

# Análisis de las Topologías IoT en Entornos Fog Computing mediante simulación

Javier Sillero Ros<sup>1</sup>, Nelson Rodríguez<sup>1</sup>, Matías Montiveros<sup>1</sup>, Maria Murazzo<sup>1</sup>, Fabiana Piccoli<sup>2</sup>, Miguel Méndez Garabetti<sup>3</sup>,

<sup>1</sup>*Departamento de Informática, F. C. E. F. y N, Universidad Nacional de San Juan*  
javiersilleros@gmail.com, nelson@iinfo.unsj.edu.ar, nicolasmontivero.nw273@gmail.com, marite@unsj-cuim.edu.ar

<sup>2</sup>*Departamento de Informática - F.C.F.M. y N, Universidad Nacional de San Luis*  
mpiccoli@unsl.edu.ar

<sup>3</sup>*Instituto de Investigaciones, Facultad de Informática y Diseño, Universidad Champagnat*  
mendez-garabettimiguel@uch.edu.ar

## Abstract

El modelo Cloud Computing está demostrando algunas debilidades con el surgimiento del IoT, la gran cantidad y variedad de datos que se generan y envían a la nube está saturando las redes y surgen problemas como: alta latencia, baja disponibilidad de ancho de banda, interrupciones momentáneas de Internet y diversos temas de seguridad. Es por ello que surge el modelo Fog Computing, con el objetivo de llevar parte del procesamiento, control y almacenamiento al extremo, específicamente sobre los dispositivos de red.

La variedad de topologías de red impacta sobre los parámetros de la continuidad IoT – Cloud. Se desconoce qué tipos de redes emplear a la hora de implantar modelos Fog y dónde ubicar el procesamiento y otras funcionalidades, sumado a la heterogeneidad de dispositivos y protocolos de comunicación en el extremo IoT. Es por eso que, para llevar a cabo una evaluación de rendimiento, se debe utilizar la simulación de entornos Fog. Este trabajo analiza las topologías IoT más conocidas mediante el empleo de técnicas de simulación y presenta una aproximación acerca de qué tipos de modelos topológicos vuelven del Fog Computing un modelo más eficiente.

**Palabras claves:** Edge Computing, Fog Computing, Fog Torch Pi, IoT, simulation, Topology IoT.

## 1. Introducción

Cloud Computing es un modelo tecnológico que permite el acceso ubicuo, adaptado y bajo demanda en red a un conjunto compartido de recursos de computación configurables (por ejemplo: redes, servidores, almacenamiento, aplicaciones y servicios), que pueden ser rápidamente provisionados y liberados con un esfuerzo de gestión reducido o interacción mínima con el proveedor del servicio [1].

La expansión del Cloud sumado a los requerimientos

de los usuarios ha terminado de consolidar este modelo. A la Infraestructura, Plataforma y Software como servicio, se le agregaron: Redes, Almacenamiento, Contenedores, Desktop, Base de datos, Seguridad, Video y Comunicaciones Unificadas como Servicio, entre otras. En definitiva, lo que actualmente se conoce como XaaS o Everything as a Service [2].

Por otro lado, Internet de las cosas (IoT) es una tendencia reciente de la computación distribuida que integra aspectos de la vida real a escalas masivas. En 1999, Kevin Ashton del Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT) acuñó el término Internet de las Cosas. En ese momento, las tecnologías de automatización comenzaban a pasar de la fábrica a nuevos entornos como hospitales, bancos y oficinas.

A medida que las primeras implementaciones de M2M (machine-to-machine) se hicieron más sofisticadas, las máquinas comenzaron a ser conectadas a otros tipos de dispositivos como servidores, y estos servidores se trasladaron a centros de datos y al Cloud. Hoy en día, Internet de las Cosas puede incluir productos industriales y comerciales, productos cotidianos como lavavajillas y termostatos, y redes locales de sensores para vigilar granjas y ciudades [3].

Las soluciones que ofrece IoT promueven la incorporación de todos los dispositivos a la red y se pronostica que entre 20 y 50 millones de los mismos se añadirán a Internet para 2020, creando una economía de más de 3 billones de dólares [4]. En consecuencia, 43 billones de gigabytes de datos serán generados y necesitarán ser procesados en los centros de datos del Cloud. Las aplicaciones que generan datos en dispositivos de usuario, como teléfonos inteligentes, tablets y dispositivos portátiles, usan actualmente el Cloud como un servidor centralizado, pero pronto se convertirá en un modelo informático insostenible [5].

La importancia de IoT y las capacidades del Cloud, imponen que esta asociación sea por demás necesaria

y ofrece muchas ventajas. La misma debe darse de forma eficiente y efectiva, con tráfico fluido de las cosas al Cloud y viceversa, lo que se denomina continuidad IoT - Cloud. Sin embargo, debido a la gran cantidad de dispositivos IoT con plataformas heterogéneas, el desarrollo de las nuevas aplicaciones es una tarea un tanto difícil [6].

En la actualidad, el modelo de Cloud Computing está encontrando serias dificultades para satisfacer los requerimientos de Internet de las Cosas. Por ejemplo, para monitoreo de salud, respuestas de emergencias y otras aplicaciones embebidas sensibles a la latencia, el retraso causado por la transmisión de datos al Cloud y el retorno de los mismos es inaceptable.

Por lo tanto, hay muchos datos que necesitan ser atendidos inmediatamente para las operaciones 24/7, y siempre en tiempo real. Los antiguos enfoques ya no funcionan, se necesita cambiar la arquitectura, la metodología, la topología y el pensamiento que sustenta la ciencia de datos. Se debe dejar atrás la antigua arquitectura centralizada y pasar a un modelo federado, que está compuesto de modelos distribuidos y centralizados que funcionan en armonía.

Para ayudar a abordar estos problemas, se ha propuesto el concepto de Fog Computing y Edge Computing. De acuerdo con este paradigma, los recursos informáticos están disponibles en el borde de la red, cerca de (o incluso ubicado junto con) los dispositivos finales [7].

Colocando los recursos informáticos en las proximidades de los dispositivos que generan los datos se reduce la latencia de comunicación. Además, los datos intensivos en red pueden procesarse y analizarse a un solo salto de los dispositivos finales, reduciendo así las demandas de ancho de banda en los enlaces de red a dispositivos distantes de los centros de datos [8].

La integración de Fog Computing con IoT crea una nueva oportunidad para los servicios, que se llama Fog como Servicio (FaaS) [9]. FaaS habilitará nuevos modelos de negocios para entregar servicios a los clientes. A diferencia del Cloud, que es operado principalmente por grandes compañías que construyen y operan enormes centros de datos, FaaS permitirá a pequeñas y grandes empresas implementar y operar servicios de computación, almacenamiento y control, privados o públicos y a diferentes escalas, para satisfacer las necesidades de una amplia variedad de clientes [10].

El presente trabajo analiza las topologías más utilizadas en IoT, a las cuales se las embebe en entornos Fog Computing bajo la simulación de las mismas. El esquema que respeta el trabajo es el siguiente: en la Sección 2 se presenta la definición del modelo Fog Computing y sus implicancias, en la Sección 3 se describen los desafíos que debe resolver

esta nueva arquitectura, mientras que en la Sección 4 se presentan los objetivos del trabajo para, luego, en la Sección 5, aclarar cuál es la problemática actual y continuar explicando la metodología empleada en el estudio en la Sección 6. La Sección 7 describe las topologías usadas en IoT, en tanto que en la Sección 8 se describen los detalles del proceso de simulación y en la Sección 9 las conclusiones obtenidas del mismo. Por último, en la Sección 10, se mencionan los trabajos a futuro.

## 2. 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. Las mismas surgen a fines de la década del 1990, cuando Akamai introduce las Redes de Entrega de Contenido (CDN) para acelerar el rendimiento web. Una CDN utiliza nodos en el borde cerca de los usuarios para captar previamente y almacenar en caché el contenido web.

Las CDN son valiosas para el contenido de video, por el ahorro de ancho de banda debido al almacenamiento en caché. Pero el nuevo modelo Edge Computing generaliza y amplía el concepto de CDN al aprovechar la infraestructura de computación en la nube [11].

En 2001 se generalizó otro concepto, introduciéndose el término Cyber Foraging para la amplificación de las capacidades informáticas de un dispositivo móvil mediante el aprovechamiento de la infraestructura cercana [12]. Esto permite orientar el futuro de las investigaciones acerca del procesamiento fuera del Cloud.

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. Se define al Cloudlet como un nuevo elemento arquitectónico que surge de la convergencia de la informática móvil / IoT y el Cloud Computing. Representa el nivel medio de una jerarquía de 3 niveles: dispositivo móvil o IoT - cloudlet - Cloud. Un cloudlet se puede ver como un "*centro de datos en una caja*" cuyo objetivo es "*acercar el Cloud*" [13].

En 2012, Flavio Bonomi y colaboradores presentaron el término Fog Computing (informática en la niebla) para referirse a una dispersa infraestructura de Cloud [14]. 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.

Fog es una arquitectura emergente para almacenamiento, control, cómputo y red, que distribuye estos servicios cerca del usuario final a lo

largo de la continuidad, desde el Cloud a las cosas (dispositivos finales). No resulta 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.

Los términos Edge y Fog suelen llevar significados diferentes según el autor que los referencie, lo cual genera confusión, ya que se suele definir Mist como el extremo final (en los dispositivos) y Fog como el extremo medio (dispositivos de interconexión por lo general) o, en otros casos, no discernir entre Fog y Mist Computing. Por ello es necesario indicar adecuadamente la definición que se va a utilizar de estos términos.

En particular, Fog y Mist Computing, usualmente se asocian a IoT en el extremo y ambos son incluidos como parte de Edge Computing. A su vez, se suele utilizar el término Edge cuando se los asocia a Mobile Cloud, o sea, en el extremo se dispone de computación móvil (smartphones).

En este estudio se considera a Fog Computing como aquella arquitectura que se ubica solamente en los dispositivos de red (a un nivel intermedio), mientras que a Mist Computing como aquella que se refiere a los dispositivos finales. El término Edge Computing es quien engloba a los anteriores.

### 3. Desafíos Fog Computing

La computación en el borde (Edge Computing) está recién en sus comienzos, tal es así que los investigadores suponen que para su real consolidación se necesitará de la construcción de nuevos estándares y desarrollos.

A pesar de presentar notables ventajas con respecto al modelo centralizado, mantener la continuidad de forma eficiente y efectiva no se puede obtener simplemente agrupando el Cloud con el extremo. Los sistemas IoT necesitan interactuar con otros, con el Cloud y con diversos tipos de usuarios y dispositivos en un ambiente distribuido y heterogéneo.

No sólo resulta necesaria una redistribución del cómputo, las funciones de red, el almacenamiento y el monitoreo, sino que, además, dicha reubicación debe ser estratégica para impedir que el sistema colapse o presente demoras inadecuadas.

Los modelos de programación concurrentes utilizados actualmente no son adecuados para aplicar en la problemática presentada. La programación paralela con memoria compartida como OpenMP o Cuda no puede ser aplicada. El modelo de memoria distribuida como MPI tampoco puede ser aplicado

dado que se diseñó para otro tipo de arquitecturas y además no puede ejecutarse en el extremo. El modelo de threads solo es aplicable dentro de un mismo equipo. Por lo tanto, se deben desarrollar soluciones basadas en el modelo de programación de actor o alguno similar que permita la concurrencia basada en memoria distribuida, pero aplicable al Edge [15].

Resultará necesario también utilizar eficientemente los recursos, lograr un adecuado balanceo de carga para la distribución entre el borde y el Cloud, definir las API's y la administración y compartición de servicios y las comunicaciones en redes definidas por el software y virtualizadas [16].

El problema de la orquestación de la variedad de servicios complejos es un importante desafío a resolver, que resulta muy complicado debido a los ambientes altamente dinámicos, a la cantidad de aplicaciones instaladas y dispuestas para Fog y a la necesidad de soportar diferentes dominios de aplicación para adaptar el servicio a la heterogeneidad extrema de la infraestructura. Por cada instancia las aplicaciones Fog no pueden siempre contar con la disponibilidad de los dispositivos de computación más poderosos, quienes ejecutan algoritmos de orquestación complejos, por lo que, en condiciones críticas (por ejemplo, cuando la infraestructura se cae por algún hecho climático), la infraestructura Edge debe ser capaz de orquestar los servicios aún en presencia de computación limitada con un grado intrínseco de resiliencia.

Otro desafío importante es la capacidad de crear aplicaciones auto adaptativas, las cuales deben ser capaces de adaptar su comportamiento basado en el ambiente subyacente, por ejemplo, en algunos casos los servicios requeridos (por ej. alta capacidad de almacenamiento o sensores de alta precisión) no pueden ser alcanzados sin dejar de ofrecer el servicio que el usuario espera, aunque con cierta degradación.

En la actualidad se está en la antesala de la cuarta ola industrial, la misma emplea tecnologías como la inteligencia artificial, la computación cognitiva, el Cloud, la analítica e Internet de las Cosas para realizar el trabajo de una manera totalmente automatizada y en constante aprendizaje. Es la primera ola que no necesita a los humanos para realizar llevarse a cabo [17].

### 4. Objetivo

El presente trabajo tiene como fin encontrar aquellos tipos de configuraciones topológicas que vuelven al modelo Fog Computing aplicable en entornos genéricos mediante la utilización de herramientas de simulación de entornos Fog. El interés está centrado en hallar configuraciones de red (topologías) que soporten las características propias de IoT, de manera que el comportamiento/performance de las mismas justifique el empleo de un modelo Fog Computing y



exponga sus ventajas respecto del despliegue centralizado del Cloud tradicional.

## 5. Situación actual y problemática

Si bien el modelo de Cloud Computing ofrece una gran capacidad de almacenamiento, control y cómputo, el mismo no es adecuado para complementarse con IoT. Hoy por hoy las redes de conexión a Internet están cada vez más congestionadas por la cantidad de datos que fluyen desde los dispositivos finales hacia el corazón de la red: los servidores del Cloud. Es por ello que surgen problemáticas relacionadas con la alta latencia, la baja disponibilidad de ancho de banda, la pérdida de información, y, por ende, un menor throughput del sistema en general. Por otro lado, la cantidad de dispositivos IoT es cada vez más grande, así como la cantidad de información que se enviará hacia el Cloud en un futuro.

Los modelos que soporten IoT debieran 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 [21]. Dichas cuestiones serían abordables por el modelo del Cloud, pero la dependencia de las redes instaladas no permite una completa satisfacción de esos 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 de mejor manera 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.

Planteado el nuevo modelo y una nueva idea de procesamiento surgen problemáticas tan o más preocupantes: ¿Cuándo es conveniente emplear un modelo Fog Computing que soporte la creciente cantidad de información que se genera?, ¿Cómo implantar el nuevo modelo, bajo qué criterios?, ¿La información seguirá circulando al Cloud o bastará con el procesamiento en el borde?, ¿Cómo generar un correcto balanceo de cargas si el Cloud continúa teniendo participación y las redes son el intermediario entre estos?, ¿Qué tipo de tareas realizar en el Cloud y cuales realizar en los nuevos nodos Fog?.

Algunos de los interrogantes tienen respuesta desde la teoría de Fog Computing, partiendo de que el

Cloud y el Fog son complementarios y las cargas se verán repartidas entre ambos modelos, pero muchos otros generan campos de investigación que están empezando a trabajarse a nivel mundial. La línea adoptada por los autores del presente trabajo es la simulación de topologías IoT embebidas en entornos Fog Computing

El desafío de esta investigación está en evaluar los diferentes tipos de topologías más utilizadas en IoT y determinar bajo qué condiciones las aplicaciones distribuidas en las mismas funcionarán de manera eficiente empleando un modelo Fog. Realizar las pruebas correspondientes para hallar resultados al respecto llevaría mucho tiempo y requerirían de bastante inversión, sin tener la certeza de que el modelo propuesto funcionará, es por ello que, la simulación, es una solución alternativa para investigar situaciones como estas.

## 6. Metodología empleada

Para llevar a cabo los estudios de laboratorio pertinentes a las topologías IoT más utilizadas se empleó una metodología cuantitativa en el marco de una investigación experimental, de manera que se manipularon variables explícitas del área a través del empleo de herramientas de simulación.

Dicha simulación se realiza en software especialmente diseñado para ello (simuladores de entornos Fog Computing), del cual se obtienen datos de Calidad de Servicio (QoS) de la red simulada, utilización de recursos hardware y ubicación de las aplicaciones, y se evalúan luego los comportamientos observados bajo los distintos patrones de configuración ingresados a través de la topología y las aplicaciones a correr. De esta manera, la creación de topologías de diversa variedad y tamaño permitirá definir bajo qué criterios estructurales es más conveniente emplear el modelo Fog.

Utilizando dichas técnicas de estudio, el grupo de investigación se encuentra trabajando para llevar a cabo evaluaciones más profundas acerca del comportamiento de las diferentes topologías de red en entornos Fog Computing, considerando la escalabilidad de las redes como el primer aspecto a hacer variar en las próximas simulaciones.

De esta manera, mediante la simulación de entornos Fog se pretende evaluar el rendimiento de cada una de las configuraciones topológicas, haciendo variar, además de su escala, aspectos como el tipo de conectividad, el tipo y la cantidad de los dispositivos que componen las redes, y las aplicaciones a desplegar en los mismos (considerando las políticas de ejecución, las cargas de procesamiento asignadas y el tamaño de las mismas). Todo ello, con el objeto de hallar conclusiones que permitan determinar las distribuciones topológicas de IoT que presentan en

general una mejor performance en entornos Fog Computing.

## 7. Topologías IoT

Recabando opiniones aportadas por expertos en redes IoT, especialmente relacionados los mismos con el sector empresarial, se observa que existen inicialmente 3 modelos topológicos básicos para IoT, los mismos son: el modelo Estrella, el modelo Peer-To-Peer y el modelo Mesh.

Para cada configuración topológica, se denominará como “nodo” a todo aquel dispositivo de red que forme conforme la misma. Se llamará “extremo superior” a los recursos de Cloud Computing disponibles para realizar las tareas de procesamiento o almacenamiento (siempre ubicados sobre nubes de procesamiento públicas), mientras que el “extremo inferior” serán los dispositivos finales de la red, es decir, los dispositivos a través de los cuales se obtiene la información y se les debe devolver la mismas ya procesada.

Estructuralmente el modelo Estrella se basa en la centralización del cómputo, del almacenamiento y del control. En una red IoT de tipo Estrella, un dispositivo final está conectado únicamente a un solo nodo de la red, cumpliendo este un papel de nodo central para con el mismo. A su vez, cada uno de estos nodos de red está conectado a un nodo servidor, el cual podría ser una conexión con el Cloud o con otro nodo de la red con capacidades superiores o funcionalidades diferentes, cumpliendo este último un papel de nodo central de mayor jerarquía. De esta manera, para que dos dispositivos finales puedan comunicarse entre ellos, la información debe viajar hasta el nodo central que comunica los caminos hacia ambos dispositivos y, luego, completar el camino desde este hacia el destinatario.

Este tipo de estructura de red presenta ventajas en un ambiente IoT debido a su fácil configuración, refiriéndose a la misma como al agregado y la remoción de dispositivos finales y a la detección de fallos. Además, dicha configuración, cargada generalmente sobre un dispositivo central que se encarga de solucionar todas aquellas situaciones complejas, permite que la performance de la red sea consistente, predecible y buena -de baja latencia y suficiente ancho de banda-. La latencia, motivo que preocupa a las aplicaciones IoT, se vería decrementada con el uso de este tipo de topologías ya que se reducen la cantidad de saltos o hops que son necesarios para transportar la información a destino.

A pesar de todo ello, las redes Estrella presentan serias desventajas que afectan a la performance en ambientes IoT. La centralización de las funcionalidades soluciona muchos problemas, pero presenta una de las desventajas más serias: un único

punto de fallo. Si el dispositivo central con el cual se comunican los diferentes nodos de la red falla, el funcionamiento de la red se ve deteriorado por completo. Por el contrario, si fallan los nodos más cercanos a los dispositivos finales -hablando de una red estrella en forma jerárquica- el sector de la red que se encuentra en fallo puede ser aislado rápidamente, mientras que el resto funciona de modo correcto.

Las redes de tipo Estrella también suelen enfrentar dificultades con respecto a las radio-interferencias, el rango de transmisión (limitado al rango de transmisión del dispositivo que cumpla la función de nodo central), y el consumo de energía, el cual depende de la distancia existente entre los dispositivos conectados, para lo que hay que recordar que los dispositivos IoT funcionan mayoritariamente alimentados por baterías.

En cuanto a las redes de tipo Peer-to-Peer, las mismas presentan una estructura en la cual todos los nodos existentes en la red están conectados entre sí, es decir, existe un link permanente entre cada nodo que conforme la red. De esta manera, este tipo de configuraciones permiten una conexión adaptativa a la situación en la cual se encuentra la red respecto al tráfico de información.

Las redes de pares (Peer-to-Peer) no son tan sencillas de configurar, debido a 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. De este modo, el extremo inferior de la red posee conexión entre sí y con el extremo superior a través de los nodos de red más cercanos (a los cuales están conectados). Hoy por hoy existen configuraciones como estas que permiten la comunicación y la distribución de archivos entre hosts pertenecientes a la misma red, mediante el establecimiento de links directos entre los mismos.

Además de todo ello, las redes de pares presentan varias desventajas, entre las cuales se destacan el rango de comunicación limitado al salto más cercano y, lo más importante 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 es muy extraño e innecesario que dos dispositivos se comuniquen directamente entre ellos (links redundantes y mayores problemas de interferencia y seguridad entre los mismos).

En un ambiente Fog Computing, las redes Peer-to-Peer serían representadas de manera que los nodos de red sean los que se comunican entre sí, mientras que los dispositivos finales se conectan a estos. Así, la latencia se vería disminuida en caso de que los nodos pre-procesen parte de la información y puedan retornar resultados a los actuadores correspondientes.

Por último, las redes Mesh, las cuales son una 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) [18], y los sensores/actuadores simples. Los Dispositivos de Funcionalidad Completa representarán, en un ambiente Fog, la salida al cloud o aquellos servidores a los cuales los nodos de red se conectan para llevar la información, mientras que los Dispositivos de Funcionalidad Reducida son los nodos de red que poseen capacidades de procesamiento y pueden correr algún tipo de aplicación que cumpla determinada función. Los sensores o actuadores simples son los dispositivos finales, considerados fuente de datos y destinatarios de información ya procesada.

Este tipo de topología combina en parte las ventajas de los modelos anteriores: son redes adaptativas, es decir, continúan funcionando cuando los links caen e incluso cuando ciertos nodos caen -lo que se denomina una mayor tolerancia a fallos-. El mantenimiento y la escalabilidad se toman menos complicados, debido a que se subdivide la red con diferentes configuraciones y aquellos sectores de estructura estrella son mucho más simples de adaptar y escalar. Las interferencias son más severas y la capacidad de retransmisión que otorga el modelo Peer-to-Peer da aún mayor flexibilidad y tolerancia a los fallos de conectividad.

Así como se combinan las ventajas de los modelos Estrella y Peer-to-Peer, las desventajas también se hacen presente en las redes Mesh producto de la herencia. La redundancia de los links por parte de la configuración Peer-to-Peer continúa acomplejando la configuración y el mantenimiento de gran parte de la estructura y, como si fuera poco, continúa existiendo la posibilidad de la conformación de un cuello de botella, es decir, la existencia de un único punto de fallo. A todo ello, se le suman algunos otros problemas como es el caso de la latencia frente a los fallos y la búsqueda de caminos alternativos para hacer circular la información.

La mayor parte de las opiniones en el área de IoT defienden a las redes de tipo Estrella como las mejores candidatas, es por ello que, teniendo en cuenta dichas estructuras topológicas, se realizaron los estudios a ser explicados en la sección siguiente.

## 8. Investigación y Resultados

### 8.1. Herramienta de Simulación

La herramienta de trabajo utilizada se denomina Fog Torch Pi, la misma es presentada como un prototipo en el proyecto de investigación: "Through the Fog", actualmente en ejecución en la Universidad de Pisa (Italia), y publicada junto con el paper: "How to best deploy your Fog applications, probably" [19]. La

misma está desarrollada en Java y se encuentra disponible para todo público en un repositorio de GitHub [https://github.com/di-unipisocc/FogTorchPI], desde el cual se la puede importar y modificar para cualquier tipo de uso, solo siendo necesario la mención a los creadores.

Existen tres ramas de la aplicación sobre Git al momento de la escritura del artículo, la rama Master, la rama Cost Model y la rama Multithreaded, que, al pertenecer a diferentes ramas y como sus nombres lo indican, permiten realizar diferentes actividades debido a las funcionalidades que cada una aporta. Para el trabajo se utilizó la 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" [19]. De esta manera, el proceso de simulación consta de tres fases: la definición de la infraestructura, la definición de la aplicación y la simulación propiamente dicha.

En la primera de las fases se determinan las topologías a poner a prueba, explicadas en la sección anterior, definiendo los nodos de las mismas (servidores Clouds, nodos Fog, dispositivos finales) en cuanto a sus características de hardware y de software. También se determinan los links entre los mismos, lo que incluye definir latencia, ancho de banda (subida y descarga por separado) y la probabilidad con la que ese ancho de banda está garantizado. La segunda fase consiste en crear la aplicación, para lo cual se definen los módulos de software que funcionarán y deberán ser mapeados de la mejor manera sobre la infraestructura, cumpliendo con todos los requisitos. Para realizar esto se precisan las estructuras de hardware y software requeridas por cada uno de los módulos de la aplicación. Estas dos primeras etapas se realizan sobre un archivo .json, que luego es interpretado por la herramienta.

Por último, se lanza la simulación, la cual, en pocas palabras, va a buscar todas las combinaciones de despliegue posibles de la aplicación generada sobre la topología señalada, devolviendo como resultado, para cada uno de los despliegues posibles, el porcentaje en que satisface los requisitos de QoS, el promedio de consumición de recursos de los dispositivos Fog (considerando almacenamiento y memoria RAM) y el costo monetario de montar una infraestructura de esas características. Dicho costo es calculado gracias a que se puede ingresar, a medida que se construye la infraestructura, los costos de utilización de los recursos, ya sean hardware, software, y también el costo de la utilización de los links de comunicación entre los nodos de la red.



Esta herramienta estima la QoS de los links usando una distribución probabilística, describiendo variaciones de latencia y ancho de banda. Dicho modelo de distribución se basa en el modelo de Monte Carlo y, el resultado entregado, que se titula como Garantía de Calidad de Servicio, representa el porcentaje de corridas en las que un despliegue en particular cumplió satisfactoriamente con todos los requisitos de QoS impuestos tanto por la infraestructura como por las aplicaciones a desplegar sobre la misma. De dicha manera, el mencionado porcentaje de QoS estima cuán bien un despliegue satisface la Calidad de Servicio en su conjunto.

## 8.2. Condiciones Generales de las Simulaciones

Previo al presente trabajo se realizaron una serie de simulaciones, publicadas en el artículo académico [22], que arrojaron resultados parciales acerca del comportamiento y la performance de los diferentes modelos topológicos más utilizados en IoT, pero todas ellas fueron a baja escala, con la consideración de pocos dispositivos finales que generan tráfico de información hacia pocos nodos Fog. Con ello se obtuvieron despliegues posibles para situaciones representativas de bajo tamaño, planteadas a la hora de realizar dichas simulaciones, de manera que las conclusiones tratan acerca del comportamiento de las redes propuestas y se expresan, al igual que los resultados del presente trabajo, mediante valores de QoS/performance, utilización de recursos y distribución de aplicaciones/cargas de trabajo.

Tomando como punto de partida dichas simulaciones, se decidió utilizar las mismas técnicas, pero esta vez a gran escala, variando la cantidad de dispositivos finales conectados, pero también incrementando la cantidad de nodos de red (nodos Fog) implantados en las topologías. Es por ello que se tomaron en cuenta nuevamente los 3 modelos topológicos más usados en IoT: modelo Estrella, modelo Peer-to-Peer y modelo Mesh.

Previo a la definición de las estructuras a simular, se determinaron los tipos de enlaces a emplear en dichas topologías. Los valores de los mismos son reales, con tecnologías que al día de hoy se encuentran vigentes y son utilizadas con frecuencia para establecer este tipo de redes IoT en el mercado.

En las diferentes topologías planteadas como casos de estudio, los enlaces entre los nodos Fog siempre son de tipo 3G, mientras que los links al extremo superior variaron entre WLAN y Satelital. La Tabla 1, extraída de [20], aclara cada una de las variables a considerar

en la construcción de las topologías y el establecimiento de sus enlaces.

Tabla 1 – Perfiles de links considerados

Link	Latencia (ms)	Descarga (Mbps)	Subida (Mbps)
Satélite	40	98%: 10,5 2%: 0	98%: 4,5 2%: 0
14M			
3G	54	99,6%: 9,61 0,4%: 0	99,6%: 2,89 0,4%: 0
4G	53	99,3%: 22,67 0,7%: 0	99,4%: 16,97 0,6%: 0
VDSL	60	60	60
Fibra Óptica	5	1000	1000
WLAN	15	90%: 32 10%: 16	90%: 32 10%: 16

Así como se determinaron las medidas de los enlaces, se definieron los costos y las capacidades de las diferentes instancias virtuales a utilizar en el Cloud, las mismas fueron abstraídas un tanto de la realidad, llevándolas a valores representativos que permitan la comprensión de lo que se está simulando. Además, se definieron los costos de utilización de los dispositivos finales, para los cuales se determinó un número fijo de invocaciones a los mismos dependiendo de su tipo: sensores o actuadores. Las Tablas 2 y 3 expresan dichos valores.

Tabla 2 – Características de Máquinas Virtuales

Tipo de MV	vCPUs	RAM (GB)	HDD (GB)	Costo (USD)
tiny	1	1	10	165
small	1	2	20	236
medium	2	4	40	1182
large	4	8	80	1774
xlarge	8	16	160	2365

Tabla 3 – Características de Dispositivos Finales

Tipo Disp.	Costo p/invocación	Cant. Invocaciones
Sensor	0,0002 USD	2880
Actuador A	0,0006 USD	96
Actuador B	0,001 USD	192

En cuanto a las cantidades de dispositivos finales se consideraron desde 40 hasta 240 dispositivos conectados a los nodos de red de la manera más representativa posible, es decir, en ocasiones se sobrecargaron nodos con conexiones del extremo inferior, mientras que, en la mayoría de los casos, se trabajó lo más balanceado posible. Cabe remarcar que la herramienta de simulación utilizada permite declarar los dispositivos finales que se conectan a cada nodo Fog y también explicitar a qué dispositivos del extremo inferior deben tener acceso los módulos de aplicaciones a desplegar en la topología. Respecto a la cantidad de nodos de Fog, se emplearon desde un

solo nodo hasta seis nodos Fog dependiendo del tipo de red y del objetivo de cada simulación.

Definido todo ello, se decidió tomar la misma distribución de aplicaciones que en las pruebas ya realizadas (la cual tienen como fuente el artículo [20]), a diferencia de que se permite la duplicación de alguno de los módulos para observar sus resultados. De este modo, la aplicación a desplegar en cualquier topología propuesta consiste de tres tipos de módulos de software: un módulo de almacenamiento (Storage), un módulo de visualización de resultados (Dashboard) y uno o más módulos de cómputo (IoTController). La Figura 1 ilustra la comunicación entre dichos módulos.

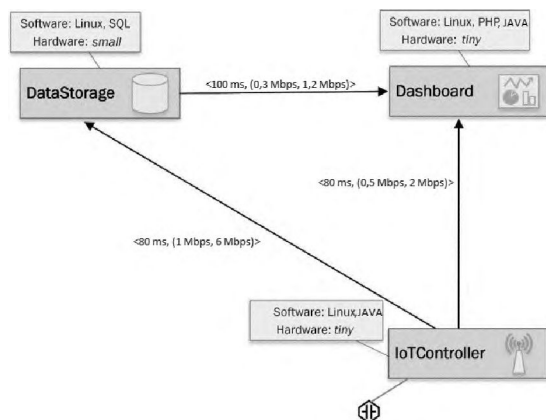


Figura 1 – Conectividad de Módulos de Software a desplegar

Por último, es necesario remarcar lo que concierne a la cantidad de simulaciones. Para cada uno de los casos se definió un conjunto de pruebas 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 realizaron 16 pruebas para cada tipo de topología, de las cuales, para cada prueba, la simulación consiste en 100000 corridas. El número de corridas no es elegido al azar, sino que se obtuvo en base a que, a menor cantidad de corridas, los resultados de despliegue fluctuaban demasiado para cada una de las simulaciones sobre el mismo lote de prueba; mientras que, a partir de las 100000 corridas, los resultados se estabilizaron.

### 8.3. Resultados

#### 8.3.1. Redes Estrella

Para las redes estrellas se realizaron 20 simulaciones, separando las mismas en dos grupos. Para el primer grupo se plantearon topologías Estrella puras y para el segundo se plantearon modelos Estrella con configuración jerárquica.

Como resultado de todo ello se observó que, para el primer tipo, la QoS de la topología se ve

decrementada si se aumenta la cantidad de nodos Fog. Sin embargo, al incrementar la cantidad de nodos Fog, se incrementa momentáneamente la cantidad de despliegues, siempre dependiendo del enlace utilizado al Cloud y de la cantidad de aplicaciones desplegadas, como así también de los dispositivos a los cuales requieren acceso las aplicaciones. A su vez, si se incrementa la cantidad de módulos de cómputo (IoTController) a desplegar en la topología, aumenta la cantidad de despliegues y la QoS no se ve disminuida respecto del Cloud.

Los valores de Calidad de Servicio en este tipo de red rondan entre el 50% y el 80%, dependiendo de la cantidad de fogs y del tipo y cantidad de aplicaciones a desplegar, 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 -incluso en ambos tipos de red Estrella- se mantiene sobre el 30%.

Aquellos despliegues en donde se aloja una o más de una aplicación en un Fog, la consumición de recursos aumenta, sin depender de la cantidad de dispositivos a los que requiere acceso la/s misma/s ni del tamaño de sus máquinas virtuales. La Figura 2 muestra los resultados de una red de este tipo.

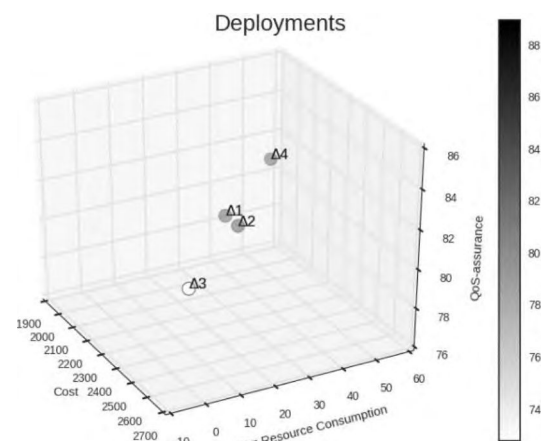


Figura 2: Red Estrella Pura de 20 dispositivos. Δ4: [IoTController->fog1][Dashboard->fog1][DataStorage->cloud1]

Respecto al segundo grupo de redes Estrella se obtuvieron muy pocos despliegues, de los cuales se puede observar una tendencia a utilizar solo el Cloud. La jerarquía presenta una alta sensibilidad a los tipos de enlaces empleados y a la cantidad de nodos Fog que conforman la misma. La Calidad de Servicio de los despliegues entregados es superior al 50%, pero la mayoría de las pruebas arrojaron despliegues en los



que el Cloud aloja la mayor cantidad de módulos software.

### 8.3.2. Redes Peer-to-Peer

Para este tipo de topología se planteó un solo grupo de evaluación, el cual fue mutando en cuanto a la cantidad de conexiones de pares existentes, lo que condujo a una evolución durante la formulación de los lotes de prueba. Siempre considerando una red de 4 fogs, se comenzó conectando algunos de ellos, para luego incrementar los enlaces en base a los resultados que se iban observando y terminar constituyendo una red de pares como la teoría la define (todos con todos).

Es por ello que los resultados de las simulaciones topológicas de Peer-to-Peer arrojaron como conclusión más importante que, contra más pares (nodos Fog) existan conectados, mayor es la cantidad de despliegues posibles, y, si se incrementa a su vez la cantidad de módulos de cómputo que tienen acceso a los dispositivos finales, mayor aún es la cantidad de despliegues. Sin embargo, la consumición de recursos Fog, independientemente del planteo topológico, nunca supera el 30%. La Figura 3 muestra una red de pares incompleta, es decir, sus nodos no están totalmente conectados, pero ya se observa la tendencia en el aumento de la cantidad de despliegues y su reacción en cuanto a QoS.

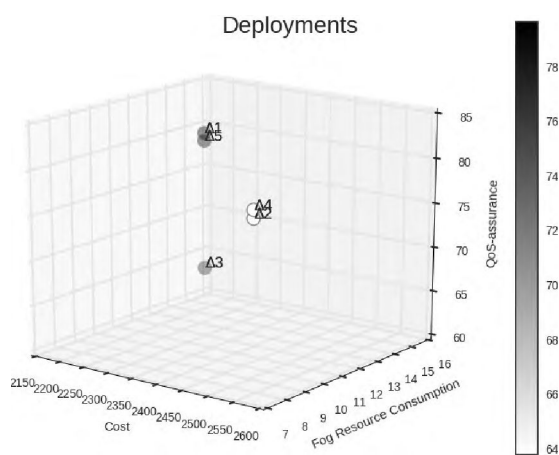


Figura 3: Red Peer-to-Peer de 60 dispositivos.  $\Delta 1$ : [IoTController->fog3][Dashboard->fog3][DataStorage->cloud1]

Si bien todo indica que la ubicación de las aplicaciones o módulos más pesados se realice en los nodos Fog más potentes o capaces, la dispersión de estos en los diferentes fogs no contribuye de buena manera a la QoS de la red en general.

En números, la Calidad de Servicio de la red en este tipo de topología no supera el 80%, aunque se plantearon pruebas con variabilidad de links desde los nodos Fog hacia el Cloud, colocando un enlace de

mayor latencia y menor ancho de banda, y se obtuvieron resultados con QoS superiores 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 solo aquellas aplicaciones más livianas.

### 8.3.3. Redes Mesh

En el último tipo de red se consideraron dos grupos diferenciados por su estructura: por un lado, una red en la que existe un nodo Fog aislado conectando al extremo inferior con el Cloud y 3 fogs conectados entre sí con una sola salida al Cloud, y por el otro lado una red con 6 nodos Fog separando 3 en formato Peer-to-Peer y 3 en formato Estrella (Estrella pura y jerárquica).

En cuanto al primer grupo, los resultados arrojados conllevan a afirmar que la Calidad de Servicio de la Red es menor que las redes Estrella, a excepción de cuando se centraliza la comunicación con el Cloud. Normalmente, cuando la red contiene una parte estrella que se comunica directamente con el Cloud la QoS es superior al 60%. Ejemplo de ello es la Figura 4.

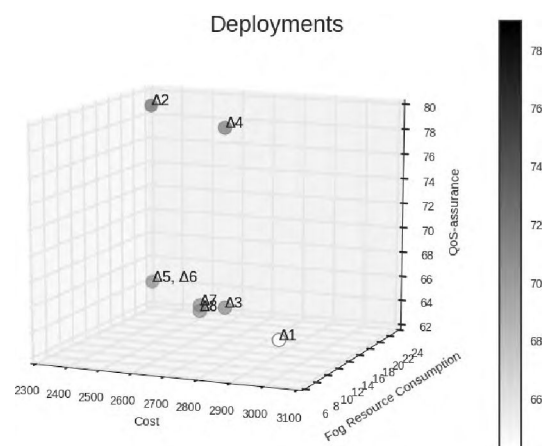


Figura 4: Red Mesh con sector estrella y Peer-to-Peer de 60 dispositivos.  $\Delta 2$ : [IoTControllerA->fog4][IoTControllerB->fog4][Dashboard->fog4][DataStorage->cloud1]

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%.

Por el otro lado, en el segundo grupo, se observaron patrones de comportamiento repetitivos a los arrojados por todas las pruebas realizadas anteriormente, la QoS de las redes decremente cuando existen una mayor cantidad de links entre los nodos de red, otorgando garantía de Calidad de Servicio de no más del 45%. Al igual que en el grupo

anterior, la consumición de recursos tampoco supera el 30%.

#### 8.4. Resultados Generales

Se observaron ciertas particularidades durante el proceso de simulación que son descritas a continuación:

Respecto a la Garantía de Calidad de Servicio de los despliegues entregados, la misma se ve alterada cuando el tipo de enlace varía la latencia y el ancho de banda, de modo que los enlaces de menor ancho de banda y mayor latencia (Satelital) siempre entregaron un mayor porcentaje de garantía, en aquellos casos donde existieron despliegues posibles.

La cantidad de despliegues también varía dependiendo de la conectividad de los dispositivos de red, como así también por el tipo de enlace utilizado para comunicarse con el Cloud, de modo que, a mayor latencia y menor ancho de banda, existe una reducida cantidad de despliegues posibles.

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

En cuanto a la variable de costos, en aquellas topologías donde la utilización de recursos Fog es mayor, el costo de utilización de las mismas es inferior comparada a aquellas en que se utilizan pocos recursos hardware de los nodos de red, requiriendo más del procesamiento y almacenamiento del Cloud.

## 9. Conclusiones

Luego de embeber las diferentes topologías de red más utilizadas para IoT en el modelo Fog Computing y realizar las simulaciones correspondientes sobre el prototipo Fog Torch Pi, se ha llegado a la conclusión de que aquellas redes Estrella puras, con centralización de procesamiento y que realizan la comunicación de los extremos de la red por medio de un nodo Fog, cumplen con una garantía de Calidad de Servicio -arrojada por el simulador empleado- superior a la del resto de las topologías (Peer-to-Peer y Mesh), alcanzando valores del 80% de satisfacción de la QoS demandada.

Se toma en cuenta también que la disminución de costos que resulta de la utilización de este tipo de topología Estrella es de aproximadamente un 10% respecto de la utilización de solamente el Cloud y de un 5% aproximadamente respecto del resto de las topologías. Esto conduce a afirmar que, las redes Estrella, al menos en las situaciones planteadas,

resultan ser más económicas que el resto de las redes planteadas.

A pesar de que el modelo de tipo Estrella presenta una mejor performance en cuanto a satisfacción de QoS respecto a los demás modelos, exhibe una menor cantidad de posibilidades de despliegue de aplicaciones en los nodos Fog. Las redes Peer-to-Peer son quienes facilitan ese despliegue de módulos de software de un ambiente Fog Computing a pesar de añadir redundancia e incrementar los riesgos de interferencia a través de sus links.

Por su parte, las redes Mesh, añaden a las ventajas características de las redes Estrella, la variedad de opciones de despliegue de las redes de pares, por lo que se entiende que, si se combinan correctamente las partes, las redes Mesh se vuelven más convenientes para determinadas circunstancias.

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, lo que también se traduce en costos. Esto a su vez significa una mayor utilización de recursos Fog, sin garantizar demandas de QoS en un 100% se introduce una nueva discusión acerca de los servicios ofrecidos por el modelo Fog Computing en general.

Para finalizar, se puede concluir que es incondicional la presencia de un profesional en el tema que pueda evaluar y determinar las posibilidades y conveniencias en cada situación a emplear un modelo Fog. Este trabajo deja en claro que no existe aún un modelo estático excepcional para ser utilizado en todos los casos posibles y a gran escala. Se debe realizar un estudio previo de la situación para tomar dimensión principalmente del tamaño del problema o situación a resolver, para luego, considerando como base los resultados expuestos, poder sugerir un modelo conveniente y adaptable a la circunstancia.

## 10. Trabajos futuros

El grupo de trabajo continúa simulando patrones de configuración que puedan indicar la conveniencia en la utilización del modelo Fog Computing en un modelo topológico estático en ambientes tan heterogéneos como los de IoT. Para ello, se está utilizando un simulador que, por defecto, permite la conformación y evaluación de topologías a gran escala. Dicha herramienta se encuentra en fase de

estudio y se espera obtener resultados que contrasten los ya obtenidos.

## Referencias

- [1] P. Mell, T. Grance, “The NIST definition of cloud computing”, NIST Special Publication, 800 – 145, 2011.
- [2] CBS Interactive Inc, “Special Report: The future of Everything as a Service”, 2017.
- [3] J. Biron, J. Follett, “Foundational Elements of an IoT Solution The Edge, The Cloud, and Application Development”, O’Reilly Media, Inc., 2016.
- [4] Garnet, “Gartner Says 6.4 Billion Connected "Things" Will Be in Use in 2016, Up 30 Percent From 2015”,  
<http://www.gartner.com/newsroom/id/3165317>, 2016.
- [5] B. Varghese, N. Wang., D.Nikolopoulos, R.Buyya, “Feasibility of Fog Computing”, arXiv:1701.05451v1cs.DC, 2017.
- [6] Y. Ai, M.; Peng, K. Zhang, “Edge cloud computing technologies for internet of things: A primer”, Digit. Commun, Netw. 2017, in press.
- [7] F. Bonomi, R. Milito, P. Natarajan, and J. Zhu, “Fog computing: A platform for Internet of Things and analytics”, Big Data and Internet of Things: A Roadmap for Smart Environments, Cham, Switzerland: Springer, pp. 169–186. 2014.
- [8] G. Premsankar, M. Di Francesco, T.Taleb, “Edge Computing for the Internet of Things: A Case Study”, IEEE INTERNET OF THINGS JOURNAL, VOL. 5, NO. 2, APRIL 2018.
- [9] H. F. Atlam, R. J.Walters, G. B. Wills, “Fog Computing and the Internet of Things: A Review”, Big Data Cogn. Comput, 2018, 2, 10; doi:10.3390/bdcc2020010.
- [10] M. Chiang, T. Zhang, “Fog and IoT: An Overview of Research Opportunities”, IEEE Internet Things J. 2016, 3,854–864.
- [11] J. Dilley et al., “Globally Distributed Content Delivery”. IEEE Internet Computing, vol. 6, No.5, 2002, pp.50–58, 2002.
- [12] M. Satyanarayanan, “Pervasive Computing: Vision and Challenges”, IEEE Personal Comm., vol. 8 No.4, 2001, pp.10–17.
- [13]M.Satyanarayanan, P. Bahl, R. Cáceres, N. Davies, “The Case for VM-Based Cloudlets in Mobile Computing”, PERVASIVE computing, 2009 IEEE.
- [14] F. Bonomi et al., ”Fog Computing and Its Role in the Internet of Things”, Proc. 1st Edition MCC Workshop Mobile Cloud Computing (MCC12), 2012, pp.13–15.
- [15] C. Hewitt, P. Bishop, R. Steiger, “A Universal Modular ACTOR Formalism for Artificial Intelligence”, Proceedings of the 3rd international joint conference on Artificial, 1973.
- [16] A. V. Dastjerdi, R. Buyya, “Fog Computing: Helping the Internet of Things Realize Its Potential”, Computer, IEEE Computer Society - 0018-91 62/16 /2016.
- [17] N. Rodríguez, M. Murazzo et al.: “Estudio de las mejoras de aplicar Fog Computing en la distribución de servicios en Cloud Computing”, XIX WICC. Bs Aires, 2017.
- [18] Jekishan K. Parmar, Ankit Desai. “IoT: Networking Technologies and Research Challenges”, International Journal of Computer Applications, Volume 154, November 2016.
- [19] Antonio Brogi, Stefano Forti, Ahmad Ibrahim, “How to best deploy your Fog applications, probably”, 1st IEEE International Conference on Fog and Edge Computing (ICFEC 2017), May 14<sup>th</sup> 2017, Madrid, Spain,  
<http://pages.di.unipi.it/forti/pdf/icfec17.pdf>.
- [20] Antonio Brogi, Stefano Forti, Ahmad Ibrahim, “Predictive Analysis to Support Fog Application Deployment”, Preprint, 2018.
- [21] CISCO, “Fog Computing and the Internet of Things: Extend the Cloud to Where the Things Are”, 2015. White Paper: [www.cisco.com/go/iot](http://www.cisco.com/go/iot).
- [22] Sillero Cristian J., “Fog Computing y topologías IoT, más convenientes que el Cloud Centralizado”, 5º CONAIIISI, Santa Fé, 2017.