

## Cómputo en la niebla aplicado a la manufactura inteligente bajo el contexto de la industria 4.0: Desafíos y oportunidades

### Fog computing applied to intelligent manufacturing in the Industry 4.0 context: Challenges and opportunities

ALONSO-CALPEÑO, Mariela Juana†\*, SANTANDER-CASTILLO, Julieta, RAMÍREZ-CHOCOLATL, Yuridia y ALANIS-TEUTLE, Raúl

*Instituto Tecnológico Superior de Atlixco*

ID 1<sup>er</sup> Autor: *Mariela Juana, Alonso-Calpeño* / ORC ID: 0000-0001-7276-1923

ID 1<sup>er</sup> Coautor: *Julieta, Santander-Castillo* / ORC ID: 0000-0002-6998-471X

ID 2<sup>do</sup> Coautor: *Yuridia, Ramírez-Chocolatl* / ORC ID: 0000-0002-7840-098

ID 3<sup>er</sup> Coautor: *Raúl, Alanis-Teutle* / ORC ID: 0000-0003-1852-1149

DOI: 10.35429/JCA.2019.11.3.16.27

Recibido Abril 20, 2019; Aceptado Junio 30, 2019

#### Resumen

El cómputo en la nube ofrece una alta capacidad de procesamiento de datos a nivel de servidor, mientras que el cómputo en la niebla funciona utilizando los nodos en el borde de la red, lo que habilita el procesamiento de datos en tiempo real con baja latencia y ubicuidad mejorada, por lo que puede contribuir en aplicaciones del Internet Industrial de las Cosas (IIoT). En este artículo se exponen los desafíos técnicos que han surgido al implementar el IIoT, y cómo es que el paradigma del cómputo en la niebla está ayudando a resolver algunos de ellos. Para ello, se ha realizado una revisión de artículos científicos en las bases de datos Google Scholar, y Web of Science utilizando palabras clave. Los resultados muestran que hay diversos desafíos en lo que respecta a interoperabilidad, criticidad mixta, latencia, tolerancia a fallas, escalabilidad, Integración horizontal y vertical, seguridad funcional, los sistemas industriales heredados y, la eficiencia energética. Se reportan las principales tendencias para afrontar estos desafíos. Este artículo propone una serie de áreas de oportunidad para fines de investigación y desarrollo de posibles soluciones.

**Internet Industrial de las cosas, Cómputo en la niebla, Industria 4.0**

#### Abstract

Cloud computing offers high server-level data processing capacity, while fog computing works using nodes at the edge of the network, enabling real-time data processing with low latency and improved ubiquity, so it can contribute on Industrial Internet of Things (IIoT) applications. This article discusses the technical challenges that have arisen in implementing the IIoT, and how the fog computing paradigm is helping to solve some of them. For this, a review of scientific articles in the Google Scholar and Web of Science databases has been carried out using keywords. The results show that there are various challenges related to interoperability, mixed criticality, latency, fault tolerance, scalability, horizontal and vertical integration, functional safety, legacy industrial systems, and energy efficiency. The main trends to face these challenges are reported. This article proposes a series of opportunity areas for research and development of possible solutions.

**Industrial Internet of things, Fog computing, Industry 4.0**

**Citación:** ALONSO-CALPEÑO, Mariela Juana, SANTANDER-CASTILLO, Julieta, RAMÍREZ-CHOCOLATL, Yuridia y ALANIS-TEUTLE, Raúl. Cómputo en la niebla aplicado a la manufactura inteligente bajo el contexto de la industria 4.0: Desafíos y oportunidades. *Revista de Cómputo Aplicado*. 2019, 3-11: 16-27

† Investigador contribuyendo como primer Autor.

\* Correspondencia del Autor (mariela.alonso@itsatlixco.edu.mx)

## Introducción

La implementación de tecnologías disruptivas en las organizaciones se deriva de la transformación en la visión de una industria y, por tanto, del diseño de estrategias corporativas para llegar a ella.

La industria manufacturera requiere de transformaciones constantes en sus procesos para lograr ventajas competitivas dentro de las cadenas globales de valor. Las necesidades emergentes en esta industria se refieren, entre otras, a disminuir el ciclo de vida de los productos y atender la creciente demanda de productos personalizados. Esto exige una mayor complejidad en los procesos de producción (Vaidya, Ambad, & Bhosle, 2018), ya que implica lograr una mayor rapidez, flexibilidad, granularidad, precisión y eficiencia en los mismos (Trejo, 2019).

La industria 4.0, tiene como uno de sus fines lograr que los sistemas de manufactura se conviertan en “inteligentes” para lograr procesos flexibles, autónomos y reconfigurables (Vaidya et al., 2018). Esto se logra debido a que las aplicaciones que implementa, permiten acceso a la información de manera transparente y oportuna desde cualquier ubicación, lo que ofrece una visión completa de la cadena de producción y permite mejorar la calidad del producto así como el nivel del servicio, al realizar ajustes instantáneos ante cualquier desviación (Riahi Sfar, Natalizio, Challal, & Chtourou, 2018).

Para hacer posibles estos beneficios, uno de los requisitos imperantes es la capacidad de obtención, procesamiento, y almacenaje de una gran cantidad de datos en tiempo real. Ello implica una creciente demanda de datos y la explosión en la cantidad de dispositivos de detección conectados y, también, restricciones en términos de comunicación, batería y potencia de cómputo (Peralta et al., 2017), que se pueden traducir en problemas de latencia, seguridad, conectividad y una conexión interrumpida (Chiang & Zhang, 2016).

Estos son algunos de los desafíos funcionales para la industria 4.0 que hacen necesario introducir una capa intermedia entre el borde y, la nube de datos, con el fin de reducir las transmisiones requeridas desde los dispositivos conectados hacia la nube.

Esta capa se denomina cómputo en la niebla (Aazam, Zeadally, & Harras, 2018; Bellavista et al., 2019; Casarrubio, 2017; Chiang & Zhang, 2016; Gazis et al., 2015; Peralta et al., 2017; Steiner & Poledna, 2016; Yin, Luo, & Luo, 2018; Yousefpour et al., 2019; Zuo, Shao, Wei, Xie, & Ji, 2018).

El objetivo de este artículo es identificar los desafíos que enfrenta la industria 4.0 en el pilar del Internet Industrial de las cosas (IIoT), y cómo los están resolviendo a través del uso del cómputo en la niebla, esto con el fin de identificar áreas de oportunidad para futuras investigaciones.

Para ello, el contenido del documento se ha dividido en tres secciones: la primera se refiere a una revisión de literatura que abarca los conceptos que permitan establecer el contexto de investigación, en la siguiente sección se describe la metodología utilizada, en la tercera sección se muestran los resultados de la investigación respecto a los desafíos en el IIoT, cómo es que se integra el cómputo en la niebla al IIoT, y cómo es que se están abordando algunos de los desafíos identificados. Finalmente se redactan las conclusiones obtenidas y se identifican las áreas de oportunidad para investigaciones futuras.

## Contexto teórico

### Internet Industrial de las cosas (IIoT)

El Internet de las cosas (IoT) es una red de información de objetos físicos interconectados a través de Internet, que permite la interacción y cooperación de estos objetos para alcanzar objetivos comunes (Jeschke, Brecher, Meisen, Özdemir, & Eschert, 2017). Dichos objetos, tienen la capacidad de medir, comunicarse, y actuar desde cualquier lugar (Díaz, Martín, & Rubio, 2016).

Cuando los datos se recopilan de la misma manera y con los mismos fines, pero dentro de un entorno industrial, ese escenario se denomina Internet Industrial de las Cosas (IIoT). Mientras que IoT proporciona acceso a cualquier "cosa" a través de Internet, el IIoT restringe las "cosas" al escenario de la industria (Aazam et al., 2018). La definición de IIoT incluye la conexión de sensores y actuadores de máquinas industriales al procesamiento local y, a internet (Boyes, Hallaq, Cunningham, & Watson, 2018).

Las tecnologías en que se apoya el IIoT, son: IoT, big data, robótica avanzada o sistemas ciberfísicos, servicios de conectividad industrial, sensores de última generación, y el cómputo en la nube (Zhong, Xu, Klotz, & Newman, 2017).

#### Industria 4.0

Se refiere a la cuarta generación de la industria que se enfoca sólo en el escenario de la industria manufacturera, que es un subconjunto de IIoT (Aazam et al., 2018; Sisinni, Saifullah, Han, Jennehag, & Gidlund, 2018). Es una iniciativa estratégica alemana que tiene como objetivo crear fábricas inteligentes, donde las tecnologías de fabricación se actualicen y transformen mediante los sistemas cibernéticos, IoT, y el cómputo en la Nube, para transformar fundamentalmente las cadenas de valor de la industria (Zhong et al., 2017). El cambio de paradigma de esta cuarta generación de la industria se ilustra en la figura 1.



**Figura 1** El cambio de paradigma hacia la industria 4.0  
 Fuente: (López Ramón y Cajal & Escudero Ceballos, 2016)

La Industria 4.0 se refiere a la estricta integración de personas en el proceso de fabricación, para lograr en ella una mejora continua y centrarse en actividades de valor agregado (Vaidya et al., 2018), esto es, las personas lograrán ventajas competitivas en la industria, con un impacto económico positivo asociado a través de su implementación (Jeschke et al., 2017).

Comprende la convergencia de diversas tecnologías disruptivas que están alcanzado conjuntamente su madurez: big data y análisis de datos, robots autónomos, simulación, sistemas integrados horizontales y verticales, el Internet Industrial de las cosas (IIoT), ciberseguridad, sistemas ciberfísicos, cómputo en la nube y, manufactura aditiva (Vaidya et al., 2018). Varias de estas tecnologías tienen ya individualmente un enorme potencial disruptivo, pero conjuntamente van a transformar empresas, sectores y mercados. Son tecnologías ahora accesibles para todo tipo de empresas, grandes y pequeñas, que se prevé permitan el diseño de soluciones a medida a un costo asequible (López Ramón y Cajal & Escudero Ceballos, 2016).

#### Cómputo en la nube

El cómputo en la nube se refiere a un modelo para permitir el acceso ubicuo a la red conveniente y bajo demanda, a un conjunto de recursos informáticos configurables (por ejemplo, redes, servidores, almacenamiento, aplicaciones y servicios) que se puede aprovisionar y lanzar rápidamente con un mínimo esfuerzo de gestión o interacción del proveedor de servicios (Mell & Grance, 2011). Sus características se muestran en la figura 2.

<b>Autoservicio bajo demanda</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Capacidades de cómputo de manera unilateral, automática y conforme a sus necesidades.</li> <li>• No requiere de interactuar con cada proveedor de servicios de manera personal.</li> </ul>
<b>Amplio acceso a la red</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Capacidades de cómputo disponibles a través de la red</li> <li>• Acceso a través de mecanismos estándar.</li> <li>• Promueve el uso para clientes heterogéneos con plataformas delgadas o gruesas.</li> </ul>
<b>Recursos agrupados</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Los recursos informáticos del proveedor se agrupan para servir a múltiples consumidores y de acuerdo a la demanda.</li> <li>• Los recursos físicos y virtuales son asignados dinámicamente.</li> </ul>
<b>Elasticidad rápida</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Las capacidades pueden ser provistas y liberadas elásticamente, para escalar rápidamente de acuerdo con la demanda.</li> <li>• Las capacidades disponibles parecen ilimitadas y son adquiridas en cualquier cantidad en cualquier momento</li> </ul>
<b>Servicio medido</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Los sistemas en la nube controlan y optimizan automáticamente el uso de recursos.</li> <li>• Aprovechan la capacidad de medición en algún nivel de abstracción apropiado para el tipo de servicio.</li> <li>• El uso de recursos puede ser monitoreado, controlado e informado, proporcionando transparencia en el servicio.</li> </ul>

**Figura 2** Características del cómputo en la nube  
 Fuente: (Mell & Grance, 2011)

El cómputo en la nube ha sido útil para las aplicaciones al expandir el alcance, capacidades de computación, almacenamiento, e infraestructura de red. El Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (NIST) lo define también como un modelo que promueve la ubicuidad y el acceso a la red sobre demanda a recursos informáticos compartidos. El cómputo en la nube ofrece servicios de infraestructura, plataforma, o software como servicios (IaaS, PaaS, SaaS).

El IaaS permite a los consumidores el acceso directo a infraestructura de Tecnologías de Información, para procesamiento, almacenamiento, y recursos de red. Por otra parte, el PaaS permite a los consumidores desarrollar software, además de ser totalmente compatible con el ciclo de vida del software - frecuentemente con la ayuda de un Middleware- para la gestión y configuración del software. El SaaS provee un ambiente para que el consumidor aloje centralmente sus aplicaciones y elimina la necesidad de que él instale el software manualmente (Yousefpour et al., 2019).

### **Limitaciones del cómputo en la nube**

Cisco predice que para el año 2020 los dispositivos interconectados a través de la nube alcanzarán los 50 mil millones, y el tráfico IP anual del centro de datos alcanzará los 15.3 ZB. Derivado de esos datos, es que se prevén problemas en el uso del cómputo en la nube aplicado al IoT, tales como: que al crecer el número de dispositivos interconectados se transferirán enormes cantidades de datos a la nube para su procesamiento, lo que provocará un alto retraso y congestión en la red (Yin et al., 2018). Asimismo, (Chiang & Zhang 2016), agregan los desafíos de latencia, ancho de banda restringido, recursos limitados, seguridad, conectividad y, que no se asegura una conexión ininterrumpida.

Como solución a estos problemas, autores como (Aazam et al., 2018; Bellavista et al., 2019; Casarrubio, 2017; Chiang & Zhang, 2016; Mukherjee & Matam, 2017; Yousefpour et al., 2019), proponen utilizar una capa intermedia inteligente distribuida, para agregar funcionalidades adicionales al sistema, realizar un procesamiento de datos cuando los dispositivos los recopilan antes de enviarlos a la red y, finalmente, a la nube. Esta capa se denomina cómputo en la niebla.

### **Cómputo en la niebla**

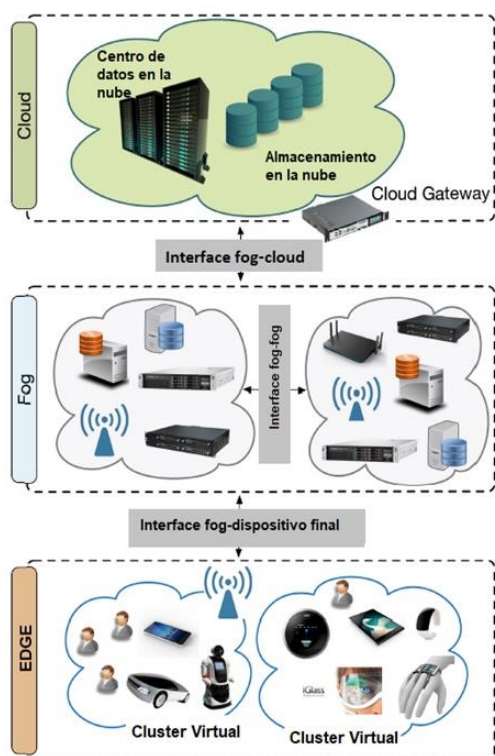
El concepto de cómputo en la niebla fue introducido por Cisco en el año 2012, y lo define como una extensión del paradigma del cómputo en la nube que provee cómputo, almacenamiento, y servicios de red, entre dispositivos finales y servidores de nube tradicionales.

No reemplaza el almacenamiento o procesamiento remoto de datos en la nube, pero si lo complementa (Ni, Zhang, Lin, & Shen, 2018). Las arquitecturas de niebla mueven de manera selectiva el cálculo, control, almacenamiento, comunicación, y toma de decisiones más cerca del borde de la red donde se están generando los datos, lo que permite resolver las limitaciones en la infraestructura actual para permitir su uso en casos de misión crítica y con gran densidad de datos. Y de acuerdo al Open Fog Consortium, al proporcionar un enlace continuo de la nube a “cosas”, se considera una extensión del cómputo en la nube (Iorga et al., 2018).

Dastjerdi, et al. (2016) mencionan que el cómputo en la niebla soporta la movilidad, recursos de cómputo, interfaces heterogéneas, protocolos de comunicación, integración a la nube y análisis de datos distribuidos para satisfacer las necesidades de baja latencia en distribuciones geográficas amplias y densas.

Iorga, et al. (2018) consideran que el cómputo en la niebla es un modelo en capas que permite el acceso ubicuo a recursos escalables compartidos, el cual consta de nodos de niebla que residen entre los dispositivos inteligentes finales y los servicios centralizados en la nube.

El modelo de tres capas se ilustra en la figura 3. Entre la nube y la niebla se encuentra una red central para ofrecer servicios de red. Desde allí puede observarse que la nube se encuentra en el nivel superior del núcleo y está lejos de los dispositivos de borde. También puede notarse, que la niebla se encuentra en el nivel medio y está más cerca de los dispositivos de borde que la nube. Cada nodo de niebla está conectado a la nube. Cada dispositivo de borde está conectado a un nodo de niebla. Y finalmente, los nodos de niebla pueden conectarse entre sí y, las comunicaciones entre ellas son todas bidireccionales (Zhang, Zhou, & Fortino, 2018).



**Figura 3** Arquitectura de 3 capas del IoT

Fuente: (Mukherjee & Matam, 2017)

Esta arquitectura minimiza el tiempo de solicitud-respuesta, de-hacia las aplicaciones compatibles y, proporciona para los dispositivos finales recursos de computación locales y, cuando sea necesario, conectividad de red a servicios centralizados (Mukherjee & Matam, 2017).

De acuerdo a lo publicado en el NIST.SP.500-325 por el National Institute of Standards and Technology, el cómputo en la niebla está formado por nodos de niebla. El nodo de niebla es el componente central de la arquitectura del cómputo en la niebla. Los nodos de niebla son componentes físicos (por ejemplo, puertas de enlace, conmutadores, enrutadores, servidores, etc.) o componentes virtuales (por ejemplo, conmutadores virtualizados, máquinas virtuales, cloudlets, entre otros) que están estrechamente acoplados a los dispositivos finales inteligentes o redes de acceso, y proporcionan recursos informáticos a estos dispositivos. Un nodo de niebla es consciente de su distribución geográfica y ubicación lógica dentro del contexto de su grupo (Iorga et al., 2018).

## Metodología

La investigación se refiere a identificar los desafíos técnicos que enfrenta el IIoT, y cómo es que se están abordando a través de la integración del cómputo en la niebla. Para lograrlo, la búsqueda de información se realizó en las bases de datos de Google Scholar, y Web of Science.

Siguiendo a Boyes et al., (2018), la búsqueda de literatura se hizo a través de la combinación de palabras clave:

- (“Industrial Internet of Things” OR “Industrial Internet” OR “industry 4.0”) AND “fog computing”
- (“fog computing” AND (“industrial internet” OR “industry 4.0” OR “Industrial Internet of Things”) AND “challenges”)
- (industrial internet” OR “industry 4.0” OR “Industrial Internet of Things”) AND “challenges”
- (“Internet Industrial de las cosas” OR “industria 4.0” OR “IIoT”) AND desafíos

Aunque no es una lista exhaustiva, abarca los términos sobre los cuales se plantea la investigación. La restricción principal para la revisión de las propuestas fue el acceso libre a los artículos, por lo cual se aclara que la información presentada no incluye todos los trabajos realizados para abordar los desafíos que presenta el IIoT. Sin embargo, puede servir como una muestra respecto a cómo se están abordando a través de la implementación del cómputo en la niebla.

Los resultados se muestran a continuación. Primero se identifican los desafíos del IIoT, y posteriormente cómo es el que paradigma del cómputo en la niebla puede integrarse al IIoT, para resolverlos.

## Resultados

### Desafíos del IIoT

Después de la revisión realizada, se encontró que autores como Breivold & Sandstrom, (2015), Hegazy & Hefeda, (2015), Trujillo, Crespo, & Alonso, (2013), (Virat, Bindu, Aishwarya, Dhanush, & Kounte, (2018), Sisinni et al., (2018), mencionan los siguientes desafíos en el IIoT:

## Interoperabilidad

La cantidad de dispositivos y componentes del sistema de diferentes proveedores y diferentes dominios plantea desafíos en términos de múltiples plataformas, numerosos protocolos y un gran número de Interfaz de Programación de Aplicaciones (API).

## Criticidad mixta

La disponibilidad y la confiabilidad reciben cada vez más prioridad en muchos productos, sistemas y servicios, estas funciones de diferentes criticidades deben separarse para que las funciones de baja criticidad no interfieran con una función de alta criticidad. La disponibilidad de hardware de procesador multinúcleo debe proporcionar la independencia necesaria entre las aplicaciones de software. Los principales indicadores de confiabilidad y disponibilidad incluyen 1) *Tiempo medio entre fallas (MTBF)*, 2) *Tiempo medio de reparación (MTTR)* y, 3) *Probabilidad de falla en la demanda (PFD)*.

## Latencia

Los sistemas de control industrial son sistemas en tiempo real que tienen requisitos estrictos sobre el comportamiento temporal, la precisión y la respuesta del sistema. La latencia y las variaciones en el tiempo que toma una operación para realizar son una preocupación importante además del rendimiento promedio. El desafío es cómo implementar dinámicamente datos e inteligencia de servicio en diferentes niveles desde el borde de la red hasta la nube, para lograr un rendimiento óptimo.

## Tolerancia a fallas

Esta es una consideración clave en IIoT donde muchos miles de dispositivos industriales heterogéneos están conectados e intercambian información. Es esencial diseñar e implementar soluciones de IIoT resistentes, con mecanismos de recuperación y tolerancia a fallos para poder tolerar y recuperarse rápidamente de fallas accidentales y malintencionadas que pueden conducir a una falta de disponibilidad del servicio.

## Escalabilidad con respecto a los ciclos de actualización de datos

Muchas plantas industriales podrían tener decenas de miles de bucles de control y aplicaciones para mantener el rendimiento deseado en operación. Estas diferentes aplicaciones de control industrial tienen diferentes requisitos de tiempo de ciclo. Estos conjuntos de datos de alta frecuencia son útiles para estudiar el análisis del comportamiento dinámico a fin de crear modelos dinámicos para la optimización y el monitoreo. Esto implica una gran cantidad de datos que deben gestionarse, por ejemplo, mediante el filtrado, el pre procesamiento en, o cerca de dispositivos de borde antes de enviarlos a la nube.

## Colaboración escalable

Un desafío aquí es permitir que los sistemas, plataformas y dispositivos horizontales y verticales puedan comunicarse y colaborar.

## Seguridad funcional

La función de seguridad y, la integridad de seguridad, son dos tipos de requisitos para lograr la seguridad funcional. La seguridad funcional pone requisitos muy específicos tanto en cómo se desarrollan los sistemas, como en la tecnología en sí. La necesidad de cumplir con las normas de seguridad para garantizar servicios de seguridad funcional adecuados es primordial.

## Desafío de seguridad específico de la industria

La arquitectura de software de una solución de IoT debe proteger a los dispositivos interconectados de intrusiones e interferencias provenientes de los canales de comunicación para que no ingresen al sistema a fin de garantizar operaciones seguras. Debe garantizar también una operación continua. Un desafío de seguridad de una solución de IIoT es cómo permitir actualizaciones de seguridad sin interrupciones y sin perjudicar la seguridad funcional o la interferencia a los servicios proporcionados en un proceso de control.

## Sistemas industriales heredados

Existe un desafío implícito para adaptar sistemas heredados (con los que se ha trabajado hace mucho ya en la industria) con soluciones de IoT de extremo a extremo que se implementan para servicios de operación adicionales.

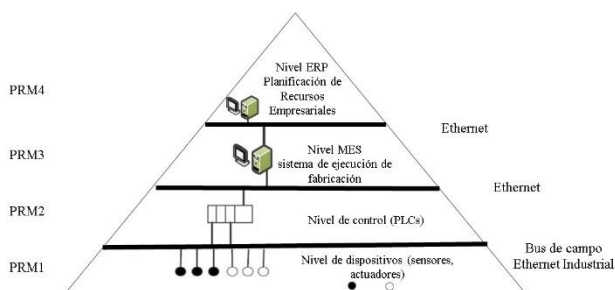
## Eficiencia de energía

La recolección de energía debe ser un enfoque prometedor para el emergente IIoT.

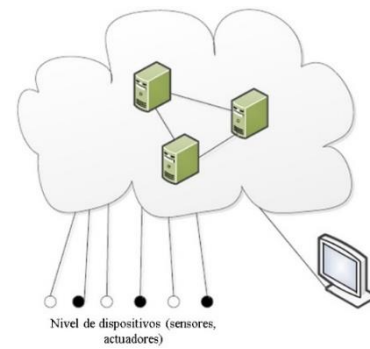
## Cómo se está integrando el cómputo en la niebla al IIoT para resolver algunos desafíos

El modelo de Referencia Purdue, es un modelo muy reconocido en la industria manufacturera, que segmenta dispositivos y equipos en funciones jerárquicas. Este modelo ha sido utilizado por organizaciones con estándares internacionales (Boyes et al., 2018). Los niveles más bajos de la pirámide se centran en el control de procesos, y los niveles superiores se ocupan de la gestión de la producción (Figura 4).

Esto implica inicialmente que la arquitectura para IIoT pueda basarse en dos capas interconectadas: una de dispositivos IoT, y otra en Cómputo en la nube, como se muestra en la Figura 5. Esto puede imponer severas restricciones en el flujo de información entre los diferentes niveles, dado que las tecnologías de comunicación y computación utilizadas difieren mucho entre las diferentes capas (Steiner & Poledna, 2016).



**Figura 4** Pirámide de comunicación simplificada en automatización según el modelo de referencia de Purdue (PRM). Fuente: (Steiner & Poledna, 2016)

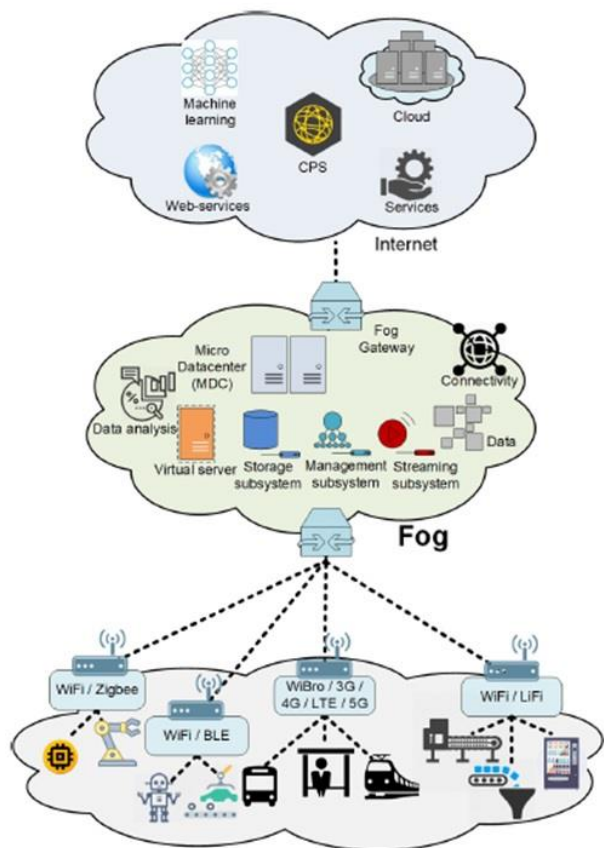


**Figura 5** Arquitectura basada en dos capas para IIoT  
 Fuente: (Steiner & Poledna, 2016)

En aras de detonar el IIoT, y tratar de resolver algunos de los desafíos mencionados en el apartado anterior, autores como (Aazam et al., 2018; Breivold & Sandstrom, 2015; Chiang & Zhang, 2016; Gazis et al., 2015; O'Donovan, Gallagher, Bruton, & O'Sullivan, 2018; Peralta et al., 2017; Steiner & Poledna, 2016; Tao, Qi, Liu, & Kusiak, 2018; Wu et al., 2017; Yin et al., 2018; Zuo et al., 2018), proponen introducir una capa intermedia, utilizando el cómputo en la niebla, de tal manera que puedan lograr una arquitectura de 3 capas, como se muestra en la figura 6.

En esta arquitectura, el despliegue estratégico de niebla asegura una retroalimentación rápida basada en los datos entrantes. En general, la niebla será responsable de las siguientes tareas (Aazam et al., 2018):

- Minería de big data industrial en tiempo real para alto rendimiento.
- Recolección concurrente de datos de múltiples tipos de sensores, robots y máquinas.
- Procesamiento rápido de los datos detectados para generar instrucciones para los actuadores y robots dentro de una latencia aceptable.
- Conectar sensores y máquinas incompatibles a través de la traducción y mapeo de protocolos necesarios.
- Gestión de la energía del sistema.
- Estructuración y filtrado de datos para evitar el envío de datos innecesarios al núcleo y la nube.



**Figura 6** Cómputo en la niebla en el IIoT  
Fuente: (Azam et al., 2018)

Para implementar una capacidad determinada de cómputo en la niebla, los nodos de niebla funcionan de manera centralizada o descentralizada y pueden configurarse como nodos de niebla independientes que se comunican entre ellos para brindar el servicio o pueden ser federados para formar agrupaciones que brindan escalabilidad horizontal sobre geolocalizaciones dispersas, a través de mecanismos de espejo o extensión.

Asimismo, para facilitar el despliegue de una capacidad de cómputo en la niebla que muestre las características descritas anteriormente, los nodos de niebla deben admitir uno o más de los siguientes atributos: autonomía, heterogeneidad, agrupación jerárquica, manejabilidad, y que sean programables (Iorga et al., 2018). Cada uno es descrito en la figura 7.

- Autonomía**
  - Operar de manera independiente
  - Tomar decisiones locales
- Heterogeneidad**
  - Los nodos tienen diferentes formas
  - Implementar en diferentes entornos.
- Agrupación jerárquica**
  - Estructuras jerárquicas, en diferentes capas.
  - Diferentes subconjuntos de funciones de servicio que trabajan juntos.
- Manejabilidad**
  - La mayoría de sus operaciones se realizan automáticamente
- Programabilidad**
  - Nodos programables en múltiples niveles por múltiples stakeholders

**Figura 7** Atributos de los nodos de niebla  
Fuente: (Iorga, et al., 2018)

Diferentes escenarios de casos de uso pueden tener diferentes arquitecturas basadas en el enfoque óptimo para soportar la funcionalidad de dispositivos finales. Pero, la elección de esta representación se basa en la intención de capturar una arquitectura compleja que incorpora sus servicios (Iorga et al., 2018).

**Desafíos del IIoT que han sido abordados integrando el cómputo en la niebla.**

En las siguientes tablas se muestra cómo diversos autores consideran que la implementación del cómputo en la niebla, sirve para abordar diversos desafíos del IIoT (Tabla 1 a Tabla 5).

Desafío: comunicación y colaboración	
Solución propuesta	Autores
Arquitectura HFC para interconectar dominios de nube y niebla distribuidos geográficamente.	(Moreno-Vozmediano et al. 2017), citado en Mouradian et al. (2018)

**Tabla 1** Solución propuesta al desafío de comunicación y colaboración

Desafíos: actualización de datos	
Solución propuesta	Autores
Agregado de datos mediante técnicas jerárquicas. Mantener una especificación uniforme. Normalización de los datos intercambiados. Hacer uso de técnicas de homogeneización de datos.	(Bellavista, et al., 2018)
El análisis de datos debe ser en tiempo real y requiere ser realizado en la niebla, en la nube e incluso en ambos. La toma de decisiones se realiza en la niebla, cerca de la frontera.	(Bellavista, et al., 2018)

**Tabla 2** Solución propuesta al desafío de la actualización de datos



Desafío: latencia	
Solución propuesta	Autores
Proponen recortar y refinar el Big data industrial localmente antes de enviarlo a la nube con el fin de disminuir retrasos	(Aazam et al., 2018)

**Tabla 3** Solución propuesta al desafío de latencia

Desafío: seguridad	
Solución propuesta	Autores
Proponen el modelo de seguridad CCA de OD-ABE, y luego presentan el primer esquema C-OD-ABE seguro.	(Zuo et al., 2018)
Los dispositivos con recursos más limitados se unen a la plataforma de computación de niebla, y la actualización de atributos hace que el cambio de roles de usuario sea más flexible.	(P. Zhang, Chen, Liu, Liang, & Liu, 2018)

**Tabla 4** Soluciones propuestas para el desafío de seguridad

Desafío: criticidad mixta	
Solución propuesta	Autores
Arquitectura basada en capas que soporte virtualización para la migración entre nodos de niebla.	(Bittencourt et al., 2015), citado en Mouradian et al. (2018)
Arquitectura para asignación de recursos que incluya un algoritmo de distribución de cargas de trabajo entre la nube y la niebla.	(Agarwal et al., 2016), citado en Mouradian et al. (2018)
Arquitectura para administración de recursos y balanceo de cargas entre la nube y la niebla.	Kapsalis et al. (2017), citado en Mouradian et al. (2018)
Introducción de una Plataforma de Operaciones Adaptativa (AOP) para proporcionar la capacidad de administración de extremo a extremo de la infraestructura de computación de niebla habilitada de acuerdo con los requisitos operacionales del proceso industrial.	(Gazis, et al., 2015)
Consideran un thin client y la movilidad. Los cómputos simples y constantes se dejan para las terminales de usuario, de modo que los dispositivos con recursos más limitados se unen a la plataforma de computación de niebla.	(P. Zhang, Chen, Liu, Liang, & Liu, 2018)
Proponen un nuevo algoritmo de programación de tareas y diseñan el esquema de reasignación de recursos para mejorar la utilización de recursos de los nodos de niebla y reducir los retrasos en las tareas.	(Yin et al., 2018)
Desafío: criticidad mixta	
Solución propuesta	Autores
Considera el uso de la computación en niebla para entregar aplicaciones de aprendizaje automático en tiempo real para las operaciones de la Industria 4.0. Los hallazgos iniciales resaltan la capacidad de la niebla para proporcionar interacciones ciberfísicas consistentes y confiables para escenarios de ingeniería en tiempo real	(O'Donovan et al., 2018)

**Tabla 5** Soluciones propuestas al desafío de criticidad mixta

A forma de resumen, los principales desafíos que se están abordando a través de la implementación del cómputo en la niebla son: comunicación y colaboración, actualización de datos, latencia, seguridad funcional, y criticidad mixta. Sin embargo, debido a la restricción mencionada en la metodología, respecto al acceso a los artículos académicos, no se puede afirmar como una verdad absoluta.

## Conclusiones

En esta revisión se han mostrado dos de las tecnologías que impulsan la industria 4.0: el IIoT y en cómputo en la nube. Se ha planteado la implementación del cómputo en la niebla como respuesta a las restricciones funcionales que presenta la integración del cómputo en la nube al IIoT.

Por otro lado, se plantearon los desafíos principales del IIoT: interoperabilidad, criticidad mixta, latencia, tolerancia a fallas, escalabilidad, colaboración escalable (Integración horizontal, y vertical), seguridad funcional, desafío de seguridad específico de la industria, los sistemas industriales heredados y la eficiencia en el manejo de energía.

Como puede observarse en la revisión presentada, no todos los desafíos han sido abordados utilizando el paradigma del cómputo en la niebla. Aun así, a pesar de que el cómputo en la niebla es una tecnología disruptiva que presenta sus propios desafíos, ha empezado a ser implementada porque realmente está siendo considerada una tecnología que puede ayudar a resolver los desafíos enfrenta el IIoT en el marco de la industria 4.0

Los autores mencionan como áreas de oportunidad importantes, las de interoperabilidad, seguridad y privacidad, la eficiencia energética que mantenga todos los dispositivos interconectados, la tolerancia a fallos y, desempeño en tiempo real.

Esta no ha sido una revisión exhaustiva, ya que tiene la restricción del acceso libre a las bases de datos, sin embargo permite dilucidar que la investigación seguirá enfocándose en los desafíos que presenta cada uno de los pilares en que se apoya la industria 4.0, por lo que se considera que aporta áreas de oportunidad para el desarrollo de tecnología.

## Referencias

- Aazam, M., Zeadally, S., & Harras, K. A. (2018). Deploying Fog Computing in Industrial Internet of. En *IEEE Transactions on Industrial Informatics* (Vol. 14, pp. 4674–4682). IEEE. <https://doi.org/10.1109/TII.2018.2855198>
- Bellavista, P., Berrocal, J., Corradi, A., Das, S. K., Foschini, L., & Zanni, A. (2019). A survey on fog computing for the Internet of Things. *Pervasive and Mobile Computing*, 52, 71–99. <https://doi.org/10.1016/j.pmcj.2018.12.007>
- Boyes, H., Hallaq, B., Cunningham, J., & Watson, T. (2018). The industrial internet of things ( IIoT ): An analysis framework. *Computers in Industry*, 101(April), 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2018.04.015>
- Breivold, H. P., & Sandstrom, K. (2015). Internet of Things for Industrial Automation-Challenges and Technical Solutions. *Proceedings - 2015 IEEE International Conference on Data Science and Data Intensive Systems; 8th IEEE International Conference Cyber, Physical and Social Computing; 11th IEEE International Conference on Green Computing and Communications and 8th IEEE Inte*, 532–539. <https://doi.org/10.1109/DSDIS.2015.11>
- Casarrubio, B. P. (2017). *Tratamiento de los activos intangibles*. Recuperado de <https://repositori.upf.edu/bitstream/handle/10230/33175/BorjaPascualTFG.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Chiang, M., & Zhang, T. (2016). Fog and IoT : An Overview of Research Opportunities. *IEEE Internet of Things Journal*, 3(6), 854–864. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2016.2584538>
- Díaz, M., Martín, C., & Rubio, B. (2016). State-of-the-art , challenges , and open issues in the integration of Internet of things and cloud computing. *Journal of Network and Computer Applications*, 67, 99–117. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2016.01.010>
- Gazis, V., Leonardi, A., Mathioudakis, K., Sasloglou, K., Kikiras, P., & Sudhaakar, R. (2015). Components of fog computing in an industrial internet of things context. En *2015 12th Annual IEEE International Conference on Sensing, Communication, and Networking - Workshops, SECON Workshops 2015* (pp. 37–42). <https://doi.org/10.1109/SECONW.2015.7328144>
- Hegazy, T., & Hefeeda, M. (2015). Industrial Automation as a Cloud Service. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 26(10), 2750–2763. <https://doi.org/10.1109/TPDS.2014.2359894>
- Iorga, M., Feldman, L., Barton, R., Martin, M., Goren, N., & Mahmoudi, C. (2018). Fog Computing Conceptual Model, Recommendations of the National Institute of Standards and Technology. En *NIST Special Publication* (pp. 500–325).
- Jeschke, S., Brecher, C., Meisen, T., Özdemir, D., & Eschert, T. (2017). Industrial Internet of Things and Cyber Manufacturing Systems. En *Industrial Internet of Things. Springer Series in Wireless Technology*. (pp. 3–19). Springer, Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-42559-7>
- López Ramón y Cajal, J., & Escudero Ceballos, V. (2016). Industria 4.0, la gran oportunidad. *Economía Aragonesa*, 59, 109–122. Recuperado de <http://gorilaa.com/resources/o6loOSw1mk/6a204800660741ecb9de0cb060c8a024.pdf#page=111>
- Mell, P., & Grance, T. (2011). *The NIST Definition of Cloud Computing Recommendations of the National Institute of Standards and Technology*.
- Mukherjee, M., & Matam, R. (2017). Security and Privacy in Fog Computing: Challenges. *IEEE Access*, 5, 19293–19304. Recuperado de <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8026115&isnumber=7859429>
- Ni, J., Zhang, K., Lin, X., & Shen, X. S. (2018). Securing Fog Computing for Internet of Things Applications: Challenges and Solutions. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 20(1), 601–628. <https://doi.org/10.1109/COMST.2017.2762345>

- O'Donovan, P., Gallagher, C., Bruton, K., & O'Sullivan, D. T. J. (2018). A fog computing industrial cyber-physical system for embedded low-latency machine learning Industry 4.0 applications. *Manufacturing Letters*, *15*, 139–142.  
<https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2018.01.005>
- Peralta, G., Iglesias-Urkia, M., Barcelo, M., Gomez, R., Moran, A., & Bilbao, J. (2017). Fog computing based efficient IoT scheme for the Industry 4.0. En *Proceedings of the 2017 IEEE International Workshop of Electronics, Control, Measurement, Signals and their Application to Mechatronics, ECMSM 2017* (pp. 1–6).  
<https://doi.org/10.1109/ECMSM.2017.7945879>
- Riahi Sfar, A., Natalizio, E., Challal, Y., & Chtourou, Z. (2018). A roadmap for security challenges in the Internet of Things. *Digital Communications and Networks*, *4*(2), 118–137.  
<https://doi.org/10.1016/j.dcan.2017.04.003>
- Sisinni, E., Saifullah, A., Han, S., Jennehag, U., & Gidlund, M. (2018). Industrial internet of things: Challenges, opportunities, and directions. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, *14*(11), 4724–4734.  
<https://doi.org/10.1109/TII.2018.2852491>
- Steiner, W., & Poledna, S. (2016). Fog Computing as enabler for de Industrial Internet of Things. *Elektrotechnik und Informationstechnik*, *133*(7), 310–314.  
<https://doi.org/10.1007/s00502-016-0438-2>
- Tao, F., Qi, Q., Liu, A., & Kusiak, A. (2018). Data-driven smart manufacturing. *Journal of Manufacturing Systems*, *48*, 157–169.  
<https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2018.01.006>
- Trejo, T. Á. (2019). *Programa para la productividad y competitividad industrial: implementación para el desarrollo de las regiones y el impulso de la manufactura 4.0*. INFOTEC. Recuperado de [https://infotec.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1027/337/1/PROPUESTA DE INTERVENCIÓN\\_PPCI\\_IMPLEMENTACIÓN PARA EL DESARROLLO DE LAS REGIONES Y EL IMPULSO A LA MANUFACTURA 4.0%281%29.pdf](https://infotec.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1027/337/1/PROPUESTA_DE_INTERVENCIÓN_PPCI_IMPLEMENTACIÓN_PARA_EL_DESARROLLO_DE_LAS_REGIONES_Y_EL_IMPULSO_A_LA_MANUFACTURA_4.0%281%29.pdf)
- Trujillo, S., Crespo, A., & Alonso, A. (2013). MultiPARTES: Multicore virtualization for mixed-criticality systems. *Proceedings - 16th Euromicro Conference on Digital System Design, DSD 2013*, *8*, 260–265.  
<https://doi.org/10.1109/DSD.2013.37>
- Vaidya, S., Ambad, P., & Bhosle, S. (2018). Industry 4.0 - A Glimpse. *Procedia Manufacturing*, *20*, 233–238.  
<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.02.034>
- Virat, M. S., Bindu, S. M., Aishwarya, B., Dhanush, B. N., & Kounte, M. R. (2018). Security and Privacy Challenges in Internet of Things. *Proceedings of the 2nd International Conference on Trends in Electronics and Informatics, ICOEI 2018*, 454–460.  
<https://doi.org/10.1109/ICOEI.2018.8553919>
- Wu, D., Liu, S., Zhang, L., Terpenney, J., Gao, R. X., Kurfess, T., & Guzzo, J. A. (2017). A fog computing-based framework for process monitoring and prognosis in cyber-manufacturing. *Journal of Manufacturing Systems*, *43*(2017), 25–34.  
<https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2017.02.011>
- Yin, L., Luo, J., & Luo, H. (2018). Tasks Scheduling and Resource Allocation in Fog Computing Based on Containers for Smart Manufacturing. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, *14*(10), 4712–4721.  
<https://doi.org/10.1109/TII.2018.2851241>
- Yousefpour, A., Fung, C., Tech, G., Kadiyala, K., Charlotte, U. N. C., & Jue, J. P. (2019). All One Needs to Know about Fog Computing and Related Edge Computing Paradigms. *Journal of Systems Architecture*, *7*(18). Recuperado de <http://10.0.3.248/j.sysarc.2019.02.009%0Ahttp://ezproxy.unal.edu.co/login?url=http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=edselp&AN=S1383762118306349&lang=es&site=eds-live>
- Zhang, P. Y., Zhou, M. C., & Fortino, G. (2018). Security and trust issues in Fog computing: A survey. *Future Generation Computer Systems*, *88*, 16–27.  
<https://doi.org/10.1016/j.future.2018.05.008>

Zhong, R. Y., Xu, X., Klotz, E., & Newman, S. T. (2017). Intelligent Manufacturing in the Context of Industry 4 . 0: A Review. *Engineering*, 3(5), 616–630. <https://doi.org/10.1016/J.ENG.2017.05.015>

Zuo, C., Shao, J., Wei, G., Xie, M., & Ji, M. (2018). CCA-secure ABE with outsourced decryption for fog computing. *Future Generation Computer Systems*, 78, 730–738. <https://doi.org/10.1016/j.future.2016.10.028>