

Procedimiento de simulación de redes de Computación en la Niebla

Fog computing networking simulation procedure

Ing. Liz Gámez Picó¹, Ing. Yang D. Rollón Rius², Dr.C. Caridad Anías Calderón³, MSc. Dayrene Frómeta Fonseca⁴

Recibido: 03/2020 | Aceptado: 07/2020

Palabras clave

Computación en la Niebla
Simulación
IFogSim

Resumen

Las redes de Computación en la Niebla (FC) son un paradigma de red distribuida que extiende los servicios de almacenamiento, cómputo y aplicación desde los centros de datos en la nube hasta el lugar donde se generan los datos y se actúa sobre ellos. El crecimiento acelerado de las aplicaciones de Internet de las Cosas (IoT) y las demandas de calidad de servicio de estas, han propiciado el desarrollo del paradigma FC. En este artículo se han desarrollado varias herramientas de simulación de FC, después de ser analizadas, se concluyó que la herramienta IFogSim es la más recomendable para el trabajo con escenarios de Computación en la Niebla. Dada la escasa bibliografía sobre la simulación de escenarios FC, en este estudio se propone un procedimiento de simulación de redes de Computación en la Niebla con la herramienta IFogSim. Este procedimiento generaliza los principales aspectos a tener en cuenta en la modelación de escenarios FC para su correcta simulación, entre los más importantes se encuentran la simulación de módulos de aplicación y la definición de la política de distribución de aplicaciones. Por último, se aplica el procedimiento a la simulación de un caso de uso de aplicación IoT sobre redes FC como método de validación.

Keywords

Fog Computing
Simulation
IFogSim

Abstract

Fog Computing (FC) networks are a distributed network paradigm that expands storage, computing and application services from cloud data centers to the place where data are generated and acted upon. The accelerated growth of the Internet of Things (IoT) applications and their quality of service demands have led to the development of the FC paradigm. A group of FC simulation tools has been developed, in this article, and after being analyzed, it was concluded

1* Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría", CUJAE, Calle 114 entre Rotonda y Autopista, Marianao, La Habana, Cuba. liz.gp@tele.cujae.edu.cu

2 Empresa de Telecomunicaciones de Cuba S.A. ETECSA

3 Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría", CUJAE, Calle 114 entre Rotonda y Autopista, Marianao, La Habana, Cuba. cache@tesla.cujae.edu

4 Universidad Carlos III de Madrid. 100373310@alumnos.uc3m.es

that the IFogSim tool is the most suitable to work with Fog Computing scenarios. In this study, a Fog Computing networking simulation procedure with the IFogSim tool is proposed, given the scarce bibliography on the simulation of FC scenarios. This procedure generalizes the main aspects to take into account when modeling FC scenarios for their precise simulation. Among the most important ones are the simulation of application modules and the definition of the application distribution policy. Finally, the procedure is applied to the simulation of a use case of IoT application on FC networks as a validation method.

Introducción

La Computación en la Niebla o *Fog Computing* (FC), también conocida como redes en la niebla o niebla, es una infraestructura de computación descentralizada en la que el cómputo, el almacenamiento y las aplicaciones están distribuidos en el lugar más eficiente entre la fuente de datos y la nube. La Computación en la Niebla extiende la computación en la nube y los servicios al borde de la red, donde se crean los datos y donde se actúa con base en ellos. El paradigma FC surge como solución a la creciente demanda de las aplicaciones IoT de menores tiempos de respuesta y mayor seguridad, así como por la proliferación de dispositivos, sensores y actuadores IoT que se estima generarán para el año 2020 flujos de datos del orden de los billones de Gigabytes que necesitarán ser procesados en los centros de datos de la nube (Rodríguez, Murazzo, Chávez y Marín, 2017).

La implementación de FC representa un gran desafío en cuanto a lo complejo de los escenarios, dado por la heterogeneidad y movilidad de los dispositivos, así como la escalabilidad, interoperabilidad, calidad de servicio (QoS del inglés *Quality of Service*), gestión de recursos y micro-servicios que se requiere para estos sistemas. Sin embargo, las probadas ventajas de su implementación conducen a profundizar en los estudios de aplicación de dicho paradigma, en este sentido la simulación constituye una herramienta de gran utilidad.

Una herramienta importante en el estudio de cualquier sistema es la simulación. Los simuladores permiten crear escenarios de complejidad similar a la que se experimentaría en la realidad y así analizar cuidadosamente desempeño, costo, inconvenientes y en general obtener conclusiones importantes a la hora de tomar decisiones en escenarios reales. En el caso de la implementación de FC, dada su relativa novedad, se carece de una estandarización de herramientas y procedimien-

tos para la simulación con enfoque en FC, si bien existen recomendaciones por autores como Gupta y Vahid Dastjerdi, 2017; Qayyum y Waqar Malik, 2017; Sillero Ros, Rodríguez, Monteveros, y Murazzo, 2018; y Moraes López y Higashin, 2017; no profundizan demasiado en las herramientas de simulación para escenarios de FC, ni se identifican criterios de cuál sería la más idónea a utilizar en la simulación de redes de Computación en la Niebla.

Ante la situación problemática antes planteada, se persigue con este artículo el objetivo de proponer la herramienta de simulación más eficaz en la modelación de escenarios de FC y su procedimiento de simulación.

Materiales y métodos

Mediante el método de análisis documental se realizó un levantamiento en la literatura referente al tema. Se incluyeron en este análisis aquellas específicas para el trabajo con el paradigma de red FC donde, si bien existe otro grupo de herramientas útiles para el modelado de aplicaciones IoT, no tienen en cuenta detalles de suma importancia en FC como lo es la aplicación distribuida y el procesamiento de borde. Además presentan ventajas para su instalación y configuración dado que son de código abierto, y funcionales en cualquier sistema operativo.

Posteriormente todas las herramientas que se abordan en este artículo fueron instaladas, configuradas y probadas durante la investigación para concluir cuál de ellas resulta más idónea para la simulación de entornos de Computación en la Niebla. De esta forma, dadas las razones anteriores y otras especificaciones que se presentan en este artículo, se dirigió la propuesta de procedimiento de simulación de redes niebla en el trabajo con la herramienta iFogSim.

Por otro lado, para la propuesta de procedimiento de simulación de redes de FC utilizando la herramienta de simulación iFogSim, se diseñó con el objetivo de

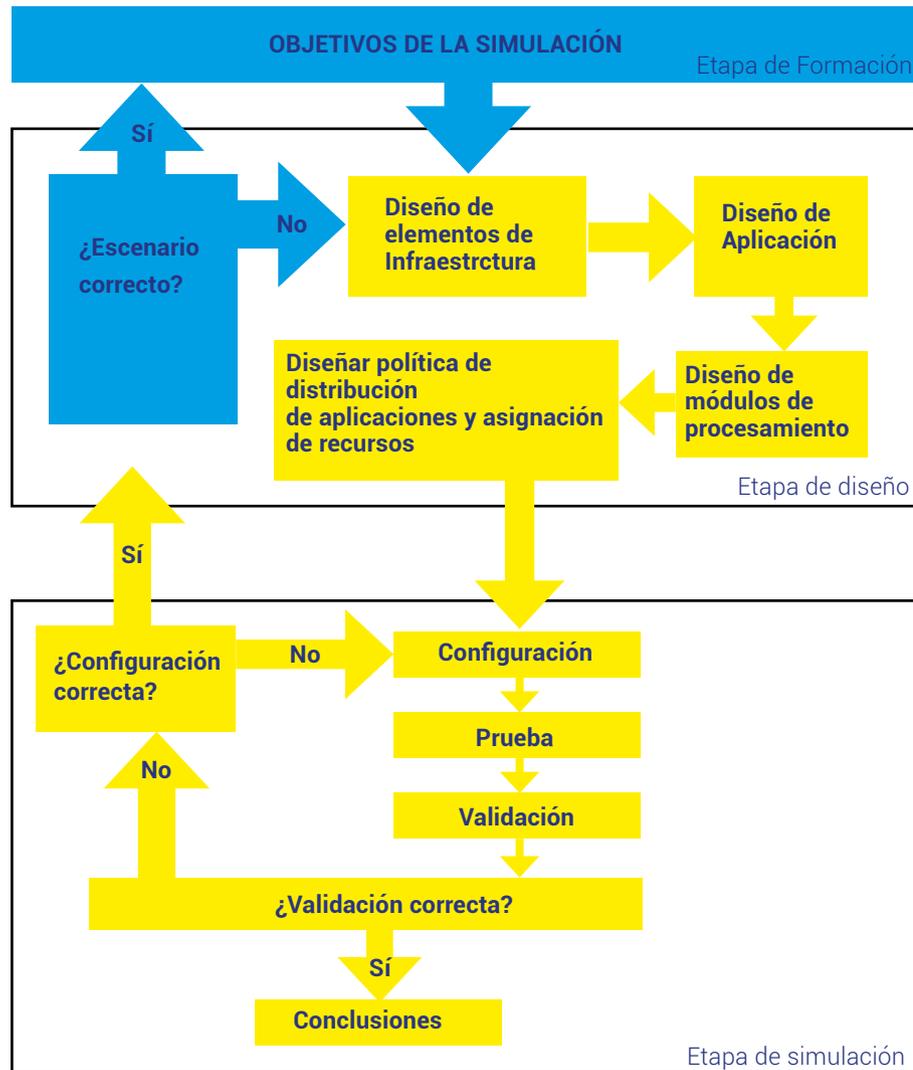
evaluar diferentes escenarios de aplicación y requerimientos de interés en el desarrollo de modelos de redes en la niebla. La figura 1 muestra, en forma de diagrama, la secuencia lógica del procedimiento propuesto para realizar simulaciones de redes FC. Este diagrama está conformado por un conjunto de bloques que contienen los aspectos esenciales a considerar durante el proceso de simulación, los cuales se detallan en los epígrafes siguientes. Para lograr una mejor organización del procedimiento, se divide en tres etapas: Formulación, Diseño y Simulación; y se plantean diferentes interrogantes para guiar la secuencia de pasos que se deben realizar.

La primera etapa es la formulación, en esta se definen los objetivos de la simulación, de la definición de estos objetivos se desencadenan los siguientes pasos del procedimiento, por lo cual son planteados de forma coherente con los resultados que se esperan obtener. Los requisitos que se establecen como objetivos son múltiples y por tanto es recomendable establecer prioridades en cuanto a la formulación de estos para la correcta aplicación del procedimiento. A partir de la formulación de los objetivos se pasa a la modelación de los elementos que conforman el escenario de Computación en la Niebla que se desea modelar.

Esta es la etapa de Diseño, en este punto se sigue el orden lógico de diseño mostrado en el diagrama que facilita el modelado de escenarios FC, esta secuencia es independiente de los objetivos seleccionados anteriormente, sin embargo los elementos particulares de cada bloque si se eligen en estrecho vínculo con los objetivos planteados para la simulación de un escenario de interés.

Primero, se modelan los dispositivos de red que conforman la infraestructura a simular, aquí se incluyen nodos niebla, sensores, servidores y centros de datos, entre otros; luego se diseña la aplicación en cuestión como módulos de procesamiento y por último se definen las políticas de distribución de módulos y recursos en los dispositivos primeramente diseñados. Esto será explicado en detalle en los siguientes epígrafes.

La tercera etapa es de simulación, en este momento, creado el escenario de simulación; se configura según los objetivos, requisitos y políticas definidas en las etapas anteriores. Luego se llevan a cabo las pruebas que para los fines planteados se definieron en la etapa de formulación, y se analizan los resultados obtenidos. En esta etapa, de sucederse cambios en algún requisito



u objetivo, así como las pruebas de interés se modifican tanto el escenario como la configuración de este.

Una vez finalizada la simulación se pasa a la validación, si esta es satisfactoria se pasa a las conclusiones. De no ser correcta la validación se toman medidas de reconfiguración, se diseña nuevamente el escenario teniendo en cuenta los errores detectados, si aún hechas estas modificaciones persiste la validación incorrecta se regresa a la definición de los objetivos y se repite el proceso.

Computación en la Niebla o *Fog Computing* (FC)

La Computación en la Niebla es un concepto de infraestructura de red y servicios que aparece definido por la empresa Cisco (Pérez, 2018).

Un concepto más formal define la niebla como una arquitectura horizontal a nivel de sistema que distribuye recursos y servicios de computación, almacenamiento, control y red en cualquier lugar desde la Nube a los dispositivos generadores de datos (Rodríguez, Murazzo, Chávez, y Martín, 2017).

La arquitectura básica de la red basada en el paradigma FC se muestra en la figura 2. Los nodos *Fog*, con capacidad de procesamiento y almacenamiento podrían ser enrutadores, conmutadores, *Gateway*, servidores y hasta los mismos dispositivos IoT si tienen las características de computación y almacenamiento necesarias. Por consiguiente, el nivel niebla puede estar constituido por varios dominios controlados por diferentes proveedores (Pérez, 2018).

La Computación en la Niebla se considera como una extensión del paradigma de computación en la nube desde el núcleo de la red hasta el borde de la red. Esta plataforma proporciona servicios de computación, almacenamiento y trabajo en red entre dispositivos finales y servidores en la nube tradicionales. Por lo general, tiene tareas que pueden ser para admitir funciones de red básicas o nuevos servicios y aplicaciones que se ejecutan en un entorno de espacio aislados.

En la Computación en la Niebla, el procesamiento tiene lugar en un centro de datos, en un dispositivo inteligente, o en un enrutador o puerta de enlace inteligente, lo que reduce la cantidad de datos enviados a la nube. Estas redes se complementan no se reemplazan, la computación en la nube; permite la analítica a corto plazo, y la nube realiza análisis a largo plazo que re-

quieran muchos recursos (Díaz Guerrero y Córdoba Carrero, 2018).

Ventajas y desventajas de Computación en la Niebla frente a la nube. (Kumar Naha, Garg, Kopolou, y Prakash Jayarama, 2018)

- En primer lugar las redes en la niebla presentan una arquitectura distribuida donde múltiples dispositivos participan en el procesamiento, en el caso de la computación en la nube el análisis de datos es centralizado.
 - El consumo de energía es mínimo comparado con las necesidades de los grandes centros de datos.
 - La arquitectura de FC genera poco tráfico en la red ya que la mayor parte de este ocurre entre los nodos niebla, que se ubicarán entre uno o dos saltos de distancia de los dispositivos IoT, y los sensores y actuadores.
 - La latencia para el procesamiento en la nube es grande en comparación con la red de computación en la niebla que como ya se dijo anteriormente acerca el procesamiento al usuario.
 - Por otro lado, las características de conectividad inalámbrica y la misma propiedad distribuida de la infraestructura FC, así como los fallos de potencia de los nodos niebla, hacen mayor la probabilidad de fallo en los dispositivos en comparación con los robustos centros de datos de la nube (Dianomic Systems^a, 2017), (Dianomic Systems^b, 2017), (Hao, Novak, Yi, y Li, 2017).
- En general, si bien el paradigma de Computación en la Niebla no sustituirá a la nube, presenta un grupo de ventajas para la interacción con IoT que la hacen una solución viable a las demandas de aplicaciones.

Principales software desarrollados para FC

Parte importante de la funcionalidad de los dispositivos niebla se encuentra en los *software*, los cuales se enmarcan en los tres niveles superiores de la arquitectura de referencia *Open Fog* (Gestión en banda y plano posterior de *software*, Soporte de aplicación y servicio de aplicación).

Por tanto, una breve explicación de los principales *software* niebla que existen y sus características más notables puede aclarar el entendimiento de aspectos clave en el análisis del paradigma FC.

Cisco IoX (Cisco and its affiliates, 2018) (Cisco, 2017)

El *software* Cisco IoX combina la ejecución de aplicaciones dentro de la niebla, la conectividad se-

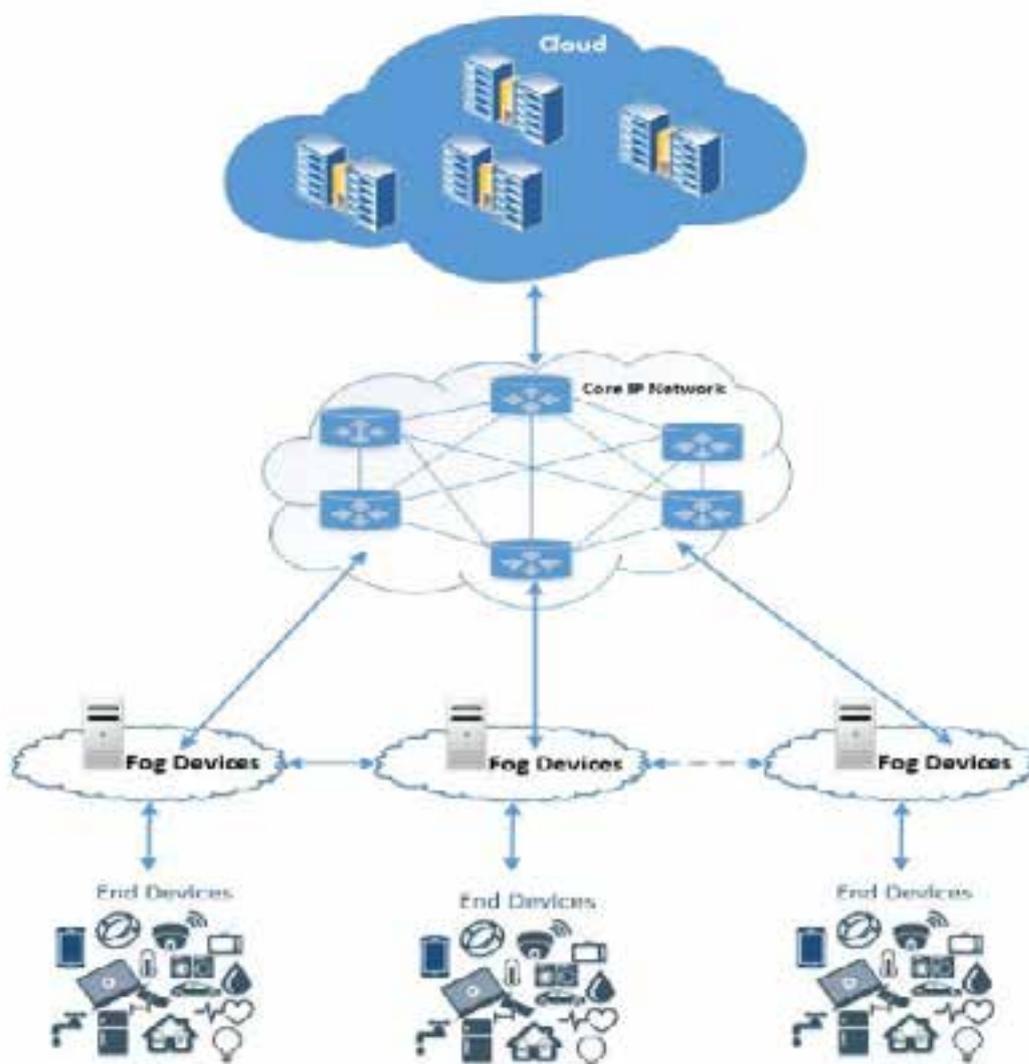


Figura 2. Estructura de Red con el Paradigma Fog Computing (Kumar Naha, Garg, Kopolou, y Prakash Jayarama, 2018)

gura con el *software* y servicios de rápida y confiable integración entre dispositivos IoT y la nube. Ofrece alojamiento y administración de aplicaciones a través de los propios elementos de la red de borde como *routers*, *switch* y módulos de cómputo. Permite además aplicaciones desarrolladas en entornos de trabajo Linux garantizando así el trabajo sobre *software* libre necesario para su desarrollo.

FOGLAMP (Dianomic Systems^a, 2017) (Dianomic Systems^b, 2017)

El *software* Foglamp ofrece una plataforma de código abierto para IoT, y es un esencial componente de FC. Usa módulos de micro servicios que incluyen toma de datos de sensores, Almacenamiento, computación y almacenamiento de historiales.

Foglamp presenta un *framework* modular y distribuido bajo licencia de código abierto, Apache V2. Estos módulos pueden estar ubicados en cualquier nivel, ya sea en la nube, niebla o red de borde, actuando juntos para proveer robustez, escalabilidad y resiliencia. Foglamp ofrece una solución “completa” para la gestión de datos, que combina una comunicación bidireccional de datos y metadatos en dirección vertical con un servicio y distribución de objetos en dirección horizontal.

WM-FOG (Hao, Novak, Yi, y Li, 2017)

WM-FOG es una propuesta de plataforma de computación para entornos de niebla que se plantea por los autores Hao, Novak, Yi, y Li en 2017, tras el análisis de los requerimientos que demanda un sistema de Computación en la Niebla. El diseño de WM-FOG

abrazando una arquitectura de *software* flexible, que puede incorporar diferentes opciones de diseño y políticas de usuario específicas.

Específicamente, WM-FOG proporciona un modo flexible para definir flujos de trabajo que pueden ser fácilmente implementados y ejecutados en sistemas basados en niebla. Al programar adecuadamente los flujos de trabajo en las entidades del sistema (es decir, los dispositivos cliente, nodos de niebla y servidores de la nube), WM-FOG puede aprovechar el paradigma de computación en la niebla y lograr una considerable mejora del rendimiento. Además, WM-FOG proporciona una manera de personalizar las políticas sobre los flujos de trabajo, a través del cual los desarrolladores pueden ayudar a que el sistema haga un mejor uso de los recursos de *hardware* subyacentes.

Herramientas de simulación

El término simulación se usa para referirse a la reproducción de un escenario en condiciones similares sin llegar al despliegue real de este, en la terminología de redes no es muy distinto el concepto. Simular una red o infraestructura es entonces una útil herramienta de análisis y diseño que permite conformar una idea del comportamiento de un sistema real.

En concreto, un simulador es un *software* capaz de modelar y ejecutar las operaciones de dispositivos de redes reales y sus interacciones. Brinda análisis detallado del proceso y datos de utilidad para su despliegue real. En los ambientes de simulación no existen eventos no controlados por lo que a iguales variables se obtendrán iguales resultados.

El trabajo con simuladores proporciona un grupo de ventajas y desventajas que se mencionan a continuación:

Ventajas

- Permite efectuar pruebas sin comprometer la red ni contar con el equipamiento necesario para implementar un escenario real.
- Permite descomponer la red en módulos haciendo más eficiente su análisis, pudiéndose simular en conjunto o por separado.
- Permite además obtener un conocimiento más profundo del funcionamiento interno tanto de los dispositivos como de la red en su conjunto, ya que se puede observar generalmente el funcionamiento de protocolos y sistemas internos de *hardware* y *software*.

Es una herramienta sólida para evaluar proyectos, prototipos, protocolos y nuevas tecnologías que se pretendan aplicar a la red en cuestión.

Desventajas

El método de simulación puede ser engorroso dado que muchas herramientas precisan de conocimientos de programación avanzados para poder ser trabajadas.

La reproducción que proporciona un simulador no es del todo exacta, desde la complejidad de ciertos escenarios reales hasta la ausencia de eventos no controlados, atenta contra la fiabilidad de muchas herramientas de simulación.

Principales herramientas de simulación de redes en la niebla

La simulación y modelado de escenarios de Computación en la Niebla tienen poca investigación, los escasos trabajos que se han llevado a cabo en este campo se centran en aspectos generales del paradigma. Por ejemplo, la predicción de requerimientos de recursos basados en la probabilidad de comportamiento de usuario en el futuro; este estudio no tiene en cuenta factores como heterogeneidad, movilidad y QoS (Kumar Naha, Garg, Kopolou, y Prakash Jayarama, 2018). Otro caso de estudio se centra en el manejo de fallos en ciudades inteligentes usando la herramienta CloudSim (Kumar Naha, Garg, Kopolou, y Prakash Jayarama, 2018). Gupta en (Gupta y Vahid Dastjerdi, 2017) presenta un estudio de la herramienta iFogSim para el modelado de escenarios FC y usando la misma herramienta se presentan estudios de casos más específicos como análisis de topologías IoT en escenario de Computación en la Niebla en (Hamadah Rahman y Wan Au, 2017) y otros casos de investigación relacionados en (Toor y ul Islam, 2019), (Gupta, 2019), (Santos y Geye, 2019), (Mtshali, Dlamini, Adigun, y Mudali, 2018).

En general, la bibliografía consultada menciona de forma breve algunas herramientas de simulación de entornos en la niebla, que a continuación serán comentadas:

iFogSim (Gupta y Vahid Dastjerdi, 2017), (Mtshali, Dlamini, Adigun, y Mudali, 2018), (Moraes López y Higashin, 2017)

El kit de herramientas de simulación iFogSim se desarrolla sobre el marco fundamental de CloudSim (Mahmud y Buyya, 2017), (Calheiros y Ranjan, 2010) y (Silva Filho y Oliveira, 2019). CloudSim es uno de los simuladores ampliamente adoptados para modelar el entorno de computación en la nube. Extendiendo la

abstracción de las clases básicas de CloudSim, iFogSim ofrece ámbitos para simular un entorno de computación de niebla personalizado con un gran número de nodos de niebla y dispositivos IoT (por ejemplo, sensores, actuadores). En iFogSim las clases están definidas de tal manera que los usuarios, que no tienen conocimiento previo de CloudSim, pueden definir fácilmente las políticas de infraestructura, colocación de servicios y asignación de recursos para computación en la niebla (Santos y Geye, 2019).

La herramienta iFogSim aplica el ciclo sensor-procesamiento-actuador (Santos y Geye, 2019) y un modelo de flujo de datos distribuido mientras simula cualquier escenario de aplicación en un entorno de Computación en la Niebla. Esto facilita la evaluación de la latencia de extremo a extremo, la congestión de la red y el uso de energía. En algunos trabajos de investigación, iFogSim ya se ha utilizado para simular recursos, movilidad, latencia, calidad de experiencia (QoE del inglés *Quality of experience*), energía, seguridad y gestión de conocimiento de QoS de entornos de Computación en la Niebla.

FogNetSim ++ (Qayyum y Waqar Malik, 2017)

FogNetSim ++ es una herramienta de simulación de código abierto que corre sobre OMNeT, (Kuma y Saho, 2014) este último un simulador de eventos discretos de red. La herramienta provee una amplia biblioteca para simular características de la red; ofreciendo un grupo de módulos integrados que actúan como dispositivos de red reales.

Además brinda flexibilidad en la configuración de red, permitiendo a los usuarios establecer parámetros de red en consonancia con sus requerimientos.

Incluye también varios de los protocolos de comunicación más comunes como TCP—*Transmission Control Protocol*—, UDP —*User Datagram Protocol*—, HTTP—*Hypertext Transfer Protocol*—, FTP—*File Transport Protocol*—, MQTT—*Message Queuing Telemetry Transport*— y otros para simular diversos escenarios.

La herramienta soporta un gran número de nodos y múltiples aplicaciones que se pueden ejecutar simultáneamente sobre un mismo nodo con diferentes protocolos de comunicación (Qayyum y Waqar Malik, 2017).

En particular, FogNetSim ++ proporciona un marco para los investigadores en tanto desarrollan sus propias técnicas de gestión de recursos, y pueden adoptar nuevos algoritmos con la pila de red completa. Sin embargo, el

manejo a través de una interfaz gráfica, dificulta el modelado de escenarios de gran tamaño.

FogTorch (Sillero Ros, Rodríguez, Monteveros, y Murazzo, 2018), (Gámez Picó, 2015)

Sobre el simulador de escenarios de redes de Computación en la Niebla, FogTorch, hasta el momento de esta investigación no se encontró documentación; solo se menciona en un análisis de topologías de red para aplicaciones IoT donde se simulan las topologías de red estudiadas y se analizan los resultados.

La herramienta es al igual que IFogSim una extensión de CloudSim que trabaja como librería de clases dentro del entorno de desarrollo Eclipse.

RECAP (Brogi y Forti, 2018)

El simulador RECAP se está desarrollando dentro del ámbito del proyecto RECAP (RECAP, 2017), un proyecto financiado por la Unión Europea que tiene como objetivo desarrollar la próxima generación de aprovisionamiento y solución de capacidad de computación en la nube / borde / niebla a través de avances de investigación específicos en optimización de infraestructura de nube, simulación y automatización.

El proyecto RECAP definirá y programará una arquitectura novedosa para realizar ideas relacionadas con la restauración, gestión de fuentes, análisis de datos y automatización inteligente. Como resultado, RECAP producirá un número de distintas herramientas diseñadas para funcionar conjuntamente, incluidos el analizador y el recolector de datos RECAP, el modelador de aplicaciones RECAP, el modelador de cargas de trabajo RECAP, el optimizador RECAP y el simulador RECAP.

El simulador RECAP permitirá la experimentación reproducible y controlable, ayudando a identificar objetivos para la implementación de componentes y su resolución óptima antes de la implementación real en un entorno real. Dichas tecnologías de simulación se emplearán ampliamente en RECAP, tanto para las interacciones de comportamientos de aplicaciones en la nube distribuida y para emular centros de datos y conectividad de sistemas de redes. La complejidad y el tamaño de los sistemas abordados son en sí mismos prohibitivos para despliegue a gran escala, y se estudiarán en varios niveles en la simulación.

Selección de Herramientas de simulación de escenarios FC

Como se mencionó anteriormente la simulación es una herramienta potente en el desarrollo de proyectos

de ingeniería, en el objeto de estudio del presente trabajo, las redes de Computación en la Niebla; adquiere vital importancia dado lo relativamente novedoso del tema. Existe un grupo de herramientas de simulación para las redes de FC, en las publicaciones de Kumar Naha, Garg, Kopolou, y Prakash Jayarama, 2018; y Qayyum y Waqar Malik, 2017; se analiza un amplio grupo de estas, algunas útiles por su alcance como CloudSim (Mahmud y Buyya, 2017), (Calheiros y Ranjan, 2010), (Silva Filho y Oliveira, 2019) y (Kuma y Saho, 2014), que sin estar pensada para el paradigma de Computación en la Niebla; permite modelar escenarios similares y características de utilidad en el análisis del paradigma FC, como es el caso del estudio de virtualización de *hardware* para redes de computación en la niebla que se desarrolla en la publicación de Brogi y Forti de 2018, y otras más específicas para los entornos niebla, como iFogSim, FogNetSim++ y FogTorch. Sin embargo, la documentación e investigación en este apartado es limitada. Algunos autores han planteado breves casos de uso como parte de una investigación sobre el tema o acotadas comparaciones de una herramienta con respecto al resto con fines comerciales (Qayyum y Waqar Malik, 2017).

En este marco, delimitar las principales herramientas según un grupo bien seleccionado de características, que permitan tener una condición de criterio en cuanto a las potencialidades, particularidades y desventajas de su uso en escenarios de FC, brinda la posibilidad de explotar la herramienta de simulación de forma óptima y obtener la mayor cantidad de información útil de un escenario de simulación dado.

En este capítulo se propone un procedimiento de simulación de redes FC desde la perspectiva y potencialidades de la herramienta de simulación que se seleccione como idónea, tras ser analizada con respecto a otros simuladores según un grupo de criterios de selección que a continuación queda detallado.

Criterios de selección de Herramientas de simulación de escenarios FC

Se expone a continuación un grupo de criterios de utilidad en la determinación de las herramientas de simulación de escenarios FC.

- Escalabilidad: La capacidad de adaptarse a los cambios de la topología de red y el incremento de nodos es de por sí unos de los pilares que persigue la arquitectura de referencia OpenFog (Luar Pérez Colomé, 2018).

Por tanto, las posibilidades en este sentido que brinde una herramienta de simulación son de gran utilidad en la simulación de escenarios FC, teniendo en cuenta el crecimiento exponencial que se prevé de las aplicaciones y dispositivos niebla.

- Solución de código abierto: Algunas herramientas de simulación son propietarias, esto además de dificultar su obtención, limitan su desarrollo. Por otro lado, el *software* de código abierto está en constante evolución, y ofrece posibilidades de uso de un diapasón más amplio para desarrolladores e investigadores, es además el más utilizado en instituciones académicas.

- Interfaz Gráfica: La herramienta debe ser útil a la mayoría, si la forma en que se maneja es compleja y exige de conocimientos avanzados de programación y lenguaje de consola, puede hacer su uso engorroso hasta el punto de ser una herramienta inservible a muchos usuarios.

- Métricas: Se debe tener en cuenta como parámetro crucial, las métricas de desempeño que proporciona determinada herramienta de simulación de entornos niebla, teniendo en cuenta el objetivo que se persigue en la simulación y los parámetros de red que se deseen medir en la simulación.

- Protocolos de comunicación: Se debe considerar tener en cuenta en la selección de la herramienta los protocolos de comunicación que soporta, condición que permite un modelado más realista de los escenarios.

- Comportamiento realista del despliegue: Se tendrá en cuenta de igual manera cuán cercano al despliegue real se pueda considerar la simulación de un escenario con una u otra herramienta. Esta debe permitir simular tanto *hardware* como *software* dentro del mismo escenario de simulación

- Usabilidad: En este punto se consideran características como: sistema operativo en que trabaja el *software*, lenguaje de programación que utiliza y el volumen de bibliografía que existe sobre la herramienta. Estos aspectos son de suma importancia en la decisión de selección que se toma ya que determina condiciones de uso para el usuario.

Prueba y comprobación de respuesta de las Herramientas de simulación de escenarios FC

- FogNetSim (Qayyum y Waqar Malik, 2017)

Se pudo comprobar que FogNetSim es una herramienta desarrollada como una extensión de

CloudNetSim, y esta de CloudSim, que utiliza las funciones disponibles en OMNeT++. FogNetSim presenta altas prestaciones en cuanto a escalabilidad ya que soporta un alto número de sensores, además incorpora variedad de protocolos de comunicación, muy útil para el estudio de aplicaciones IoT en la infraestructura de Computación en la Niebla. Su principal deficiencia es que, entre los parámetros de rendimiento de red que mide en la simulación, no se incluye la latencia, sin dudas un pilar entre las métricas de desempeño de una red niebla. La disminución de la latencia es uno de los objetivos fundamentales que promueven el desarrollo del paradigma FC. Tal limitación lo descartan como la herramienta idónea para el modelado de entornos niebla.

• FogTorch

Desarrollado como extensión de CloudSim (Silva Filho y Oliveira, 2019), es un conjunto de herramientas de simulación extensible que permite el modelado y simulación de sistemas de computación en nube y entornos de suministro de aplicaciones. El kit de herramientas CloudSim modela el comportamiento de los componentes del sistema de la nube, tales como los centros de datos, las máquinas virtuales (VM) y las políticas de aprovisionamiento de recursos. FogTorch por otro lado es solamente mencionado brevemente en una investigación que analiza las topologías de red más usadas en el desarrollo de IoT aplicando el paradigma FC (Sillero Ros, Rodríguez, Monteberos, y Murazzo, 2018).

• IFogSim

Esta herramienta es igualmente una extensión de la herramienta CloudSim que se explicó anteriormente. IFogSim brinda una herramienta de código abierto altamente escalable, que mide parámetros como ocupación de la red, latencia, consumo de procesamiento y consumo de energía, para diferentes políticas de gestión de recursos y aplicaciones en ambientes niebla. Solo soporta el protocolo de comunicación MQTT, característica deficiente ya que la aplicación de diferentes protocolos de comunicación en un mismo entorno de simulación sería útil en el análisis de estas redes. Para este apartado se puede usar la herramienta FogNetSim++, descrita anteriormente. Con iFogSim se simulan las aplicaciones divididas en módulos que se distribuyen a través de los diferentes niveles de arquitectura de red, en dependencia de la capacidad de los dispositivos e intereses de la simulación, esto permite un modelado realista de los objetivos de latencia, segu-

ridad, ocupación de red y aplicaciones distribuidas que se pretende con el paradigma FC.

Tal y como se adelantó en los Materiales y Métodos de esta investigación y por las razones antes expuestas se dirige la propuesta de procedimiento de simulación de redes niebla en el trabajo con la herramienta iFogSim.

Resultados y discusión

Aplicación del procedimiento en Caso de uso: Video-vigilancia inteligente

Las aplicaciones de video-vigilancia inteligente son un interesante caso de estudio de la Computación en la Niebla dado el uso extendido de esta aplicación, la alta demanda de ancho de banda que genera la transmisión de video en vivo hacia la nube, así como la baja latencia que se demanda para la respuesta de estos sistemas.

En la modelación del caso de estudio se seguirá paso a paso el procedimiento anteriormente propuesto para la simulación con iFogSim.

En primera instancia se define una muestra de la infraestructura básica de este sistema, se modelará un área con cuatro cámaras conectadas a dos *Gateway*, uno por cada dos cámaras; que envían la información a un ISP y de este a los centros de datos en la nube. Cada cámara se modela como la combinación de un sensor, un actuador y un nodo niebla, por otro lado cada *Gateway* soportará dos cámaras y estos se conectan al ISP que envía la información a la nube representada por un nodo llamado centro de datos. El diseño estará sujeto a crecimiento de la muestra. El diseño de la infraestructura atendiendo a los requerimientos de red planteados se muestra en la figura 3 ya modelado en la interfaz gráfica de la Herramienta IFogSim.

La aplicación de video vigilancia inteligente, donde las cámaras de video vigilancia poseen capacidad de procesamiento para detectar movimiento y enviar una alerta, se puede dividir en las siguientes tareas de procesamiento:

1. Detector de movimiento: Este módulo está ubicado en la propia cámara, su función es seguir todo el flujo de video captado por la cámara en busca de movimiento, en caso de detección, pasa el fragmento al módulo detector de objetos.

2. Detector de objetos: Este módulo recibe el video donde se detectó movimiento, lo compara con otros objetos descubiertos anteriormente y define si el

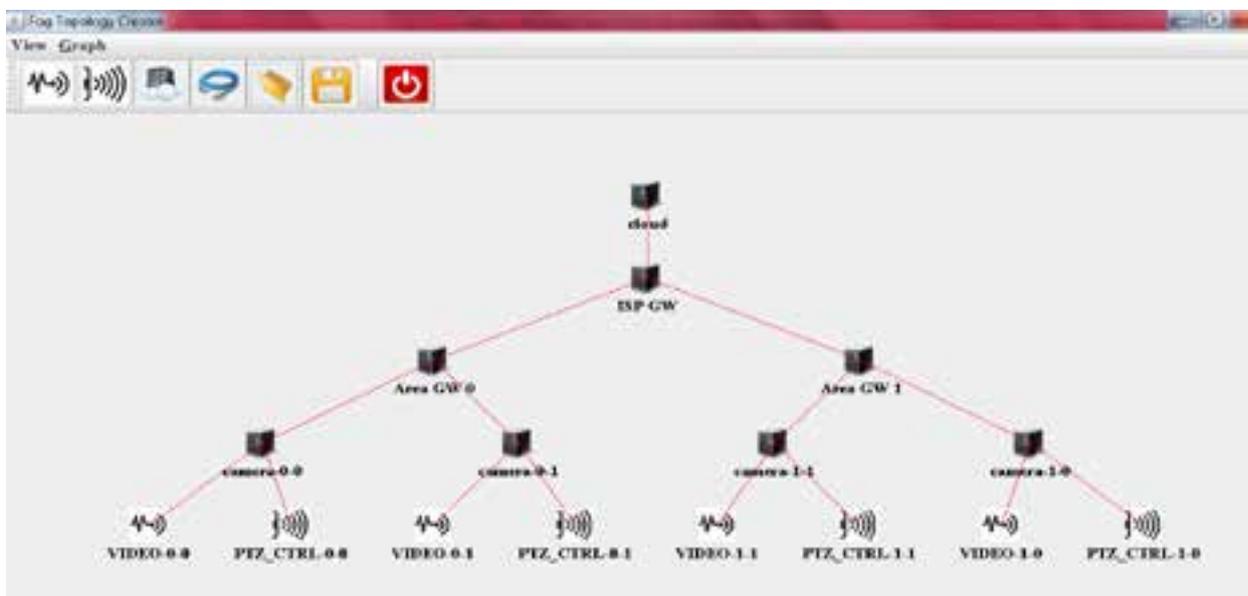


Figura 3. Muestra de infraestructura de caso de estudio

objeto es nuevo en el escenario, de ser así se activa el seguimiento de este y se calculan las coordenadas del objeto detectado.

3. Seguimiento de objeto: Este módulo recibe las últimas coordenadas del objeto y calcula los parámetros necesarios de enfoque y dirección (PTZ — *Pan-Tilt-Zoom*—) para las cámaras del sistema.

4. Control PTZ: Ubicado en cada cámara funciona como el actuador de este sistema, ajusta los valores de resolución, brillo, dirección y enfoque de cada cámara para lograr una imagen clara del objeto detectado.

5. Interfaz de Usuario: En este bloque se reciben los fragmentos de video donde se detectó movimiento.

Las pruebas que se realizaron durante la simulación de este caso de estudio son las siguientes.

- Prueba de infraestructura: Una vez diseñada la infraestructura de red que compone la muestra del sistema que se simula, y definidas las tasas de comunicación entre dispositivos Fog se simula el escenario atendiendo a la fiabilidad de la comunicación de este sistema tanto en sentido vertical como horizontal.

- Prueba de escalabilidad: Al sistema ya modelado se le agregaron dispositivos niebla en los diferentes niveles jerárquicos prestando atención a la funcionabilidad del sistema bajo crecimiento de la infraestructura. Para este fin se modelan cinco escenarios donde se agregan áreas desde 1 área hasta 2, 4, 8 y 16; cada área modelada con cuatro cámaras para un total de cinco configuraciones de escalabilidad.

Para el diseño de elementos de infraestructura en primer lugar, se declara la clase principal del proyecto DCNSFog y los elementos que la conforman tal como se muestra en el fragmento de código del escenario que se simula (Figura 4).

Como se planteó en los objetivos se va a simular una muestra del sistema compuesta de un área con cuatro cámaras de video-vigilancia que se diseñan con la combinación de elementos Nodo-sensor-actuador.

A continuación, se declaran los elementos y sus atributos como se puede observar en el siguiente fragmento del código presente en la figura 5.

En la etapa de simulación se configuran los detalles del escenario y el funcionamiento de la herramienta, se compila el escenario diseñado y se analizan los resultados. Se llevan a cabo las pruebas necesarias durante la simulación para comprobar que la modelación del escenario formulado en los objetivos funciona correctamente. La prueba de conexión entre los nodos se verifica compilando el escenario creado, en la ventana de consola que brinda la herramienta iFogSim se muestra la simulación satisfactoria con los parámetros calculados o los errores de configuración en caso de existir. En la figura 6 se muestra el resultado de la compilación señalándose la indicación de la simulación del escenario de forma correcta.

Para las pruebas de escalabilidad y desempeño se modifican atributos de las clases y métodos correspondientes para aumentar o disminuir la cantidad de elementos y la política de colocación de módulos de

aplicación. Para cada escenario de configuración formulado en la etapa de definición de objetivos se compila el código y se analizan los datos.

De la simulación y análisis de este escenario de aplicación se puede concluir que la implementación de una política de colocación de módulos de aplicación distribuida desde la nube hasta la red niebla disminuye en gran medida la latencia y la ocupación de la red tal como se puede observar en las gráficas 1 y 2.

Conclusiones

Las redes de Computación en la Niebla constituyen un cambio significativo en la estructura actual de las redes de aprovisionamiento de servicios en la nube, su carácter aún novedoso requiere del estudio de su impacto y características particulares de su aplicación en diferentes escenarios.

En este marco la simulación de escenarios constituye una posibilidad de análisis crucial en el desarrollo e investigación de este nuevo paradigma de redes. Si bien se han desarrollado una serie de herramientas para la simulación de estas redes, estas aún no satisfacen todas las demandas de modelación de escenarios

```
(...) public class DCNSFog {
    Static List<FogDevice> fogDevices = new ArrayList<FogDevice>
    ();
    Static List<Sensor> sensors = new ArrayList<Sensor>();
    Static List<Actuator> actuators = new ArrayList<Actuator> ();
    Static int numOfAreas = 1;
    Static int numOfCamerasPerArea =4; (...)
```

Figura 4. Fragmento del código de simulación

```
3. Private static void createFogDevices (int userId, String appId)
    {
4. FogDevice cloud = createFogDevice ("cloud", 44888, 48888, 100,
    10000, 0,0.01, 16*103, 16*83.25);
5. cloud.setParentId (-1);
6. fogDevices.add (cloud);
7. FogDevice proxy = createFogDevice ("proxy-server", 2800, 4000,
    10000, 10000, 1, 0.0, 107.339, 83.4333);
8. proxy.setParentId (cloud.getId ());
9. proxy.setUplinkLatency (100);
10. fogDevices.add (proxy);

11 For (int i=0; i<numOfAreas++){
12. AddArea (i+"", userId, appId, proxy.getId ());
```

Figura 5. Fragmento del código declarando elemento y atributo

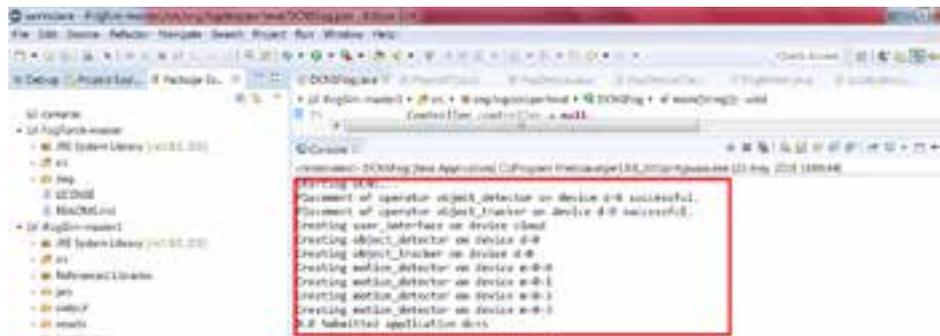
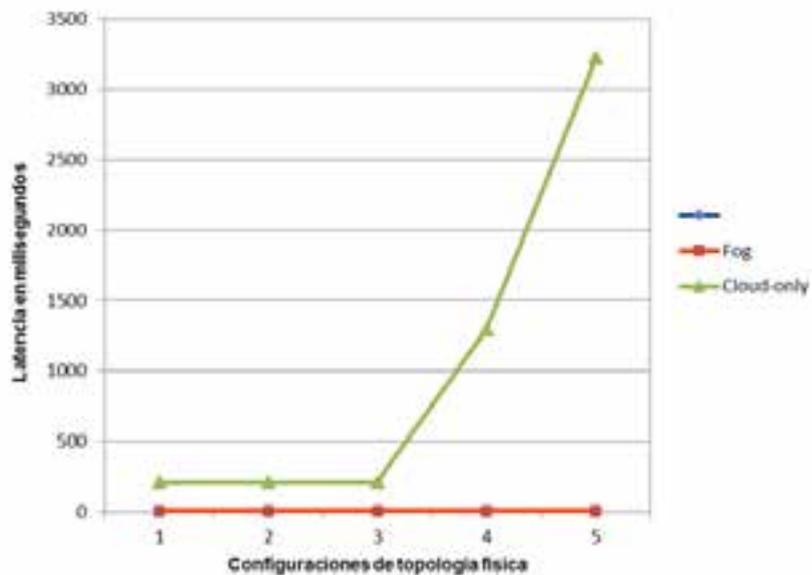


Figura 6. Resultados expuestos en la ventana de consola de IFogSim

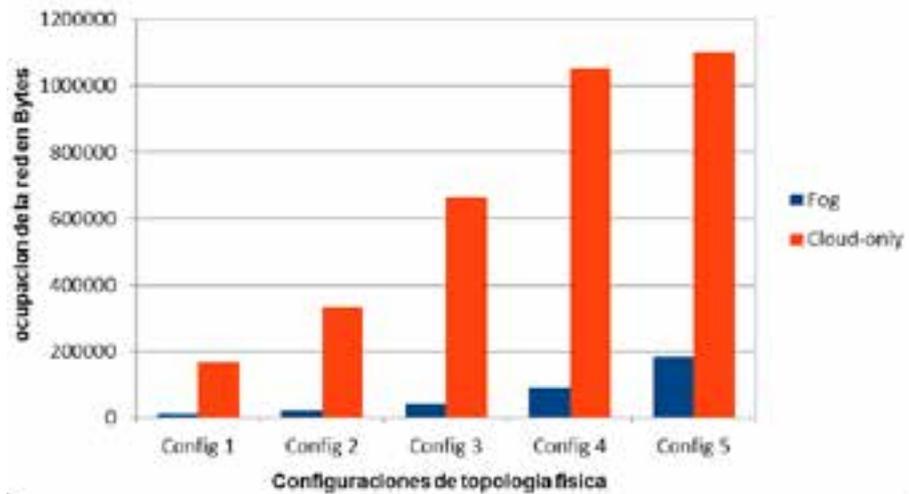


Gráfica 1. Comportamiento de la latencia para diferentes configuraciones

de Computación en la Niebla. Dentro de ellas la herramienta de simulación propuesta en este artículo, iFogSim se impone como la más factible para los intereses de simulación después de analizados ciertos parámetros de utilidad que permitieron comparar las diferentes herramientas existentes para este fin.

Se propuso un procedimiento de simulación de redes de computación en la niebla con la herramienta IFogSim. En este procedimiento se generalizan los principales aspectos a tener en cuenta en el diseño de escenarios de Computación en la Niebla en tres etapas: Formulación, Diseño y Simulación. En el desarrollo específico de estas etapas se pueden citar como aspectos de gran importancia el diseño de infraestructura, la modelación de aplicaciones y la definición de

Ocupacion de la red



Gráfica 2. Comportamiento de la ocupación de la red para diferentes configuraciones

las políticas de distribución de módulos de aplicación como los puntos medulares del procedimiento. El mismo se puso a prueba en el análisis de un caso de estudio de aplicación de video-vigilancia inteligente, se llevaron a cabo un grupo de pruebas al sistema modelado arrojando resultados satisfactorios de la aplicación del procedimiento propuesto.

Referencias bibliográficas

- Brogi, A., y Forti, S. (2018). *QoS-aware Deployment of IoT Applications Through the Fog. Thesis, University of Pissa.*
- Calheiros, R. N., y Ranjan, R. (2010.). *CloudSim: a toolkit for modeling and simulation of cloud computing environments and evaluation of resource provisioning algorithms.* Obtenido de Wiley Online Library: wileyonlinelibrary.co
- Cisco. (2017). *Cisco IoX Local Manager Reference Guide.* Obtenido de <http://www.cisco.com>
- Dianomic Systems^a. (2017). *FogLAMP Plugins.*
- Dianomic Systems^b. (2017). *FogLAMP at a Glance.*
- Díaz Guerrero, S. I., y Córdoba Carrero, J. A. (2018). Tesis. *Análisis del Paradigma Fog y Edge Computing.* Universidad Industrial de Santander Bucaramanga, España.
- Gámez Picó, L. (2015). *Procedimiento para la simulación de las SDN.* Tesis. Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, La Habana, Cuba.
- Gupta, H., y Vahid Dastjerdi, A. (2017). *IFogSim: A toolkit for modeling and simulation of resource management techniques in the Internet of Things, Edge and Fog computing environments. Software Practice and Experience.*

- Gupta, M. (2019). Fog Computing Pushing Intelligence to the Edge. *IJSTE - International Journal of Science Technology & Engineering*.
- Hamadah Rahman, F., y Wan Au, T. (2017). *A Performance Study of High-end Fog and Fog Cluster in iFogSim*.
- Hamadah Rahman, F., y Wan Au, T. (2017). *A Performance Study of High-end Fog and Fog Cluster in iFogSim*.
- Hao, Z., Novak, E., Yi, S., y Li, Q. (2017). Challenges and Software Architecture for Fog Computing. *IEEE Computer Society*, (17).
- Kuma, R., y Saho, G. (2014). Cloud Computing Simulation Using CloudSim. *MiniNet*, 8.
- Kumar Naha, R., Garg, S., Kopolou, D. G., y Prakash Jayarama, P. (2018). Fog Computing: Survey of Trends, Architectures, Requirements, and Research Directions. *arXiv*.
- Mahmud, R., y Buyya, R. (2017). *Modelling and Simulation of Fog and Edge Computing Environments using iFogSim Toolkit*. *Fog and Edge Computing: Principles and Paradigms*.
- Moraes López, M., y Higashin, W. A. (2017). *MyiFogSim: A Simulator for Virtual Machine Migration in Fog Computing*. *Cloud AM/HDC*.
- Mtshali, M., Dlamini, S., Adigun, M. O., y Mudali, P. (2018). *Fog computing as an enabler to the Next Generation Industrial Development*.
- Pérez Colomé, A. L. (2018). Tesis de Licenciatura. *Procedimiento para la implementación de la Computación en la Niebla en ciudades inteligentes*. Instituto Politécnico José Antonio Echevarría, La Habana, Cuba.
- Qayyum, T., y Waqar Malik, A. (2017). FogNetSim++: A Toolkit for Modeling and Simulation of Distributed Fog Environment. *JOURNAL OF LATEX CLASS*.
- RECAP. (2017). *Consortio RECAP*.
- Rodríguez, N., Murazzo, M., Chávez, S., y Martín, A. (2017). *Estudio de las Mejoras de Aplicar Fog Computing en la Distribución de Servicios en Cloud Computing*.
- Santos, L. A., y Geye, C. (2019). *Urban Computing Experiment by Mixing Fog Computing Simulation and Public Open Street Map Data*.
- Sillero Ros, J., Rodríguez, N., Monteveros, M., y Murazzo, M. (2018). *Análisis de las topologías IoT en Entornos Fog Computing mediante simulación*. Buenos Aires.
- Silva Filho, M. C., y Oliveira, R. L. (2019). *CloudSim Plus Documentation*.
- Toor, A., y ul Islam, S. (2019). *Energy efficient edge-of-thing*.

