

Análisis de las topologías Edge y Fog para la continuidad del extremo al Cloud

Javier Sillero Ros, Nelson Rodríguez

Departamento de Informática, F. C. E. F. y N, Universidad Nacional de San Juan

Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, UNSJ, Ig. De la Roza y Meglioli,
Rivadavia, San Juan, Argentina

javiersilleroros@gmail.com, nelson@iinfo.unsj.edu.ar

Abstract. Cloud Computing es un modelo que ha demostrado eficiencia y presenta muchas ventajas, por lo que ha sido adoptado por la industria. En los últimos años ha habido un fuerte impulso para mover todo al Cloud centralizado, habilitado por la virtualización y fomentado por la necesidad de reducir costos, acortar el tiempo de comercialización de nuevos servicios y aumentar la flexibilidad. Sin embargo, se perdió de vista la importancia de la ubicación de la funcionalidad para el rendimiento, el uso eficiente de los recursos de red y la experiencia del suscriptor. Con el surgimiento de IoT estas deficiencias se ponen de manifiesto y Cloud Computing presenta serias dificultades para adaptarse. Este trabajo presenta un análisis de la utilización de Fog y Edge Computing para mantener la continuidad del extremo hacia el Cloud, teniendo en cuenta los requisitos que deben cumplirse en redes IoT.

Keywords: Cloud Computing, Edge Computing, Fog Computing, IoT.

1. Introducción

Internet de las cosas (IoT) representa una de las tecnologías más disruptivas de los últimos años y es la base de nuevos desarrollos y tendencias como Smart City, Smart Home y Smart Factory. Se puede definir como una red dinámica de nodos físicos y virtuales, que permite una comunicación fluida entre objetos y la provisión de servicios contextuales [1]. Es necesario que la masiva cantidad de datos producidos por esta nueva tecnología sean procesados de alguna manera, por lo que son enviados inevitablemente al Cloud debido a la gran capacidad que ofrece el mismo.

La expansión del Cloud ha terminado de consolidar este modelo. A la Infraestructura, Plataforma y Software como servicio, se le agregaron: Redes, Almacenamiento, Contenedores, Funciones, Desktop, Base de datos, Seguridad, y Recuperación ante desastres, entre otras funcionalidades. En definitiva, lo que actualmente se conoce como XaaS o Everything as a Service [2].

Sin embargo, la gran cantidad y variedad de tipos de datos que se generan en el extremo y se envían al Cloud está saturando las redes y se presentan problemas como:

alta latencia, baja disponibilidad de ancho de banda, interrupciones momentáneas de Internet y diversos temas de seguridad. Es por ello que surgen los modelos Fog Computing y Edge Computing, con el objetivo de llevar parte del procesamiento, control y almacenamiento al borde de la red.

De esta forma, tanto el extremo como el Cloud deben trabajar en sintonía y se debe mantener la continuidad, pero, para lograr que el extremo y el Cloud se complementen correctamente y eficientemente se requiere analizar una vasta cantidad de variables. Este estudio presenta un análisis acerca de las principales topologías de red utilizadas en IoT con el objetivo de determinar aquellas configuraciones de red que vuelven del modelo Fog Computing una solución aplicable a la realidad de modo tal que se propicie la continuidad IoT-Cloud.

El presente trabajo se estructura de la siguiente manera: en la Sección 2 se definen los conceptos de Edge y Fog Computing, en la Sección 3 tiene lugar la explicación de la situación actual y de la problemática planteada, la Sección 4 explicita la metodología de estudio empleada, mientras que la Sección 5 las topologías IoT consideradas para el estudio y la Sección 6 la herramienta de simulación usada junto con los casos de estudio planificados. La Sección 7 exhibe los resultados obtenidos para cada tipo de topología y la Sección 8 los comportamientos y resultados generales del análisis. Por último, en la Sección 10, se detallan las conclusiones.

2. Edge y Fog Computing

Llevar parte de las funciones de los centros de datos al extremo de la red ha sido puesto en práctica anteriormente, entre sus antecedentes se puede nombrar a las redes de distribución de contenido, cuyo objetivo es acelerar el rendimiento web. Las CDN son valiosas para la entrega de video por el ahorro de ancho de banda al almacenar en caché, pero el nuevo modelo Edge Computing generaliza y amplía el concepto de CDN al aprovechar la infraestructura de computación en la nube [3].

En 2009 se desarrolla el concepto de Cloudlet, que en la actualidad es mantenido por la Universidad de Carnegie Mellon y varios sponsors como Intel, Vodafone e IBM, entre otros. Un cloudlet se puede ver como un "*centro de datos en una caja*" cuyo objetivo es "*acercar el Cloud*" [4]. Dicha variante es bastante compleja en cuanto a su funcionamiento, por lo que no se utiliza frecuentemente.

En 2012, Flavio Bonomi y colaboradores presentaron el término Fog Computing para referirse a esta dispersa infraestructura de Cloud [5]. Sin embargo, en este caso, la motivación para la descentralización es la escalabilidad de la infraestructura IoT en lugar del rendimiento interactivo de las aplicaciones móviles.

Se han propuesto diferentes arquitecturas para realizar plataformas de computación de borde. El análisis de estas arquitecturas revela que el borde de la red no está claramente definido y los nodos que se espera que participen pueden variar. Además, la terminología utilizada para describir dicho borde difiere mucho, el mismo término se utiliza para definir arquitecturas y funcionalidades diferentes [6].

Dichas arquitecturas no son un simple traslado de la funcionalidad del Cloud a los nodos intermedios, dado que las aplicaciones IoT son diferentes de las basadas en Web. Ciertas aplicaciones IoT necesitan respuestas en tiempo real o con un límite de

tiempo conocido y además, muchas de estas presentan un gran número de dispositivos conectados que pueden variar, resultando un desafío importante mantener la escalabilidad.

Recientes iniciativas de la industria y la academia en forma conjunta, están generando contribuciones que auguran que estas arquitecturas tengan, en propuestas abiertas, soluciones interoperables y disponibles [7] [8].

Los términos Edge y Fog suelen llevar significados diferentes según el autor que los referencia, lo cual genera confusión. Asimismo, se suele definir Mist Computing como otro término dentro del modelo Edge. En particular, Fog y Mist Computing, usualmente se asocian a IoT en el extremo y ambos son incluidos como parte del Edge Computing. Se considera a Fog como aquella arquitectura que se ubica solamente en los dispositivos de red (extremo medio), mientras que a Mist como aquella que se refiere a los dispositivos finales (extremo final).

3. Situación Actual

En el extremo, los modelos que soporten IoT deben priorizar, entre otras cosas, cuatro cuestiones básicas para un buen funcionamiento: la minimización de la latencia, la conservación del ancho de banda, el abordaje de cuestiones de seguridad y el movimiento de la información a los lugares más indicados para su procesamiento [9]. Dichas cuestiones serían abordables por el modelo del Cloud, pero la dependencia de las redes instaladas no permite una completa satisfacción de dichos principios.

Fog Computing, por su parte, busca reducir el tráfico en la red, logrando una disminución en la latencia, y persigue un acercamiento del cliente con el servidor y una ampliación en el número de servidores, de modo que se aproveche mejor el ancho de banda disponible, se incremente la productividad de las aplicaciones y servidores y se mejore la experiencia de usuario. En este nuevo paradigma todo aquel dispositivo que tenga capacidad de procesamiento y se encuentre conectado a la red (siendo un dispositivo de red) es capaz de pre-procesar información y puede ser considerado un nodo Fog.

Por lo tanto, es necesario analizar las variantes de redes IoT: en qué casos son más convenientes, cuáles y cómo se adaptan mejor, siempre favoreciendo la continuidad extremo-Cloud.

A continuación, se presenta una evaluación de las topologías más usadas en IoT y mediante un análisis de estas, embebidas en entornos Fog Computing, se determina en qué condiciones estructurales las aplicaciones distribuidas en las mismas funcionarán de manera eficiente empleando un modelo Fog. Así es como se espera determinar la influencia del modelo Fog Computing principalmente en la continuidad IoT-Cloud.

4. Metodología de Estudio

En el presente trabajo se llevaron a cabo estudios sobre las topologías IoT más utilizadas, para lo cual se empleó una metodología cuantitativa en el marco de una investigación experimental, haciendo uso de una herramienta de simulación.

Dicha herramienta es específica para simular entornos Fog Computing y la misma entrega como resultado datos acerca de la Garantía de QoS de cada red simulada, utilización de recursos Fog Computing, costo de mantenimiento de cada topología y ubicación de aplicaciones predefinidas (carga en los diferentes nodos Fog). Luego de obtener los resultados de la simulación se evalúan los comportamientos observados bajo los distintos patrones de configuración ingresados.

De esta manera, mediante la simulación de entornos Fog se pretende evaluar el rendimiento de cada una de las configuraciones topológicas, haciendo variar la escala, el tipo de conectividad, el tipo y la cantidad de los dispositivos que componen las redes, y las aplicaciones a desplegar en los mismos. Todo ello es con el objeto de explorar aquellas variantes topológicas IoT que permiten una continuidad IoT-Cloud y determinar la/s más conveniente/s sin degradar la funcionalidad de ninguno de los extremos y contribuyendo a una distribución balanceada de, entre otras cosas, las tareas de cómputo y almacenamiento entre los dispositivos de red que conforman un entorno Fog y el Cloud.

5. Topologías IoT

Existen tres modelos topológicos básicos para IoT, los mismos son: el modelo Estrella, el modelo Peer-to-Peer y el modelo Mesh.

El modelo Estrella se basa en la centralización del cómputo, almacenamiento y control. En una red IoT de tipo Estrella, un dispositivo final está conectado únicamente a un dispositivo de red, el cual pasa a ser, en un entorno Fog, un nodo Fog. Los diferentes nodos Fog en redes Estrella se comunican mediante la conexión al Cloud o a nodos Fog de mayor jerarquía dentro de la topología.

Este tipo de estructura facilita la agregación y remoción de dispositivos finales y la detección de fallos en los mismos. Además, las situaciones complejas siempre son resueltas por el/los dispositivos/s central/es, conformando una red con una performance consistente, predecible, de baja latencia y suficiente ancho de banda. A pesar de todo ello, las redes Estrella presentan, debido a la centralización de las funcionalidades, una importante debilidad: la existencia de un único punto de fallo.

En cuanto a las redes de tipo Peer-to-Peer, su estructura consiste en que todos los nodos existentes en la red están conectados entre sí mediante un link. De esta manera, los nodos Fog de una topología Peer-to-Peer pasan a estar conectados punto a punto con los demás nodos Fog de la red (interconexión de dispositivos de red), mientras que los dispositivos finales se conectan al nodo de red más cercano. Así, este tipo de configuración es adaptativa a la situación en la cual se encuentra la red respecto del tráfico de información.

Si bien la latencia se ve disminuida debido a los tipos de enlaces establecidos, las redes de pares son más complejas de configurar producto de que es necesario establecer los links entre cada uno de los nodos de red agregados y los ya existentes y, luego, conectar los dispositivos finales con los mismos. Además, en términos de opinión de especialistas que trabajan en el mercado, las redes Peer-to-Peer no son muy útiles para ambientes IoT, debido a que no es habitual que dos dispositivos se comuniquen directamente entre ellos.

Por último, las redes Mesh (combinación de los otros dos tipos) consisten básicamente en tres clases de nodos: los gateways o Dispositivos de Funcionalidad Completa (FFD), los sensores/actuadores-routers o Dispositivos de Funcionalidad Reducida (RFD) [10], y los sensores/actuadores simples. Los Dispositivos de Funcionalidad Completa representan, en un ambiente Fog Computing, la salida al Cloud o nodos de mayor jerarquía (y por ende de mayor capacidad), mientras que los Dispositivos de Funcionalidad Reducida son los nodos de red que poseen capacidades para correr algún tipo de aplicación (nodo Fog). Los dispositivos finales son los sensores o actuadores simples, productores y receptores de la información enviada a la red.

Este tipo de topología combina en parte las ventajas de los modelos anteriores: son redes adaptativas (mayor tolerancia a fallos) y el comportamiento de los sectores estrella de la red introduce estabilidad en cuanto a rendimiento. Así como se concatenan las ventajas, las desventajas también se hacen presente producto de la herencia: la redundancia de los links de la configuración Peer-to-Peer continúa acomplejando la configuración y el mantenimiento y, como si fuera poco, continúa existiendo la posibilidad de la conformación de un cuello de botella propio de las redes Estrella.

6. Herramienta de Simulación

La herramienta de trabajo utilizada se denomina Fog Torch Pi, presentada como un prototipo en el proyecto de investigación: “*Through the Fog*”, actualmente en ejecución en la Universidad de Pisa (Italia), y publicada junto al paper: “*How to best deploy your Fog applications, probably*” [11]. La misma es una aplicación desarrollada en Java [<https://github.com/di-unipi-socc/FogTorchPI>] y consta de 3 versiones hasta el momento.

Se utilizó su versión Cost Model, la cual “...permite expresar las capacidades de procesamiento y los atributos promedio de la Calidad de Servicio (QoS) de la infraestructura Fog, junto con los requerimientos de procesamiento y QoS de la aplicación, y determinar los despliegues de la aplicación sobre la infraestructura Fog que satisfacen todos los requisitos preestablecidos” [11].

El proceso de simulación consta de tres fases: la definición de la infraestructura, la definición de la/s aplicación/es y la simulación propiamente dicha. En la primera de las fases se determinan la topología a simular: se definen los nodos (servidores Clouds, nodos Fog, dispositivos finales) en cuanto a sus características de hardware y de software, y los links entre los mismos. La segunda fase consiste en crear la aplicación a desplegar en la infraestructura, para lo cual se definen los módulos de software y sus requerimientos, que deberán ser mapeados de la mejor manera sobre la infraestructura.

Por último, se lanza la simulación, la cual entrega todas las combinaciones de despliegue posibles de la aplicación ingresada sobre la topología señalada, devolviendo como resultado, para cada uno de los despliegues, el dispositivo donde se aloja cada módulo de software, el porcentaje en que satisface los requisitos de QoS (Garantía de Calidad de Servicio), el promedio de consumición de recursos de los

dispositivos Fog (considerando almacenamiento y memoria RAM) y el costo monetario mensual de montar una infraestructura de esas características.

Luego de diseñar y simular las situaciones necesarias, se procede a evaluar tanto los patrones ingresados como el producto obtenido y, a partir de ello, evaluar la performance de la red en general.

6.1. Casos de prueba

Para cada tipo de topología se definió un conjunto de prueba o archivos de entrada que representan una situación en particular, modificando en ocasiones una sola variable y en otras más de una.

En promedio se constituyeron 20 casos de prueba para cada configuración topológica, de manera que, en los diferentes escenarios, variaron tanto la escalabilidad de los dispositivos finales y los dispositivos de red (nodos Fog), como así también los tipos de enlaces: sobre todo los enlaces desde los nodos Fog hacia los servidores del Cloud, pero también los enlaces entre los dispositivos de red (en el caso de redes que permiten la interconexión de estos).

También alternaron las capacidades de software de las máquinas virtuales requeridas para desplegar las aplicaciones ingresadas. Estas últimas, se alojan en el Cloud y en los dispositivos de red, siempre que el hardware de los mismos tolere dicha carga.

En cuanto a las condiciones de hardware, las mismas no fueron modificadas con respecto al Cloud, sino respecto a los nodos de red, de manera que se observa el comportamiento en situaciones extremas de carga de trabajo.

7. Resultados

La figura presentada a continuación (Figura 1) expresa de manera resumida los resultados obtenidos de todo el proceso de simulación en su conjunto. La misma denota una situación en la que la cantidad de nodos de red, aplicaciones y dispositivos finales conectados a los nodos es igual para todas las topologías. A su vez, el tamaño de las máquinas virtuales y los requerimientos tanto de software como de hardware también son idénticos para todos los casos.

Los elementos variables son los links entre los nodos de red debido a la naturaleza de las diferentes topologías, pero el objetivo es representar un modelo comparativo general bajo el cual se pueden expresar los resultados de manera conjunta.

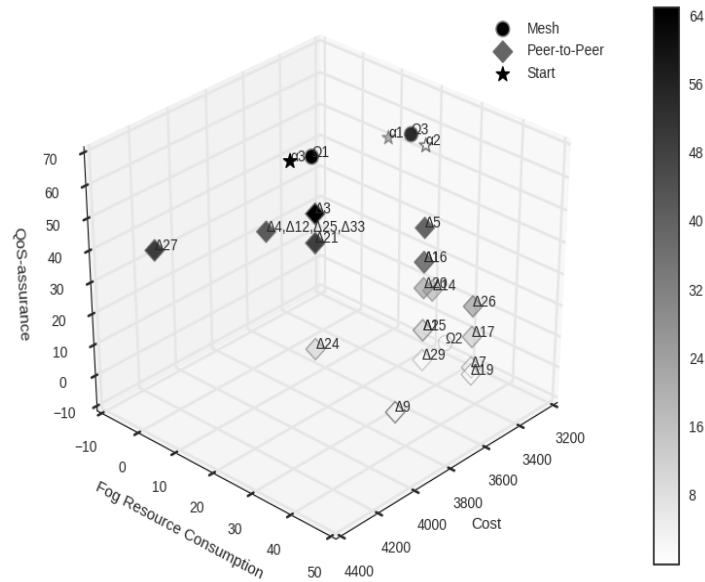


Fig. 1: Resultados comparativos de las 3 variables resultado entregadas por el simulador para las 3 topologías consideradas.

Si bien los números expresados en el gráfico pueden parecer muy diferentes a los a continuación expuestos para cada tipo de topología, se observa mediante este una tendencia a los comportamientos observados particularmente.

7.1. Redes Estrella

En las redes de tipo Estrella pura, en las que diferentes nodos Fog tienen comunicación directa con el Cloud, la QoS de la topología se ve decrementada si se aumenta la cantidad de nodos Fog. Sin embargo, al incrementar estos, se amplía momentáneamente la cantidad de despliegues, siempre dependiendo de: el tipo de link establecido entre los nodos de red y el servidor del Cloud, el número de aplicaciones desplegadas y los dispositivos a los cuales requieren acceso esas aplicaciones.

A su vez, si se incrementan los módulos de software capaces de ser alojados en dispositivos de red, aumentan los despliegues y la Garantía de QoS proporcionada por la red no se ve disminuida respecto de la utilización de únicamente el Cloud.

Los valores de Garantía de Calidad de Servicio arrojados para este tipo de red rondan entre el 50% y el 80%, entregando los mejores valores cuando se considera un solo nodo de red conectando ambos extremos.

En cuanto a la utilización de recursos Fog Computing en topologías con un solo nodo Fog, la misma ha llegado a ser del 84%, mientras que el promedio del resto de los despliegues -en los que el número de estos varía- se mantiene sobre el 20%. En aquellos despliegues donde se aloja una o más de una aplicación o módulo en un Fog, la consumición de recursos tiende a incrementar.

El planteo de topologías Estrella de manera jerárquica ha producido pocos despliegues con Garantías de Calidad de Servicio muy similares a las redes Estrella puras, pero se intensifica la utilización del Cloud.

7.2. Redes Peer-to-Peer

Los resultados de las simulaciones de las redes cuya configuración topológica es de tipo Peer-to-Peer arrojaron como conclusión que: contra más pares (nodos Fog) estén interconectados, mayor es la cantidad de despliegues posibles, y, si se incrementa a su vez la cantidad de módulos de software que requieren acceso a los dispositivos finales, mayor aún es el número de combinaciones. Sin embargo, la consumición de recursos Fog, independientemente de la cantidad de links que existan entre los nodos de red, nunca supera el 30%.

Si bien todo indica que la ubicación de los módulos de software más pesados se realice en los nodos Fog más potentes o capaces de este tipo de topología, la dispersión de estos en los diferentes nodos no contribuye de buena manera a la QoS de la red en general. Existen situaciones en las que, ante la distribución de las aplicaciones en los distintos dispositivos de red más potentes, la performance de la red se ve decrementada comparado con aquellas en donde se sobrecargan algunos nodos.

En cifras concretas, la Garantía de Calidad de Servicio de estas redes no supera el 80%, aunque se plantearon pruebas con variabilidad de links desde los nodos Fog hacia el Cloud, colocando enlaces de mayor latencia y menor ancho de banda, obteniendo resultados muy aislados con QoS superior al 85%, con consumiciones de recursos Fog del 25% en promedio y, claramente, una tendencia a la utilización mayoritaria del Cloud, cargando sobre los nodos de la red intermedios aquellas aplicaciones más livianas.

7.3. Redes Mesh

En general, para este tipo de topología, la Garantía de Calidad de Servicio es menor que las redes Estrella, a excepción de cuando se centraliza la comunicación con el Cloud. Normalmente, cuando toda la información de la red es transferida al Cloud a través de un único punto, la QoS es superior al 60%.

La predominancia de secciones en formato Estrella dentro de una red Mesh asegura, como anteriormente se menciona, la estabilidad en la performance de la misma, lo que se ve plasmado como el incremento en la Garantía de QoS en redes Mesh predominantemente de tipo Estrella.

Este tipo de topología expresa desde sus resultados la tendencia a una mayor cantidad de despliegues cuando la red presenta más secciones de tipo Peer-to-Peer, entregando datos de performance inferiores: nuevamente se introduce el comportamiento típico de las redes de pares (más despliegues posibles, menor QoS).

En la mayoría de los casos, el despliegue de las aplicaciones se da en los nodos raíz de las secciones Estrella y en los nodos más fuertes de las secciones Peer-to-Peer, arrojando como consumición de recursos un promedio no superior al 25%.

8. Resultados Generales

Además de los resultados expresados particularmente para cada tipo de topología, se observaron ciertas características respecto al comportamiento de las diferentes topologías luego de realizar el proceso de simulación de estas.

Respecto a la Garantía de Calidad de Servicio de los despliegues entregados, la misma se ve alterada cuando el tipo de enlace varía su latencia y ancho de banda, de modo que los enlaces de menor ancho de banda y mayor latencia siempre entregan una mejor performance de la red, pero no proporcionan una variedad nutrida de despliegues posibles.

El mencionado porcentaje de Garantía de QoS arrojado por el simulador estima cuán bien un despliegue de las aplicaciones ingresadas sobre la topología diseñada satisface la Calidad de Servicio requerida en su conjunto, por lo tanto, ello indica de qué manera se adapta la configuración topológica dentro de un ambiente Fog a las necesidades del IoT y los usuarios en general.

Respecto al porcentaje de consumición de recursos hardware en los nodos de red producido por la carga de aplicaciones, se presenta una clara influencia sobre estos respecto del tamaño de las máquinas virtuales o recursos hardware requeridos por las aplicaciones a desplegar sobre los mismos.

Por último, en cuanto a la variable de costos, en aquellas topologías donde el uso de recursos Fog es mayor, el costo de utilización de estas es inferior comparado a aquellas en las que se utilizan pocos recursos hardware de los nodos de red, requiriendo más del procesamiento y almacenamiento del Cloud. Este comportamiento se debe a que el empleo de recursos de fuentes mucho más grandes (inicialmente no diseñadas para el procesamiento continuo de funciones relativamente sencillas) es naturalmente más costoso, mientras que la utilización de nodos de red, que de hecho ya existen y están disponibles, resultan ser más accesibles y, en ocasiones, lo suficientemente convenientes en cuanto a sus capacidades para justificar su aprovechamiento.

9. Conclusiones

Luego de introducir las diferentes topologías IoT en entornos Fog Computing, realizar la simulación de estas sobre el prototipo Fog Torch Pi y analizar los resultados producidos, se ha arribado a la conclusión de que las configuraciones topológicas de tipo Estrella son lo más convenientes para promover la continuidad IoT-Cloud.

El descenso de las funcionalidades del Cloud hacia el borde de la red no puede realizarse de manera totalmente federal. Las redes federales, con cantidades de enlaces y nodos superiores entregan diferentes y mayores posibilidades de despliegue de las aplicaciones Fog sobre los distintos nodos de red capaces de soportar las mismas, pero ese tipo de redes añaden diversos problemas de interconectividad, por lo que dichas posibilidades no contribuyen a una red estable y de un rendimiento predecible y constante.

Durante el proceso de este trabajo se ha comprendido que la descentralización de las funcionalidades del Cloud no debe ser sobrecargada solo sobre los dispositivos

finales ni distribuida por la red con criterios de igualdad. La continuidad IoT-Cloud es el balance de cargas entre los dispositivos existentes, es la distribución de dichas tareas a lo largo del camino del extremo al Cloud, pero de manera semi-centralizada y criteriosa, agrupando sobre determinados puntos aquellas capacidades de orquestación y organización que favorezcan dicha prolongación extremo-Cloud.

La escalabilidad en las redes ha demostrado en este estudio que, a mayor cantidad de dispositivos a controlar, mayor es la cantidad necesaria de nodos Fog a implantar en la red, exigiendo una capacidad suficientemente alta de los mismos para poder cargar las aplicaciones necesarias. Esto a su vez significa una mayor utilización de recursos Fog, pero sin garantizar demandas de QoS en un 100%, lo que introduce una nueva discusión acerca de los servicios ofrecidos por el modelo Fog Computing en general.

Si bien las topologías Estrella presentan una de las soluciones más convenientes en términos de rendimiento a la continuidad IoT-Cloud, este trabajo deja en claro que no existe aún un modelo estático excepcional para ser utilizado en todos los casos y a gran escala. La integración extremo-Cloud requiere de un arduo y minucioso estudio, que contemple muchas más variables que afectan o podrían afectar al funcionamiento en armonía de los extremos opuestos.

Referencias

1. Lee G. M. et al: The internet of things: concept and problem statement :01. Dept. Reseaux et Service Multimedia Mobiles; Electronics and Telecommunications Research Institute; China Internet Network Information Center; Services repartis, Architectures, Modelisation, Validation, Administration des Reseaux, Research Report, Mar. 2011, <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00634616> (2011).
2. CBS Interactive Inc: Special Report: The future of Everything as a Service. (2017).
3. Dilley J. et al.: Globally Distributed Content Delivery. IEEE Internet Computing, vol. 6, No.5, 2002, pp.50–58, (2002).
4. Satyanarayanan M., Bahl P., Cáceres R., Davies N.: The Case for VM-Based Cloudlets in Mobile Computing. Pervasive Computing. IEEE (2009).
5. Bonomi F. et al.: Fog Computing and Its Role in the Internet of Things. Proc. 1st Edition MCC Workshop Mobile Cloud Computing (MCC12), pp.13–15 (2012).
6. Prensankar G., Di Francesco M., Taleb T.: Edge Computing for the Internet of Things: A Case Study. IEEE Internet of Things Journal, Vol. 5, No. 2, April (2018).
7. Open Fog Consortium, <http://www.openfogconsortium.org>
8. Open Edge Computing, <http://www.openedgecomputing.org>
9. CISCO: Fog Computing and the Internet of Things: Extend the Cloud to Where the Things Are”. (2015). White Paper: <http://www.cisco.com/go/iot>.
10. Jekishan K. Parmar, Ankit Desai. “IoT: Networking Technologies and Research Challenges”. International Journal of Computer Applications. Vol. 154. November (2016).
11. Brogi A., Forti S., Ibrahim A.: How to best deploy your Fog applications, probably. 1st IEEE International Conference on Fog and Edge Computing (ICFEC 2017), May 14th, 2017, Madrid, Spain, <http://pages.di.unipi.it/forti/pdf/icfec17.pdf>.