

ACTUALIZACIÓN DEL ESTADO DEL ARTE DE LA COMPUTACIÓN EN LA NIEBLA

MSc. Liz Gámez Picó¹, DrC. Caridad Anías Calderón²

^{1,2} Universidad Tecnológica de La Habana. “José Antonio Echevarría”, CUJAE, Calle 114, No. 11901, e/ Ciclo Vía y Rotonda Marianao, La Habana, CP 19390.

¹e-mail: liz.gp@tele.cujae.edu.cu

²e-mail: cacha@tesla.cujae.edu.cu

RESUMEN

El paradigma de Computación en la Niebla surge como solución a la creciente demanda de las aplicaciones de Internet de las Cosas de menores tiempos de respuesta y mayor seguridad, así como por la proliferación de dispositivos, sensores y actuadores IoT. Actualmente representa un desafío mantenerse actualizado respecto al tema ya que la tecnología se encuentra en desarrollo y que se están realizando nuevas implementaciones de la misma. El presente trabajo tiene como objetivo realizar una actualización del estado del arte de la tecnología para lo cual se definieron características principales del paradigma FC, así como los avances, las tendencias de desarrollo, y su aplicación actual. Además, se analizó la arquitectura de referencia OpenFog, se detallaron las principales aplicaciones de esta tecnología, y se abordaron aspectos insuficientemente estudiados como la gestión, la implementación y la simulación de la FC.

PALABRAS CLAVES: Computación, niebla, aplicaciones, gestión.

SURVEY OF FOG COMPUTING

ABSTRACT

The Fog Computing paradigm emerges as a solution to the growing demand of Internet of Things applications for shorter response times and greater security, as well as the proliferation of IoT devices, sensors and actuators. Currently it is a challenge to stay updated on the subject since the technology is in development and new implementations of it are being carried out. The objective of this work is to update the state of the art of technology, for which the main characteristics of the FC paradigm were defined, as well as the advances, development trends, and its current application. In addition, the OpenFog reference architecture was analyzed, the main applications of this technology were detailed, and insufficiently studied aspects such as CF management, implementation and simulation were addressed.

INDEX TERMS: Computing, fog, applications, management.

1. INTRODUCCIÓN

El surgimiento del Internet de las Cosas (IoT, por sus siglas en inglés) y su posterior evolución para convertirse en el Internet de Todo (IoE por sus siglas en inglés), facilitó el desarrollo de nuevas tecnologías debido a su versatilidad y ubicación en variados escenarios, ejecutando tareas de forma automática y trabajando con información en tiempo real. Esto creó una avalancha de datos en la red, y el surgimiento de nuevas aplicaciones para esta tecnología, lo que condicionó la aparición de nuevos paradigmas que intentaban dar solución a las necesidades de almacenar y procesar gran cantidad de información, en el menor tiempo posible.

La ejecución centrada en la nube de las aplicaciones de IoT no logran cumplir completamente con dichas necesidades, ya que los centros de datos en la nube se encuentran generalmente distantes de los dispositivos IoT. Debido a ello, la idea de una extensión de la nube en la red de borde, introdujo el enfoque de computación en la niebla (FC, por sus siglas en inglés), permitiendo ejecutar estas aplicaciones más cerca de las fuentes de datos. De esta forma, la computación en la niebla puede mejorar el tiempo de entrega del servicio de las aplicaciones IoT y disminuir la

congestión de la red [1]. En el anexo 1 se muestra una comparativa, respecto a aspectos de interés entre la computación en la nube y la niebla.

La computación en la niebla combina varias áreas de investigación existentes, que incluyen computación en la nube, Internet de las cosas, computación en la nube distribuida, dispositivos móviles, redes de entrega de contenido, computación de servicios, entre otros. Como resultado, investigadores de diversos campos como las redes, nube, *softwares*, servicios y seguridad, están trabajando en FC[1]. En el presente informe de vigilancia Tecnológica se abordarán las características principales del paradigma FC, así como los avances, las tendencias de desarrollo, y su aplicación actual. Se analizará la arquitectura de referencia OpenFog, se detallarán las principales aplicaciones de esta tecnología, y se abordarán aspectos insuficientemente estudiados como la gestión, la implementación y la simulación de la FC.

Definición y características

La computación en la niebla, es un concepto introducido por la empresa Cisco, la que define: "La niebla extiende la nube más cerca de las cosas que producen y actúan sobre los datos de IoT. Los dispositivos, llamados nodos niebla, se pueden implementar en cualquier lugar con una conexión de red: en el piso de una fábrica, en la parte superior de un poste de energía, junto a una vía férrea, en un vehículo o en una plataforma petrolera. Cualquier dispositivo con computación, almacenamiento y conectividad de red puede ser un nodo niebla. Los ejemplos incluyen controladores industriales, conmutadores, enrutadores, servidores integrados y cámaras de video vigilancia" [3].

La niebla computacional no es más que una red de nodos interconectados entre ellos. Esto permite una mejor distribución geográfica, baja latencia, rápido procesamiento y geolocalización. Cada nodo niebla es un recurso para almacenamiento temporal. Entre sus funciones incluye, colección de datos, comunicaciones, procesamiento y administración. Comparada con los dispositivos de borde la niebla tiene más memoria o almacenamiento disponible, lo cual hace posible procesar significativos volúmenes de datos, proveniente de los dispositivos de borde. Por otro lado, cuando se necesite más recursos o la latencia no sea un requisito crítico, los datos se pueden enviar hacia la nube a través de las vías de comunicación disponibles. Los nodos nieblas son un puente entre los dispositivos IoT y la nube [4].

La computación en la niebla, por su cercanía a la capa más baja de la arquitectura de IoT, también se tiende a llamar, erróneamente, computación en el borde, pero hay diferencias importantes entre estos tipos de computación. La computación en la niebla involucra la combinación dinámica de recursos y fuentes de datos entre los múltiples dispositivos que residen entre la nube y los dispositivos IoT, mientras que la computación en el borde aprovisiona dispositivos en el borde de la red para realizar funciones predefinidas [2]. La niebla trabaja con la nube, mientras que el borde se define por la exclusión de la misma. La capa de niebla abarca una jerarquía, no solo en el perímetro de la red, sino en todas las áreas desde la nube hasta los dispositivos IoT, mientras el borde tiende a ser limitado a un pequeño número de capas. La computación en la niebla siempre usa la computación de borde, pero no al revés. Cabe señalar que varios autores utilizan diferentes terminologías, por ejemplo, computación en el borde, computación perimetral móvil o computación perimetral de múltiples accesos, para describir conceptos similares [3].

2. ARQUITECTURA DE REFERENCIA OPENFOG

El creciente interés sobre el tema de las redes de computación en la niebla hizo necesaria la creación de una arquitectura referencial, que sirviese como estándar para el despliegue de esta tecnología cumpliendo los requisitos y expectativas existentes en torno al paradigma. Con este fin se crea, en noviembre de 2015, el consorcio OpenFog formado por las principales instituciones de la industria como: ARM, Cisco, Dell, Intel, Microsoft, así como instituciones académicas con interés en el tema, actuando de forma complementaria a otros grupos de investigación de la IoT y las Tecnologías de la Información y las comunicaciones [4].

En el año 2017 fue publicada una arquitectura de referencia para FC por el consorcio antes mencionado con el objetivo de ayudar a ingenieros y desarrolladores, a entender las necesidades y particularidades propias de los sistemas de FC. Más tarde la IEEE anunciaría la utilización de esta arquitectura por el estándar IEEE 1934-2018 [5].

En junio de 2019 el consorcio de Internet Industrial de las Cosas (IIoT, por sus siglas en inglés) se fusionó con el consorcio OpenFog, con el objetivo de servir de guía a la industria en todo lo concerniente a inteligencia artificial y computación en la niebla y en el borde. Esta unión de organizaciones trabaja para aprovechar los mejores marcos y prácticas definidos, y la posibilidad de certificar a desarrolladores y sus implementaciones. Es importante destacar

ACTUALIZACIÓN DEL ESTADO DEL ARTE DE LA COMPUTACIÓN EN LA NIEBLA

que mantiene la misma arquitectura de referencia estandarizada para la FC, la IEEE 1934-2018. En la figura 1 se muestra el modelo de arquitectura propuesto por OpenFog [5].

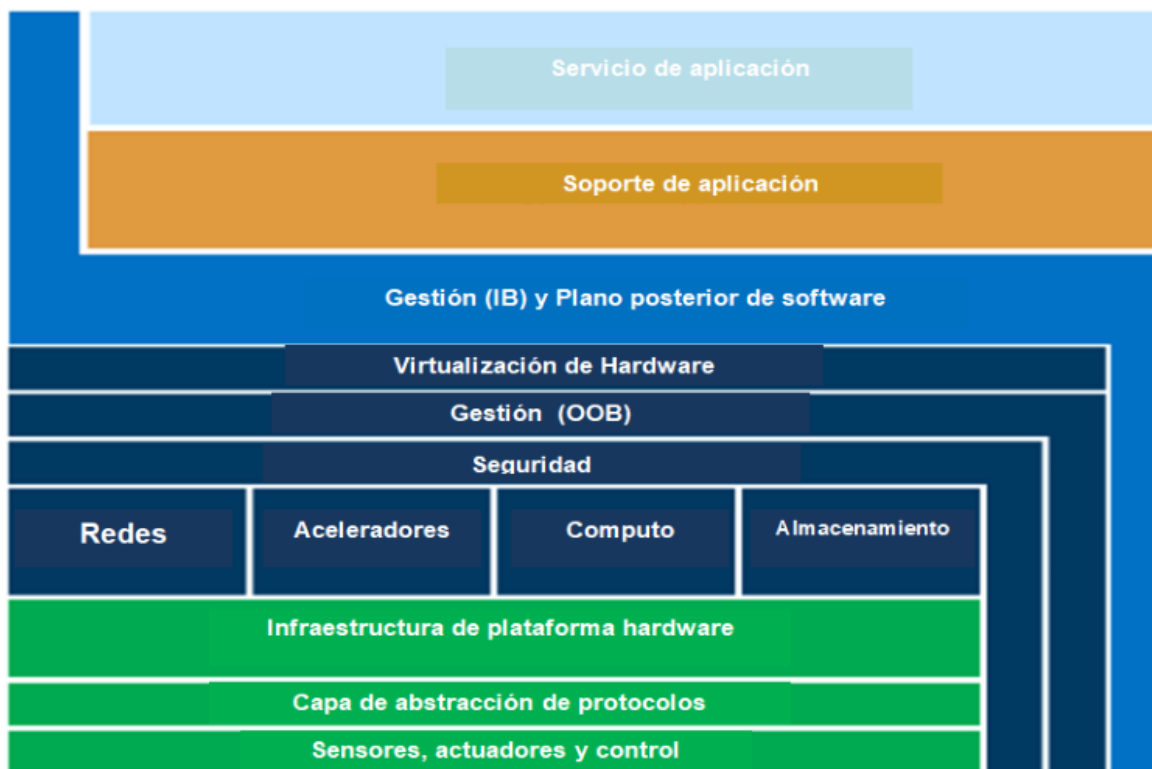


Figura 1: Descripción de Arquitectura de Referencia OpenFog [5].

La arquitectura de computación en la niebla definida por OpenFog se basa en un conjunto de principios básicos denominados pilares, los cuales representan los atributos claves que un sistema necesita incorporar para poder ser definido como sistema de FC [6], los cuales se resumen a continuación.

Pilar de seguridad: describe todos los mecanismos que se pueden aplicar para hacer un nodo de niebla seguro desde el hardware hasta la aplicación de software. Las implementaciones de seguridad tienen muchas descripciones y atributos diferentes tales como privacidad, anonimato, integridad, confianza, certificación, verificación y medición. El objetivo principal es garantizar que todos los elementos conectados tengan implementada la seguridad en todos los niveles, para poder establecer un canal totalmente confiable y seguro de extremo a extremo. En este caso se incluye la seguridad del nodo niebla, de la red y de los datos.

Pilar de escalabilidad: aborda las necesidades dinámicas de los despliegues de niebla para lograr adaptarse a las variaciones de carga de trabajo, rendimiento del sistema y demanda de recursos, entre otras.

Pilar de apertura: es esencial para lograr sistemas de computación en la niebla completamente interoperables en ecosistemas con soluciones de múltiples proveedores. Permite afirmar que es posible integrar equipos y software de múltiples proveedores y diferentes generaciones en una red unificada y sin fisuras.

Pilar de autonomía: permite que los nodos niebla, en todos los niveles de la jerarquía de una implementación, continúen ejecutando gran cantidad de funciones, ante las fallas de otros componentes del sistema. Algunas de las áreas típicas de autonomía en el borde incluyen autonomía de: descubrimiento, orquestación y gestión, seguridad, operación y ahorro de uso del ancho de banda.

Pilar de programabilidad: permite implementaciones altamente adaptables que incluyen soporte para la programación en las capas de software y hardware. La programabilidad de un nodo niebla incluye los siguientes beneficios: infraestructura adaptable a diversos escenarios, implementaciones eficientes en el uso de los recursos, seguridad mejorada, entre otras.

Pilar de confiabilidad, disponibilidad y capacidad de servicio (Reliability, availability and Serviceability, RAS por sus siglas en inglés): define que una implementación confiable continuará brindando la funcionalidad diseñada bajo condiciones de funcionamiento normales y adversas. La disponibilidad garantiza una gestión y una orquestación continua, generalmente medidas en tiempo de actividad. La facilidad de servicio del pilar RAS incluye instalación, actualización y reparación altamente automatizadas para implementar de manera eficiente la computación en la niebla a escala, y actualización del hardware o el software de forma autónoma.

Pilar de agilidad: se centra en transformar el volumen de datos generados por los sensores y actuadores en conocimientos prácticos. La agilidad también se ocupa de la naturaleza dinámica de los despliegues de niebla y la necesidad de responder rápidamente a cambios.

Pilar de jerarquía: dependiendo de la escala y la naturaleza del escenario que se aborda, la jerarquía puede ser una red de sistemas particionados inteligentes y conectados dispuestos en capas lógicas, o puede encontrarse en un solo sistema físico. Realizando un enfoque jerárquico, un sistema niebla puede ser dividido en diferentes capas: dispositivos IoT, nodos niebla para el monitoreo y control, y nodos niebla o nube para el soporte a la operación y soporte al negocio.

3. GESTIÓN DE LA COMPUTACIÓN EN LA NIEBLA

En los sistemas FC, es necesario gestionar los diferentes componentes distribuidos con capacidades de procesamiento, así como de centralizar y orquestar los flujos de información entre dichos componentes y las plataformas en la nube. La estandarización de la gestión de la FC aún constituye un reto, incluso para la OpenFog. En la bibliografía se destacan [4], [5], [6] y [7], como propuestas o soluciones que se acercan al tema de la gestión de la arquitectura de FC.

Las principales características de los entornos niebla que hacen que sea muy importante su gestión son:

- Numerosos dispositivos IoT para cada aplicación.
- Muchos de los dispositivos se encuentran limitados en recursos.
- Tecnologías heterogéneas.
- Servicios heterogéneos coexistiendo.
- Requerimientos de baja latencia
- Posibilidad de gran cantidad de nodos niebla y dispersos.
- Aspectos críticos de privacidad y seguridad.
- Limitaciones en cuanto a la energía
- Papel predominante del acceso inalámbrico.
- Aplicaciones en tiempo real.

La gestión de recursos de la niebla realiza operaciones administrativas como el despliegue, la virtualización, la supervisión de los nodos que la componen, el equilibrio de la carga, el auto escalado y el aprovisionamiento dinámico de recursos para garantizar la fiabilidad y la disponibilidad del servicio [8]. En este sentido se han realizado novedosas propuestas con entornos que integran blockchain en arquitecturas de computación en la niebla para cubrir diferentes áreas de la gestión, con resultados prometedores [9]. La mayoría de estas soluciones utilizan blockchain para la gestión de datos y la autenticación con el fin de resolver los problemas de seguridad y privacidad y proporcionar una alta fiabilidad [10]. Uno de los resultados más relevantes es un orquestador de recursos para entornos de computación en la niebla basado en blockchain, que se está desarrollando en el grupo de Redes y Arquitecturas de Altas Prestaciones (RAAP) del Instituto de Investigación en Informática de Albacete, denominado HIDRA (heterogeneous, interoperable and distributed architecture) [11]. Su principal objetivo es la orquestación de aplicaciones que se ejecutan en un entorno de computación de niebla, empleando para ello la tecnología blockchain y los contratos inteligentes. Los contratos inteligentes son un recurso también importante que pueden desplegarse entre los clientes y los proveedores de servicios para validar el cumplimiento de los acuerdos de nivel de servicio (SLA, por sus siglas en inglés) para el uso de recursos bajo demanda, en un entorno de FC [12].

Una de las áreas de la gestión más importantes en el despliegue de la computación en la niebla es la seguridad, donde los mecanismos de seguridad a implementar dependen del modelo de amenazas y del valor del activo a proteger, pudiendo existir diferentes niveles de seguridad. Estos van desde la protección física a los dispositivos, la protección al software y la seguridad de las aplicaciones, hasta la protección a la red. Además de los mecanismos de seguridad antes planteados, un aspecto importante a tener en cuenta es la gestión de la seguridad que considera un conjunto de aspectos, entre los que se destacan las herramientas de gestión a utilizar y la capacitación del personal, los cuales son vitales para proveer una efectiva y proactiva gestión, que evitará la ocurrencia de afectaciones a la seguridad del sistema niebla [13]. El éxito del despliegue de modelos basados en la niebla requiere un marco de orquestación que pueda, de forma simple, mantener y mejorar la seguridad de los datos y la fiabilidad del sistema [14].

En [15] se realiza una revisión de los principales problemas de seguridad y privacidad que se encuentran en las implementaciones de computación en la niebla, destacándose ataques como el de control de acceso [16], denegación de servicio [17], sobre los elementos virtualizados [18] y sobre la raíz de confianza [19].

Herramientas *software* para la implementación de la computación en la niebla

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

Durante la búsqueda bibliográfica se han analizado diferentes plataformas IoT, haciendo especial énfasis en las de código abierto entre las cuales se pueden citar: All Joyn [20], Kaa[21], IoTivity[22], Foglamp[23], Nimbis, AWS IoT, oneM2M, Bluemix, Brillo, Open HAB, OSN, CitySDK, Riot OS, Sentilo, SOGIA2, Contiki OS, FIWARE, IoTSys, ThingSpeak, iPlace, Tiny OS, , IPSO Alliance, i-SCOPE, Thingsquare, ThingWorx y Xively by LogMeIn. Destacándose las cuatro primeras por ser las más referenciadas y de las cuales en el anexo 2 se resume una tabla comparativa. Dentro de los softwares propietarios se destacan: Nebbiolo FogOS, FogHorn y Cisco IoX, siendo este último de los más referenciados, a pesar de no ser de código abierto. Estas herramientas son plataformas que permiten ejecutar varias aplicaciones niebla, aunque también existen plataformas más específicas para determinadas aplicaciones.

La simulación es una herramienta potente en el desarrollo de las tecnologías y en el caso de la FC, adquiere vital importancia dado lo relativamente novedoso del tema. Existen un grupo de herramientas de simulación para las redes de FC, en [24] y [25] se analizan un amplio grupo de estas, algunas útiles por su alcance como CloudSim [26] y MiniNet [27], 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 la virtualización de hardware para redes de computación en la niebla que se desarrolla en [28]. Otras herramientas de simulación más específicas para los entornos niebla son iFogSim[29], FogNetSim++[25] y FogTorch[39], las cuales se comparan en [30], teniendo en cuenta elementos como la escalabilidad, la usabilidad, las métricas que se obtienen, el lenguaje de desarrollo, si es de código abierto, protocolos que soporta y la documentación. De acuerdo con esto se concluye que la herramienta iFogSim es la más idónea para entornos FC. Adicionalmente en [31] se comparan cuatro simuladores para FC: iFogSim, MyiFogSim[32], EdgeCloudSim[33] y YAFS[34]. La comparación se basa tanto en la información disponible públicamente sobre los simuladores como en la experiencia de los autores con su uso práctico. Los resultados muestran fortalezas y debilidades de los simuladores, y también algunos comportamientos potencialmente anómalos.

4. APLICACIONES DE LA COMPUTACIÓN EN LA NIEBLA

Las soluciones de FC van en aumento, destacándose nuevos y diversos casos de uso en: ciudades inteligentes, en la salud [35], aplicación en el transporte: carros inteligentes y control de tráfico, escenario de vigilancia y seguridad visual, construcciones inteligentes, para el sistema inteligente de monitoreo de tuberías, entre otras. A continuación, se detallan algunas características de las aplicaciones que se consideran con mayor impacto.

Aplicaciones en sistemas de redes de sensores

Entre las aplicaciones que comúnmente cubren estas redes de sensores en la industria del petróleo y el gas, que generalmente requieren un enfoque de computación en la niebla se encuentran [36]:

Control de nivel de tanques: Se basa en el acoplamiento de un transmisor inalámbrico con un sensor de nivel para controlar que no se sobrepasen los niveles máximos permitidos en los tanques, o conocer su porcentaje de llenado.

Presión: Los componentes fundamentales de todas las perforadoras de petróleo y gas son las tuberías (tubing) y las carcasas o tuberías de revestimiento (casing). Estos elementos están hechos con metales especiales, que poseen comportamientos peculiares en cuanto a resistencia y desempeño ante altas presiones. Sin embargo, todo metal alcanza un punto en el que la presión ejercida sobre él, excede su capacidad de resistencia. Por lo tanto, es de vital importancia el monitoreo de la presión en las tuberías y carcasas. Empleando sistemas FC se pueden planificar y tomar medidas con carácter proactivo para evitar derrames y explosiones, que puedan provocar desastrosas consecuencias para el medio ambiente, pérdida de vidas humanas y de recursos.

Temperatura: En este sector la temperatura es típicamente medida con una Resistencia Detectora de Temperatura (RTD, por sus siglas en inglés) la cual es emparejada con el transmisor inalámbrico para monitorear la temperatura de los fluidos, gases y maquinarias.

Otra importante y novedosa aplicación en este sentido es la nube de sensores sociales (SSC, por sus siglas en inglés) que se combina con las redes sociales, la red de sensores inalámbricos, la computación en la nube y la computación en la niebla [37].

Aplicación en el transporte: autos inteligentes y control de tráfico [38]

Los automóviles autónomos generan múltiples terabytes de datos todos los días, desde los sistemas de Medición y Detección de Objetos mediante láser (LIDAR por sus siglas en inglés), el Sistema Global de Posicionamiento (GPS, por sus siglas en inglés), cámaras, etc. Cuando el automóvil inteligente se combina con otras infraestructuras inteligentes, un modelo solo en la nube no funcionará, requiriéndose un enfoque de computación en la niebla. Muchos de los requisitos que se describen para esta aplicación, también se aplica a otras áreas de transporte inteligente, como barcos, trenes, camiones, buses y drones.

Aplicación en sistema de videovigilancia [39]

Las cámaras de vigilancia y seguridad se encuentran desplegadas por todo el mundo, garantizando la seguridad de los activos físicos de entidades, de las personas y de áreas de interés. Estas cámaras tienen la capacidad de generar una gran cantidad de datos, que pueden superar los terabytes por día para una sola cámara. Los modelos de nube tradicionales que se implementaron para cámaras de baja resolución no son escalables con las cámaras de 1080p y 4K debido a los requerimientos de alta disponibilidad y al costo del transporte de la información a través de la red. Además, las decisiones sobre la seguridad deben realizarse en la cámara o en el lugar de instalación y no se puede realizar únicamente en la nube. Las cámaras que capturan imágenes de personas, lugares o cosas y están estrechamente vinculadas a la toma de decisiones, requieren un mayor nivel de seguridad de los activos de software y hardware de la cámara.

Las ciudades inteligentes, los hogares inteligentes, las tiendas minoristas, el transporte público, la fabricación y las empresas dependen cada vez más de los sensores de las cámaras para proteger a las personas, identificar el acceso no autorizado y aumentar la seguridad, la confiabilidad y la eficiencia. El gran ancho de banda de los datos visuales que se recopilan en una red a gran escala hace que no sea práctico transportar todos los datos a la nube para obtener información en tiempo real. Un espacio de aplicación particularmente exigente es la vigilancia de instalaciones de alto valor con muchas personas y objetos moviéndose a través de ellas.

Las implementaciones a escala de ciudad que incluyen colocar cámaras en los semáforos y otras implementaciones de cámaras en áreas remotas no tienen conectividad de gran ancho de banda a la nube para cargar el video recopilado. El monitoreo en tiempo real y la detección de anomalías como por ejemplo intrusos en un edificio, la caída de un ciudadano mayor o el fallo de encendido de un equipo de fabricación, plantean requisitos estrictos de baja latencia en los sistemas de vigilancia. Las bajas demoras son importantes desde el punto de vista tanto de la detección como de la respuesta.

Además, se deben abordar las preocupaciones de privacidad cuando se usa una cámara como sensor que recopila datos de imágenes para que las imágenes no revelen la identidad de una persona o revelen información contextual confidencial a entidades no autorizadas, como, por ejemplo, propiedad intelectual en una planta de fabricación.

Aplicación en ciudades inteligentes [13]

Las ciudades inteligentes generalmente engloban un conjunto de aplicaciones de computación en la niebla como son: control de tráfico y autos inteligentes, videovigilancia pública y edificios inteligentes [40].

Un edificio inteligente puede contener miles de sensores para medir diversos parámetros de su funcionamiento: temperatura, humedad, puertas abiertas o cerradas, lectores de tarjeta de acceso, nivel de ocupación de estacionamiento, seguridad, ascensores, calidad del aire, etc. Estos sensores captan datos en intervalos de tiempos predefinidos y transmiten esta información a un servidor de almacenamiento local. Una vez que se procesa esta información, los actuadores ajustarán los parámetros de funcionamiento a los valores adecuados.

Un nodo niebla en un edificio podría ser responsable de:

- Realizar funciones de control de clima e iluminación.
- Realizar funciones de seguridad del edificio.
- Proporcionar una infraestructura de cómputo y de almacenamiento para los residentes del edificio.

Despliegue de casos de uso de computación en la niebla

La implementación de FC representa un gran desafío debido a lo complejo de los escenarios, dado por la heterogeneidad y movilidad de los dispositivos IoT, gran variedad de aplicaciones o casos de uso, así como la escalabilidad, interoperabilidad, calidad de servicio, gestión de recursos y microservicios que se requiere para estos sistemas. En [41] se presentó un procedimiento para el despliegue de variados casos de uso de computación en la niebla, el cual cuenta con seis etapas bien definidas, en cada una de las cuales se detallaron aspectos de interés a considerar y recomendaciones. En el procedimiento se plantea que primeramente deben quedar descritos de forma

ACTUALIZACIÓN DEL ESTADO DEL ARTE DE LA COMPUTACIÓN EN LA NIEBLA

clara y precisa todos los requisitos y características generales del proyecto, para posteriormente analizar si se requiere un enfoque de FC. Se realiza la selección de los elementos básicos que componen la red niebla, como es el caso de los sensores y actuadores, nodos niebla, la plataforma en la nube, los protocolos de comunicación, las tecnologías de acceso e interconexión y el sistema de gestión. Posteriormente se deben resumir todos los elementos que integran la solución y definir la cantidad de nodos niebla necesarios. Se propone el uso del simulador iFogSim y se destacan tres fases para la simulación de la solución: formulación, diseño y simulación. Una vez finalizado el diseño lógico y la simulación se realiza la documentación de la red y se definen las configuraciones correspondientes en cada una de las herramientas, lo cual será utilizado posteriormente en el despliegue del sistema FC. Finalmente se realizan pruebas de campo para comprobar el correcto funcionamiento del diseño propuesto antes de su despliegue total, en el anexo 3 se resumen algunas posibles pruebas a realizar. El sistema de FC debe ser gestionado y monitoreado de forma continua para garantizar su correcto funcionamiento. La optimización continua de métricas como la latencia, ancho de banda, consumo de energía, entre otras, juega un rol fundamental en una implementación de FC [42].

Caso de uso en la Industria energética [43]

En los últimos años la industria 4.0 enfocada en el desarrollo de tecnología inteligente ha experimentado una revolución con el desarrollo de las IoT, y el uso de la computación en la niebla. El siguiente ejemplo mostrado evidencia la aplicación de la FC en la industria energética para minimizar el consumo de la energía en una fábrica inteligente. El flujo de tareas de tipo múltiple se ingresa desordenadamente y tanto el consumo de energía como la carga de trabajo varía mucho entra la celda de fabricación. Este caso propone un método de programación y balance de carga consciente de la energía (ELBS, por sus siglas en inglés), utilizando nodos niebla a partir de la perspectiva de consumo de energía de equipo, que tiene como objetivo lograr el equilibrio de carga y la programación de los equipos sometidos a la multitarea y multiobjetos.

En primer lugar, el modelo de la energía consciente relacionada con la fábrica inteligente se establece en los nodos niebla y luego se utiliza para cuantificar el consumo de energía en relación con la carga de trabajo del equipo. En segundo lugar, se establece una función de optimización del equilibrio de carga teniendo en cuenta el consumo de energía del equipo. Se utiliza el algoritmo de optimización de enjambre de partículas, para obtener una solución óptima. Finalmente, se introduce un sistema multiagente, para guiar la programación de la carga de trabajo del equipo con el mecanismo de programación de tareas.

En cuanto a la arquitectura que presenta el sistema aplicado a la fábrica inteligente, la plataforma FC brinda disimiles funciones informáticas, formando una arquitectura más amplia, proporcionando nuevas herramientas inteligentes para los servicios de computación. En la figura.2, se muestra cómo se implementan los nodos niebla en el borde del equipo, y como se construye un modelo basado en los nodos, para el equipo.

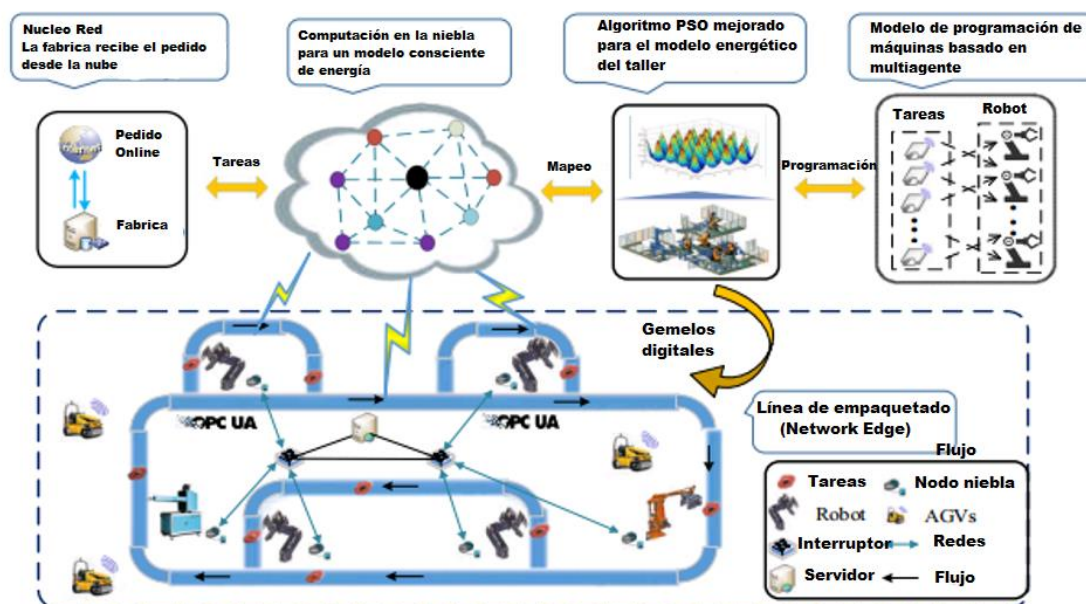


Figura 2. Arquitectura de FC para ELBS en fábrica inteligente [43].

5. CONCLUSIONES

La computación en la niebla es un enfoque novedoso que permite mejorar el tiempo de entrega del servicio de las aplicaciones IoT y disminuir la congestión de la red. El desarrollo de la tecnología y las investigaciones realizadas al respecto justifican la necesidad de realizar una vigilancia tecnológica del tema. La contribución principal de este

informe es la actualización del estado del arte de la FC, así como profundizar en los aspectos insuficientemente estudiados como es el caso de la gestión, la simulación y la implementación de la tecnología.

Es importante destacar que el estándar IEEE 1934-2018 que define la arquitectura de referencia para la FC, describe en detalle cada una de las capas de dicha arquitectura lo cual facilita el despliegue de casos de uso. La estandarización de la gestión de la FC aún constituye un reto, incluso para la OpenFog Consortium. Entre las principales aplicaciones en las que se emplea la arquitectura de FC destacan: los sistemas de redes de sensores, autos inteligentes y control de tráfico, sistemas de video-vigilancia y ciudades inteligentes. Los *softwares* niebla se enmarcan en los tres niveles superiores de la arquitectura de referencia OpenFog y en él se implementan las principales funcionalidades de los sistemas FC. En la bibliografía se detallan herramientas tanto propietarias, como de software libre, que permiten ejecutar varias aplicaciones niebla, aunque también existen herramientas más específicas para aplicaciones niebla en particular. La simulación es una herramienta potente en el desarrollo de las tecnologías y en el caso de la FC, adquiere vital importancia dado lo relativamente novedoso que es.

RECONOCIMIENTOS

Los autores desean agradecer la oportunidad de colaboración brindada por la empresa Tecnomática respecto al desarrollo del tema de investigación, de conjunto con el grupo de investigación de Telemática de la Universidad Tecnológica de La Habana. “José Antonio Echevarría”, CUJAE.

REFERENCIAS

- [1] Z. Mann, «Notions of architecture in fog computing», *Computing*, vol. 103, pp. 1-23, ene. 2021, doi: 10.1007/s00607-020-00848-z.
- [2] W. D. X. M. H. J. F. W. J. L. Desheng Wang, «M iFo: A novel edge network integration framework for fog computing», 2018.
- [3] Z. Mann, «Optimization problems in fog and edge computing», en *Fog and edge computing: principles and paradigms*, Wiley, 2019, pp. 103-121.
- [4] Shanhe Yi, Zijiang Hao, Zhengrui Qin, and Qun Li y Dept of Computer Science, The College of William and Mary, «Fog Computing: Platform and Applications», *Third IEEE Workshop Hot Top. Web Syst. Technol.*, 2015.
- [5] Amir Sinaeepourfard, Jordi Garcia, Xavier Masip-Bruin, Eva Marin-Tordera, «A Novel Architecture for Efficient Fog to Cloud Data Management in Smart Cities», *IEEE*, 2017.
- [6] JAVIER PINZÓN CASTELLANOS, «IMPLEMENTACIÓN DE UNA ARQUITECTURA FOG COMPUTING», UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BUCARAMANGA – UNAB FACULTAD DE INGENIERÍA MAESTRÍA EN GESTIÓN, APLICACIÓN Y DESARROLLO DE SOFTWARE BUCARAMANGA, 2020.
- [7] Renyu Yang¹², Zhenyu Wen³, David McKee¹, Tao Lin⁴, Jie Xu¹², Peter Garraghan⁵, «Fog Orchestration and Simulation for IoT Services», 2018.
- [8] B. Varghese y Hong, «Resource Management in Fog/Edge Computing : A Survey on Architectures, Infrastructure, and Algorithms.», *ACM Comput*, 2019, doi: <https://doi.org/10.1145/3326066>.
- [9] H. Baniata y A. Kertesz, «A Survey on Blockchain-Fog Integration Approaches», *IEEE Access*, 2020, doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2999213>.
- [10] P. Singh, A. Nayya, y A. Kaur, «Blockchain and Fog Based Architecture for Internet of Everything in Smart Cities.», *Future Internet*, 2020, doi: <https://doi.org/10.3390/fi12040061>.
- [11] C. Núñez-Gómez, B. Caminero, y C. Carrión, «HIDRA: A Distributed Blockchain- Based Architecture for Fog/Edge Computing Environments», *IEEE Access*, 2021, doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3082197>.
- [12] P. Kochovski y V. Stankovski, «Smart Contracts for Service-Level Agreements in Edge-to-Cloud Computing», *J. Grid Comput.*, 2020, doi: <https://doi.org/10.1007/s10723-020-09534-y>.
- [13] Alejandro Luar Pérez Colomé, Caridad Anías Calderón, Tatiana Delgado Fernández, «Procedimiento para la implementación de la computación en la niebla en ciudades inteligentes», *RIELAC*, vol. 42, pp. 45-57, 2021.
- [14] M. Hussain y M. Alam, *Fog and Edge Computing: Principles and Paradigms*. 2019.
- [15] A. M. Alwakeel, «An Overview of Fog Computing and Edge Computing Security and Privacy Issues», *Sens*. 2021, dic. 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/s21248226>.
- [16] Y. Ren, F. Zhu, J. Qi, J. Wang, y A. K. Sangaiah, «Identity Management and Access Control Based on Blockchain under Edge Computing for the Industrial Internet of Things», *Appl. Sci.*, vol. 9, n.º 10, 2019, doi: 10.3390/app9102058.

- [17] B. Paharia y K. Bhushan, «A Comprehensive Review of Distributed Denial of Service (DDoS) Attacks in Fog Computing Environment», en *Handbook of Computer Networks and Cyber Security.*, Springer, 2020. [En línea]. Disponible en: https://doi.org/10.1007/978-3-030-22277-2_20
- [18] Z. Tao *et al.*, «A Survey of Virtual Machine Management in Edge Computing», *Proc. IEEE*, vol. 107, n.º 8, pp. 1482-1499, 2019, doi: 10.1109/JPROC.2019.2927919.
- [19] J. Yuan y X. Li, «A Reliable and Lightweight Trust Computing Mechanism for IoT Edge Devices Based on Multi-Source Feedback Information Fusion», *IEEE Access*, vol. 6, pp. 23626-23638, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2831898.
- [20] *All Joyn*. 2018. [En línea]. Disponible en: <https://github.com/alljoyn/alljoyn.github.com/wiki>
- [21] «Kaa Github».
- [22] KAJSA ELFSTRÖM, «Evaluation of IoTivity: A Middleware Architecture for the Internet of Things», master thesis, KTH School of Information and Communication Technology, 2017.
- [23] *FogLAMP at a Glance*. Dianomic Systems, 2017. [En línea]. Disponible en: https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&url=https://dianomic.com/platform/foglamp/&ved=2ahUKewjJuf_8svfzAhXLQjABHS87D90QtwJ6BAGEEAE&usq=AOvVaw3dGXnkUVN_baFdSIIV9PcG
- [24] RANESH KUMAR NAHA, SAURABH GARG, DIMITRIOS GEORGEKOPOLOU, y PREM PRAKASH JAYARAMA, «Fog Computing: Survey of Trends, Architectures, Requirements, and Research Directions», jul. 2018.
- [25] Tariq Qayyum, y Asad Waqar Malik., «FogNetSim++: A Toolkit for Modeling and Simulation of Distributed Fog Environment», *JOURNAL OF LATEX CLASS*, dic. 2017.
- [26] Rodrigo N. Calheiros, y Rajiv Ranjan., «CloudSim: a toolkit for modeling and simulation of cloud computing environments and evaluation of resource provisioning algorithms», 2010.
- [27] L. Becerra Sanchez, B. Valencia Suárez, S. Santacruz-Pareja, y J. Padilla-Aguilar, «Uso de Mininet y Openflow 1.3 para la enseñanza e investigación en redes IPv6 definidas por software», *Rev. Educ. En Ing.*, vol. 12, p. 89, jul. 2017, doi: 10.26507/rei.v12n24.794.
- [28] Antonio A. T. R. Coutinho, y Fabiola Greve, «An Architecture for Fog Computing Emulation», 2017.
- [29] Harshit Gupta, y Amir Vahid Dastjerdi, «IFogSim: A toolkit for modeling and simulation of resource management techniques in the Internet of Things, Edge and Fog computing environments», 2017.
- [30] L. Gámez, C. Calderón, Y. Rollón, y D. Frómata, «PROCEDIMIENTO DE SIMULACIÓN DE REDES DE COMPUTACIÓN EN LA NIEBLA», *Rev. Tono*, vol. 16, 2020.
- [31] C. Kunde y Z. Á. Mann, «Comparison of Simulators for Fog Computing», en *Proceedings of the 35th Annual ACM Symposium on Applied Computing*, New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2020, pp. 1792-1795. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1145/3341105.3375771>
- [32] M. M. Lopes, W. A. Higashino, M. A. M. Capretz, y L. F. Bittencourt, «MyiFogSim: A Simulator for Virtual Machine Migration in Fog Computing», *Companion Proc. The10th Int. Conf. Util. Cloud Comput.*, 2017.
- [33] C. Sonmez, A. Ozgovde, y C. Ersoy, «EdgeCloudSim: An environment for performance evaluation of Edge Computing systems», en *2017 Second International Conference on Fog and Mobile Edge Computing (FMEC)*, may 2017, pp. 39-44. doi: 10.1109/FMEC.2017.7946405.
- [34] I. Lera, C. Guerrero, y C. Juiz, «YAFS: A Simulator for IoT Scenarios in Fog Computing», *IEEE Access*, vol. 7, pp. 91745-91758, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2927895.
- [35] T. Nguyen, I. B. Dhaou, y M. Ali, «Energy efficient fog-assisted IoT system for monitoring diabetic patients with cardiovascular disease», en *FutureGenerationComputerSystems*, Elsevier, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.future.2018.10.0>
- [36] Arif Ahmed, HamidReza Arkian, Davaadorj Battulga, Ali J. Fahs, Mozhdeh Farhadi, Dimitrios Giouroukis, y Adrien Gougeon, Felipe Oliveira Gutierrez, Guillaume Pierre, Paulo R. Souza Jr, Mulugeta Ayalew Tamiru, Li Wu, «Fog Computing Applications: Taxonomy and Requirements», 2019.
- [37] J. Liang, M. Zhang, y V. C. M. Leung, «A Reliable Trust Computing Mechanism Based on Multisource Feedback and Fog Computing in Social Sensor Cloud», *IEEE Internet Things J.*, vol. 7, n.º 6, pp. 5481-5490, 2020, doi: 10.1109/JIOT.2020.2981005.
- [38] «“Transportation scenario: Smart cars and traffic control (3.1),”» 2017. [En línea]. Disponible en: https://www.iiconsortium.org/pdf/OpenFog_Reference_Architecture_2_09
- [39] «“Visual security and surveillance scenario (3.2),”» 2017. [En línea]. Disponible en: https://www.iiconsortium.org/pdf/OpenFog_Reference_Architecture_2_09_
- [40] «Fog Use Case Scenarios: Smart Buildings», 2017. [En línea]. Disponible en: https://www.iiconsortium.org/pdf/OpenFog_Reference_Architecture_2_09_
- [41] L. Gámez, «“Procedimiento para el despliegue de casos de uso de computación en la niebla”», CUJAE.
- [42] J. Bellendorf y Z. Á. Mann, «Classification of Optimization Problems in Fog Computing», *Future Gener Comput Syst*, vol. 107, n.º C, pp. 158-176, jun. 2020, doi: 10.1016/j.future.2020.01.036.

[43] J. Wan, B. Chen, S. Wang, M. Xia, D. Li, y C. Liu, «Fog Computing for Energy-Aware Load Balancing and Scheduling in Smart Factory», n.º IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, doi: .
<https://doi.org/10.1109/TII.2018.2818932>.

SOBRE LOS AUTORES

Liz Gámez Picó, Ingeniera en Telecomunicaciones, Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría”, La Habana, Cuba, liz.gp@tele.cujae.edu.cu, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2992-2060>.

Caridad Emma Anías Calderón, Ingeniera en Telecomunicaciones, Doctora en Ciencias Técnicas, Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría”, La Habana, Cuba, cache@tesla.cujae.edu.cu, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5781-6938>.

CONFLICTO DE INTERESES

No existen conflictos de intereses.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

- **Autor 1:** 70% conceptualización, preparación, creación y desarrollo del artículo
- **Autor 2:** 30% revisión crítica de cada una de las versiones del borrador del artículo y aprobación de la versión final a publicar, contribución a la idea y organización del artículo, sugerencias acertadas para la conformación de la versión final

Esta revista provee acceso libre inmediato a su contenido bajo el principio de hacer disponible gratuitamente investigación al público. Los contenidos de la revista se distribuyen bajo una licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 Unported License. Se permite la copia y distribución de sus manuscritos por cualquier medio, siempre que mantenga el reconocimiento de sus autores y no se haga uso comercial de las obras.

