

Algoritmos de Virtualización de Redes: Un enfoque multi-objetivo basado en Programación Lineal Entera

Cristian Rodrigo Aceval Sosa
Facultad Politécnica
Universidad Nacional de Asunción
Asunción-Paraguay
cristian.aceval@gmail.com

Victor Ricardo Franco Benegas
Facultad Politécnica
Universidad Nacional de Asunción
Asunción-Paraguay
victorfranco90@gmail.com

Resumen— La Virtualización de Redes es un componente clave de la Internet del futuro, permitiendo la coexistencia de redes virtuales e independientes en la misma red de infraestructura proporcionando la creación dinámica y el soporte a redes con diferentes paradigmas y mecanismos en la misma red física. Un reto importante en la provisión dinámica de las redes virtuales reside en la asignación óptima de los recursos físicos a recursos virtuales. Este problema es conocido como *Virtual Network Embedding* (VNE). Las investigaciones anteriores se han centrado en el diseño de algoritmos basados en la optimización de un solo objetivo a la vez. En el presente trabajo se propone la resolución del problema VNE con un enfoque multi-objetivo, utilizando como herramienta una formulación de Programación Lineal Entera (ILP) realizando múltiples corridas y agregando una restricción adicional. Nuestros objetivos principales son la minimización de la utilización de recursos y el equilibrio de carga.

Palabras Clave — Redes Virtuales; VNE; Optimización Multi-objetivo; ILP.

I. INTRODUCCIÓN

La virtualización de redes es una de las más prometedoras tecnologías para el futuro de la internet, por lo tanto, puede ser pensado como un componente esencial en la arquitectura del futuro [1]. Además, numerosos testbeds de diversas organizaciones, se basan actualmente en este paradigma, a fin de proveer un ambiente independiente a los distintos grupos de investigación [2][3].

En la virtualización de redes, la entidad primaria es la red virtual VN (*Virtual Network*). Ésta es una combinación de los elementos activos y pasivos de las redes (enlaces de red y nodos de red) de la red física o de sustrato (*Substrate Network*). Los nodos virtuales son interconectados a través de enlaces virtuales, formando una topología virtual [4].

Con la virtualización de recursos (nodos y enlaces) en la red de sustrato, múltiples topologías de redes virtuales con múltiples características pueden ser creadas y co-hosteadas en el mismo hardware físico.

Las futuras arquitecturas de internet estarán basadas en el modelo de negocio denominado “Infraestructura como Servicio” o IaaS (*Infrastructure as a Service*) [5] el cual desacopla el rol actual del ISP (*Internet Service Provider*) en dos nuevos roles:

- Proveedor de Infraestructura InP (*Infrastructure Provider*): encargado de mantener la infraestructura.
- Proveedor de Servicios SP (*Service Provider*): a cargo de la implementación de protocolos de red y ofertas de servicios.

La introducción de virtualización de redes separa la administración y los roles de negocios del SP [6] mediante la identificación de tres actores principales:

- Proveedor de Servicios SP (*Service Provider*): se concentra en el negocio mediante el uso de redes virtuales para ofrecer servicios personalizados.
- Operador de Red Virtual VNO (*Virtual Network Operator*): instala, administra y opera la red virtual acorde a las necesidades del SP.
- Proveedor de red Virtual VNP (*Virtual Network Provider*): reúne los recursos virtuales de uno o más InPs.

El problema de incorporación de recursos virtuales a recursos físicos es conocido como la asignación de redes virtuales VNE (*Virtual Network Embedding*).

A través de un mapeado dinámico de recursos virtuales sobre el hardware físico, el beneficio adquirido debe ser maximizado. Esta optimalidad puede ser computada considerando distintos objetivos, como la calidad de servicio QoS (*Quality of Service*), maximización de ganancias y seguridad en las redes.

Para los operadores de redes, la virtualización de red podría ofrecer una serie de ventajas comerciales a corto o mediano plazo, con el potencial de reducción de costos y aumentos de los ingresos, como una herramienta interesante desde el punto de vista operativo [7] [8].

Aunque existe un gran interés por la virtualización de redes, tanto en la comunidad de investigación y los operadores de red, existen varios desafíos que impiden ser desarrollados en entornos reales [9]. Uno de los principales obstáculos es la asignación eficiente de una red virtual a una red física, dado que este proceso requiere una optimización simultánea de nodos y enlaces virtuales, que es complejo por naturaleza, tanto en la formulación matemática y a nivel computacional [10].

II. DESCRIPCIÓN DEL MODELO DE RED

Para la descripción de las redes utilizamos superíndices para diferenciar redes físicas de redes virtuales, donde p y v corresponden a redes físicas y virtuales respectivamente:

- *Red Física:* la red física es descrita como un grafo no dirigido ponderado $G^p = \{N^p, L^p, C^p, B^p, D^p, Dis^p\}$ compuesto por un conjunto de nodos, N^p , y un conjunto de enlaces físicos L^p . Cada nodo físico i está caracterizado por una capacidad de procesamiento C_i^p , comunmente conocido como CPU. Y por su ubicación física, que puede ser definido por coordenadas x e y . La distancia entre nodos físicos Dis_{ij}^p , puede ser obtenido usando la expresión (1). Con respecto a los enlaces físicos, consideramos que cada enlace ij cuenta con ancho de banda, B_{ij}^p , y un retardo, D_{ij}^p , además consideramos que cada enlace es unidireccional.

$$D_{ij}^p = \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2} \quad (1)$$

- *Red Virtual:* una solicitud VN puede describirse como un grafo no dirigido ponderado $G^v = \{N^v, L^v, C^v, B^v, D^v, Dis^v\}$ compuesto por un conjunto de nodos, N^v , y un conjunto de enlaces físicos L^v . Cada nodo físico m está caracterizado por una capacidad de procesamiento C_m^v . Y por su ubicación virtual, que puede ser definido por coordenadas x e y . La distancia entre nodos virtuales Dis_{mn}^v es recibido como parámetro. Con respecto a los enlaces virtuales, consideramos que cada enlace mn cuenta con ancho de banda, B_{mn}^v , y un retardo, D_{mn}^v , además consideramos que cada enlace es unidireccional. La máxima distancia entre nodos virtuales Dis_{mn}^v puede ser utilizado para limitar el número intermedio de saltos entre nodos virtuales.
- *Notación de Asignación de Redes Virtuales:* Primeramente la convención utilizada para la notación índice: N^p representa el conjunto de nodos que pertenecen a la red física; L^p representa el conjunto de enlaces que pertenecen a la red física; y L_i^p representa el subconjunto de enlaces ij que están conectados directamente con el nodo i . Para la representación de redes virtuales se utiliza la misma anotación utilizando las letras m y n .

III. FORMULACIÓN MATEMÁTICA DEL PROBLEMA

Esta sección describe la formulación matemática para resolver el problema VNE, el cual está basado en [10].

A. Variables de Asignación.

La variable binaria x es utilizada para el mapeamiento de nodos virtuales y es definido en la expresión (2). Donde, $x_i^m \rightarrow N^v \times N^p$ es una matriz. La variable binaria y es usada para representar los enlaces y es definida en la ecuación (3), donde $y_{ij}^{mn} \rightarrow (L^v)^2 \times (L^p)^2$ es una matriz.

1) Asignación Virtual de Nodos:

$$x_i^m = \begin{cases} 1, & \text{el nodo virtual } m \text{ es asignado al nodo físico } i \\ 0, & \text{no es asignado} \end{cases} \quad (2)$$

2) Asignación Virtual de Enlaces:

$$y_{ij}^{mn} = \begin{cases} 1, & \text{el enlace virtual } mn \text{ utiliza al enlace físico } ij \\ 0, & \text{no es utilizado} \end{cases} \quad (3)$$

B. Restricciones:

Para asegurar una correcta asignación de nodos y enlaces virtuales, y obedecer a la ley de conservación de capacidades de nodos y enlaces físicos se definen un conjunto de restricciones:

- 1) *Asignación de Nodos Virtuales a Nodos Físicos:* la ecuación (4) asegura que cada nodo virtual es asignado, y que es asignado a un solo nodo físico.

$$\forall m: \sum_i x_i^m = 1 \quad (4)$$

- 2) *Un nodo virtual por nodo físico:* la ecuación (5) asegura que cada nodo físico puede ser utilizado como máximo por un nodo virtual de una solicitud, aunque cada nodo físico puede ser utilizado por otros nodos virtuales de otras solicitudes.

$$\forall i: \sum_m x_i^m \leq 1 \quad (5)$$

- 3) *Conservación de CPU:* la ecuación (6) asegura que la capacidad de CPU disponible en cada nodo físico no sea excedida.

$$\forall i: \sum_m x_i^m \cdot C_m^v \leq C_i^p \quad (6)$$

- 4) *Distancia de Nodos Virtuales:* la ecuación (7) asegura que la distancia máxima entre nodos virtuales, Dis_{mn}^v , no es violada. A diferencia de las distancias entre nodos físicos que son obtenidos por la ecuación (1), la distancia máxima entre nodos virtuales es un parámetro del problema. Por otra parte el valor de K representa una constante grande que solamente es utilizando en situaciones donde el nodo virtual n no es asignado al nodo físico i , por ejemplo $x_i^n = 0$.

$$\forall m, n \in L_m^v, m < n, \forall i:$$

$$\sum_j Dis_{ij}^p \cdot x_j^m \leq Dis_{mn}^v \cdot x_i^n + (1 - x_i^n) \cdot K \quad (7)$$

- 5) *Asignación de enlaces virtuales a enlaces físicos Multi-Commodity flow conservation con formulación Nodo-Enlace:* Para optimizar simultaneamente la

asignación de enlaces virtuales y enlaces físicos, la restricción *Multi-Comodity Flow* [11] es aplicado en conjunto con la formulación *Nodo-Enlace* [12]; Además se utiliza la noción de flujos directos sobre los enlaces virtuales que se representa en la ecuación (8), donde L_m^v representa todos los enlaces virtuales directamente conectados al enlace m , y L_i^p representa todos los enlaces físicos directamente conectados al nodo físico i :

$$\forall m, n \in L_m^v, m < n, \forall i: \sum_{j \in L_i^p} (y_{ij}^{mn} - y_{ji}^{mn}) = x_i^m - x_i^n \quad (8)$$

- 6) *Conservación de Ancho de Banda:* la ecuación (9) se asegura que la capacidad de Ancho de Banda disponible en cada enlace físico no sea excedida.

$$\forall i, j \in L_i^p, i < j: \sum_{m, n \in L_m^v, m < n} B_{mn}^v (y_{ij}^{mn} + y_{ji}^{mn}) \leq B_{ij}^p \quad (9)$$

- 7) *Límite del Retardo en enlaces:* el retardo del enlace virtual, D_{mn}^v , es un parámetro del problema, y es igual a la suma de los retardos de todos los enlaces físicos que componen el enlace virtual, para asegurarnos que esta restricción se cumpla se aplica la ecuación (10).

$$\forall m, n \in L_m^v, m < n, \forall i: \sum_{j \in L_i^p, i < j} D_{ij}^p (y_{ij}^{mn} + y_{ji}^{mn}) \leq D_{mn}^v \quad (10)$$

IV. OBJETIVOS DE ESTE TRABAJO – ANÁLISIS DE LAS FUNCIONES OBJETIVOS

Al momento de formular un modelo del problema VNE basado en ILP debemos indefectiblemente proponer la función objetivo. La asignación de las redes virtuales debe de ser optimizada, de manera a poder conseguir una mayor tasa de aceptación de requerimientos virtuales, y mayor eficiencia en la utilización de recursos físicos.

En el trabajo [10] en el cual está basado nuestra tesis, los autores proponen tres funciones objetivo distintos, y la que consigue mejores resultados, es la denominada “*Weighted Shortest Distance Path (WSDP)*”:

$$\min \alpha \left(\sum_m C_m^v \left[\sum_i \frac{x_i^m}{C_i^p} \right] \right) + B \left(\sum_{m,n} B_{mn}^v \left[\sum_{i,j} \frac{y_{ij}^{mn}}{B_{ij}^p} \right] \right) \quad (11)$$

Lo que la función objetivo (11) propone es asignar los nodos y enlaces con mayor cantidad de recursos libres, a los requerimientos que soliciten de más prestaciones, tanto de

utilización de CPU como de ancho de banda. De esta manera se consigue un cierto grado de Balance de Carga al mismo tiempo de la búsqueda del camino más corto para los enlaces virtuales.

A. Análisis de las métricas utilizadas.

Para el problema VNE en su versión dinámica, es decir, cuando los requerimientos de redes virtuales llegan en tiempos distintos sin conocerlos de antemano, es necesario definir algunas métricas para evaluar la eficiencia del algoritmo de asignación estudiado. Estas métricas son aplicadas al final del proceso, luego de realizar todas las asignaciones de redes virtuales en función del tiempo.

Las métricas más importantes que cubren todos los aspectos del problema, y que son propuestos en la mayoría de los trabajos relacionados [] [] son los siguientes:

a) *Tasa de Aceptación de Solicitudes VN:* la tasa de aceptación de solicitudes de redes virtuales está dada por la ecuación (12), A^{VN} , y define el rendimiento global del método de asignación: número de solicitudes aceptadas k' , sobre el número de solicitudes recibidas k .

$$A^{VN} = \frac{k'}{k} \quad (12)$$

b) *Relación costo/ganancia:* Además de los costos, los ingresos se suelen tener en cuenta. Al dividir el costo por ingresos, los valores de costos variables están equilibradas, cuánto más alto sea el valor, se necesitarán más recursos para asignar la red virtual [10].

En general, se relaciona el costo de la asignación, como igual a la sumatoria de recursos físicos utilizados (es decir, cantidad de CPU y costo del ancho de banda B utilizado en los enlaces). La ganancia o *revenue* es igual a la sumatoria de recursos que requiere el requerimiento de la red virtual (es decir, la sumatoria de CPU más ancho de banda requerido en toda la red virtual).

En la asignación individual de una solicitud, puede también considerarse objetivos puntuales, relacionados con las métricas globales citadas anteriormente. Estos objetivos son:

- *Minimizar el costo de la asignación:* Buscando minimizar el costo de los enlaces virtuales, ya que los nodos en general no pueden ser minimizados. En síntesis, se busca minimizar la cantidad de saltos a efectos de que la asignación sea la más eficiente posible.
- *Minimizar el balance de carga de la red de sustrato:* En este caso se busca asignar los recursos de tal manera a que queden siempre con valores balanceados, de tal manera a facilitar las asignaciones

posteriores y evitar que recursos de la red física queden aislados.

Si se busca solamente minimizar el costo, se puede llegar a la segmentación de la red física y por lo tanto aumentará el índice de rechazos de solicitudes virtuales. Por otro lado si sólo se toma en cuenta el balance de carga, se mejorará la tasa de aceptación, pero empeorará la relación entre el costo y la ganancia de la asignación, por lo tanto, estos objetivos son evidentemente contrapuestos. Como puede verse, el problema es bi-objetivo y hay una relación muy estrecha entre los objetivos puntuales de la función objetivo, con los resultados de las métricas globales.

Ningún trabajo anterior utiliza un enfoque multi-objetivo para este problema, a pesar de que evidentemente existe más de una métrica para definir la eficiencia de la asignación de redes virtuales.

B. Objetivo General.

El objetivo general de nuestro trabajo puede, por lo tanto, formularse de la siguiente manera:

- Resolver el problema VNE en su versión dinámica u online, realizando un enfoque multi-objetivo, buscando optimizar en forma simultánea la relación costo/ganancia y la tasa de aceptación de requerimientos.

Para esto nos basamos en el trabajo [10] en el cual se desarrolla una formulación ILP del problema, proponiéndose 3 funciones objetivo distintas. Como la formulación ILP es mono-objetivo, nuestra propuesta buscará minimizar uno de los objetivos, manteniendo el otro objetivo con un valor constante y realizando múltiples ejecuciones para obtener finalmente un Frente Pareto.

C. Objetivos Secundarios

1. Implementar la resolución ILP del problema propuesto en [10] en una herramienta de optimización (por ejemplo, CPLEX [13]).
2. Desarrollar un simulador de red, a efectos de simular el comportamiento de una red física en la cual se asignan dinámicamente requerimientos de redes virtuales.
3. Proponer y diseñar una resolución multi-objetivo, considerando la optimización simultánea de los objetivos mencionados.
4. Determinar los valores óptimos de los parámetros α y β utilizados en [10] realizando pruebas empíricas, variando dichos valores para la construcción de un frente pareto óptimo.

Se buscará determinar hasta qué punto es factible ejecutar el simulador en base a distintos tamaños del problema.

5. Realizar comparaciones con los resultados del trabajo [10] el cual es considerado como el estado del arte para el problema VNE.

D. Estado Actual del Trabajo

Actualmente nuestro trabajo se encuentra en la fase de desarrollo del simulador de red. La resolución ILP del problema propuesto en [10] ya fue implementada y se encuentra funcional, en la sección IV. D se presenta el cronograma de trabajo.

E. Cronograma de trabajo

1) *Tabla de cronograma de trabajo:* a continuación se presenta una tabla ilustrativa de un cronograma de trabajo y avance de tesis aproximado.

TABLA I.

Plan de Trabajo	Meses			
	Agosto	Setiembre	Octubre	Noviembre
Resolución ILP del problema.				
Implementación del Simulador de Red.	X	X		
Propuesta y Diseño de una Resolución Multi—Objetivo.		X		
Determinación de α y β óptimos.		X		
Comparaciones de resultados con el considerado como estado del arte.			X	
Elaboración del Paper.			X	
Edición del Libro de Tesis.			X	X

TRABAJOS FUTUROS

Como trabajos futuros proponemos el análisis del problema de la reconfiguración de redes virtuales, la aplicación de esquemas de protección o de supervivencia a las mismas y además el estudio del impacto del consumo de energía, habiendo la posibilidad de implementarlos en distintos enfoques.

REFERENCIAS

- [1] N. Feamster, L. Gao, and J. Rexford, "How to lease the internet in your spare time," *Computer Communication Review*, vol. 37, no. 1, 2007.
- [2] N. McKeown, T. Anderson, H. Balakrishnan, G. Parulkar, L. Peterson, J. Rexford, S. Shenker, and J. Turner, "Openflow: enabling innovation in

- campus networks,” *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, vol. 38, no. 2, pp. 69–74, Mar. 2008.
- [3] ONF, “Open networking foundation,” <http://www.opennetworking.org>, 2011.
 - [4] Andreas Fischer, Juan Felipe Botero, Michael Till Beck, Hermann de Meer, and Xavier Hesselbach, “*Virtual Network Embedding: A Survey*”, 2013.
 - [5] S. Bhardwaj, L. Jain, and S. Jain, “Cloud computing: A study of infrastructure as a service (iaas),” *Int J. Eng. and Information Technology*, vol. 2, pp. 60–63, 2010.
 - [6] G. Schaffrath, C. Werle, P. Papadimitriou, A. Feldmann, R. Bless, A. Greenhalgh, A. Wundsam, M. Kind, O. Maennel, and L. Mathy, “Network virtualization architecture: proposal and initial prototype,” in *Proceedings of the 1st ACM workshop on Virtualized infrastructure systems and architectures*, ser. VISA ’09. New York, NY, USA: ACM, 2009, pp. 63–72.
 - [7] J. Carapinha and J. Jim’enez, “Network virtualization: a view from the bottom,” in *Proc. 2009 ACM Workshop on Virtualized Infrastructure Systems and Architectures*, pp. 73–80. Available: <http://portal.acm.org/citation.cfm?id=1592648.1592660>.
 - [8] M. Melo, S. Sargento, and J. Carapinha, “Network virtualisation from an operator perspective,” *Proc 2009 Conf. Sobre Redes de Computadores - CRC*. Available: <http://www.av.it.pt/marciomelo/papers/crc09.pdf>.
 - [9] N. Chowdhury and R. Boutaba, “Network virtualization: state of the art and research challenges,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 47, no. 7, pp. 20–26, July 2009.
 - [10] Marcio Melo, Susana Sargento, Ulrich Killat, Andreas Timm-Giel, and Jorge Carapinha, “*Optimal Virtual Network Embedding: Node-Link Formulation*”, 2013.
 - [11] S. Even, A. Itai, and A. Shamir, “On the complexity of time table and multi-commodity flow problems,” in *Proc. 1975 Symposium on Foundations of Computer Science*, pp. 184–193. Available: <http://dx.doi.org/10.1109/SFCS.1975.21>
 - [12] M. Pi’oro and D. Medhi, *Routing, Flow, and Capacity Design in Communication and Computer Networks*. Elsevier/Morgan Kaufmann, 2004.
 - [13] “IBM ILOG Optimization Products,” Sep. 2012. Available: <http://www-01.ibm.com/software/websphere/products/optimization>