

A Multi-Objective Approach for Virtual Network Embedding

Enrique Dávalos¹, Cristian Aceval², Victor Franco¹, Benjamín Barán¹

¹Facultad Politécnica; ²Centro Nacional de Computación
Universidad Nacional de Asunción (UNA)
San Lorenzo, Paraguay

Abstract—Network Virtualization is a key technology for the Future Internet, as it allows the deployment of independent virtual networks using resources of the same basic infrastructure. An important challenge in the dynamic provision of virtual networks resides in the optimal assignment of physical resources (nodes and links) to requirements of virtual networks. This problem is known as Virtual Network Embedding (VNE). For the resolution of this problem, previous research has focused on designing algorithms based on the optimization of only one objective. On the contrary, in this work we present a multi-objective algorithm called VNE-MO-ILP for solving dynamic VNE problem, which calculates an approximation of the Pareto Front considering simultaneously resource utilization and load balancing. Results of experiments, using a network simulator, prove that the proposed algorithm is better or at least comparable to the state-of-the-art algorithm.

Keywords—ILP; VNE; virtual network embedding; network virtualization; multi-objective optimization

I. INTRODUCCIÓN

La Virtualización de Redes de datos (Network Virtualization) es una tecnología relevante al analizar la evolución de la Internet, agregando funciones no disponibles en su diseño original y rompiendo así con el fenómeno denominado “Osificación de la Internet” [1, 2]. Además, numerosos testbeds o laboratorios de pruebas de diversas organizaciones tanto académicas como de la industria, se basan actualmente en este paradigma con el fin de proveer un ambiente independiente de experimentación y pruebas a los distintos grupos de investigación en el área [3-5].

Una Red Virtual o VN (Virtual Network) está compuesta de nodos virtuales y enlaces virtuales, que utilizan recursos de la red física o de sustrato (Substrate Network). Los nodos virtuales son interconectados a través de enlaces virtuales, formando una topología virtual [6]. Múltiples redes virtuales pueden coexistir aisladas e independientes unas de otras, sobre un mismo hardware físico.

El problema que trata la asignación de recursos de la red física a las redes virtuales es conocido como VNE (*Virtual Network Embedding*) y resulta crítico para el desarrollo de las tecnologías de Virtualización de Redes [7]. El objetivo es maximizar los beneficios a través de una asignación eficiente. Estos beneficios pueden referirse a la maximización de ganancias, utilización óptima de la red física, o cumplimiento de cláusulas de Calidad de Servicio o QoS (*Quality of Service*). El problema VNE es complejo por naturaleza, tanto en la

formulación matemática como a nivel computacional [8], siendo actualmente conocido como un problema *NP-difícil* [6].

Se pueden considerar dos versiones del problema VNE: la versión estática u *off-line*, en la cual se consideran conocidos de antemano los requerimientos de redes virtuales (VNR, *Virtual Network Requirement*), y la versión dinámica u *on-line*, en la cual los VNR no son conocidos *a priori* y van tratándose individualmente a medida que aparecen. Este trabajo estudia la versión *on-line* o dinámica del problema VNE.

Recientemente, el problema VNE ha atraído mucha atención a la comunidad científica, como puede notarse en los *surveys* o revisiones bibliográficas relacionadas al problema [6, 9]. Las estrategias propuestas para su resolución son basadas en heurísticas o en formulaciones de Programación Lineal Entera (ILP, *Integer Linear Programming*). Por la complejidad del problema, los primeros trabajos han propuesto algoritmos en los que la asignación de nodos virtuales se realiza en forma independiente o no coordinada con la asignación de los enlaces, como en [7] y [10]. Otros trabajos proponen la asignación coordinada, pero realizándola en dos etapas [11].

En [12], Cheng *et al.* realizan ambas asignaciones en una sola etapa, en forma coordinada. En esta propuesta los autores utilizan los atributos topológicos tanto de la red física como la del VNR elaborando un *ranking* de nodos, inspirándose en el algoritmo *PageRank* utilizado por Google para el *ranking* de las páginas web [13]. De esa manera, se busca tomar en cuenta la incidencia de la topología de la red. A partir del nodo con mejor posición en el *ranking* se construye un árbol y de esa manera se ordena la asignación de nodos y enlaces virtuales, con el objetivo de asignar los nodos virtuales a los nodos físicos mejor posicionados en la red física.

El trabajo de Lischka y Karl en [14] también realiza las asignaciones coordinadamente, utilizando algoritmos de detección de isomorfismo en sub-grafos (SID, *Subgraph Isomorphism Detection*). Con esto se busca en la topología de la red física un sub-grafo isomórfico que represente a la topología del VNR, aplicando una restricción que limita la cantidad de saltos para mapear los enlaces virtuales.

Todos los trabajos citados resuelven el problema VNE con heurísticas que buscan optimizar un único objetivo específico. En [8], Melo *et al.* utilizan técnicas de ILP consiguiendo muy buenos resultados tanto con las métricas de rendimiento como con los tiempos de corrida. Se realizan evaluaciones de tres funciones-objetivo distintas, concluyendo que la mejor

alternativa es la denominada “Camino de menor distancia ponderada” o *Weighted Shortest Distance Path (WSDP)*, la cual combina objetivos de balance de carga con la búsqueda de caminos más cortos para los enlaces virtuales.

A diferencia de los trabajos anteriores, en este trabajo se presenta un enfoque multi-objetivo basado en la idea que los objetivos más utilizados en la asignación individual de una VNE, es decir, el costo de la asignación en términos de la utilización de recursos físicos, y el balance o distribución uniforme de éstos en la red física, son claramente contrapuestos. En la medida de nuestro conocimiento, este trabajo resulta así ser el primero en proponer un enfoque multi-objetivo que permite calcular una aproximación al Frente Pareto [15] considerando simultáneamente los dos objetivos arriba citados.

El algoritmo propuesto, denominado aquí VNE-MO-ILP (*Virtual Network Embedding – Multi-Objective - Integer Linear Programming*), realiza múltiples corridas de una formulación ILP, cada una con variaciones en una restricción. De esta manera se genera el mencionado Frente Pareto, y se ofrece además al operador de la red física múltiples opciones (soluciones no comparables entre sí) para la asignación de recursos a un VNR. También resulta interesante investigar el efecto de la selección de criterios específicos en los valores de las métricas globales usualmente consideradas para evaluar la eficiencia del algoritmo, como son: i) La *Tasa de Aceptación*, y ii) La *Relación Ganancia/Costo* [12].

El resto del trabajo se divide de la siguiente manera: La Sección II presenta una descripción formal del problema VNE, sus métricas y restricciones típicas. La Sección III explica nuestra propuesta, con las funciones-objetivo consideradas. La Sección IV expone los resultados experimentales, mientras que la última sección presenta las conclusiones y trabajos futuros propuestos.

II. DESCRIPCIÓN FORMAL DEL PROBLEMA VNE

Esta sección describe el modelado de las redes física y virtual, además de definir las restricciones principales para la formulación formal del problema VNE. Esta formulación está basada en la propuesta de Melo *et al.* publicada en [8]. También se presentan las métricas que se utilizarán para evaluar la eficiencia del algoritmo propuesto respecto al trabajo de referencia [8] de Melo *et al.*

A. Modelado de la red física y del requerimiento de red virtual (VNE)

La red física o de sustrato es modelada como un grafo no dirigido ponderado $\{G^p = N^p, L^p, C^p, B^p, D^p\}$ compuesto por un conjunto de nodos N^p y un conjunto de enlaces físicos L^p . Cada nodo físico $i \in N^p$ está caracterizado por una capacidad de procesamiento (por ejemplo de CPU) C_i^p . Consideramos que cada enlace $l_{ij} \in L^p$ cuenta con un ancho de banda B_{ij}^p y provoca un retardo de propagación D_{ij}^p .

A su vez, un requerimiento de red virtual VNR puede describirse como un grafo no dirigido ponderado $\{G^v = N^v, L^v, C^v, B^v, D^v\}$ compuesto por un conjunto de nodos N^v y un conjunto de enlaces físicos L^v . Cada nodo virtual $m \in N^v$

está caracterizado por el requerimiento de una capacidad de procesamiento C_m^v . Con respecto a los enlaces virtuales, consideramos que cada enlace $l_{mn} \in L^v$, $m < n$, requiere un ancho de banda B_{mn}^v con un retardo máximo de D_{mn}^v . Como tratamos el problema dinámico, cada VNR tiene un tiempo de vida t^v pasado el cual debe ser retirado de la red física, liberando los recursos utilizados.

Además, L_i^p representa el subconjunto de enlaces físicos l_{ij} que están conectados directamente al nodo i en la red física. Análogamente, L_m^v representa el subconjunto de enlaces virtuales l_{mn} que están directamente conectados con el nodo virtual m .

B. Variables de asignación

La variable binaria x_i^m es utilizada para representar el mapeamiento de nodos virtuales a los nodos físicos y es definido en la expresión:

$$x_i^m = \begin{cases} 1, & \text{si el nodo virtual } m \text{ es asignado al nodo físico } i \\ 0, & \text{en caso contrario} \end{cases} \quad (1)$$

La variable binaria y_{ij}^{mn} representa la asignación de enlaces virtuales a caminos formados por enlaces físicos, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$y_{ij}^{mn} = \begin{cases} 1, & \text{si el enlace virtual } l_{mn} \text{ usa el enlace físico } l_{mn} \\ 0, & \text{en caso contrario} \end{cases} \quad (2)$$

Luego de un mapeamiento exitoso, y antes de la aparición de un nuevo VNR, se restan de cada nodo y enlace físico los recursos que utiliza la nueva red virtual, a fin de mantener actualizada la disponibilidad de recursos en la red física.

C. Restricciones aplicadas al problema VNE

Para asegurar una correcta asignación de nodos y enlaces virtuales, y obedecer la ley de conservación de capacidades de nodos y enlaces físicos, se definen un conjunto de restricciones siguiendo el delineamiento propuesto en [8] por Melo *et al.*

1) *Asignación de nodos virtuales a nodos físicos*: Las expresiones (3) a (5) que siguen, aseguran que cada nodo virtual sea asignado a un solo nodo físico, y que cada nodo físico pueda ser utilizado como máximo por un solo nodo virtual en la misma solicitud, aunque pueda ser utilizado por otras VNR, y que la capacidad (por ejemplo de CPU) de cada nodo físico no se exceda:

$$\forall m: \sum_i x_i^m = 1 \quad (3)$$

$$\forall i: \sum_m x_i^m \leq 1 \quad (4)$$

$$\forall i: \sum_m x_i^m \cdot C_m^v \leq C_i^p \quad (5)$$

2) *Asignación de enlaces virtuales a enlaces físicos*: Para permitir la optimización simultánea en la asignación de enlaces y nodos virtuales, la restricción *Multi-Commodity Flow* [16] es aplicada en conjunto con la formulación *Nodo-Enlace* [8]. Además, se utiliza la noción de flujos direccionales sobre los enlaces virtuales que se representa en la expresión (6), siguiendo la notación propuesta en [8].

$$\forall l_{mn} \in L_m^v, \quad m < n, \quad \forall i:$$

$$\sum_{j \in L_i^p} (y_{ij}^{mn} - y_{ji}^{mn}) = x_i^m - x_i^n \quad (6)$$

3) *Limitaciones de ancho de banda:* La expresión (7) asegura que la capacidad de ancho de banda disponible en cada enlace físico no sea excedida.

$$\forall l_{ij} \in L_i^p, \quad i < j:$$

$$\sum_{m,n \in L_m^v, m < n} B_{mn}^v (y_{ij}^{mn} + y_{ji}^{mn}) \leq B_{ij}^p \quad (7)$$

4) *Límite del Retardo en enlaces:* El retardo máximo D_{mn}^v del enlace virtual l_{mn} es un dato del problema que acota la suma de los retardos de todos los enlaces físicos que componen el enlace virtual. Para asegurar que esta restricción se cumpla, Melo *et al.* aplican la expresión:

$$\forall l_{mn} \in L_m^v, \quad m < n, \quad \forall i:$$

$$\sum_{j \in L_i^p, i < j} D_{ij}^p (y_{ij}^{mn} + y_{ji}^{mn}) \leq D_{mn}^v \quad (8)$$

D. Métricas de evaluación para el problema VNE

Para el problema VNE en su versión dinámica, es decir, cuando los requerimientos de redes virtuales VNR 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 calculadas al final del proceso de simulación, luego de realizar todas las asignaciones de redes virtuales en función del tiempo.

Las métricas que utilizaremos en este trabajo, por ser las más aceptadas en la literatura actual [10,11] son los siguientes:

i) *Tasa de Aceptación de VNR:* La tasa de aceptación de VNR que se denota como A^{VNR} , está dada por la ecuación (9) y define el rendimiento global del método de asignación en cuanto a su capacidad de asignar (y no rechazar o bloquear) la mayor cantidad posible de VNR.

$$A^{VNR} = \frac{k^{VNRa}}{k^{VNR}} \quad (9)$$

En esta ecuación, k^{VNR} representa la cantidad total de VNR cuya asignación fue solicitada, mientras que k^{VNRa} es la cantidad de VNR asignada exitosamente por el algoritmo.

ii) *Relación Ganancia/Costo:* Consideramos el costo del mapeamiento de una VNR igual al costo de los recursos que utiliza en la red física o de sustrato. La ganancia o *revenue* puede ser considerada como proporcional a los costos de recursos requeridos por el VNR (CPU de los nodos virtuales y ancho de banda de los enlaces virtuales). Cuanto más alto sea el valor de este indicador E^{VNR} , mayor eficiencia indica en el

uso de los recursos de la red física y por lo tanto significa mayor ganancia para el dueño de la red de sustrato [7]. Los coeficientes α y β relacionan los costos reales de las unidades de capacidad en los nodos y ancho de banda en los enlaces.

$$E^{VNR} = \frac{\alpha \sum_m C_m^p + \beta \sum_{m,n} B_{mn}^p}{\alpha \sum_i C_i^p + \beta \sum_{i,j} B_{ij}^p} \quad (10)$$

III. PROPUESTA PARA LA RESOLUCIÓN DEL PROBLEMA VNE: ALGORITMO VNE-MO-ILP

Al realizar la asignación de recursos a un VNR individual, se debe definir los objetivos de la misma. Estos deben apuntar a conseguir mejores resultados en las métricas globales, es decir, una mayor Tasa de aceptación A^{VNR} , y una mayor Relación ganancia/costo E^{VNR} . Este trabajo plantea la optimización de dos objetivos en cada asignación:

- *Menor utilización de recursos físicos:* Como la necesidad de recursos de los nodos virtuales no puede ser minimizada, se busca minimizar la cantidad de enlaces físicos, a efectos de atender los requerimientos con la menor cantidad de recursos posibles, mejorando la eficiencia. Este objetivo tiene una relación directa con la métrica E^{VNR} .
- *Mejor Balance de carga:* En este caso se busca asignar los recursos de forma que la red quede siempre con valores balanceados, tanto en los nodos como en los enlaces, de forma a facilitar las asignaciones posteriores y evitar que recursos de la red física queden aislados. Así buscamos la mejor métrica de Tasa de aceptación A^{VNR} .

Como consecuencia de lo arriba descrito, el algoritmo VNE-MO-ILP propone:

1) *Parametrizar un costo de asignación SP*, dado por:

$$SP = \sum_{ij} \sum_{mn} y_{ij}^{mn} * B_{mn}^v \quad (11)$$

donde este parámetro SP varía entre un valor mínimo y un valor máximo fijados *a priori*, tomando $(s+1)$ valores igualmente espaciados entre sus valores máximos y mínimos, como se mostrará en la ecuación (15).

2) *Optimizar el Balance de Carga:* Se busca minimizar los recursos en los nodos con mayor capacidad de recursos y en los enlaces físicos con mayor balance de ancho de banda, esto es:

$$\text{minimizar } f = \gamma \cdot (\mathcal{L}_{max}^p) + (\mathcal{L}_{max}^B) \quad (12)$$

donde γ relaciona los costos de recursos físicos de nodos y enlaces, y los valores de cargas máximas en los nodos y enlaces físicos, \mathcal{L}_{max}^p y \mathcal{L}_{max}^B respectivamente, están definidas de acuerdo con las siguientes nuevas restricciones, que se agregan a las restricciones formuladas en la Sección 2:

$$\forall i \in N^p: C_i^p - \sum_m x_i^m * C_m^v \leq \mathcal{L}_{max}^p \quad (13)$$

$$\forall l_{ij} \in L^p: B_{ij}^p - \sum_{mn} y_{ij}^{mn} * C_{mn}^v \leq \mathcal{L}_{max}^{B^p} \quad (14)$$

El algoritmo propuesto VNE-MO-ILP calcula una aproximación al Frente Pareto utilizando las dos ideas arriba expuestas. En nuestro mejor entender, ningún trabajo anterior utiliza un enfoque multi-objetivo que permita calcular una aproximación al Frente Pareto, por más que ya se hayan utilizado más de una métrica para definir la eficiencia de la asignación de redes virtuales en redes físicas.

De esta manera, este algoritmo ofrece al operador de red un Frente Pareto con distintas soluciones (óptimas en el sentido Pareto) a fin de dar a éste operador la libertad de elección, siguiendo un criterio que puede ser eventualmente adaptado a las necesidades del momento.

El Algoritmo VNE-MO-ILP esquematizado en la Tabla 1, inicializa parámetros y variables, y calcula las cotas máxima y mínima aceptables para el parámetro SP definido en (11), para lo cual se divide el intervalo $[SP_{min}, SP_{max}]$ en s sub-intervalos, asignando al parámetro SP los siguientes $(s+1)$ valores:

$$SP = SP_{min} + \tilde{n} (SP_{max} - SP_{min}) \text{ con } \tilde{n} = 0, 1, 2, \dots, s \quad (15)$$

Seguidamente, se prepara una formulación ILP con los siguientes elementos:

- Los parámetros, variables de asignación y restricciones presentados en la Sección 2;
- Las restricciones adicionales en las expresiones (11), (13) y (14).
- La función objetivo de la expresión (12).

Posteriormente, en cada iteración se pasa esta formulación a un *ILP Solver*, el cual devuelve una solución, si ésta existe.

TABLA 1. ALGORITMO VNE-MO-ILP

<p>Entrada: Red física actualizada G, Solicitud VNR, formulación ILP, Número de Corridas por VNR, Max_Costo_VNR. Salida: Frente Pareto FP.</p>
<pre> 1: Inicializar FP 2: SPmin = Cantidad de enlaces virtuales de VNR 3: SPmax = Maximo_Costo_VNR 4: para SP = SP_min a SP_max en saltos de (SP_min - Sp_max)/s hacer 5: Asignar valor de SP a la expresión (15) 6: Agregar (15) como restricción de la formulación ILP 7: Pasar la formulación ILP al SOLVER 8: si SOLVER () = factible entonces 9: Agregar Solución (SOLVER) al FP 10: fin si 11: fin para 12: si FP= ϕ 13: devolver VNR_Bloqueada 14: sino 15: eliminar soluciones dominadas en FP 16: retornar FP 17: fin si </pre>

Con cada solución dada por el *ILP Solver* se genera un punto del Frente Pareto aproximado, el cual resultará ser la salida del algoritmo VNE-MO-ILP.

De esta manera, se logró utilizar un *ILP Solver* que resuelve problemas mono-objetivo para encontrar aproximaciones al Frente Pareto, resultado típico en la resolución de un problema multi-objetivo.

Si bien el método ILP no es escalable a redes muy complejas, nuestra propuesta utiliza de todas formas esta formulación teniendo en cuenta los tiempos de ejecución reportados en el artículo de referencia [8], conscientes de la necesidad de proponer heurísticas eficientes para redes más complejas.

IV. EXPERIMENTOS Y RESULTADOS

A. Simulador de red de eventos discretos

Para la evaluación del algoritmo propuesto se ha desarrollado un simulador de red de eventos discretos en lenguaje *Java* [17], el cual está esquematizado en la Figura 1.

Luego de definir los parámetros de una red física y de un conjunto de M requerimientos de redes virtuales, el simulador toma un requerimiento aleatoriamente y lo pasa al Algoritmo VNE-MO-ILP, el cual interactúa con el *ILP Solver* para construir punto a punto un Frente Pareto con las soluciones no dominadas (óptimas en el sentido Pareto) encontradas. Si el algoritmo no encontró ninguna solución, se actualizan las métricas. En cambio si se obtiene un Frente Pareto, es necesario aplicar un criterio posiblemente subjetivo para elegir una solución y pasar a la siguiente instancia de tiempo.

B. Redes de prueba y ambiente de experimentación

Las redes de sustrato utilizadas son *IRIS* y *MARNET*, éstas fueron obtenidas de *The Internet Topology Zoo* [19] y se visualizan en las Figuras 2 y 3 respectivamente. *IRIS* es una red de topología *mesh* con 51 nodos y 64 enlaces, mientras que *MARNET* es de una topología híbrida (estrella/ *mesh*) con 20 nodos y 27 enlaces.

El retardo en cada enlace físico es proporcional a su longitud, y las capacidades de cada nodo fueron generados aleatoriamente con un valor de 200 y 300 unidades de procesamiento. La tasa de transferencia de datos es de 512 Mbps para cada enlace.

Los requerimientos de red virtual VNR fueron generadas utilizando el generador de topologías de red *BRITE* [20]. La cantidad de nodos virtuales varía entre 2 y 10. La tasa de datos de cada enlace toma un valor entero uniformemente distribuido entre 2 y 8 Mbps, y los requerimientos de capacidad de procesamiento fueron distribuidos entre 2 y 40 unidades de recursos.

Para la resolución de la formulación ILP se utilizó la herramienta IBM Ilog CPLEX ® [18] versión 12.6. Los tiempos consumidos en las pruebas fueron registrados para comparaciones posteriores.

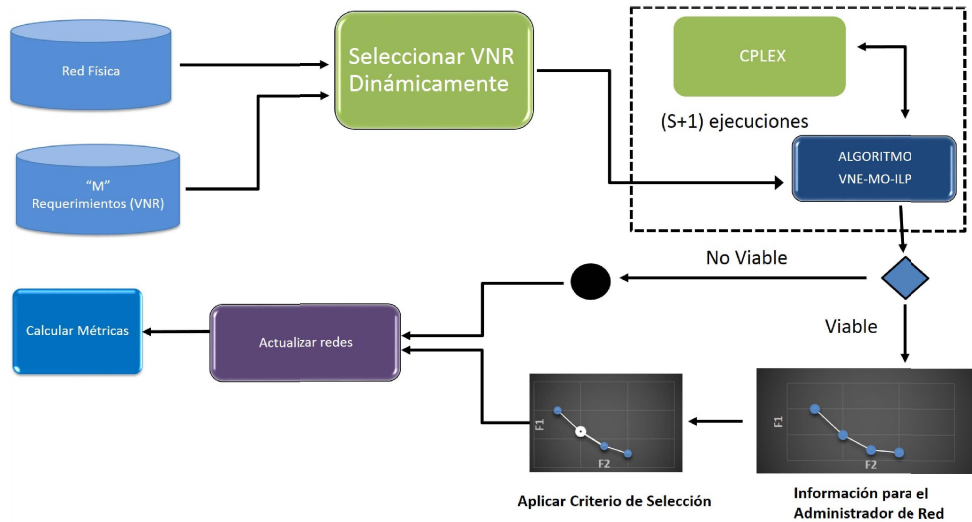


Fig. 1. Simulador de red de eventos discretos

C. Resultados y comparaciones

Se han realizado grupos de experimentos tomando VNRs con tiempos de vida en una distribución aleatoria uniforme con promedios de 10, 20, 30, 40 y hasta 100 unidades de tiempo para cada VNR. En cada instancia de tiempo suponemos la llegada de un VNR. Para conseguir que la red física llegue a su estado estable en cuanto a cantidades de VNRs instaladas, los experimentos se interrumpen cuando se llega a 500, 1000, 1500, y así sucesivamente hasta 5000 VNRs. Todas las simulaciones se realizaron en un procesador Intel Core (TM) I7-4770 (3.4 GHz) con 8 Gigabytes de memoria RAM.

Además, se han realizado los mismos experimentos con el algoritmo propuesto en [8] para realizar comparaciones de resultados.

a) *Criterios de selección de resultados:* En los experimentos, hemos tomado tres criterios distintos para la selección de una solución del Frente Pareto, a efectos de pasar a la siguiente instancia de tiempo:

- 1) En el primer criterio tomamos la solución con el menor *Costo de asignación SP* (11), y el peor *Balance de carga* (12) (Criterio Izquierdo, CI).
- 2) Para el segundo criterio tomamos la solución más cercana al eje de coordenadas buscando un equilibrio entre ambas métricas (Criterio Central, CC).
- 3) Por último tomamos la solución que tiene mayor Costo de asignación, pero con el mejor *Balance de Carga* para ser evaluados posteriormente (Criterio Derecho, CD).

En la Fig. 4 se puede observar un Frente Pareto de ejemplo, correspondiente a la asignación de una VNR, en el cual están indicados los tres criterios de selección mencionados.

Los resultados obtenidos comparando los 3 criterios propuestos se encuentran en las Tablas 2 y 3 para las redes IRIS y MARNET respectivamente. En las mismas están resaltados con negrita y en rojo los valores de las métricas en que el algoritmo VNE-MO-ILP fue superado por el algoritmo de referencia VNE-NLF presentado en [8].

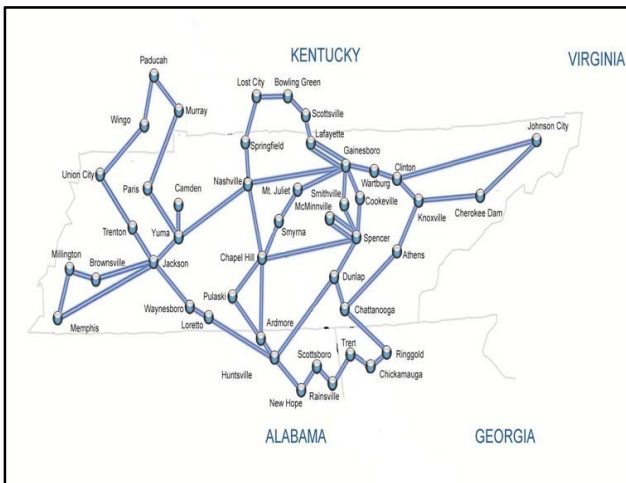


Fig. 2 Topología de la red IRIS

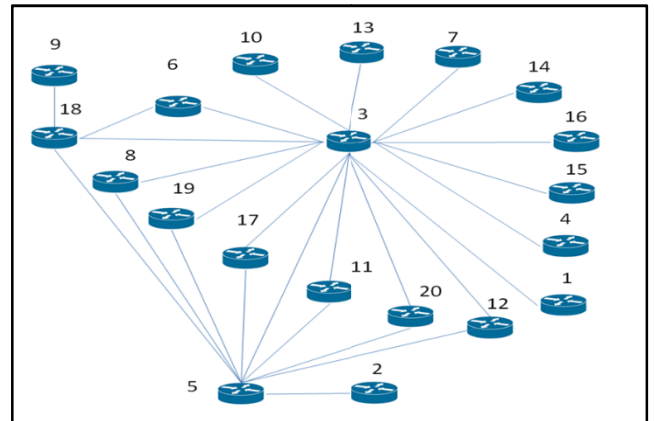


Fig. 3 Topología de la red MARNET

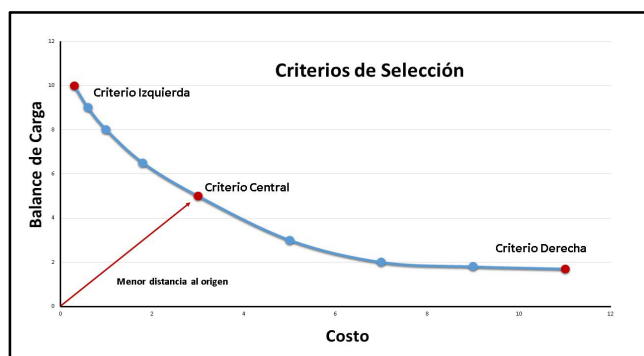


Fig. 4 Criterios de Selección considerados.

En la Tabla 2 se puede notar que para la red *mesh* IRIS, el algoritmo propuesto superó al algoritmo de Melo *et al.* en todos los experimentos, mejorando tanto la Tasa de Aceptación de VNR (A^{VNR}) como la Relación Ganancia/Costo E^{VNR} . Sin embargo, al considerar la Tabla 3, para la red híbrida MARNET, se puede observar que en todos los casos, la mejor Relación Ganancia/Costo E^{VNR} es conseguida por el algoritmo VNE-MO-ILP propuesto en este trabajo; mientras que el algoritmo de referencia VNE-NLF sólo mejora al algoritmo propuesto en cuanto a la Tasa de Aceptación A^{VNR} en 3 de las 10 instancias. En otras palabras, el algoritmo VNE-MO-ILP encuentra soluciones que dominan a las soluciones encontradas por el algoritmo VNE-NLF mientras que éste último no logra encontrar ninguna solución que domine a las soluciones encontradas por el algoritmo propuesto en el sentido Pareto.

b) Relación Ganancia/Costo: Las Figuras 5 y 6 presentan los resultados para ésta métrica, por cada instancia considerada en función del promedio del tiempo de vida de los VNR, que varía de 10 hasta 100 unidades de tiempo. Al aumentar el promedio de tiempo de vida, se consigue que una mayor cantidad de VNR permanezca en la red simultáneamente, por lo que se logra una mayor utilización de la red de sustrato.

Para la red IRIS (Fig. 5), los tres criterios de selección de un punto del Frente Pareto mejoran los resultados obtenidos con el algoritmo de referencia. El mejor criterio es el CI (menor costo de asignación SP), como era de esperar, ya que optimiza la utilización de recursos en el mapeo de cada VNR.

A su vez, para la red MARNET (Fig. 6), los resultados también son mejores para el algoritmo VNE-MO-ILP. Sin embargo, sólo dos criterios logran mejores resultados que el algoritmo de referencia: el Criterio Izquierdo (CI) y el Criterio Central (CC). Para este caso el Criterio Derecho (CD) tiene un desempeño similar al del algoritmo de referencia sin superarlo notoriamente como ocurre con la red IRIS, como puede observarse en la Fig. 5.

Esta diferencia favorable al algoritmo propuesto es debido a que VNE-NLF considera en una sola formulación ILP ambos componentes: balance de carga y utilización de recursos, sin tener en cuenta la relación de compromiso que existe entre ambos. En cambio, el algoritmo VNE-MO-ILP considera ambos aspectos por separado, calculando el Frente Pareto que caracteriza a la relación de compromiso que existe entre ambos criterios, logrando así mejores resultados.

TABLA 2. RESUMEN DE RESULTADOS – TOPOLOGÍA IRIS

Tiempo de vida	VNE-MO-ILP			VNE-NLF	
	Criterio	A^{VNR}	E^{VNR}	A^{VNR}	E^{VNR}
10	CI	100%	0.785	95.6%	0.277
	CC	100%	0.600		
	CD	100%	0.580		
20	CI	100%	0.782	95.6%	0.379
	CC	100%	0.592		
	CD	100%	0.567		
30	CI	100%	0.780	95.6%	0.379
	CC	100%	0.596		
	CD	100%	0.571		
40	CI	100%	0.780	94.7%	0.412
	CC	100%	0.583		
	CD	100%	0.563		
50	CI	100%	0.781	95.2%	0.450
	CC	99.8%	0.595		
	CD	99.9%	0.568		
60	CI	100%	0.780	95.2%	0.450
	CC	99.7%	0.595		
	CD	99.9%	0.559		
70	CI	99.9%	0.778	95.8%	0.482
	CC	99.7%	0.595		
	CD	99.9%	0.556		
80	CI	100%	0.778	96.1%	0.495
	CC	99.9%	0.588		
	CD	99.9%	0.549		
90	CI	99.9%	0.779	96.6%	0.514
	CC	99.8%	0.591		
	CD	99.9%	0.549		
100	CI	99.9%	0.779	94.7%	0.510
	CC	99.9%	0.590		
	CD	99.9%	0.544		

c) Tasa de Aceptación de VNR: Las figuras 7 y 8 ilustran los resultados relacionados a ésta métrica. Se puede observar que para la red IRIS (Fig. 7) que se consigue asignar con éxito casi el 100% de los VNR, con los 3 criterios utilizados (CI, CC, CD). Sin embargo, el algoritmo de referencia se mantiene en un valor de 95% a 97%, sin lograr atender todos los requerimientos de VNR. En contrapartida, para la red MARNET (Fig. 8) no se observa una diferencia significativa entre los algoritmos comparados, es decir, el comportamiento de los algoritmos es bastante similar en todos los casos.

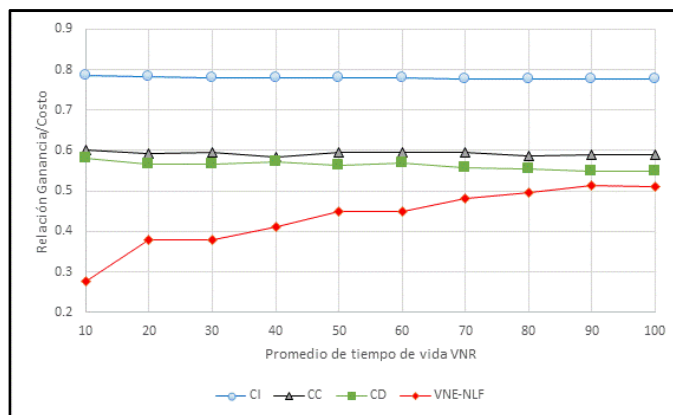


Fig. 5. Resultados – Relación Ganancia/Costo, red IRIS

TABLA 3. RESUMEN DE RESULTADOS – TOPOLOGÍA MARNET

Tiempo de vida	VNE-MO-ILP			VNE-NLF	
	Criterio	A^{VNR}	E^{VNR}	A^{VNR}	E^{VNR}
10	CI	100%	0.933	100%	0.717
	CC	100%	0.885		
	CD	100%	0.721		
20	CI	100%	0.929	100%	0.717
	CC	100%	0.882		
	CD	100%	0.716		
30	CI	100%	0.904	100%	0.713
	CC	100%	0.877		
	CD	100%	0.714		
40	CI	99.9%	0.872	100%	0.706
	CC	100%	0.858		
	CD	100%	0.713		
50	CI	99.9%	0.852	100%	0.702
	CC	99.9%	0.839		
	CD	100%	0.713		
60	CI	94.5%	0.835	96.9%	0.689
	CC	94.3%	0.827		
	CD	96.7%	0.705		
70	CI	84.5%	0.828	86.7%	0.680
	CC	85.1%	0.824		
	CD	85.6%	0.705		
80	CI	76.4%	0.825	77.1%	0.676
	CC	86.9%	0.824		
	CD	77.1%	0.706		
90	CI	70.3%	0.825	70.4%	0.679
	CC	70.2%	0.811		
	CD	69.4%	0.708		
100	CI	64%	0.819	63.9%	0.672
	CC	63.3%	0.821		
	CD	63.8%	0.711		

Estos resultados exitosos del algoritmo VNE-MO-ILP se deben a que éste realiza varios intentos para el mapeamiento de cada VNR. De hecho, en caso que una formulación ILP no sea factible, realiza el cambio en el valor del parámetro SP y prueba nuevamente. Este proceso se realiza para casi todos los valores posibles para el costo de utilización de recursos, consiguiendo así realizar la asignación de casi todas las VNR. En contrapartida, el algoritmo de referencia sólo realiza un intento que de ser infructuoso lleva al bloqueo del VNR considerado.

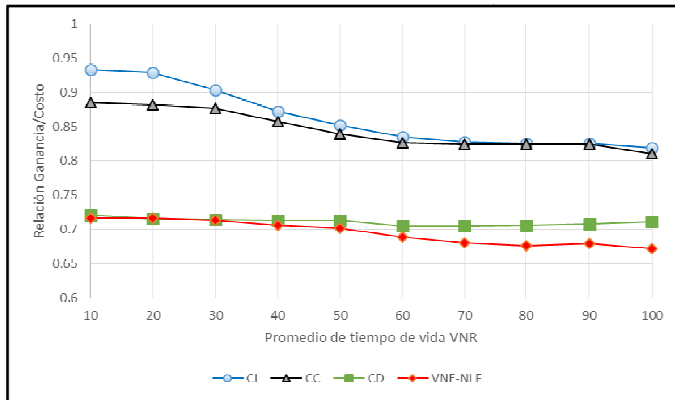


Fig. 6. Resultados – Relación Ganancia/Costo, red MARNET

d) *Tiempos de ejecución:* Los tiempos promedio de asignación de cada VNR para el algoritmo VNE-MO-ILP variaron para cada conjunto de pruebas entre dos y cinco segundos. En cambio, los tiempos de ejecución para el algoritmo de referencia del estado del arte, VNE-NLF, fueron menores a un segundo.

Como se ha expuesto en este trabajo, el algoritmo de referencia realiza un solo intento de mapear el VNR, a través del intento de resolución de una sola formulación ILP, por lo que lógicamente es más rápido. En cambio, el algoritmo VNE-MO-ILP realiza varias llamadas al *ILP Solver* obteniendo mejores resultados en las métricas de comparación al costo de requerir mayor tiempo de ejecución.

Los valores encontrados, sin embargo, pueden considerarse aceptables, no significativos en los tiempos de operación real de una red. Además, las topologías de red tomadas para los experimentos son representativas de redes de tamaño mediano, y las instancias de cada prueba implican un elevado tráfico en cada una de ellas.

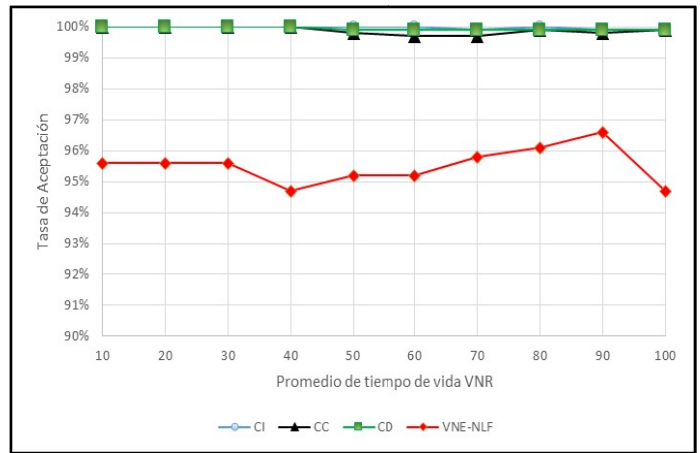


Fig. 7. Resultados – Tasa de Aceptación, red IRIS

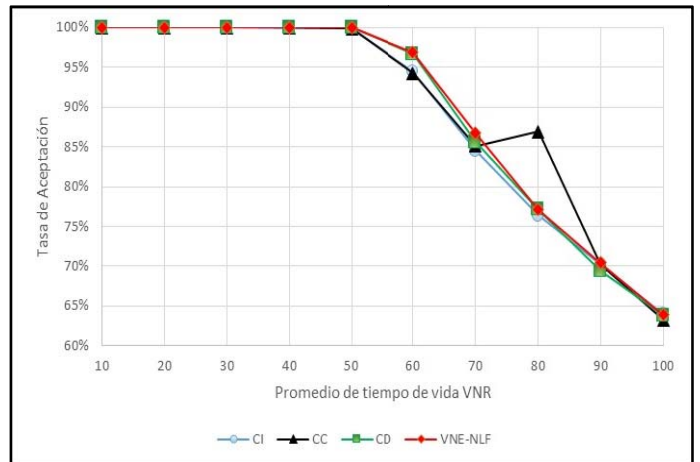


Fig. 8. Resultados – Tasa de Aceptación, red MARNET

V. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

El problema VNE trata la asignación eficiente de recursos de las redes físicas (nodos y enlaces) a requerimientos de redes virtuales. En este trabajo se presenta el algoritmo VNE-MO-ILP (*Virtual Network Embedding-Multi Objective- Integer Linear Programming*) para la resolución de éste problema en su versión dinámica, utilizando un enfoque multi-objetivo.

Los dos objetivos usualmente considerados en la asignación individual de un requerimiento de red virtual son: i) el Costo de asignación, relacionado con la utilización eficiente de los recursos de la red física, y ii) el Balance de carga, que busca una distribución uniforme de éstos en todos los nodos y enlaces.

El algoritmo propuesto en este trabajo obtiene una aproximación al Frente Pareto para cada requerimiento individual, a través de múltiples corridas de una formulación ILP. De esta manera se representa la relación de compromiso entre ambos objetivos mencionados y se presentan opciones al operador de la red para la selección de una solución específica. Este trabajo es el primero, en nuestro mejor entendimiento, en proponer un enfoque multi-objetivo para este problema.

Se realizaron pruebas experimentales comparando la eficiencia del algoritmo propuesto en dos topologías de red de tamaño mediano, comparando los resultados con los del algoritmo VNE-NLF presentado en [8], superándolo en las dos métricas consideradas: i) la Tasa de Aceptación de VNR, y ii) la Relación Ganancia/Costo, con tiempos de ejecución razonables. Se destaca que las soluciones encontradas por el algoritmo VNE-MO-ILP dominan en muchos casos a las soluciones encontradas por el algoritmo de referencia, pero en ningún caso sus soluciones resultan dominadas (en el sentido Pareto).

Cabe destacar además, que se han realizado pruebas con diversos criterios para seleccionar una solución del Frente Pareto. Los resultados experimentales obtenidos indican que el criterio denominado Criterio Izquierdo o "CI", el cual utiliza la solución con la mejor utilización de los recursos, obtiene los mejores resultados, lo que no necesariamente significa que es la única opción posible dado que el operador de la red podría cambiar la opción escogida del Frente Pareto considerando necesidades específicas al momento de la toma de decisión. Lógicamente, cualquiera sea la solución del Frente Pareto que escoja, ésta no puede considerarse una mala decisión dado que se trata de una solución no dominada por ninguna otra solución.

Como ya fuera expuesto, la utilización de una formulación ILP en redes de gran tamaño resulta prohibitivo, por lo que los autores proponen la utilización de diferentes meta heurísticas para la resolución del problema VNE. Además, éste enfoque puede ser utilizado para analizar otros problemas similares, como el problema VNR (*Virtual Network Reconfiguration*) que puede ser tratado como una clara extensión del problema tratado en este trabajo.

REFERENCIAS

- [1] N. Feamster, L. Gao, y J. Rexford, "How to lease the internet in your spare time," *Computer Communication Review*, vol. 37, Nro 1, 2007.
- [2] T. Anderson; L. Peterson; S. Shenker; J. Turner, "Overcoming the Internet impasse through virtualization," *Computer*, vol.38, Nro.4, pag.34-41, Abril 2005
- [3] L. Peterson, T. Anderson, D. Blumenthal, D. Casey, D. Clark, D. Estrin, J. Evans, D. Raychaudhuri, M. Reiter, J. Rexford, S. Shenker, y J. Wroclawski, "GENI design principles," *IEEE Computer Magazine*, 2006.
- [4] University of Waterloo, "User controlled lightpaths project," <http://uclp.uwaterloo.ca/>.
- [5] A. Tzanakaki *et al.*, "Energy efficiency in integrated IT and optical network infrastructures: The GEYSERS approach", en *Proc. of IEEE INFOCOM*, Workshop on Green Communications and Networking, 2011
- [6] Fischer, Andreas, *et al.* "Virtual network embedding: A survey.". *IEEE Communications Surveys and Tutorials* : pag. 1-19, 2013.
- [7] M. Yu, Y. Yi, J. Rexford, y M. Chiang, "Rethinking virtual network embedding: Substrate support for path splitting and migration," *ACM SIGCOMM CCR*, vol. 38, Nro. 2, pag. 17-29, Abril 2008
- [8] M. Melo, S. Sargento, U. Killat, A. Timm-Giel, y J. Carapinha. "Optimal virtual network embedding: Node-link formulation". *IEEE Transactions on Network and Service Management*, 10 (4): pag. 356-368, 2013
- [9] N. M. M. K. Chowdhury, "Network virtualization: State of the art and research challenges". *IEEE Commun. Mag.*, vol. 47, Nro. 7, pag. 20-26, Julio 2009.
- [10] J. Lu y J. Turner, "Efficient mapping of virtual networks onto a shared substrate," Washington University in St. Louis, Reporte Técnico, 2006.
- [11] N. Chowdhury, M. Rahman, y R. Boutaba, "Virtual network embedding with coordinated node and link mapping," en *Proc. in 2009 IEEE INFOCOM*, pag. 783-791, 2009.
- [12] X. Cheng, S. Su, Z. Zhang, H. Wang, F. Yang, Y. Luo, y J. Wang, "Virtual network embedding through topology-aware node ranking," *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, vol. 41, pag. 38-47, Abril 2011.
- [13] The Google Search Engine: Commercial Search Engine founded by the Originators of PageRank, <http://www.google.com/>, 2003.
- [14] J. Lischka y H. Karl, "A virtual network mapping algorithm based on subgraph isomorphism detection," en *Proceedings of the 1st ACM workshop on Virtualized infrastructure systems and architectures*. New York, USA, Agosto 2009, pag. 81-88.
- [15] C. von Lüken, B. Barán, C. Brizuela. A survey on multi-objective evolutionary algorithms for many-objective problems. *Computational Optimization and Applications*, 58(3), Pag. 707-756. 2014
- [16] S. Even; A. Itai; A. Shamir, "On the complexity of time table and multi-commodity flow problems," *Foundations of Computer Science*, 1975., 16th Annual Symposium on , pag.184-193, 13-15, Oct. 1975.
- [17] Oracle. (2015) Java. <https://www.oracle.com/java/index.html>.
- [18] ILOG IBM, "Cplex optimization studio". 2013
- [19] University of Adelaide. Internet topology Zoo. <http://www.topology-zoo.org/index.html>, 2013.
- [20] I. Matta, J. Byers, A. Medina, A. Lakhina. BRITE topology generator tool. <http://www.cs.bu.edu/brite/>, 2014.