carapinha, S. Sargento, L. Torres, P. Tran, U. Killat, et al., "Virtual Network Mapping – An Optimization Problem," in *Mobile Networks and Management*. vol. 97, K. Pentikousis, R. Aguiar, S. Sargento, and R. Agüero, Eds., ed: Springer Berlin Heidelberg, 2012, pp. 187-200.
- [39] F. Zhu and H. Wang, "A modified ACO algorithm for virtual network embedding based on graph decomposition," *Computer Communications*.
- [40] D. Jian, H. Tao, W. Jian, H. Wenbo, L. Jiang, and L. Yunjie, "Virtual network embedding through node connectivity," *The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications*, vol. 22, pp. 17-56, 2// 2015.
- [41] A. Jarray and A. Karmouch, "Decomposition Approaches for Virtual Network Embedding With One-Shot Node and Link Mapping," *Networking, IEEE/ACM Transactions on*, vol. PP, pp. 1-1, 2014.
- [42] Z. Ye, L. Yong, J. Depeng, S. Li, and Z. Lieguang, "A virtual network embedding scheme with two-stage node mapping based on physical resource migration," in *Communication Systems (ICCS), 2010 IEEE International Conference on*, 2010, pp. 761-766.
- [43] L. Wenzhi, X. Yang, M. Shaowu, and T. Xiongyan, "Completing virtual network embedding all in one mathematical programming," in *Electronics, Communications and Control (ICECC), 2011 International Conference on*, 2011, pp. 183-185.
- [44] G. Xiujiao, Y. Hongfang, V. Anand, G. Sun, and D. Hao, "A new algorithm with coordinated node and link mapping for virtual network embedding based on LP relaxation," in *Communications and Photonics Conference and Exhibition (ACP), 2010 Asia*, 2010, pp. 152-153.
- [45] W. de Paula Herman and J. R. de Almeida Amazonas, "Hop-by-hop Routing Convergence Analysis Based on Paths Algebra," in *Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference, 2007. CERMA 2007*, 2007, pp. 9-14.
- [46] Y. YoungSeok and B. A. Myers, "An exploratory study of backtracking strategies used by developers," in *Cooperative and Human Aspects of Software Engineering (CHASE), 2012 5th International Workshop on*, 2012, pp. 138-144.
- [47] A. Chmeiss, Sai, x, and L. s, "Constraint satisfaction problems : backtrack search revisited," in *Tools with Artificial Intelligence, 2004. ICTAI 2004. 16th IEEE International Conference on*, 2004, pp. 252-257.
- [48] K. T. Herley, A. Pietracaprina, and G. Pucci, "Deterministic parallel backtrack search," *Theoretical Computer Science*, vol. 270, pp. 309-324, 1/6/ 2002.
- [49] R. Solis-Oba and G. Persiano, "Special Issue on Approximation and Online Algorithms," *Theory of Computing Systems*, vol. 56, pp. 1-2, 2015/01/01 2015.
- [50] A. Hakiri, A. Gokhale, P. Berthou, D. C. Schmidt, and T. Gayraud, "Software-Defined Networking: Challenges and research opportunities for Future Internet," *Computer Networks*, vol. 75, Part A, pp. 453-471, 12/24/ 2014.
- [51] Y. Xingbin, H. Shanguo, W. Shouyu, W. Di, G. Yuming, N. Xiaobing, et al., "Software defined virtualization platform based on double-FlowVisors in multiple domain networks," in *Communications and Networking in China (CHINACOM), 2013 8th International ICST Conference on*, 2013, pp. 776-780.
- [52] R. Jain and S. Paul, "Network virtualization and software defined networking for cloud computing: a survey," *Communications Magazine, IEEE*, vol. 51, pp. 24-31, 2013.
- [53] K. Bakshi, "Considerations for Software Defined Networking (SDN): Approaches and use cases," in *Aerospace Conference, 2013 IEEE*, 2013, pp. 1-9.
- [54] Z. Boyang, G. Wen, Z. Shanshan, L. Xinjia, D. Zhong, W. Chunming, et al., "Virtual network mapping for multi-domain data plane in Software-Defined Networks," in *Wireless Communications, Vehicular Technology, Information Theory and Aerospace & Electronic Systems (VITAE), 2014 4th International Conference on*, 2014, pp. 1-5.
- [55] Y. Xin, I. Baldine, A. Mandal, C. Heermann, J. Chase, and A. Yumerefendi, "Embedding virtual topologies in networked clouds," presented at the Proceedings of the 6th International Conference on Future Internet Technologies, Seoul, Republic of Korea, 2011.
- [56] H. Wen, P. Tiwary, and T. Le-Ngoc, "Network Virtualization Technologies and Techniques," in *Wireless Virtualization*, ed: Springer International Publishing, 2013, pp. 25-40.
- [57] D. Meyer, "The Software-Defined-Networking Research Group," *Internet Computing, IEEE*, vol. 17, pp. 84-87, 2013.
- [58] S. Salsano, N. Blefari-Melazzi, A. Detti, G. Morabito, and L. Veltri, "Information centric networking over SDN and OpenFlow: Architectural aspects and experiments on the OFELIA testbed," *Computer Networks*, vol. 57, pp. 3207-3221, 11/13/ 2013.
- [59] M. Berman, J. S. Chase, L. Landweber, A. Nakao, M. Ott, D. Raychaudhuri, et al., "GENI: A federated testbed for innovative network experiments," *Computer Networks*, vol. 61, pp. 5-23, 3/14/ 2014.
- [60] M. H. Raza, S. C. Sivakumar, A. Nafarieh, and B. Robertson, "A Comparison of Software Defined Network (SDN) Implementation Strategies," *Procedia Computer Science*, vol. 32, pp. 1050-1055, // 2014.
- [61] R. Sherwood, G. Gibb, K.-K. Yap, G. Appenzeller, M. Casado, N. McKeown, et al., "FlowVisor: A Network Virtualization Layer," Deutsche Telekom Inc. R&D Lab, Stanford University, Nicira Networks2009.
- [62] D. Schwerdel, B. Reuther, T. Zinner, P. Müller, and P. Tran-Gia, "Future Internet research and experimentation: The G-Lab approach," *Computer Networks*, vol. 61, pp. 102-117, 3/14/ 2014.
- [63] J. F. Botero, X. Hesselbach, M. Duelli, D. Schlosser, A. Fischer, and H. de Meer, "Energy Efficient Virtual Network Embedding," *Communications Letters, IEEE*, vol. 16, pp. 756-759, 2012.

- [64] L. Nonde, T. E. H. El-Gorashi, and J. M. H. Elmirghani, "Green Virtual Network Embedding in optical OFDM cloud networks," in *Transparent Optical Networks (ICTON), 2014 16th International Conference on*, 2014, pp. 1-5.
- [65] Y. Zilong, A. N. Patel, P. N. Ji, Q. Chunming, and W. Ting, "Virtual infrastructure embedding over software-defined flex-grid optical networks," in *Globecom Workshops (GC Wkshps), 2013 IEEE*, 2013, pp. 1204-1209.
- [66] D. Simeonidou, R. Nejabati, and M. P. Channegowda, "Software defined optical networks technology and infrastructure: Enabling software-defined optical network operations," in *Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC), 2013*, 2013, pp. 1-3.
- [67] M. F. Bari, R. Boutaba, R. Esteves, L. Z. Granville, M. Podlesny, M. G. Rabbani, *et al.*, "Data Center Network Virtualization: A Survey," *Communications Surveys & Tutorials, IEEE*, vol. 15, pp. 909-928, 2013.
- [68] S. Mehraghdam, M. Keller, and H. Karl, "Specifying and placing chains of virtual network functions," in *Cloud Networking (CloudNet), 2014 IEEE 3rd International Conference on*, 2014, pp. 7-13.
- [69] M. R. C. Faizul Bari, Shihabur; Ahmed, Reaz; Boutaba, Raouf, "On Orchestrating Virtualized Network Functions," 2015.

Néstor Álzate Mejía, se graduó como Ingeniero de Sistemas de la Universidad Cooperativa de Colombia. Obtuvo el título de Especialista en Telecomunicaciones de la Universidad Autónoma de Bucaramanga. Es aspirante a Magister en Ingeniería de Sistemas y Computación de la Universidad Tecnológica de Pereira. Actualmente es profesor de tiempo completo en la Universidad Católica de Pereira. Sus principales intereses de investigación son la Virtualización de Redes y las Redes Definidas por Software.

José Roberto de A. Amazonas, graduado en ingeniería eléctrica de la Escuela Politécnica de la Universidad de São Paulo (EPUSP), Brasil, en 1979. Recibió el M.Sc., Ph.D. y grados postdoctorales de EPUSP en 1983, 1988 y 1996, respectivamente. Es profesor asociado del Departamento de Telecomunicaciones e Ingeniería de Control en EPUSP, donde está a cargo de la educación e investigación de comunicaciones ópticas y redes de comunicaciones de alta velocidad. Ocupó diversos cargos en universidades de Brasil y Europa. También ha dirigido la investigación en colaboración con varias empresas brasileñas, europeas y norteamericanas. Sus intereses de investigación se encuentran en el área de las comunicaciones ópticas, redes cableadas e inalámbricas, la calidad de servicio (QoS) y el aprendizaje a distancia.

Juan Felipe Botero, es profesor en el Departamento de Ingeniería Electrónica y de Telecomunicaciones de la Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia. En 2006, recibió su grado en Ingeniería de Sistemas por la Universidad de Antioquia. En 2008 y 2013 recibió sus grados de M.Sc. y Ph.D. en Ingeniería Telemática por la Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España. En 2013, se unió al Grupo de Investigación en Telecomunicaciones Aplicadas (GITA), que actualmente dirige. Sus principales intereses de investigación incluyen calidad de servicio, redes definidas por software, virtualización de redes, computación en la nube, optimización y asignación de recursos en diferentes arquitecturas de red.