

# Network Functions Virtualization: A Survey

J. J. Gil and J. F. Botero

**Abstract**— New and different trends in networks have been promoted in recent years, among these, Network Functions Virtualization. It has emerged as an initiative from the telecom industry (manufacturers, network operators and carriers) in order to increase the flexibility of network services deployment and integration within operator's networks. This is achieved through the implementation of network functions such as firewalls, encryption, filtering, load balancing, among others, via software modules. The idea is to avoid using devices based in specific hardware and increase return on investment. Transforming network functions in software allows to run them on different general purpose equipment that could be located in a variety of telecom infrastructure, including data centers, network nodes, and even in end-user facilities. Virtual network functions can easily be migrated from one equipment to another without the need to install new specialized hardware. This article presents a state of the art on network functions virtualization, also it proposes an explanation and classification of the main projects that are working under this paradigm. Finally, future challenges in this area are identified and presented.

**Keywords**— Virtualization, Virtualized Datacenter, Virtual Networks, Network Architectures, NGN, NFV & SDN.

## I. INTRODUCCION

LA APARICIÓN de paradigmas emergentes como la computación en la nube [1], virtualización de red (NV, siglas en inglés) [2], [3], redes definidas por software (SDN, siglas en inglés) [4], [5], [6], y últimamente la virtualización de las funciones de la red (NFV, siglas en inglés) [7], [8], plantea nuevas posibilidades para la gestión de los recursos físicos y lógicos de las infraestructuras de red, con un impacto positivo en términos de agilidad y costo. Desde el punto de vista de los operadores de red, estas tecnologías pueden ayudar a reducir los costos de operación (OPEX, siglas en inglés) y costos de capital (CAPEX, siglas en inglés) [9]; además, facilitan la innovación en la red y abren la puerta a nuevas oportunidades de negocio.

NFV, desde una perspectiva de alto nivel, promueve y acelera la innovación en redes y servicios, permitiendo dinamizar el mercado de las telecomunicaciones a través de nuevos enfoques operativos, con un despliegue más rápido de nuevos servicios (menor tiempo de comercialización), y mayor seguridad [8].

En las redes tradicionales los proveedores de servicio se ven obligados a incorporar frecuentemente dispositivos de propósito particular, para cumplir con las altas exigencias de los servicios avanzados que requieren sus clientes, estos dispositivos cumplen funciones de cortafuegos, balanceadores

de carga, sistemas de detección de intrusos (IDS, siglas en inglés), inspector de paquetes (DPI, siglas en inglés), optimizadores de redes de área amplia, traductores de direcciones de red (NAT, siglas en inglés), entre otras. De esta manera, se agrega mayor complejidad a la operación y el mantenimiento de la red. De hecho, el OPEX y el CAPEX de los operadores se incrementa debido a que estos dispositivos de propósito específico son: 1) poco flexibles, 2) energéticamente ineficientes, 3) costosos de gestionar y 4) no proveen tolerancia a fallos.

NFV emerge para solucionar estos problemas. De acuerdo con el grupo industrial de especificación de NFV (NFV-ISG, siglas en inglés) del Instituto Europeo de estandarización de Telecomunicaciones (ETSI, siglas en inglés), el cual está conformado por fabricantes, vendedores de equipos, proveedores de tecnología y los principales operadores de redes de telecomunicaciones a nivel mundial; NFV explota las técnicas de la virtualización para convertir a los dispositivos de red en simples módulos virtuales [1].

Entre los beneficios que obtienen los operadores implementando NFV en la infraestructura de red, podemos nombrar:

- Reducción de los costos de operación y de capital.
- Reducción del consumo energético.
- Reducción del tiempo de lanzamiento al mercado de nuevos servicios de red.
- Incremento de la rentabilidad de la inversión.
- Flexibilidad para escalar rápida y dinámicamente diferentes servicios en función de la demanda.
- Despliegue de nuevos servicios innovadores de bajo riesgo.
- Apertura al mercado de dispositivos virtuales y a los participantes de software puro.

Este artículo pretende realizar una amplia revisión del estado del arte en NFV. La referencia [10] presentó una revisión resumida del estado del arte en NFV, en particular presentan: beneficios, arquitectura y casos de uso de NFV. En este artículo, se amplía esta revisión mediante la profundización en antecedentes, desafíos y perspectivas, y la inclusión de proyectos que parten de la comunidad académica y de la industria. También, proponemos una taxonomía de clasificación de estos proyectos para ubicar sus principales características y aportes al estado del arte.

El manuscrito está organizado de la siguiente manera: En la sección II, se exponen los antecedentes y casos de uso de NFV, y su relación con otros nuevos paradigmas de red como SDN y NV. En la sección III, se discuten los principales proyectos y trabajos relacionados con NFV. En la sección IV, se propone una clasificación de algunos proyectos sobre NFV. En la sección V, se discuten los desafíos emergentes y las

---

J. J. Gil, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia, e-mail: juliver.gil@udea.edu.co

J. F. Botero, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia, e-mail: juanf.botero@udea.edu.co

perspectivas para la investigación futura en NFV. En la sección VI, se realiza una discusión final sobre NFV. Finalmente, las conclusiones de este trabajo se presentan en la sección VII.

## II. ANTECEDENTES Y CONCEPTOS FUNDAMENTALES DE NFV

En esta sección, se exponen los antecedentes, pruebas de concepto, marco arquitectural, encadenamiento de funciones de red, y tecnologías habilitantes de NFV; también se incluyen aspectos sobre seguridad, compatibilidad con otras tecnologías emergentes y capacidad de administración.

### A. Historia

La iniciativa NFV surgió a finales del año 2012, cuando más de veinte de los mayores proveedores de servicios de telecomunicaciones a nivel mundial formaron un grupo industrial de especificación de NFV, dentro de la ETSI [11], sirviendo como paraguas formal de cooperación. El objetivo del NFV-ISG es generar una serie de recomendaciones que permitan una rápida implementación de NFV.

Desde su lanzamiento, el NFV-ISG ha crecido a por lo menos 235 entidades, entre ellas 34 proveedores de servicios, y ha celebrado siete reuniones plenarias que abarcan Asia, Europa y América del Norte. NFV-ISG se ha convertido en el punto focal para el progreso de la industria NFV. En octubre de 2013 se publicaron los primeros documentos técnicos que describen un contexto amplio de la tecnología.

La segunda publicación de documentos del NFV-ISG se realizó en enero de 2015 [12], [13]; estos documentos están disponibles en el sitio web de la ETSI (<https://www.etsi.org/technologies-clusters/technologies/nfv>).

### B. Virtualización de las funciones de la red

NFV es una reciente iniciativa que parte de la industria [13]. NFV surge debido a que en las instalaciones de los operadores de red reside una vasta y creciente cantidad de hardware propietario. El ofrecer un nuevo servicio de red requiere, muy a menudo, de la instalación de nuevo hardware propietario, lo que implica incurrir en nuevos costos de adquisición, instalación, operación, locación y energía. Estos costos sumados a los de formación de personal idóneo, hacen difícil y poco rentable la innovación en servicios de red. Además, el hardware propietario llega rápidamente al fin de su vida útil, lo que conlleva a que el ciclo de 1) adquisición, 2) integración y 3) despliegue, se repita constantemente con poco beneficio económico para los operadores de red, restringiéndoles la capacidad de innovación en un mundo ávido de recibir nuevos servicios centrados en el Internet.

El objetivo de NFV es transformar la manera en que los operadores de red diseñan sus redes, mediante la evolución de la tecnología de virtualización de servidores, con el fin de consolidar los diferentes tipos de funciones de red, en equipos estándar de propósito general (servidores, conmutadores y dispositivos de almacenamiento). Los cuales pueden estar ubicados en centros de datos (DC, siglas en inglés), nodos de

red o cerca del usuario final (ver Fig. 1) [11]. La tecnología NFV virtualiza las funciones de red de los equipos de red tradicionales, convirtiéndolas en aplicaciones software que puedan ejecutarse en hardware de propósito general; permitiendo así que estas puedan moverse entre diferentes lugares en la red, en tiempo real, dependiendo de los requisitos de los servicios. Por lo tanto, NFV evita usar nuevos equipos propietarios cada vez que se desee implementar un nuevo servicio de red.

El paradigma NFV es complementado por otras tecnologías como la virtualización de red y las redes definidas por software, que se discuten a continuación.

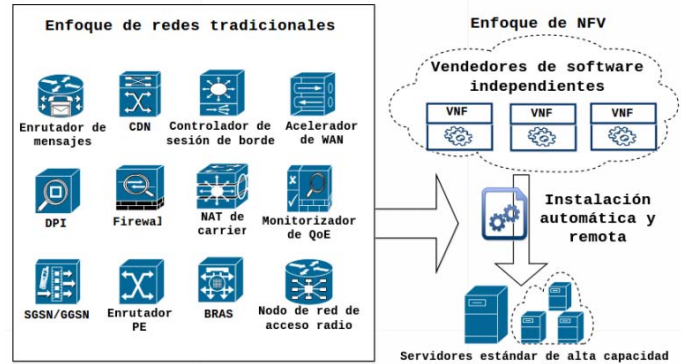


Figura 1. Perspectiva de la NFV.

*Virtualización de red:* Esta tecnología proporciona un medio para crear topologías de red arbitrarias (con garantías de calidad de servicio extremo a extremo) las cuales pueden ejecutarse sobre la misma infraestructura física de la red [2], [3]. NFV permite crear diferentes redes virtuales que pueden llevar a cabo diferentes servicios y coexistir en la misma infraestructura física. El valor agregado de usar esta herramienta es el hecho de que los administradores de red no tienen que cambiar manualmente la configuración de las conexiones entre nodos físicos (se hace a través de túneles). Además genera la posibilidad de separar el rol actual del proveedor de servicios de Internet (ISP, siglas en inglés), en dos nuevos roles: proveedor de infraestructura y proveedor de servicios [14].

*Redes definidas por software:* Las SDNs hacen que la red sea programable mediante la separación entre el plano de control (le dice a la red cómo y hacia dónde se envían los paquetes) y el plano de datos (se encarga de enviar los paquetes) [3]. El funcionamiento de las SDNs depende de la existencia de dispositivos de transmisión que puedan ser programados a través de un controlador SDN; como NOX [15], Floodlight [16] o Maestro [17], usando un protocolo estándar, como OpenFlow [18], [19]. Actualmente, SDN es la herramienta más adecuada para poner en práctica la implementación de la virtualización de red [20], [21].

NFV y SDNs son altamente compatibles, pero no dependen una de otra. De hecho, NFV provee la infraestructura sobre la que el software de las SDNs se ejecuta. Además, NFV complementa muy bien la idea de las SDNs, de usar hardware de propósito general. La

combinación de SDNs y NFV provee un gran valor agregado a las redes actuales, dado que:

- El hardware propietario que es comúnmente costoso y cumple una función específica es reemplazado por hardware genérico con software avanzado que permite funciones de virtualización.
- El plano de control en software, se puede mover de un hardware costoso (en una plataforma dedicada) a una ubicación que optimiza su uso (p. ej. un servidor en un DC). De hecho, ya se han realizado pruebas de concepto que permiten gestionar funciones de red virtuales mediante la combinación de NFV y SDNs [22], [23].
- El plano de control se abstrae de la infraestructura utilizada para enviar y recibir datos, y se estandariza para permitir la innovación en la red y en sus aplicaciones, sin la necesidad de actualizar los equipos de red.

Más detalles sobre la relación entre NFV y SDN se abordan en la siguiente subsección.

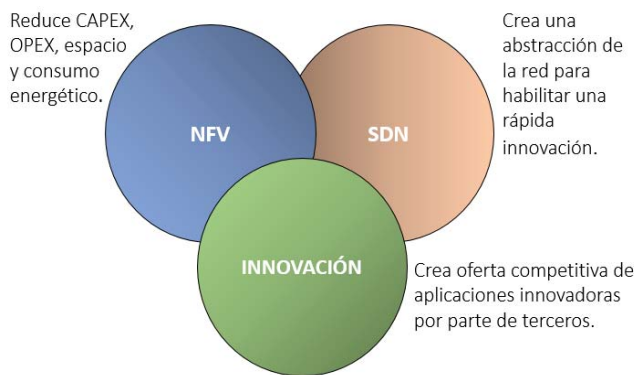


Figura 2. Relación entre NFV y SDN.

### C. Relación entre NFV y SDN

Como se muestra en la Fig. 2, NFV es altamente complementaria a SDN, pero no depende de ella (o viceversa). NFV se puede implementar sin SDN, aunque las dos tecnologías se pueden combinar y potencialmente obtener mayor valor agregado [11].

Los objetivos de NFV pueden ser alcanzados sin necesidad de usar SDN, basándose en las técnicas actualmente en uso en muchos DCs. Pero los planteamientos sobre la separación de los planos de control y de datos según lo propuesto por SDN pueden mejorar el rendimiento, simplificar la compatibilidad con implementaciones existentes, y facilitar la operación y mantenimiento de la infraestructura de red [24].

### D. PoC-NFV: Prueba de conceptos de NFV

Los esfuerzos de colaboración entre los diferentes actores de la industria NFV es un aspecto clave para fomentar la implementación y crecimiento del ecosistema NFV. En octubre de 2013, el NFV-ISG publicó un marco de referencia

para analizar y definir la prueba de concepto sobre NFV (PoC, siglas en inglés), con el objetivo de mostrar a NFV como una tecnología viable y generar conocimiento práctico dentro del NFV-ISG [13].

Tal marco de referencia permite a los diferentes actores de la industria, mostrar sus progresos con la tecnología NFV, independientemente del enfoque, tamaño de las empresas o condición de miembros del NFV-ISG.

La actividad del PoC ha tenido mucho éxito, dado que se han superado las expectativas más optimistas en cuanto a participación, compromiso e importancia técnica. Desde el momento de la publicación, 25 pruebas de conceptos de múltiples fabricantes y operadores están en curso, cada uno patrocinado por al menos un proveedor de servicios, abarcando todos los elementos del marco arquitectural de NFV. Más de 50 proveedores están participando y todos los casos de uso identificados por el NFV-ISG están representados. Dado el número y la importancia de los PoCs del NFV-ISG, los más recientes han aprovechado los resultados de las actividades de trabajos anteriores. Además, hay satisfacción porque se están alcanzando los objetivos de liderar e impulsar el desarrollo de esta tecnología innovadora, demostrando la viabilidad y fomentando el crecimiento de un ecosistema abierto para NFV, de tal manera que se pueda implementar en las redes de los operadores en el menor tiempo posible.

El próximo desafío será encontrar el camino de la viabilidad técnica para la maduración tecnológica e interoperabilidad. Esto irá evolucionando como parte de la próxima fase de trabajo del NFV-ISG. La información sobre el PoC-NFV, junto con los objetivos y resultados individuales está disponible en el portal de la ETSI [25], [26].

### E. Arquitectura de NFV

Las funciones de red virtuales (VNFs, siglas en inglés) pueden ser desplegadas y reasignadas para compartir diferentes recursos físicos y virtuales de la infraestructura, de manera que coincidan con los requisitos de escalabilidad y rendimiento. Esto hace que los ISPs puedan desplegar rápidamente nuevos servicios [7], [27].

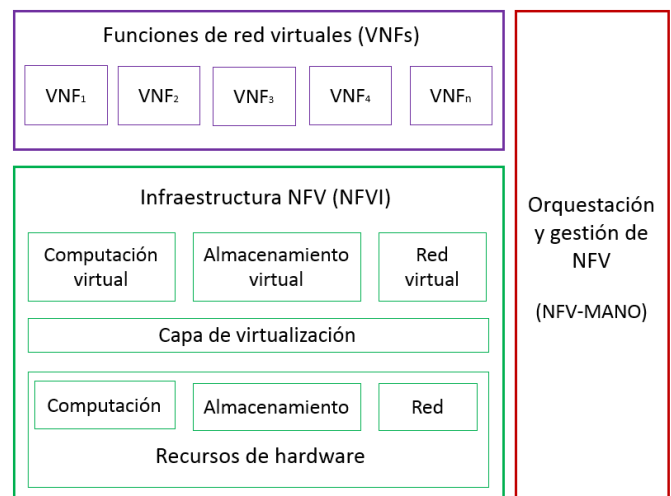


Figura 3. Arquitectura NFV de alto nivel [27].

En general, hay tres componentes principales de una arquitectura NFV de alto nivel (ver Fig. 3), entre ellos están: las VNFs, la infraestructura NFV (NFVI, siglas en inglés) y la orquestación y gestión de NFV (NFV-MANO, siglas en inglés).

A continuación se describen los componentes de cada uno de los tres bloques funcionales de la arquitectura NFV de alto nivel [7], [28], que se pueden observar en la Fig. 4.

- 1) *VNFs*: Son instancias de funciones de red virtualizadas que colectivamente se conocen como servicio de red que se pueden instalar en una o múltiples máquinas virtuales (VM, siglas en inglés). En algunas situaciones las VNFs pueden correr en VMs instaladas en sistemas operativos o directamente sobre el hardware y ser gestionadas por medio de hipervisores nativos. Una VNF es administrada generalmente por un sistema de gestión de elementos (EMS, siglas en inglés), que es responsable de su creación, configuración, monitoreo, rendimiento y seguridad. El EMS se conecta con los sistemas de gestión de la red y las VNFs, y proporciona la información fundamental requerida por los sistemas de soporte de operaciones (OSS, siglas en inglés) en el entorno de un proveedor de servicios. Los OSS son los sistemas generales de gestión que, junto con los sistemas de apoyo a las empresas (BSS, siglas en inglés), ayudan a los proveedores a desplegar y gestionar diversos servicios de telecomunicaciones de extremo a extremo (tales como: pedidos, facturación, renovaciones, solución de problemas, etc.). Las especificaciones NFV se centran en la integración con soluciones OSS/BSS existentes.

- 2) *NFVI*: La infraestructura NFV, son todos los recursos de hardware y software que componen el ambiente NFV. NFVI incluye la conectividad de red entre diferentes ubicaciones, p. ej., entre DCs y nubes híbridas públicas o privadas.

Los recursos físicos típicamente incluyen computación, almacenamiento y hardware de red que proporcionan el procesamiento, almacenamiento y la conectividad para las VNFs, a través de la capa de virtualización que se encuentra justo por encima del hardware. Esta abstrae los recursos físicos que pueden ser lógicamente particionados y asignados a las VNFs para que realicen sus tareas.

No hay una solución específica para un despliegue de NFV, más bien la arquitectura NFV puede aprovechar una capa de virtualización existente, tal como un hipervisor, con características estándar que simplemente sea capaz de extraer los recursos de hardware y asignarlos a las VNFs.

Cuando no está disponible el soporte del hipervisor, a menudo se alcanza la capa de virtualización a través de un sistema operativo que añade software en la parte superior de un servidor no virtualizado o mediante la implementación de una VNF como una aplicación.

- 3) *Orquestación y gestión de NFV*: El bloque de orquestación y gestión de NFV se compone de Orquestador, gestores de VNFs y gestores de la infraestructura virtualizada (VIMs, siglas en inglés). Este bloque es responsable de la gestión y el mantenimiento de los repositorios de datos, puntos de referencia e interfaces que se utilizan para el intercambio de información entre todos los componentes que

conforman un servicio, con el fin de garantizar la correcta operación de las VNFs en la NFVI.

El Orquestador es el encargado de dirigir, gestionar y automatizar el servicio de red de extremo a extremo que es proporcionado por una cadena de VNFs. Normalmente hay un solo Orquestador que supervisa la creación de un servicio de red. Los gestores de VNFs, son responsables del ciclo de vida de tales funciones, incluyendo instancias, actualizaciones, consultas, escalamiento y terminación.

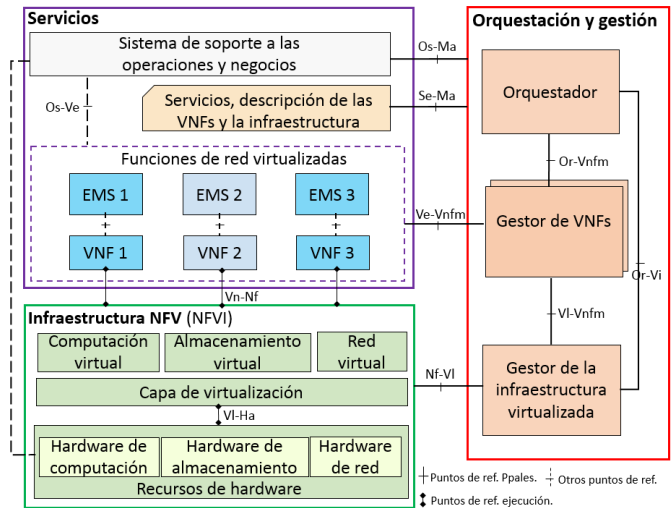


Figura 4. Marco arquitectural de NFV.

Múltiples gestores de VNF se pueden implementar. Según el entorno, un gestor puede ser requerido para cada VNF o puede estar a cargo de varias VNFs.

Los gestores de la infraestructura virtualizada son utilizados para controlar y gestionar la interacción de una VNF con la computación subyacente, almacenamiento y recursos de la red bajo su autoridad. Proporcionan visibilidad dentro de la gestión de la infraestructura y manejan la administración de recursos, incluyendo:

- Supervisión de los recursos a disposición de la NFVI.
- Asignación de los facilitadores de virtualización.
- Gestión continua y cambios de asignación para optimizar la utilización y eficiencia de los recursos de la infraestructura.

En la Fig. 4, también se observan las interfaces que conectan los componentes de los bloques funcionales del marco arquitectural NFV.

Si queremos desplegar un servicio de red que use un firewall y un DPI, entonces NFV-MANO se encargará de decir dónde se ubicarán estas VNFs en la red física. Las VNFs serán controladas tanto por los EMS como por la NFV-MANO, y la capa de virtualización ofrecerá los recursos físicos de las ubicaciones elegidas por NFV-MANO a las VNFs.

## F. Campos de aplicación y casos de uso

En principio, todas las funciones de red y los nodos pueden ser considerados para la virtualización, pero, con el fin de abarcar el alcance de los desafíos técnicos, NFV-ISG seleccionado un conjunto de escenarios de casos de uso



pertinentes [29]. NFV es aplicable a cualquier procesamiento de paquetes, del plano de datos, y a cualquier función, del plano de control, tanto en redes móviles como en redes fijas. Ejemplos potenciales de funciones de red que se pueden virtualizar incluyen:

- Elementos de conmutación: CG-NAT (NAT a gran escala), enrutadores.
- Nodos de red móviles: HLR/HSS, MME, SGSN, GGSN/PDN-GW, RNC, NodosB, eNodosB.
- Funciones contenidas en enrutadores domésticos y decodificadores para crear entornos domésticos virtualizados.
- Elementos de puerta de enlace de Túneles: pasarelas VPN IPSec/SSL.
- Análisis de tráfico: medición, DPI, QoS.
- Garantía de servicio, seguimiento de SLA, pruebas y diagnósticos.
- Señalización en NGN: SBC, IMS.
- Funciones convergentes de red: servidores AAA, control de políticas y plataformas de carga.
- Optimización a nivel de aplicación: CDN, servidores de caché, balanceadores de carga, aceleradores de aplicaciones.
- Funciones de seguridad: cortafuegos, antivirus, sistemas de detección de intrusiones, protección contra el spam.

Se necesitan más estudios para identificar las funciones de red en las que la virtualización rinde mayores beneficios. Los casos de uso de interés incluyen:

- Inspección de paquetes a profundidad o DPI basado en software, proporcionando análisis avanzado de tráfico. Un DPI basado en software puede ser desplegado en cualquier lugar de la red, proporcionando mejores capacidades de análisis, así como mecanismos más sencillos para la implementación, actualización, pruebas y modificación de la escala, para cargas variables de trabajo.
- Implementaciones de nodos IP, por ejemplo: CG-NAT y servidores de banda ancha de acceso remoto (BRAS) en servidores estándar de alto volumen.
- Virtualización de servicios que actualmente requieren dispositivos de hardware dedicado en las instalaciones del cliente, incluyendo: cortafuegos, seguridad web, IPS/IDS, enrutadores, optimizadores y aceleradores WAN.
- Virtualización de redes de distribución de contenido (CDN), su objetivo es extender y ampliar los servicios de entrega de contenido de manera fácil, y también, maximizar la reutilización del hardware, para permitir instalar otras aplicaciones de entrega de contenidos bajo demanda.
- Virtualización del núcleo de la red móvil, para que los operadores de red, puedan hacer frente a la demanda creciente de tráfico en las redes móviles, y mejorar el desempeño y utilización de los recursos [30], incluyendo el ahorro de energía, la consolidación de hardware, facilitar el soporte multi-cliente [31] y hacer más rápida la configuración de nuevos servicios. NFV en las redes móviles también puede ser utilizada para crear instancias optimizadas del núcleo de la red para servicios específicos, por ejemplo, para las comunicaciones de

máquina a máquina e internet de las cosas, donde hay una gran cantidad de dispositivos procesando e intercambiando datos. SDN y en particular NFV se perfilan para revolucionar las redes móviles [32], y son tecnologías claves para la implementación de redes 5G [33], [34].

- Implementación coordinada de redes y nubes para empresas, que permitan ofrecer servicios bajo demanda, y eficiencia del capital a clientes empresariales y operadores de red.
- Implementación de nodos DSL híbridos de fibra para la red externa. Estos nodos deben ser de bajo consumo y de muy bajo costo de mantenimiento. La virtualización podría ser utilizada para reducir la complejidad del hardware en este tipo de nodos remotos.

#### G. Encadenamiento y asignación de VNFs

Un servicio puede ser visto como un conjunto de funciones de red (NFs, siglas en inglés) organizadas dentro de un grafo ordenado [35]. En NFV, estos grafos se llaman VNF Forwarding Graphs (VNF-FG) [7], [27]. El concepto de "Forwarding Graph" se puede utilizar en lugar de "cadena de servicio", con el fin de explicar que un servicio de extremo a extremo desplegado sobre redes virtuales no es exclusivamente una cadena lineal. A menudo la cadena de servicio puede tener ramificaciones [33], [36], [37], [38], [39]. Por ejemplo en un servicio de red específico, los paquetes podrían pasar a través de diferentes dispositivos de red como cortafuegos, DPI, servidor de cifrado, monitor de red y servidor de descifrado, etc., los cuales serían los elementos del grafo de una cadena de servicio.

El VNF-FG provee a un operador de red, el nivel de abstracción requerido para la composición dinámica, elástica y simplificada de servicios [40], [41].

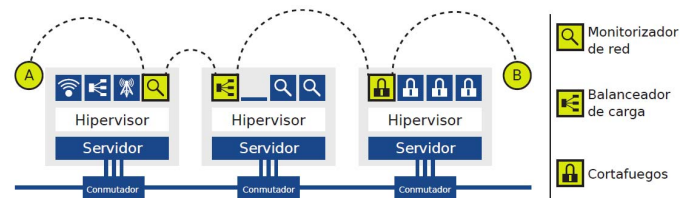


Figura 5. Cadena de VNFs.

La Fig. 5 muestra como un servicio de red que se ofrece desde el punto A hasta el punto B debe pasar por un VNF-FG que está compuesto por las siguientes funciones de red: monitoreo, balanceo de carga y cortafuegos; estas funciones se instancian en los equipos de propósito general ubicados en la red como máquinas virtuales administradas por un hipervisor [42].

La Fig. 6 muestra un servicio de red desplegado en una infraestructura tradicional; bajo este escenario, un servicio está compuesto por tres funciones de red físicas, equivalente a tener hardware propietario hospedado en una infraestructura tradicional. Las funciones de red físicas están representadas por los cuadros azules y la infraestructura tradicional está identificada como una elipse amarilla punteada.

Por otro lado, en la Fig. 7 se observa un servicio de red desplegado sobre una infraestructura NFV. Aquí varias VNFs (cuadros azules) están interconectadas entre sí, a través de

enlaces virtuales (líneas punteadas azules) y cada VNF está asignada (líneas punteadas rojas) a un servidor estándar de alto volumen, el cual reside en la infraestructura NFV (círculos punteados amarillos).

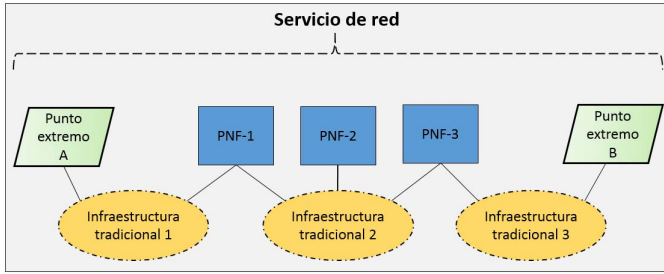


Figura 6. Servicio de red desplegado en una infraestructura tradicional.

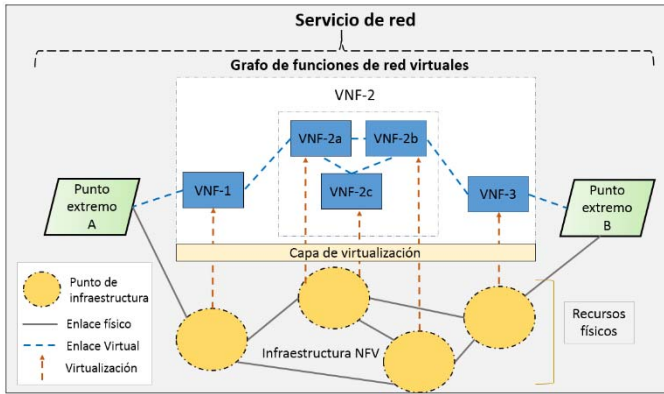


Figura 7. Servicio de red desplegado en una infraestructura NFV.

El grafo de VNFs se debe asignar a la NFVI, lo que implica solucionar un problema complejo de optimización [33], [35], [36], [39], el cual se resuelve mediante alguna técnica de optimización ya sea exacta, heurística o metaheurística.

#### H. Coexistencia y compatibilidad de NFV con redes tradicionales existentes

NFV deberá coexistir con equipos de red heredados. Es decir, deberá ser capaz de trabajar junto con redes híbridas, compuestas de funciones de red físicas (PNFs, siglas en inglés) y de VNFs.

NFV tendrá que soportar un camino de transición, desde las actuales soluciones basadas en PNFs, hasta unas soluciones estándar, más abiertas basadas en VNFs. Por ejemplo, la migración a NFV podría permitir la integración de múltiples PNF y VNF de diferentes proveedores, sin incurrir en una alta complejidad de integración, facilitando un ecosistema de múltiples proveedores.

El marco arquitectural NFV, en conjunto con el sistema de gestión de herencia, deberá soportar la misma capacidad de servicio e impacto sobre el rendimiento, dentro de un SLA, cuando ocurre la transición desde las PNFs a las VNFs (y viceversa). Además, deberá ser capaz de interoperar con sistemas de gestión de herencia con un mínimo impacto en las interfaces y nodos de red existentes, ejemplos de sistemas de gestión de herencia son los OSS, BSS, sistema de gestión de la nube o sistemas de control de balanceo de carga, que podrían existir actualmente en las redes de los operadores [7].

#### I. Seguridad en NFV

El NFV-ISG convocó a un grupo de expertos en seguridad para enfocarse en esta preocupación. Experiencia y conocimiento especializado en seguridad son escasos, por lo que el objetivo original fue el de tratar estos temas lo más rápido posible, con el fin de asesorar al resto del grupo en temas de seguridad como el que se plantea por ejemplo en [43].

NFV-ISG ha completado una evaluación exhaustiva de problemas de seguridad relacionados con la tecnología NFV. Como resultado de la evaluación, el grupo ha identificado varios problemas que se presentan en las arquitecturas de red basadas en NFV, los cuales podrían ser solucionados con tecnologías disponibles. Entre los problemas de seguridad que se identificaron están: aislamiento multi-administrador, monitoreo de VNFs, autenticación y autorización de usuarios, autenticación de servicios, validación de la topología de las redes NFV, disponibilidad de la infraestructura de gestión de las VNFs etc.

En los pocos casos en que las soluciones no están fácilmente disponibles, por ejemplo, validación de la topología de las redes virtuales, no se requiere de una nueva investigación sobre este tema, sino solamente esfuerzos de ingeniería. Una de las áreas, aislamiento multi-administrador, está aún en investigación, y el problema aquí es que, una vez que a alguien se le da privilegios de administrador sobre una plataforma NFV, es difícil evitar que acceda a la parte interna de una VNF en ejecución. Esto hace difícil la "separación o aislamiento de VNFs", que es una deseable práctica de seguridad, si las funciones son sensibles.

En los documentos sobre aspectos de seguridad en NFV [44], [45] se identifican las áreas donde se requerirá la evolución de diferentes tecnologías, prácticas y procesos, para garantizar seguridad y confianza en las redes NFV.

#### J. Tecnologías habilitantes

Varios desarrollos tecnológicos recientes hacen que los objetivos de la NFV sean alcanzables. A continuación se describen estos facilitadores y se discute brevemente su relevancia.

Computación en la nube: NFV aprovecha las tecnologías modernas, como las desarrolladas para la computación en la nube. En el centro de estas tecnologías están los mecanismos de virtualización: la virtualización de hardware por medio de hipervisores, así como conmutadores ethernet virtualizados, conectan el tráfico entre las VMs e interfaces físicas. Para funciones orientadas a la comunicación, el procesamiento de paquetes de alto rendimiento, está disponible a través de CPUs multi-core de altas prestaciones, que usan tarjetas de red ethernet inteligentes para compartir la carga y descarga TCP, enrutando los paquetes directamente hacia la memoria de la VM y hacia los controladores ethernet en modo encuesta [24].

Las infraestructuras basadas en la nube, proporcionan métodos para mejorar el uso y disponibilidad de recursos mediante mecanismos de gestión, aplicables a la creación automática de instancias de dispositivos virtuales en la red, para gestionar recursos mediante la asignación de núcleos de

CPU, memoria e interfaces; posibilitando de esta manera, la migración y re-inicialización de VMs que puedan fallar.

Por último, la disponibilidad de interfaces de programación de aplicaciones (APIs, siglas en inglés) abiertas para el control y gestión del plano de datos, como las que ofrece OpenFlow y OpenStack [46], proporcionan un grado adicional de integración de NFV con la infraestructura de la nube.

**Servidores estándar de alta capacidad:** Son elementos claves para la justificación económica de NFV, dado que, aprovecha las economías de escala de la industria. Un servidor estándar de alta capacidad, es un servidor con componentes estandarizados (por ejemplo, con arquitectura x86).

Los dispositivos de red que dependen del desarrollo a la medida de circuitos integrados para aplicaciones específicas (ASIC) serán cada vez menos competitivos que los procesadores de propósito general, dado que el costo de desarrollo de tales circuitos aumenta exponencialmente con la disminución del tamaño [13].

Aceleradores de hardware como DOPRF [47], son necesarios en los servidores de propósito general, para enfrentar el alto procesamiento que demanda la configuración y asignación de cadenas de VNFs, en las redes de nueva generación o arquitecturas de internet del futuro.

### III. PROYECTOS NFV

En esta sección, se discuten algunos de los principales proyectos que se están desarrollando a nivel mundial por parte de la industria y de la comunidad académica.

El código abierto es importante para la producción de implementaciones de referencias abiertas y la producción de estándares de facto; los proyectos de código abierto como OpenDaylight [48], OpenStack, etc. han creado grupos de trabajo para introducir las modificaciones necesarias que les permitan adaptarse a los requerimientos de NFV.

NFV-ISG participa directamente en las comunidades de código abierto que están trabajando actualmente en proyectos y soluciones como [49], [50] y [51] que facilitan la implementación y despliegue de NFV de manera rápida. A continuación se describen algunos de los proyectos más relevantes de NFV.

#### A. OPNFV

En septiembre de 2014, la Fundación Linux, anunció la creación de la plataforma abierta para proyectos NFV (OPNFV, siglas en inglés) [52]. Como parte del anuncio, la fundación declaró que OPNFV establecerá una plataforma integral, de código abierto a nivel de operadores y proveedores de servicios, para avanzar en la evolución de NFV y garantizar la coherencia, rendimiento e interoperabilidad entre varios componentes del código. La fundación también señaló que debido a que existen múltiples bloques NFV de código abierto ya construidos, entonces OPNFV trabajará con proyectos de exploración, para coordinar su integración y pruebas, mientras se llenan vacíos de desarrollo. Los objetivos iniciales del proyecto son los siguientes:

1. Desarrollar una plataforma integral de código abierto con la que se pueda investigar y demostrar la funcionalidad básica de NFV.
2. Incluir la participación proactiva de los principales usuarios finales, para validar si OPNFV satisface las necesidades de la comunidad de usuarios;
3. Contribuir y participar en proyectos de código abierto pertinentes, que serán aprovechados en la plataforma de referencia OPNFV.
4. Establecer un ecosistema abierto de soluciones NFV, basadas en estándares y software de código abierto.
5. Promover OPNFV como una plataforma de referencia de código abierto para aplicaciones NFV.

OPNFV provee una plataforma para NFV. Por lo tanto, gran parte de la arquitectura OPNFV está directamente relacionada con la arquitectura aportada en los documentos de NFV-ISG. OPNFV trabaja en estrecha colaboración con otros proyectos de exploración de código abierto. Para lograr este objetivo, además del desarrollo del código, el proyecto abordará una serie de aspectos de integración y pruebas.

En el recuadro azul de la Fig. 8 se ilustra el ámbito que cubre OPNFV en relación con los componentes básicos definidos en el marco arquitectural de NFV.

Nf-Vi y VIM construyen la capa de infraestructura del marco NFV y necesitan tener las siguientes interfaces o puntos de referencia implementados: Nf-Vi, Or-Vi, Vi-Vnfm, Vn-Nf y VI-Ha

Nf-Vi y VI-Ha son internos a OPNFV, pero estos puntos de referencia se implementarán con el objetivo de lograr la interoperabilidad. VIM tiene que interactuar con el gestor de VNFs y el Orquestador, por tanto, Vi-Vnfm y Or-Vi estarán abiertos y vienen, respectivamente, con una única especificación.

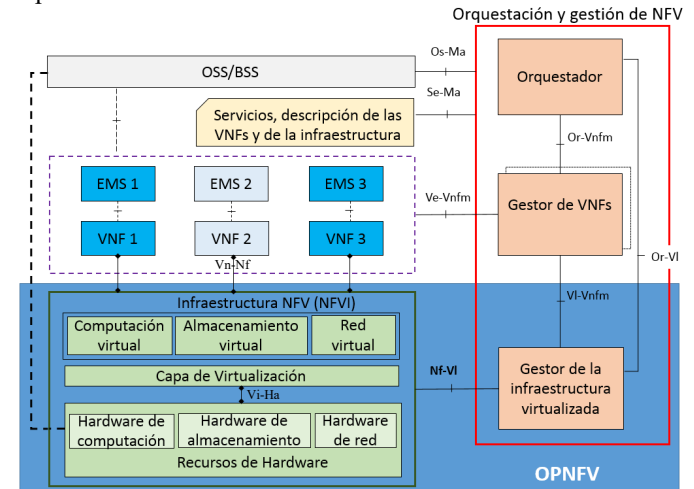


Figura 8. Arquitectura OPNFV basada en la arquitectura NFV de NFV-ISG.

La solución OPNFV (NFVI + VIM) proporcionará una especificación única y uniforme, hacia APIs northbound y southbound las cuales permiten que un componente particular de una red pueda comunicarse con un componente de nivel superior o de nivel inferior respectivamente, para interoperar con soluciones de terceros, implementando otras funciones de la arquitectura NFV. Los despliegues de VNFs deben ser

fáciles de operar, escalar, y evolucionar, independientemente del tipo de VNF que esté siendo desplegada.

## B. OpenMANO

OpenMANO es un proyecto de código abierto de Telefónica que proporciona una implementación práctica de la arquitectura de referencia de NFV-MANO.

El stack de NFV-MANO es un módulo innovador que permite la creación sencilla y el desarrollo de complejos escenarios de red y ha sido validado satisfactoriamente con múltiples VNFs [53].

Con OpenMANO, Telefónica dirige la adopción de NFV a través de la liberación de código abierto, alentando a la industria y a los desarrolladores de software a explorar sus posibilidades, y todo ello desde una propuesta diseñada a través de una arquitectura en capas como se muestra en la Fig. 9.

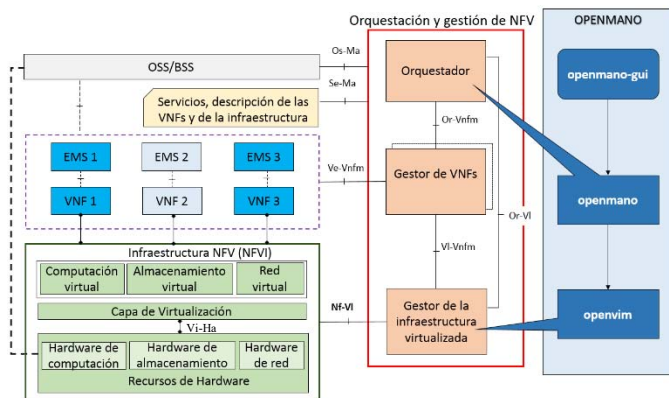


Figura 9. Arquitectura OpenMANO basada en la arquitectura NFV de ISG.

OpenMANO proporciona tres módulos software que se describen a continuación:

- OpenMANO: Es un componente “clave”, se trata de la implementación de un orquestador de VNFs (NFV-O, siglas en inglés), que permite la creación de complejos escenarios de red. El módulo tiene una interfaz con el gestor de la infraestructura virtualizada a través de su API y ofrece una interfaz northbound, por medio de la que se ofrecen los servicios, incluyendo la creación y eliminación de VNFs o servicios de red.
- OpenVIM: Es un gestor de infraestructura virtualizada, tiene una interfaz con los nodos de computación de NFV y con el controlador SDN, para proporcionar capacidades de computación y de enrutamiento, así como para desplegar VMs. Contiene también una interfaz donde se ofrecen servicios en la nube en los que se incluye la creación, borrado y gestión de imágenes, instancias y redes. La implementación de OpenVIM sigue las recomendaciones NFV-PER001 [54].
- OpenMANO-gui: Interfaz gráfica web de usuario, la cual interactúa con la API de OpenMANO de manera amigable. Se proporciona además una interfaz de línea de comandos para los usuarios más avanzados.

En la Fig. 10 se muestra la arquitectura de OpenMANO, ésta contiene tres módulos principales (openvimd, openmanod y openmano-gui) y dos líneas de comandos de clientes (openvim y openmano).

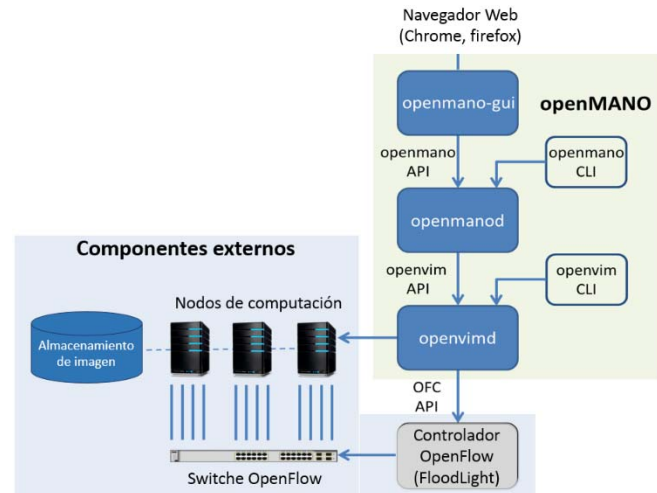


Figura 10. Arquitectura OpenMANO.

Los componentes externos son administrados por openvim. La imagen de almacenamiento y los nodos de cómputo son gestionados directamente por openvimd, mientras que los switches son gestionados directamente por openvimd. El controlador Floodlight controla los switches y openvim interactúa directamente con este controlador.

## C. T-NOVA

T-NOVA es un proyecto financiado por la unión europea, e impulsado por un fuerte núcleo industrial con la asistencia de pequeñas y medianas empresas innovadoras y una academia reconocida en el campo; con el objetivo de presentar una solución integral para ofrecer, desplegar y gestionar las VNFs [55].

En concreto, T-NOVA tiene como objetivo diseñar e implementar una arquitectura integrada de gestión, incluyendo un orquestador de plataforma, para la provisión, gestión, seguimiento y optimización automatizada de las VNFs sobre infraestructuras de red. T-NOVA aprovecha y mejora el estado del arte de los marcos de gestión de la computación en la nube para la elástica provisión y asignación de los recursos de IT, para alojar las funciones de red. Esto también se explota y extiende a aspectos de las SDN, enfocándose en la tecnología OpenFlow, para la gestión eficiente de los recursos de la red, incluyendo la segmentación de la red, la redirección de tráfico y provisión de calidad de servicios (QoS, siglas en inglés).

Además de permitir a los operadores de redes y proveedores de servicios, manejar y manipular eficientemente las funciones de redes de acuerdo a sus propias necesidades, T-NOVA introduce un concepto innovador adicional, que es ofrecer funciones de red a los clientes de los operadores, como servicios de valor agregado (NFaaS, siglas en inglés). A los proveedores de servicios se les ofrece la única posibilidad de mejorar los servicios tradicionales de conectividad con dispositivos virtuales de red (gateways virtuales, servidores



proxy, cortafuegos, IDS/IPS, transcodificadores de video, analizadores de tráfico, etc.) que se proporcionan a sus clientes como un servicio, eliminando la necesidad de adquirir, instalar y mantener hardware especializado en las instalaciones de los clientes.

El servicio compuesto que ofrece la plataforma de T-NOVA a los clientes de los proveedores de servicios consta de dos componentes, como se muestra en la Fig. 11:

- Un servicio de conectividad, (es decir, enlaces de red con una capacidad específica y garantías de calidad de servicio). T-NOVA implementa una plataforma novedosa de gestión de NFV basada en SDN.
- Un conjunto de funciones de red, que van desde el manejo de flujo y mecanismos de control hasta el procesamiento de la carga útil del paquete dentro de la red, de acuerdo con las necesidades del cliente. Para apoyar estas funciones, los recursos de computación (procesamiento, memoria y almacenamiento) son asignados por el orquestador de la plataforma dentro de la infraestructura.

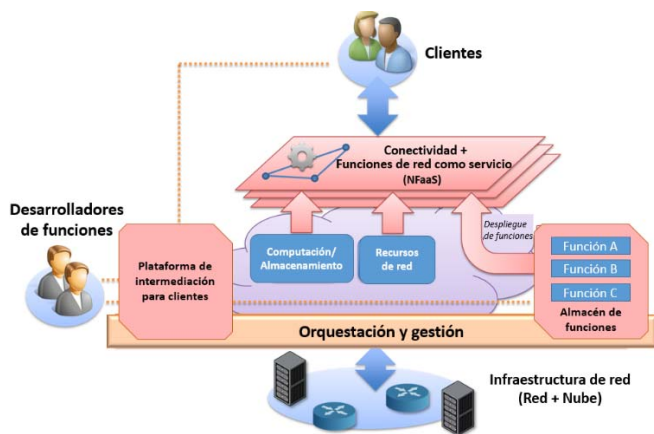


Figura 11. Arquitectura T-NOVA.

Con el fin de facilitar la participación de diversos actores en el escenario NFV, T-NOVA introduce un innovador almacén de VNFs, siguiendo el paradigma de las ya exitosas "tiendas de aplicaciones" de compañías que comercializan sistemas operativos. El almacén de VNFs contiene funciones de red de diferentes desarrolladores, tales funciones son publicadas como entidades independientes y acompañadas con los metadatos necesarios. El almacén permite a los clientes seleccionar los dispositivos virtuales que mejor se ajusten a sus necesidades, instalarlos en sus servicios de conectividad y configurarlos o adaptarlos de acuerdo a cada requerimiento.

Una plataforma novedosa de intermediación se ha creado con el fin de facilitar la competencia y apoyar a las diferentes configuraciones de la cadena de valor. La plataforma facilita a los clientes, realizar transacciones con el proveedor de servicios de T-NOVA y múltiples desarrolladores de funciones de terceras partes. Además, permite seleccionar el paquete o módulo de servicios que mejor se adapte a sus necesidades. Tras la recepción de las solicitudes de los usuarios, la plataforma de intermediación examina conjuntamente i) los recursos de almacenamiento, procesamiento y comunicación disponibles y ii) la disponibilidad de VNFs en el almacén de funciones, que

pueden venir con específicas ofertas económicas o técnicas y modelos de facturación asociados.

A través del almacén de funciones y la plataforma de Intermediación, T-NOVA tiene como objetivos: 1) introducir y promover un nuevo Marketplace para NFV, 2) introducir nuevos casos de negocios, 3) ampliar considerablemente las oportunidades del mercado, atrayendo nuevos participantes al mercado de las redes.

Las PYME y la academia, pueden aprovechar la arquitectura de T-NOVA mediante el desarrollo de innovadoras VNFs de última generación, de forma similar a como se hace con la instalación y uso de una aplicación en un teléfono móvil. Las aplicaciones pueden ser incluidas en el almacén de funciones, y rápidamente ser introducidas al mercado, evitando así el retraso y riesgo de integración.

#### D. CloudNFV

CloudNFV [56] es una plataforma abierta para la implementación de NFV, basada en tecnologías como computación en la nube y SDN en un entorno de múltiples proveedores. Entre las empresas involucradas en CloudNFV podemos nombrar: 6WIND, CIMI Corporation, Dell, Enterprise Web, Overture Networks, y Qosmos, entre otras. CloudNFV ha sido recientemente aceptada como una prueba de concepto en el marco del NFV ISG.

CloudNFV despliega una mezcla de funciones virtuales de red, componentes de aplicaciones en la nube, dispositivos y servicios de red reales y servicios multi-operador. Soporta vistas de gestión compatibles en los servicios, y en funciones virtuales, utilizando una estructura de servicio que sigue el modelo de jerarquía GB922 de TMF [57].

Su objetivo es dar soporte a las interfaces especificadas por el NFV-ISG pero también, proporcionar acceso abierto a servicios, que están compuestos, implementados y administrados por funciones que están fuera del alcance de NFV.

En el marco de referencia del PoC de NFV-ISG, se realiza una validación del marco CloudNFV que define los diferentes escenarios, en una implementación íntegra para la creación, implantación y gestión de servicios. El PoC se basa en parte en el proyecto de código abierto Clearwater de Metaswitch [58].

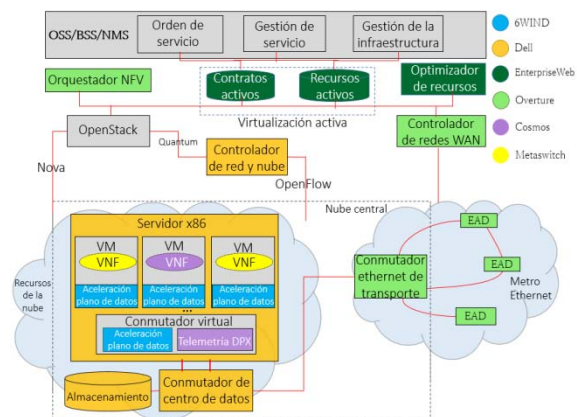


Figura 12. Arquitectura CloudNFV.

La arquitectura CloudNFV gestiona y orquesta aplicaciones construidas en torno a un modelo ágil de datos y procesos llamado virtualización activa, que provee el contrato y la política de almacenamiento ("contrato activo") y la información del estado de los recursos ("recurso activo"). Las órdenes de servicio están optimizadas a través de la virtualización activa provisionada sobre una infraestructura en la nube, la arquitectura general se representa en la Fig. 12.

### E. CloudBand

CloudBand es una plataforma NFV para proveedores de servicios, esta permite implementar nuevas arquitecturas de redes basadas en NFV [59]. La plataforma consta de dos partes: i) Sistema de administración de CloudBand y ii) nodo CloudBand, como se indica en la Fig. 13.

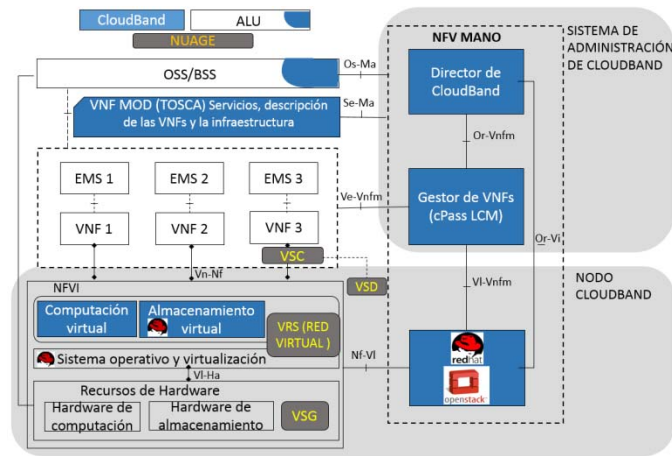


Figura 13. Arquitectura CloudBand.

El Sistema de administración de CloudBand incorpora el orquestador y el gestor de funciones de red. Tanto las interfaces del sistema de gestión como el nodo CloudBand utilizan APIs OpenStack estándar, así como también las API de funciones adicionales (API del controlador SDN).

El Nodo CloudBand utiliza la Plataforma OpenStack como el gestor de la infraestructura virtual, añade funcionalidades complementarias, utiliza conectores y APIs abiertas. Además, la pila de software del Nodo CloudBand incluye InkTank Ceph como la solución virtual de almacenamiento, y Libvirt en la capa de virtualización, como parte de la NFVI. La importancia de la estrategia de desarrollo de productos de código abierto no puede ser subestimada cuando se considera la solución CloudBand para implementaciones NFV. Además, la pila de software del nodo CloudBand es independiente del hardware al igual que el de la Plataforma OpenStack y otras tecnologías de código abierto.

### F. Cloud4NFV

Cloud4NFV es una plataforma para funciones de red virtuales, aunque no está estrictamente limitada a manejar VNFs. Cloud4NFV facilita la gestión de la infraestructura de la nube y plataformas SDN como OpenDaylight y OpenStack respectivamente, siguiendo las principales directrices de NFV-ISG.

Entre las más importantes funcionalidades de Cloud4NFV está el realizar el despliegue automatizado, configuración y gestión del ciclo de vida (instanciación, configuración, actualización, terminación, etc.) de servicios de red.

La exposición de funcionalidades tales como: despliegue y aprovisionamiento de servicios, monitoreo de servicio, reconfiguración y desmontaje de servicios, gestión y optimización de recursos para alojar VNFs, aprovechan las plataformas de gestión de la nube para asociar diferentes VNFs.

Los detalles sobre estas funcionalidades se proporcionan en [60]. La arquitectura de Cloud4NFV es altamente compatible con la arquitectura de NFV-ISG, por razones de simplicidad, las diferentes entidades se nombran de acuerdo con la nomenclatura propia del grupo.

Las cuatro entidades principales de la plataforma de acuerdo a la Fig. 14, son: el orquestador; gestor de VNFs; gestor de la infraestructura virtualizada (VIMs); y por último, los servicios y la descripción de VNFs e Infraestructura. El orquestador es una entidad única, mientras que podrá haber múltiples gestores de VNFs, uno por cada función de red o uno por cada función de red compuesta, es decir, una función de red compuesta de varias subfunciones.

Cloud4NFV considera dos tipos de VIM: La nube VIM y WAN-VIM. De acuerdo a lo planteado en la arquitectura Cloud4NFV que muestra la Fig. 12, hay una nube VIM por cada DCs. Mientras que solo existe un WAN-VIM. De esta manera la plataforma tiene la vista de un dominio de red unificado que conecta los DCs con los dominios web de los clientes. También se tiene en cuenta que, desde el punto de vista técnico, la plataforma está preparada para permitir la integración con gestores de infraestructura virtualizada de terceros. La integración de los servicios de conectividad WAN es un complemento para las definiciones actuales de NFV-ISG. Más detalles al respecto, sobre los componentes de la arquitectura Cloud4NFV, implementación y pruebas de rendimiento son presentados en [61].

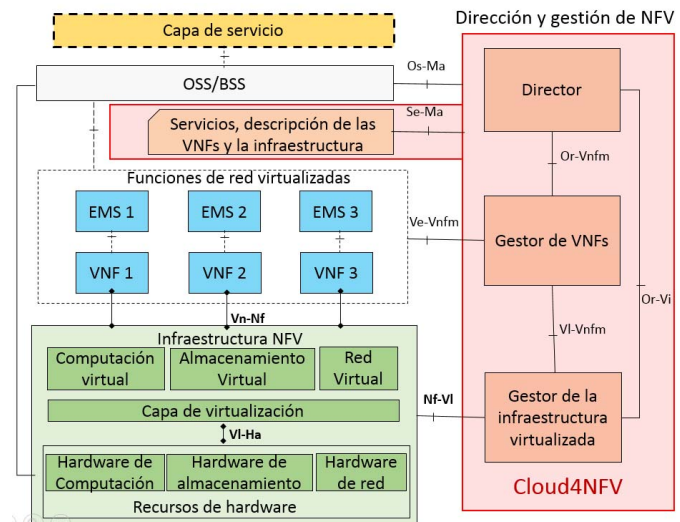


Figura 14. Arquitectura Cloud4NFV.

## G. Otros proyectos habilitadores

Propuestas como ZOOM (Zero-touch Orchestration, Operations and Management) [62] contribuyen a la construcción de un ecosistema adecuado para NFV. ZOOM es un proyecto colaborativo, propuesto por TM Forum y liderado por los principales fabricantes y proveedores de servicio a nivel mundial. Este proyecto está orientado a funciones de gestión, procesos de negocio, modelos de información, mejores prácticas, y APIs para permitir la automatización, escalabilidad y agilidad en el ecosistema virtual. Además, trabaja en estrecha colaboración con otras organizaciones de estandarización para aprovechar las mejores prácticas existentes y adoptar estándares emergentes.

CALICO [63] es una iniciativa de código abierto que tiene como objetivo cambiar la conectividad a gran escala de las VNFs y las implementaciones de la nube de capa 2 a capa 3. Además, permite al modelo de conexión trabajar directamente en el nivel del protocolo de Internet (IP).

Otra propuesta es Catalyst [64] que ilustra cómo hacer la orquestación de las VNFs aprovechando el poder de análisis y políticas definidas dinámicamente. Catalyst muestra cómo crear instancias, controlar y escalar VNFs basadas en parámetros técnicos (SLA, QoS, etc.) y las métricas de negocio (costo de la energía, etc.).

Entre otros proyectos importantes orientados a investigación y desarrollo en tecnologías de la nube y NFV están: MCN [65], OpenEPC [66], UNIFY [67], ClickOS [68], [69], Blue-PLANET [70], los cuales son dirigidos por comunidades y centros de investigación de excelencia a nivel mundial. MCN y OpenEPC aprovechan las características operacionales de la nube para alojar, operar y desplegar las próximas redes móviles de nueva generación, teniendo en cuenta los esquemas avanzados de movilidad IP, control de

QoS basado en políticas, e integración con diferentes plataformas de aplicaciones en entornos de redes convergentes. UNIFY promueve la creación de servicios de manera flexible y automática, a través de una arquitectura que facilita entornos de producción unificada [71]. ClickOS es una plataforma de código abierto con sistema operativo minimalista que habilita NFV en la infraestructura de redes de operadores y proveedores de servicios. Soporta una significativa variedad de funciones de red, basadas en módulos software que pueden cumplir tareas como limitación y filtración de tráfico, monitoreo de red, y prevención de ataques DDoS [72], etc. Mientras que Blue-PLANET es una plataforma fiable para redes implementadas con NFV y SDN, construida específicamente para proveer: i) orquestación, automatización y control de servicios en SDN, ii) capacidad de gestión del hardware y software de múltiples proveedores y operadores de redes, y iii) gestionar el ciclo de vida de los servicios virtualizados a través de los DCs.

## IV. CLASIFICACIÓN DE PROYECTOS NFV

A continuación se presenta una clasificación de los principales proyectos sobre NFV descritos anteriormente. La tabla I clasifica los proyectos con base en una taxonomía que contiene la información sobre cada proyecto y su respectiva referencia, el tipo de plataforma que usa, la cual puede ser de código abierto (CA) o código cerrado (CC), el o los bloques funcionales del marco arquitectural NFV sobre los que trabaja, entre ellos: (VNFs, EMS, VIM, NFVO, OSS/BSS y NFVI), también se relaciona la entidad que gestiona el proyecto, al igual que la contribución principal de cada uno de ellos, y finalmente, el estado de cada proyecto o implementación que puede ser en ejecución (EE) o terminado (T).

TABLA I. CLASIFICACIÓN DE PROYECTOS NFV.

Proyecto	Tipo de plataforma	Componente del marco arquitectural NFV	Lidera	Principal contribución	Estado
OPNFV [52]	CA	NFVI, VIM	Fundación Linux	Provee una plataforma integral de código abierto que aborda aspectos de integración y pruebas para avanzar en la evolución de NFV.	T
OpenMANO [53]	CA	NFVO, VIM	Telefónica	Emplea marco arquitectural en capas para la creación sencilla de complejos escenarios de red, facilita la articulación de NFV y SDN con servicios en la nube e implementa Interfaz gráfica web de usuario.	EE
T-NOVA [55]	CC	VNFs	Unión Europea	Implementa una plataforma novedosa de gestión de NFV basada en SDN usando un almacén de VNFs, provee mecanismos para la asignación de recursos, segmentación de la red, redirección de tráfico y provisión de QoS.	EE
CloudNFV [56]	CA	NFVO, VIM, OSS/BSS	Dell, CIMI Corp	Implementa servicios multi-operador para proporcionar acceso abierto a servicios. Además provee las condiciones para la composición, implementación y administración de funciones fuera del alcance de NFV.	F
CloudBand [59]	CA	NFVO, NFVI, VNFs	Alcatel-Lucent	Facilita la compatibilidad entre diferentes soluciones NFV. También utiliza APIs OpenStack estándar donde el software es independiente del hardware.	F
Cloud4NFV [61]	CA	VNFs, NFVO, VIM, VNFM	Portugal Telecom	Automatiza la gestión de la infraestructura de NFV y plataformas SDN; además, configura y gestiona el ciclo de vida de servicios de red con los dominios web de los clientes.	F
ZOOM [62]	CA	NFVO, VNFM	TM Forum	Introduce mejoras para el despliegue dinámico de servicios personalizados. Incorpora APIs para permitir la automatización, escalabilidad y agilidad en el ecosistema virtual.	T

CALICO [63]	CA	VNFs	Metaswitch Networks	Provee conectividad a gran escala a las VNFs. Además, ofrece una solución para la interconexión entre máquinas virtuales o contenedores Linux.	EE
MCN [65]	CA	VNFs, OSS/BSS	Unión Europea	Ofrece un modelo para alojar en la nube a los principales componentes de las redes móviles de nueva generación, teniendo en cuenta los esquemas avanzados de movilidad IP.	T
UNIFY [67]	CA	VNFs	Unión Europea	Ofrece una plataforma automática y dinámica para la creación de servicios de red, hospedados en DCs, compatibles con redes basadas en las tecnologías NFV.	EE
Catalyst [64]	CC	VNFs, OSS/BSS	TM Forum	Emplea parámetros técnicos y políticas definidas dinámicamente para orquestar VNFs.	T
OpenEPC [66]	CC	VNFs, NFVI	Core Network Dynamics	Virtualizó las principales funciones de las redes móviles para alojarlas en la nube teniendo en cuenta los esquemas avanzados de movilidad IP.	T
ClickOS [69]	CA	VNFs, EMS	Unión Europea	Desarrolla una plataforma virtualizada (sistema operativo) minimalista para ejecutar VNFs.	T
Blue-PLANET [70]	CC	NFVO, OSS/BSS, VIM	Nuage Networks/Ciena Corporation	Implementa una plataforma para proveer orquestación y automatización de servicios, y gestión del hardware y software de múltiples proveedores de red.	T

## V. DESAFIOS EMERGENTES

Hay una serie de desafíos para implementar NFV [74], que necesitan ser abordados tanto por la industria como por la comunidad académica, para acelerar la adopción, despliegue y progreso de esta prometedora tecnología. Entre los desafíos que se han identificado están:

*a) Portabilidad e Interoperabilidad:* Un desafío importante es definir una interfaz unificada que desacople claramente las instancias software del hardware subyacente, tal como se presenta en las VMs y sus hipervisores. La portabilidad e interoperabilidad permiten crear diferentes ecosistemas, tanto para proveedores de dispositivos virtuales como para proveedores de DCs. La portabilidad también facilita a los operadores de red, optimizar los recursos requeridos por los dispositivos virtuales [7].

*b) Compensación del rendimiento:* Dado que el enfoque de NFV se basa en hardware estándar de propósito general, se debe tener en cuenta la probable disminución del rendimiento de la red. El desafío entonces sería el cómo mantener la degradación del rendimiento tan pequeña como sea posible, usando hipervisores apropiados y tecnologías modernas de software, para que los efectos sobre la latencia, rendimiento y procesamiento se reduzcan al mínimo. Un primer acercamiento para resolver el desafío de compensación del rendimiento se presenta en [47] donde se propone usar tecnologías para acelerar el hardware de la NFVI y de esta manera, mejorar el procesamiento de las VNFs, sin embargo aún queda por resolver en esta área.

*c) Migración y compatibilidad con las plataformas existentes:* Las implementaciones de NFV deben coexistir con equipos tradicionales de los operadores de red, ser compatibles con sus sistemas de orquestación, gestión de red, OSS y BSS, existentes. NFV debe ser compatible con una ruta de migración de los actuales dispositivos físicos de red a dispositivos de red virtuales basados en estándares abiertos [27], [54].

*d) Orquestación y gestión:* NFV presenta una oportunidad, a través de la flexibilidad ofrecida por los dispositivos de red virtuales que operan en una infraestructura estándar y abierta, para alinear rápidamente la dirección y gestión de las interfaces northbound asociadas a políticas bien definidas y especificaciones abstractas. Esto reducirá en gran medida el costo y el tiempo para integrar nuevos dispositivos virtuales en el entorno operativo de un ISP. El desafío en esta área será proponer plataformas de orquestación, como por ejemplo CloudNFV [36] que permita niveles aceptables de gestión, para que en un servicio de red, todas las funciones requeridas sean instanciadas de forma coherente y bajo demanda [27].

*e) Automatización:* NFV sólo escalará si la orquestación y gestión de todas las VNFs puede realizarse automáticamente. La automatización de procesos es fundamental para el éxito de NFV [11]. En un ambiente dinámico, tanto el despliegue de VNFs como la recuperación de fallas o incidentes podrían realizarse de manera automática y bajo demanda [10].

*f) Seguridad y resiliencia:* Los operadores de red deben tener confianza en que la seguridad, la resistencia y disponibilidad de sus redes no se verán afectadas cuando se introduzca la tecnología NFV. Nuestras expectativas iniciales son que NFV mejorará la resiliencia y disponibilidad de la red, al permitir que las VNFs se puedan volver a crear bajo demanda después de un fracaso. Un dispositivo virtual debe ser tan seguro como un dispositivo físico si la infraestructura es segura, especialmente el hipervisor y su configuración [74]. En [75] se propone un orquestador de la seguridad para redes basadas en NFV. El orquestador de la seguridad mejora el marco arquitectural de ISG-FV de la ETSI.

*g) Estabilidad de la red:* Otro desafío importante es garantizar la estabilidad de la red, para que no se vea afectada en la orquestación y gestión de un gran número de dispositivos virtuales. Por ejemplo, cuando las VNFs son reubicadas, durante eventos de re-configuración, debido a fallas de hardware, software o a un ciber ataque. Inestabilidad también puede ocurrir en las redes actuales, en función de las combinaciones no deseadas de los diversos mecanismos de control y optimización [7].



*h) Simplicidad:* Un reto para la tecnología NFV es garantizar que las plataformas de red virtuales sean más simples de operar, comparadas con las que existen en la actualidad. Los ISP buscan simplificar o sustituir en gran medida las complejas plataformas de red, manteniendo al mismo tiempo la continuidad de los servicios de apoyo que generan ingresos importantes [10].

*i) Integración:* La perfecta integración de múltiples dispositivos virtuales existentes, dentro de servidores estándar de alto volumen es un reto clave para NFV. Los operadores de red deben ser capaces de "combinar" los servidores de diferentes fabricantes con hipervisores y dispositivos virtuales de diferentes proveedores sin incurrir en importantes costos de integración. El ecosistema debe ofrecer servicios de integración, mantenimiento y de apoyo a terceros, así como mecanismos para validar nuevos productos NFV [41].

*j) Composición de cadenas de VNFs:* Una cadena de VNFs puede ser proporcionada como un servicio bajo demanda; eliminando la necesidad de adquirir, instalar y mantener hardware especializado en la infraestructura de red. El reto es desarrollar algoritmos que realicen la creación y asignación de cadenas de manera óptima y automática, posibilitando una mejor gestión y programación de la red. Una propuesta para componer cadenas de VNFs fue presentada en [36], donde se emplea una heurística para realizar el encadenamiento de VNFs y posteriormente se realiza de manera coordinada el mapeo de estas sobre la NFVI.

*k) Mapeo de VNFs:* Los operadores de red desean colocar las VNFs donde puedan ser usadas de manera eficiente, y donde sea más económico gestionarlas. Pese a que virtualizar determinadas funciones de la red es sencillo, hay algunas de ellas que tienen requisitos estrictos de retardo, requiriendo una ubicación en un determinado servidor estándar de alto volumen; lo cual implica resolver un problema de optimización. Se han propuesto algunos enfoques sobre mapeo de VNFs. Uno de ellos fue presentado en [35]. Aquí, se define un modelo para formalizar el encadenamiento de funciones usando un lenguaje libre de contexto. Posteriormente se realiza el proceso de mapeo con Programación entera mixta restringida cuadráticamente (MIQCP, siglas en inglés) para encontrar la mejor ubicación de las VNFs, teniendo en cuenta los recursos limitados de la red y los requisitos de las funciones.

## VI. DISCUSIÓN

Los operadores de red están combinando NFV y SDN para alcanzar los objetivos comunes que brindan ambas tecnologías, y obtener una mayor rentabilidad del negocio de las telecomunicaciones. En la actualidad grandes fabricantes, proveedores de infraestructura y de servicios están realizando alianzas o fusiones con empresas del campo de la computación en la nube y empresas de software, de cara a los nuevos retos que se avecinan en el ecosistema de las redes de nueva generación.

NFV es una tecnología emergente muy importante porque promueve y acelera la innovación en redes y servicios, reduce CAPEX y OPEX, y permite de esta manera, dinamizar el mercado de las telecomunicaciones. También abre la puerta a nuevas oportunidades de negocio y plantea nuevas

posibilidades para la gestión de los recursos físicos y lógicos de las infraestructuras de red. Sin embargo, NFV se encuentra en una etapa emergente y aún hay muchos desafíos de investigación e implementación que superar para lograr un amplio despliegue y adopción de esta tecnología por parte de los actores del negocio de las telecomunicaciones.

Varios de los proyectos que se han descrito en la sección III, son financiados y desarrollados con la cooperación, tanto de la academia como de la industria, con el objetivo de lograr estandarizar la tecnología y crear un ecosistema apto para masificar su uso en las redes.

Para alcanzar el éxito de NFV se deben superar algunos desafíos relacionados con la seguridad, automatización, escalabilidad, simplicidad, compatibilidad, integración etc, y también se debe poner atención a otros retos asociados a la asignación de recursos en arquitecturas de redes basadas en NFV y SDN. Además, debemos unir esfuerzos para crear soluciones de código abierto que permitan gestionar los mecanismos relacionados con la migración, movilidad y portabilidad, en el nuevo escenario del hardware estándar de propósito general.

## VII. CONCLUSIONES

En este artículo se ha realizado una revisión exhaustiva de NFV. De tal manera que primero se detalló en que consiste esta tecnología, luego se explicaron claramente algunos proyectos que se vienen ejecutando para impulsar la adopción de la misma. Adicionalmente, se realizó una clasificación de los proyectos existentes en NFV. También se presentaron desafíos emergentes que pueden ser objetos de investigación por parte de la comunidad científica, y por último, se realizó una discusión sobre las bondades que puede ofrecer la tecnología NFV a la industria de las tecnologías de la información y las comunicaciones.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por COLCIENCIAS y por el proyecto CODI/ARAIF 2014-856 de la estrategia de sostenibilidad de la Universidad de Antioquia.

## REFERENCIAS

- [1] Jain, R. and Paul, S., "Network Virtualization and Software Defined Networking for Cloud Computing-A Survey," Communications Magazine, IEEE, p. 24-31, v. 51, n. 11, Mar 2013.
- [2] N.M. Mosharaf, Kabir Chowdhury, Raouf Boutaba, "A survey of network virtualization," Computer Networks, v. 54, n. 5, p. 862-876, ISSN 1389-1286., 8 Apr 2010
- [3] Chowdhury, N.M.M.K., Boutaba, R., "Network virtualization: state of the art and research challenges," Communications Magazine, IEEE-MCOM, v.47, n.7, p.20-26, Jul 2009.
- [4] ONF White Paper on Software-Defined Networking: The New Norm for Networks. April 2012. [Online]. Available: <https://www.opennetworking.org/images/stories/downloads/sdn-resources/white-papers/wp-sdn-newnorm.pdf>
- [5] N. Feamster, J. Rexford, and E. Zegura, "The Road to SDN: An Intellectual History of Programmable Networks," ACM Sigcomm Computer Communication, v. 44, n. 2, p. 87-98, 2014.
- [6] Kreutz, D. Ramos, F.M.V. Esteves Verissimo, P. Esteve Rothenberg, C. Azodolmolky, S. Uhlig, S., "Software-Defined Networking: A Comprehensive Survey," Proceedings of the IEEE JPROC, v.103, n.1, p.14,76, Jan. 2015.

- [7] NFV-ISG, White paper on Network Functions Virtualization, whitepaper3, Jan 2015. [Online]. Available: [https://portal.etsi.org/Portals/0/TBpages/NFV/Docs/NFV\\_White\\_Paper3.pdf](https://portal.etsi.org/Portals/0/TBpages/NFV/Docs/NFV_White_Paper3.pdf)
- [8] J. Batalle, J. Ferrer Riera, E. Escalona, E. Grasa and J.A. García Espin. "Virtual Network Function Scheduling-Concept and Challenges," *Smart Communications in Network Technologies*, p. 1-5, Jun 2014.
- [9] Enrique Hernandez-Valencia, Steven Izzo, and Beth Polonsky, "How Will NFV/SDN Transform Service Provider OpEx?," *IEEE Network, The Magazine of Global Internetworking*, v. 29, n. 3, Jun 2015.
- [10] Bo Han, Vijay Gopalakrishnan, Lusheng Ji, and Seungjoon Lee, "Network Function Virtualization: Challenges and Opportunities for Innovations," *IEEE Communications Magazine*, v. 53, n. 2, Feb 2015.
- [11] NFV-ISG, Network Functions Virtualization- "An Introduction, Benefits, Enablers, Challenges & Call for Action," ETSI, Tech. Rep., 2012. [Online]. Available: [https://portal.etsi.org/NFV/NFV\\_White\\_Paper.pdf](https://portal.etsi.org/NFV/NFV_White_Paper.pdf)
- [12] NFV-ISG, Network Functions Virtualization, Draft Documents: [Online]. Available: [http://docbox.etsi.org/ISG/NFV/Open/Latest\\_Drafts/](http://docbox.etsi.org/ISG/NFV/Open/Latest_Drafts/)
- [13] NFV-ISG, White paper on Network Functions Virtualization: "Network Operator Perspectives on Industry Progress", Technical rep. Oct 2013. [Online]. Available: [http://portal.etsi.org/NFV/NFV\\_White\\_Paper2.pdf](http://portal.etsi.org/NFV/NFV_White_Paper2.pdf)
- [14] Nick Feamster, Lixin Gao, and Jennifer Rexford. "How to lease the internet in your spare time". *SIGCOMM Computer Communication Review*, v.37, n.1, Jan 2007
- [15] N. Gude et al., "NOX: Towards an Operating System for Networks," *ACMSIGCOMM Computer Communication*. v. 38, n. 3, p. 105, Jul 2008.
- [16] Paul Lappas, Jason Parraga, Rob Sherwood, Rob Adams, KC Wang. "FDL, Floodlight" [Online] Available: <http://www.projectfloodlight.org/>
- [17] Z. Cai, "Maestro: Achieving Scalability and Coordination in Centralized Network Control Plane", Ph.D. thesis, 2011.
- [18] N. McKeown, G. Parulkar, J. Rexford, H. Balakrishnan. T. Anderson, L. Peterson, S. Shenker, J. Turner, OpenFlow: Enabling Innovation in Campus Networks. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, v.38 n.2, Apr 2008.
- [19] Kim H, Feamster N, "Improving network management with software defined networking," *Communications Magazine, IEEE*, v.51, n.2, p.114,119, Feb 2013.
- [20] ONF Solution Brief OpenFlow-enabled SDN and Network Functions Virtualization, Open Network Foundation, Feb 2014.
- [21] Y. Jarraya, T. Madi, and M. Debbabi, "A Survey and a Layered Taxonomy of Software-Defined Networking," *IEEE Communications Surveys Tutorials*, v. 16, n. 4, p. 1-1, 2014.
- [22] J. Batalle, J. Ferrer Riera, E. Escalona, and J.A. García Espin. On the implementation of NFV over an openflow infrastructure: Routing function virtualization. In *Future Networks and Services (SDN4FNS)*, *IEEE SDN for*, p. 1-6, Nov 2013.
- [23] G. Monteleone and P. Paglierani. Session border controller virtualization towards "service defined networks" based on NFV and SDN. In *Future SDN for Networks and Services (SDN4FNS)*, p. 1-7, Nov 2013.
- [24] Joint-operator white paper introducing NFV published October 2012: [Online]. Available: [http://portal.etsi.org/NFV/NFV\\_White\\_Paper.pdf](http://portal.etsi.org/NFV/NFV_White_Paper.pdf)
- [25] European Telecommunications Standards Institute, ETSI. [Online]. Available: [www.etsi.org/](http://www.etsi.org/)
- [26] NFV-ISG Published Documents: [Online]. Available: <http://docbox.etsi.org/ISG/NFV/Open/Published/>
- [27] NFV-ISG, "Network Functions Virtualisation (NFV); Architectural Framework" [Online]. Available: [http://www.etsi.org/deliver/etsi\\_gs/NFV/001\\_099/002/01.01.01\\_60/gs\\_NFV002v010101p.pdf](http://www.etsi.org/deliver/etsi_gs/NFV/001_099/002/01.01.01_60/gs_NFV002v010101p.pdf)
- [28] DxCentral Network Functions Virtualization Report 2015. The Trusted News and Resource Site for SDx, SDN, NFV, Cloud and virtualization Infrastructure, Apr 2015. [Online]. Available: <https://www.sdxcentral.com/>
- [29] NFV-ISG, "Network Function Virtualisation (NFV) -Use Cases", Tech. Report., 2013. [Online]. Available: [http://www.etsi.org/deliver/etsi\\_gs/NFV/001\\_099/001/01.01.01\\_60/gs\\_nfv001v010101p.pdf](http://www.etsi.org/deliver/etsi_gs/NFV/001_099/001/01.01.01_60/gs_nfv001v010101p.pdf)
- [30] Chengchao Liang, F. Richard Yu, and Xi Zhang, "Information-Centric Network Function Virtualization over 5G Mobile Wireless Networks", *IEEE Network, The Magazine Global Internetworkg*, v.29, n.3, Jun2015.
- [31] Ruozhou Yu, Guoliang Xue, Vishnu Teja Kilari, and Xiang Zhang, "Network Function Virtualization in the Multi-Tenant Cloud", *IEEE NetworkThe Magazine of Global Internetworking*, v. 29, n. 3, Jun 2015.
- [32] Songlin Sun, Michel Kadoch, Liang Gong, and Bo Rong, "Integrating Network Function Virtualization with SDR and SDN for 4G/5G Networks", *IEEE Network, The Magazine of Global Internetworking*, v. 29, n. 3, Jun 2015.
- [33] Arsany Basta, Wolfgang Kellerer, Marco Hoffmann, Hans Jochen Morper. "Applying NFV and SDN to LTE Mobile Core Gateways; The Functions Placement Problem", *AllThingsCellular '14: Proceedings of the 4th workshop on All things cellular: operations, applications, & challenges*, ISBN: 978-1-4503-2836-4. Aug 2014.
- [34] Hawilo, H. Shami, A. Mirahmadi, M. Asal, R. "NFV: state of the art, challenges, and implementation in next generation mobile networks (vEPC)", *Network, IEEE v28*, n. 6, p: 18 - 26, Dec. 2014.
- [35] M. Caggiani Luizelli, L. Richter Bays, L. Saleté Buriol, "Piecing Together the NFV Provisioning Puzzle: Efficient Placement and Chaining of Virtual Network Functions", *Proceedings of IFIP/IEEE International Symposium on Integrated Network Management*. Canada, May 2015.
- [36] M. Till Beck and J. Botero, "Coordinated allocation of service function chains," in *Global Communications Conference (GLOBECOM)*, 2015 IEEE, p. 1-7, 2015, To appear.
- [37] Leonard Nonde, Taisir E. H. El-Gorashi, and Jaafar M. H. Elmoghani. "Energy Efficient Virtual Network Embedding for Cloud Networks", *Journal of Lightwave Technology*, v. 33, n. 9, May 1, 2015.
- [38] Ming Xia, Meral Shirazipour, Ying Zhang, Howard Green, and Atilla Takacs. "Network Function Placement for NFV Chaining in Packet/Optical Datacenters", *Journal of Lightwave Technology*, v. 33, n. 8, Apr 1, 2015.
- [39] Md. Faizul Bari, ; Shihabur Rahman Chowdhury, ; Reaz Ahmed, and Raouf Boutaba, "On Orchestrating Virtual Network Functions in NFV", *ArXiv*, Mar 2015.
- [40] Wanfu Ding, Wen Qi, Jianping Wang, and Biao Chen, "OpenSCaaS: An Open Service Chain as a Service Platform Toward the Integration of SDN and NFV", *IEEE Network, The Magazine of Global Internetworking*, v. 29, n. 3, Jun 2015.
- [41] Timothy Wood, K. K. Ramakrishnan, Jinho Hwang, Grace Liu, and Wei Zhang, "Toward a Software-Based Network: Integrating Software Defined Networking and Network Function Virtualization", *IEEE Network, The Magazine of Global Internetworking*, v. 29, n. 3, Jun 2015.
- [42] Gerald J. Popek and Robert P. Goldberg. Formal requirements for virtualizable third generation architectures. *Communicat. ACM*, Jul 1974.
- [43] Ying-Dar Lin, Po-Ching Lin, Chih-Hung Yeh, Yao-Chun Wang, and Yuan-Cheng Lai, "An Extended SDN Architecture for Network Function Virtualization with a Case Study on Intrusion Prevention", *IEEE Network, The Magazine of Global Internetworking*, v. 29, n. 3, Jun 2015.
- [44] NFV-ISG, Network Functions Virtualisation (NFV): "NFV Security; Security and Trust Guidance". ETSI GS NFV-SEC 003 V1.1.1 (2014-12). [Online] Available: [http://www.etsi.org/DELIVER/ETSI\\_GS/NFV-SEC/001\\_099/003/01.01.01\\_60/GS\\_NFV-SEC003V010101P.PDF](http://www.etsi.org/DELIVER/ETSI_GS/NFV-SEC/001_099/003/01.01.01_60/GS_NFV-SEC003V010101P.PDF)
- [45] NFV-ISG, "ETSI GS NFV-SEC 001 V1.1.1: Network Functions Virtualisation (NFV); NFV Security; Problem Statement," [http://www.etsi.org/deliver/etsi\\_gs/NFV-SEC/001\\_099/001/01.01.01\\_60/gs\\_NFV-SEC001v010101p.pdf](http://www.etsi.org/deliver/etsi_gs/NFV-SEC/001_099/001/01.01.01_60/gs_NFV-SEC001v010101p.pdf), October 2014.
- [46] "OpenStack Project", [Online]. <http://www.openstack.org/>
- [47] Zvika Bronstein, Evelyn Roch, Jinwei Xia, and Adi Molkho. "Uniform Handling and Abstraction of NFV Hardware Accelerators", *IEEE Network, The Magazine of Global Internetworking*, v. 29, n. 3, Jun 2015.
- [48] "OpenDaylight Network Intent Composition Project", [Online]. [https://wiki.opendaylight.org/index.php?title=Network\\_Intent\\_Composition:Main#Friday\\_8AM\\_Pacific\\_Time](https://wiki.opendaylight.org/index.php?title=Network_Intent_Composition:Main#Friday_8AM_Pacific_Time)
- [49] "VMWare NSX", [Online]: <http://www.vmware.com/products/nsx>
- [50] "Juniper Contrail", [Online]: <http://www.juniper.net>
- [51] "Nuage", [Online]: <http://www.nuagenetworks.net/>
- [52] C. Price and S. Rivera, "Opnfv: An open platform to accelerate nfv," in *White Paper. A Linux Foundation Collaborative Project*, Oct. 2012
- [53] Diego R. Lopez, Telefonica I+D. OpenMANO "The dataplane ready open source NFV MANO Stack". [Online] Available: <https://github.com/NFVLABS/OPENMANO>
- [54] Network Functions Virtualisation (NFV); NFV Performance & Portability Best Practises, [online]. Available:

www.etsi.org/deliver/etsi\_gs/NFV-PER/001\_099/001/01.01.01\_60/gs\_nfv-per001v010101p.pdf

- [55] Xilouris, G. ; Trouva, E. ; Lobillo, F. ; Soares, J.M. ; Carapinha, J. ; McGrath, M.J. ; Gardikis, G. ; Paglierani, P. ; Pallis, E. ; Zuccaro, L. ; Rebahi, Y. ; Kourtis, A. "T-NOVA: A Marketplace for Virtualized Network Functions", European Conference on Networks and Communications (EUCNC), Jun 2014.
- [56] CloudNFV. (2013) CloudNFV. [Online]. Available: <http://www.cloudfnv.com>
- [57] TMF. GB922: Information Framework. [Online]. Available: <https://www.tmfforum.org/resources/suite/gb922-information-framework-r14-5-1-pdf/>
- [58] Clearwater project, [Online]: <http://www.projectclearwater.org/>
- [59] CloudBand, [Online]. Available: <https://www.alcatel-lucent.com/solutions/cloudband>
- [60] J. Soares, C. Gonçalves, et.al., "Towards a Telco Cloud Environment for Service Functions", submitted to IEEE Communication Magazine.
- [61] Soares, J.; Dias, M.; Carapinha, J.; Parreira, B.; Sargento, S. "Cloud4NFV: A platform for Virtual Network Functions", IEEE 3rd International Conference on Cloud Networking (CloudNet), p. 288-293, Luxembourg, Oct. 2014.
- [62] ZOOM "Zero-time Orchestration, Operations and Management" [online]. Available: <https://www.tmfforum.org/wp-content/uploads/2014/10/ZoomDownload.pdf>
- [63] "Calico project" [Online] Available: <http://www.projectcalico.org/>
- [64] White Paper, "Catalyst Project: Maximizing Profitability with Network function Virtualization, White Paper", Dec 2014. [Online]. Available: <http://nse.viavisolutions.com/ProductLiterature/Maximizing-Profitability-with-NFV-Orchestration.pdf>
- [65] J. Carapinha, et.al. "D2.1: Reference Scenarios and Technical System Requirements Definition", Mobile Cloud Networking FP7 project, Apr 2013. [Online]. Available: <http://fp7-mcn.eu/site/>
- [66] Corici, M.; Gouveia, F.; Magedanz, T.; Vingarzan, D. OpenEPC: A technical infrastructure for early prototyping of NGMN testbeds, International Conference on Testbeds and Research Infrastructures for the Development of Networks and Communities (TridentCom), 2010, Berlin. [Online]. Available: <http://www.openepc.com/>
- [67] A. Csaszar, et al., "Unifying Cloud and Carrier Network - EU FP7 Project UNIFY", Workshop on Distributed Cloud Computing (DCC), Dec 2013. [Online]. Available: <https://www.fp7-unify.eu/>
- [68] J. Martins, M. Ahmed, et.al, "ClickOS and the art of network function virtualization", in the 11th USENIX Conference on Networked Systems Design and Implementation (NISDI'14), 2014.
- [69] Bondan, L. Dos Santos, C.R.P. Zambenedetti Granville, L. "Management requirements for ClickOS-based Network Function Virtualization", IEEE 10th International Conference on Network and Service Management (CNSM), p. 447 – 450, Nov. 2014, Brazil
- [70] Blue Planet SDN Platform, "Nuage", [Online]. Available: <http://www.nuagenetworks.net/>
- [71] Kejie Lu, Shucheng Liu, Shucheng Liu, Mehmet Ersue, and Yu Cheng. "Network Function Virtualization: Opportunities and Challenges", IEEE network, IEEE Network, The Magazine of Global Internetworking, v. 29, n. 3, Jun 2015.
- [72] Lim, S. ; Ha, J. ; Kim, H. ; Kim, Y. ; Yang, S. "A SDN-oriented DDoS blocking scheme for botnet-based attacks", Sixth International Conference on Ubiquitous and Future Networks, p. 63-68, 8-11, Jul 2014.
- [73] Raphael Rosa, Marcos Siqueira, Emerson Barea, Cesar Marcondes, Christian Rothenberg, "Network Function Virtualization: Perspectivas, Realidades e Desafios", XXXII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos Florianópolis, May 2014.
- [74] M. Beck and J. F. Botero, "Resilient allocation of service function chains," in IEEE Conference on Network Function Virtualization and Software Defined Networks 2015 (NFV-SDN'15), San Francisco, USA, Nov. 2015, "submitted"
- [75] Jaeger, B., "Security Orchestrator: Introducing a Security Orchestrator in the Context of the ETSI NFV Reference Architecture," in *Trustcom/BigDataSE/ISPA, 2015 IEEE* , vol.1, no., pp.1255-1260, 20-22 Aug. 2015.



**Juliver Gil Herrera** is a Ph.D. student in Electronic and Computer Engineering, at the Electronics and Telecommunications Engineering Department at the University of Antioquia, Colombia. In 2003 and 2010 respectively, he received his first B.Sc. degree in Mathematical and Physical Sciences, and his second B.Sc. degree in Telecommunications Engineering, both from the University of Antioquia. After, he received his M.Sc. degree in Computer Engineering from Politecnico di Torino, Italy in 2013. His main research and professional interests involve Network Optimization, NFV, SDN and Network Virtualization, also he is interested in Future Internet Architecture and IoT.



**Juan Felipe Botero** is a Professor at the Electronics and Telecommunications Engineering Department at the University of Antioquia, Medellín, Colombia. In 2006 he received his Computer Science Degree from the University of Antioquia, his M.Sc. degree in Telematics Engineering in 2008 from the Technical University of Catalonia, UPC, in Barcelona, Spain, and his Ph.D. degree in Telematics Engineering at UPC. In 2013, he joined GITA (Research group on applied telecommunications) at the Electronics and Telecommunications Engineering Department. His main research interests include Quality of Service, Software Defined Networking, Network Virtualization, Data Center Network Virtualization and resource allocation in virtual networks.