

Modelo de medición de ecosistemas inteligentes desarrollados bajo el paradigma del internet de las cosas (IoT)

Smart ecosystems measurement model developed under the Internet of Things (IoT) paradigm

Alejandro Quiroz Estrada 

Jovani Alberto Jiménez Builes 

Albeiro Espinosa Bedoya 

Carlos Mario Zapata Jaramillo 

Universidad Nacional de Colombia

Gustavo Alonso Acosta Amaya 

Politécnico Jaime Isaza Cadavid, Colombia

OPEN  ACCESS

Recibido: 05/10/2021

Aceptado: 13/12/2021

Publicado: 17/02/2022

Correspondencia de autores:
gaacosta@elpoli.edu.co



Copyright 2020
by Investigación e
Innovación en Ingenierías

Resumen

Objetivo: Proponer un modelo de medición dentro de una arquitectura IoT, con el fin de establecer qué características de calidad son las más convenientes y necesarias para la red de objetos tomando como referencia el modelo jerárquico ISO/IEC 25000 de calidad del software. **Metodología:** Para el diseño del modelo se realizó una revisión sistemática de literatura que permitió obtener evidencias desde artículos científicos almacenados en repositorios digitales para poder cuantificar los atributos de calidad y determinar las métricas ideales. Como punto de partida se realizaron una serie de preguntas de investigación y una encuesta a un grupo de expertos con conocimiento en IoT para determinar que características y subcaracterísticas de calidad cumplen con los requisitos necesarios. **Resultados:** Se evidenció que los resultados y resolución de preguntas de investigación planteadas al igual que la encuesta realizada por el grupo de expertos para la validación del modelo responden a los criterios necesarios para un modelo de calidad. Además, con la finalidad de facilitar el entendimiento del modelo que aquí se propone, se realiza una representación gráfica por medio de esquemas preconceptuales. **Conclusiones:** Por último, este modelo incluye métricas externas para medir atributos de características de calidad en cualquier área del IoT.

Palabras clave: Arquitectura IoT, esquema preconceptual, ISO 25000, métricas, modelo de calidad.

Abstract

Objective: Propose a measurement model within an IoT architecture, in order to establish which quality characteristics are the most convenient and necessary for the object network, taking as a reference the ISO / IEC 25000 hierarchical model of software quality. **Methodology:** For the design of the model, a systematic literature review was carried out that allowed obtaining evidence from scientific articles stored in digital repositories in order to quantify the quality attributes and determine the ideal metrics. As a starting point, a series of research questions and a survey were conducted with a group of experts with knowledge in IoT to determine which quality characteristics and sub-characteristics meet the necessary requirements. **Results:** It was evidenced that the results and resolution of research questions posed as well as the survey carried out by the group of experts for the validation of the model respond to the necessary criteria for a quality model. Furthermore, in order to facilitate the understanding of the model proposed here, a graphical representation is made by means of pre-conceptual schemas. **Conclusions:** Finally, such model it provides external metrics to measure attributes of quality characteristics in any area of the IoT.

Keywords: IoT architecture, ISO 25000, metrics, preconceptual scheme, quality model.

Introducción

El uso e implementación de métricas en todas las áreas del conocimiento permite mejorar y evaluar la calidad de los procesos, proyectos, diseños y arquitecturas. En el ámbito tecnológico, las métricas son claves para medir el rendimiento y disponibilidad del recurso, y permite solucionar problemas en la infraestructura [1]. El continuo cambio y adopción de nuevas tecnologías hace necesario aplicar modelos y técnicas acordes a las necesidades y los requisitos de funcionamiento y administración. Con la aparición de la industria 4.0, *Big Data* y analítica, que facilitan el procesamiento de grandes volúmenes de datos de diferentes fuentes y el IoT, las máquinas, sensores, dispositivos y personas pueden establecer una comunicación entre sí, lo que significa un incremento acelerado de los datos que se intercambian [2, 3]. Sin embargo, debido a la heterogeneidad de las comunicaciones y los limitados Gateways de las redes IoT, actualmente no se cuenta con un modelo para la gestión y evaluación de las características de calidad de la arquitectura, lo que genera vulnerabilidad y múltiples problemas de seguridad, estabilidad, disponibilidad y eficiencia de la red [4, 5].

Por esta razón, cada arquitectura IoT incorpora una o varias métricas particulares que, seleccionadas según criterios el desarrollador, se emplean para evaluar los requisitos funcionales y de rendimiento. Este panorama plantea la necesidad de proponer un modelo de métricas para el diseño y evaluación de ecosistemas inteligentes que consideren criterios de calidad, como se hace en la ingeniería del software. En este trabajo se considera el modelo de calidad de software ISO/IEC 25000 [6], conocido también como *SQuaRE (System and Software Quality Requirements and Evaluation)*, constituido por una familia de normas que tiene por objetivo la creación de un marco de trabajo común para evaluar la calidad de productos software y en el cual se definen los términos para las características y subcaracterísticas. De esta manera, en base a la norma ISO 25000, se determina cuales de las métricas son las más pertinentes para el modelo propuesto [7].

La selección de métricas inicia con un estudio de los retos y amenazas presentes en las redes IoT, lo que permite establecer cuáles métricas son útiles y necesarias para la construcción del modelo. Las características estipuladas en la norma ISO/IEC 25000 son: funcionalidad, confiabilidad, usabilidad, eficiencia, mantenibilidad y portabilidad. Finalmente se emplea un esquema preconceptual para representar el modelado de los requisitos de validación de las redes IoT [8].

Este artículo se organiza de la siguiente manera. En la Sección 2 se presenta un marco teórico en el que se incluye una descripción de los principales desafíos y problemas de las arquitecturas IoT y sus atributos de calidad del software. En la Sección 3 se presentan algunos trabajos previos, resaltando sus principales aportes y desventajas. En la Sección 4 se presenta la metodología explicada en este estudio. En la Sección 5 se presenta el análisis de los resultados. En la Sección 6 se presenta la discusión y finalmente, en la Sección 7 se presentan las principales conclusiones y trabajo futuro.

Materiales y métodos

En este artículo se realiza un estudio y comparación entre algunos modelos de métricas de calidad que sirvan como base para la construcción de un modelo para la medición de ecosistemas inteligentes desarrollados bajo el IoT. Algunos autores desarrollan métricas para la calidad de las redes IoT haciendo uso de *ATAM*, el cual es un método de evaluación de arquitectura software e *IPAVEMENT*, que hace referencia a los elementos no propios del pavimento convencional como dispositivos electrónicos y de radiofrecuencia. Smith [9] propone un *framework* conceptual de ciberseguridad para aplicaciones IoT llamado *SMITH*

Framework, que incluye un modelo de gestión de la ciberseguridad y un modelo conceptual del dominio de la ciberseguridad. La validación del *framework* se realiza con el método ATAM. Oviedo, Rodríguez y Piattini [10] presentan un caso de estudio de la aplicación para ciudades inteligentes *Ipavement*, donde muestran la necesidad de desarrollar un servicio de software que pueda ofrecer dicha tecnología. Los autores utilizan el modelo de calidad ISO/ IEC 25000 para establecer los requisitos de calidad. Este entorno incluye un proceso de evaluación, un modelo de calidad y un conjunto de herramientas de evaluación.

Mi [11] sugiere un modelo de calidad para IoT, tomando como referencia el *IAQM (Institute of Air Quality Management)*. En este artículo se expone el problema de incompatibilidad de la ISO 9126 para evaluar ecosistemas inteligentes IoT. Baños [12] diseña una metodología para evaluar la calidad de un producto software para una implementación de IoT. La metodología se puede ajustar para cada dominio particular del IoT. Además, el autor toma como referencia el modelo de calidad ISO 25000, que para el modelo propuesto en este artículo es base de partida y comparación.

Desafíos y algunos problemas de las arquitecturas IoT

La evolución del IoT ha permitido desarrollar aplicaciones y servicios inteligentes en las áreas de salud, logística, gestión energética, seguridad, agroindustria y medio ambiente, mediante la interconexión de sensores, dispositivos, tecnologías y conceptos innovadores. Los objetos físicos como núcleo del IoT y su seguridad y privacidad son cruciales para los IoT y sus aplicaciones. La mayoría de las arquitecturas de IoT existentes solo se enfocan en los problemas de seguridad en la capa de percepción, capa de red y capa de aplicación, haciendo que los mecanismos de seguridad y preservación de la seguridad sean ineficaces [13, 14].

Otro desafío es el consumo y eficiencia energética [15], debido a los grandes volúmenes de datos que se transfieren por la red en un instante dado y a los nuevos nodos que se van agregando a la red [16]. El incremento de los dispositivos IoT conectados a la red implica retos de movilidad y conectividad que permitan garantizar una fácil y eficiente conexión de los usuarios al ecosistema IoT. Además, una alta demanda de equipamientos electrónicos requiere recursos para su fabricación, lo cual a largo plazo genera problemas de impacto ambiental debido a las dificultades para el reciclaje de la basura electrónica [17].

Atributos de calidad de software

La literatura reporta una amplia cantidad de recursos relativos, las cuales resultan útiles para la elaboración de un modelo, las cuales se pueden adaptar debido a la carencia de literatura que aporte a la calidad de la arquitectura IoT. Según Pressman [18], la calidad del software es la conformidad con los requisitos funcionales y de rendimiento, estándares explícitos de desarrollo y las características implícitas que se esperan de todo el software desarrollado profesionalmente. En la ISO [19] se define como la totalidad de características de un producto, proceso o servicio que cuenta con la habilidad de satisfacer necesidades explícitas o implícitas. La calidad de software posee índices medibles que son base del control y perfeccionamiento de la productividad. Algunas características de calidad son la funcionalidad, mantenibilidad, confiabilidad, eficiencia, usabilidad, ejecución, disponibilidad y portabilidad.

Metodología

La metodología propuesta se basa en una revisión sistemática de literatura [20], que permita obtener evidencias desde artículos científicos almacenados en repositorios digitales para poder cuantificar los atributos de calidad y determinar las métricas ideales para la construcción del modelo propuesto. Se parte de las siguientes preguntas de investigación.

Pregunta 1: ¿Cuáles características de calidad de software permiten medir la calidad de las arquitecturas IoT? Esta pregunta hace referencia a las características de calidad que se utilizan para medir la calidad del software basado en IoT.

Pregunta 2: ¿Cuáles otras características de calidad a nivel general son aplicables al IoT? En esta pregunta se exploran características de calidad que a nivel general pueden determinar la calidad de una arquitectura IoT.

Pregunta 3: ¿Que características de calidad presentan limitaciones al momento de medir la calidad de una arquitectura IoT? Con esta pregunta se expone cuáles características de calidad, a pesar de su uso en la medición de arquitecturas IoT, presentan limitaciones al abordar otros aspectos o características de calidad.

Inicialmente se realizó un análisis de diferentes artículos que se enfoquen en el uso de métricas y su validación. Posteriormente, con los datos extraídos se seleccionaron las características y subcaracterísticas de calidad que se deben emplear en un ecosistema inteligente. Luego, con los resultados obtenidos, se diseñó y aplicó una encuesta a expertos en el área del IoT para determinar el peso de las características de calidad identificadas.

Tabla 1. Bases de datos académicas consultadas

Base de datos	Palabras clave	Resultados seleccionados
Science Direct	IoT metrics; IoT functionality metrics; IoT quality metrics; Smart industry metrics; IoT portability metrics; IoT usability metrics; IoT reliability metrics	8
Springer	IoT metrics; IoT functionality metrics; IoT quality metrics; Smart industry metrics; IoT portability metrics; IoT usability metrics; IoT reliability metrics	8
Scopus	IoT metrics; IoT functionality metrics; IoT quality metrics; Smart industry metrics; IoT portability metrics; IoT usability metrics; IoT reliability metrics	6
IEEE	IoT metrics; IoT functionality metrics; IoT quality metrics; Smart industry metrics; IoT portability metrics; IoT usability metrics; IoT reliability metrics	3
Scielo	IoT metrics; IoT functionality metrics; IoT quality metrics; Smart industry metrics; IoT portability metrics; IoT usability metrics; IoT reliability metrics	1

Fuente: Elaboración propia

La selección de las características de calidad se tomó con base en la posibilidad de cuantificar criterios como la heterogeneidad de los datos y comunicaciones, capacidad de comunicación, cómputo, almacenamiento, eficiencia energética de la red y dispositivos, la incorporación y flexibilidad de diferentes tecnologías. Con base en los antecedentes y otros artículos publicados entre 2016 y 2020, se realizó una búsqueda y filtrado en las bases de datos Science Direct, Springer, Scopus, IEEE y Scielo, como se consignan en la Tabla 1.

De la revisión en las bases de datos se seleccionaron 46 artículos candidatos. Los artículos seleccionados exploran métricas enfocadas a las arquitecturas IoT aplicadas en diferentes contextos, adicionalmente evalúan características de calidad estándar y no estándar. Por otra parte, los artículos no seleccionados llegaron a ser irrelevantes porque a pesar de exploraban la calidad de ecosistemas IoT, no lo hacían desde las métricas. Otros fueron descartados porque solo tenían relación con la calidad del software y no con el IoT. Por lo tanto, debido a que no hay unanimidad acerca de la importancia de las características y subcaracterísticas de calidad presentadas en esta investigación, se realiza una encuesta utilizando el método *Delphi* [21] a un grupo de cinco expertos con conocimientos en IoT para la validación del modelo, dos de ellos docentes investigadores y los tres restantes desarrolladores de soluciones IoT. El número de iteraciones empleadas en este trabajo fueron dos, con el fin de disminuir la dispersión y precisar la opinión media consensuada.

Resultados y discusión

En esta sección se presentan los resultados y resolución de las preguntas de investigación, y la validación de las características y subcaracterísticas de calidad por el grupo de expertos por medio de una encuesta. En las Tabla 2, 3 y 4 se muestran las características y subcaracterísticas de calidad evaluadas que responden a las preguntas de investigación planteadas mediante los artículos que las revisan y exploran. Para determinar la manera como cada métrica responde o no a las preguntas, se considera si dentro del artículo seleccionado se abordan los temas de calidad y medición de las redes IoT, además de los pro y contra de las métricas empleadas.

Tabla 2. Artículos que abordan las características y subcaracterísticas de calidad del software en el ámbito del IoT

Características y subcaracterísticas de calidad	Artículos seleccionados
Funcionalidad	[23, 29, 31, 36]
Exactitud	[26]
Interoperabilidad	[28, 30, 36, 39, 40]
Seguridad	[22, 26, 29, 31, 32, 33, 38, 41]
Fiabilidad	[22, 36, 38, 41, 42, 44]
Recuperabilidad	[41]
Usabilidad	[28, 29, 38]
Eficiencia	[22, 33, 34]
Posibilidad de cambiar	[40]
Estabilidad	[34, 39]
Portabilidad	[22]
Adaptabilidad	[25, 36]
Compatibilidad	[39, 46]

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3. Artículos que abordan las características de calidad a nivel general en el ámbito del IoT

Características de calidad	Artículos seleccionados
Latencia	[23, 37, 43, 45]
Privacidad	[29, 38]
Escalabilidad	[33, 34, 36]
Rendimiento	[39, 41]
Disponibilidad	[39, 41]

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4. Artículos que evidencian limitaciones de algunas características de calidad en el ámbito del IoT

Características de calidad	Artículos seleccionados
Utilización de recursos	[24]
Mantenibilidad	[47]
Analizabilidad	[34]
Instalabilidad	[35]

Fuente: Elaboración propia

Para darle respuesta a la pregunta 1 de investigación, básicamente se toman aquellas características y subcaracterísticas que pueden medir la calidad de las capas de red de una arquitectura IoT.

Pese a que las características y subcaracterísticas de calidad de la Tabla 2 permiten medir atributos de la arquitectura IoT, algunas son limitadas debido a la naturaleza de este tipo de redes (exactitud, analizabilidad, instalabilidad y adaptabilidad). Estas subcaracterísticas se pueden agrupar dentro de características más generales para poder medir el ecosistema inteligente. Las métricas seleccionadas como la funcionalidad, confiabilidad, eficiencia y demás, se acoplan de manera adecuada al ámbito del IoT debido a que se pueden integrar en todas las capas de la arquitectura IoT.

En respuesta a la pregunta 2, las características de calidad encontradas en la revisión de la literatura que se pueden emplear en el ámbito del IoT que no están dentro de la ISO 25000 y aportan información útil son latencia, privacidad, escalabilidad, compatibilidad, rendimiento y disponibilidad, como se muestra en la Tabla 3.

Las características de calidad que se muestran en la Tabla 4, dan respuesta a la pregunta 3. Aquellas que presentan limitaciones son la utilización de recursos, mantenibilidad, analizabilidad e instalabilidad. La principal limitación que presentan estas métricas es su poca documentación dentro de las bases de datos seleccionadas. Pese a las limitaciones, el grupo de expertos las evalúa y solo la instalabilidad se descarta.

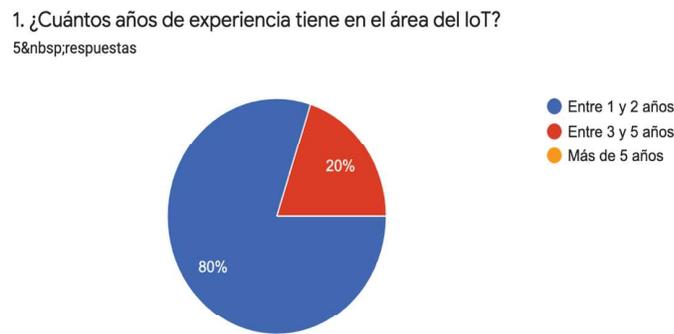
Para la validación de las características y subcaracterísticas de calidad, inicialmente en la encuesta se realizó un perfilamiento en cuanto a la experiencia en el área del IoT y los proyectos en que ha participado el experto. Luego, se realiza un sondeo con el fin de identificar la necesidad de un modelo de calidad en el ámbito del IoT y cuales de las características de calidad presentadas en esta investigación son consideradas como relevantes por el grupo de expertos. Finalmente, se seleccionan las características y subcaracterísticas de calidad con base a la evaluación realizada por el grupo de expertos. El criterio de

selección que proponen los expertos consiste en sumar la calificación dada por ellos a cada característica y subcaracterísticas de calidad, en una escala de cero a diez.

El total de cada una de estas se divide sobre el número expertos que es cinco, y el valor obtenido corresponde al promedio de cada característica y subcaracterística. Los promedios de cada característica y subcaracterística que obtuvieron una calificación mayor o igual a ocho fueron tomados para el modelo. Para los pesos de calidad de cada característica y subcaracterística, se dividió cada uno de los promedios sobre la escala de calificación más alta que es diez. Mientras el peso de cada característica y subcaracterística calidad este más cerca de uno es mejor.

En la Figura 1 se observa que el 80% tiene una experiencia con IoT de 1 a 2 años, el 20 % de 3 a 5, lo que consta que la mayoría de los expertos encuestados tienen conocimiento suficiente en el ámbito del IoT.

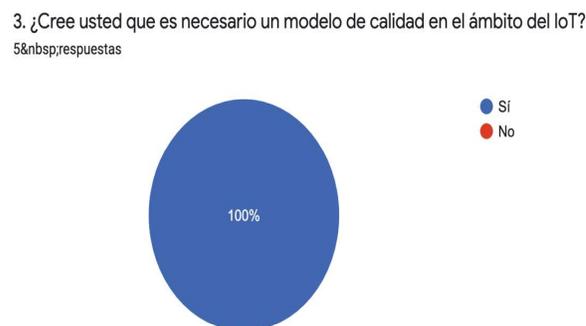
Figura 1. Experiencia en el área del IoT de los encuestados



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 2 se observa que el 80% participa en proyectos orientados al IoT, lo que sugiere que estas personas poseen habilidades con esta solución tecnológica.

Figura 2. Participación de los expertos en proyectos orientados al IoT

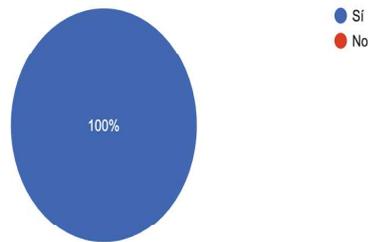


Fuente: Elaboración propia

En la Figura 3 se observa que el 100% de los encuestados afirman la necesidad de un modelo de calidad debido a que se necesitan niveles éticos, tecnológicos mínimos y estándares con el fin de aportar calidad al desarrollo tecnológico.

Figura 3. Necesidad de un modelo de calidad según respuestas de los expertos

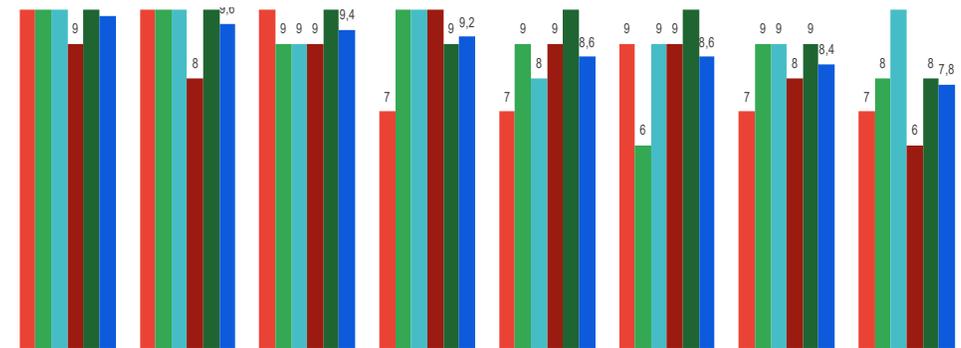
3. ¿Cree usted que es necesario un modelo de calidad en el ámbito del IoT?
5 respuestas



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 4 se observa que las características de calidad evaluadas para realizar la encuesta, que, según el criterio de selección que proponen por los expertos, aquellas con un valor promedio mayor o igual a 8 se incluyen en el modelo propuesto. Aquellas que presentan una mayor relevancia son funcionalidad, fiabilidad, usabilidad, eficiencia, mantenibilidad, seguridad y compatibilidad. La portabilidad no cumple con el requisito de evaluación, por consiguiente, no se toma para el modelo.

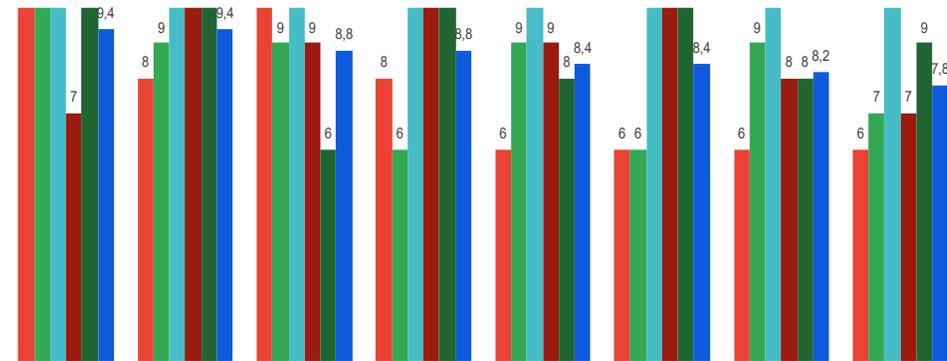
Figura 4. Resultados de las características del estándar de calidad ISO25000 evaluadas



Fuente: Elaboración propia

En la Fig. 5, se observa que las subcaracterísticas de calidad que cumplen con el criterio de selección son exactitud, interoperabilidad, recuperabilidad, utilización de recursos, analizabilidad, estabilidad y adaptabilidad. Por otra parte, la subcaracterística posibilidad de cambiar se descarta debido a que no cumple con el requisito de evaluación.

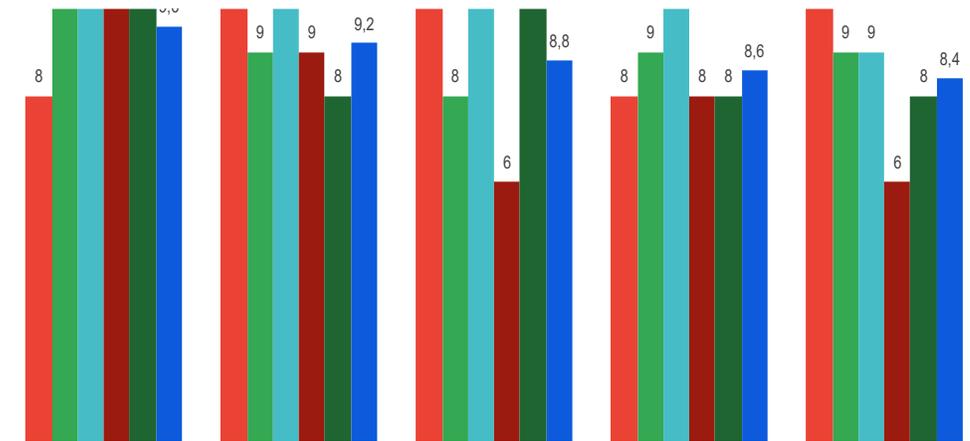
Figura 5. Resultados de las subcaracterísticas del estándar de calidad ISO25000 evaluadas



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 6 se observa cada una de las características de calidad no estándar evaluadas con su nivel de importancia. Las características que cumplen el requisito de selección son latencia, privacidad, escalabilidad, rendimiento y disponibilidad.

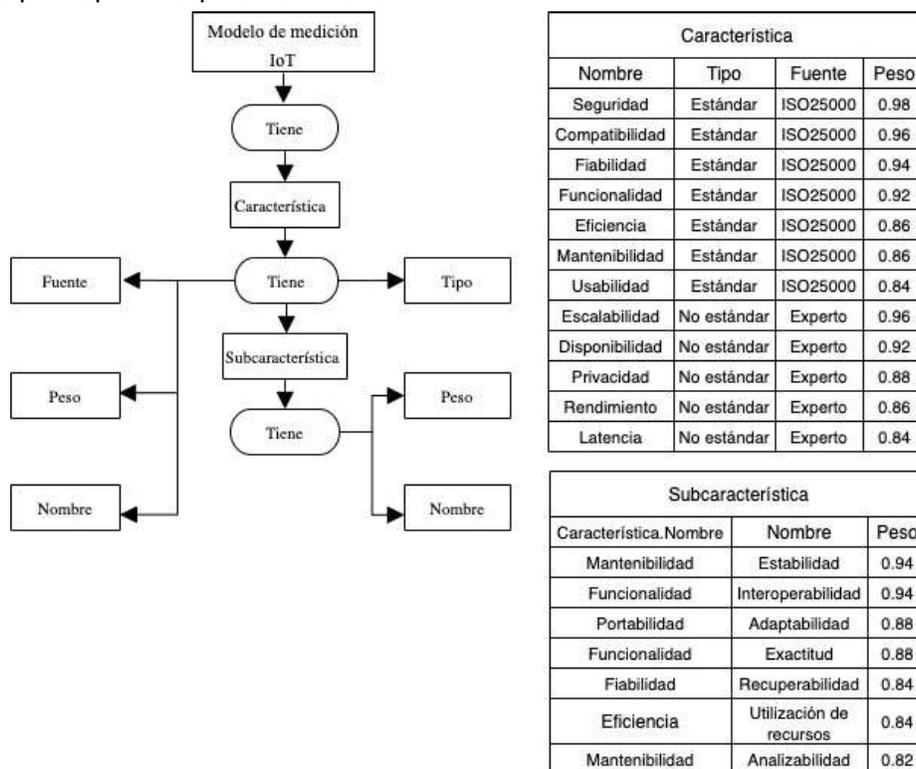
Figura 6. Resultados de las características calidad no estándar evaluadas



Fuente: Elaboración propia

En la Fig. 7 se presenta el modelo de calidad propuesto mediante un esquema preconceptual.

Figura 7: Esquema preconceptual del modelo de calidad IoT



Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 5 se presentan las métricas de las características y subcaracterísticas seleccionadas.

Tabla 5. Métricas de las características y subcaracterísticas de calidad

Características y subcaracterísticas	Medida, fórmula y cálculo de elementos de datos	Interpretación del valor medido
Funcionalidad	$X = 1 - A / B$, A = Número de elementos de cumplimiento de funcionalidad especificados que no se han implementado durante las pruebas, B = Número total de elementos de cumplimiento de funcionalidad especificados.	$0 \leq X \leq 1$, cuanto más cerca de 1.0, mejor.
Fiabilidad	$X = 1 - A / B$, A = Número de elementos de cumplimiento de confiabilidad especificados que no se han implementado durante las pruebas, B = Número total de elementos de cumplimiento de confiabilidad especificados.	$0 \leq X \leq 1$, cuanto más cerca de 1.0, mejor.
Usabilidad	$X = 1 - A / B$, A = Número de elementos de cumplimiento de usabilidad especificados que no se han implementado durante las pruebas, B = Número total de elementos de cumplimiento de usabilidad especificados.	$0 \leq X \leq 1$, cuanto más cerca de 1.0, mejor.
Eficiencia	$X = 1 - A / B$, (X: Relación de elementos de cumplimiento satisfechos relacionados con la eficiencia) A = Número de elementos de cumplimiento de eficiencia especificados que no se han implementado durante las pruebas, B = Número total de elementos de cumplimiento de eficiencia especificados.	$0 \leq X \leq 1$, cuanto más cerca de 1.0, mejor.
Mantenibilidad	$X = 1 - A / B$, A = Número de elementos de cumplimiento de mantenibilidad especificados que no se han implementado durante las pruebas B = Número total de elementos de cumplimiento de mantenibilidad especificados.	$0 \leq X \leq 1$, cuanto más cerca de 1.0, mejor.

Seguridad	$X = A / B$, A= Número de "accesos de usuario al sistema y datos" registrados en la base de datos del historial de acceso, B = Número de "accesos de usuario al sistema y datos" realizados durante la evaluación.	$0 \leq X \leq 1$, cuanto más cerca de 1.0, mejor.
Compatibilidad	$X = A / T$, A = Número de restricciones o fallas inesperadas que encuentra el usuario durante el funcionamiento simultáneo con otro software y/o dispositivo, T = Duración del tiempo de funcionamiento simultáneo de otro software y/o dispositivo.	$0 < X$, cuanto más pequeño, mejor.
Exactitud	$X = A / T$, A = Número de casos encontrados por los usuarios con una diferencia con respecto a los resultados esperados razonables más allá de lo permitido, T = tiempo de funcionamiento.	$0 < X$, cuanto más pequeño, mejor.
Interoperabilidad	$X = A / B$, A = Número de formatos de datos que están aprobados para intercambiarse con otro sistema durante las pruebas de intercambio de datos, B = Número total de formatos de datos que se intercambiarán.	$0 \leq X \leq 1$, cuanto más cerca de 1.0, mejor.
Recuperabilidad	$X = \text{Suma}(T) / B$, T = Tiempo de recuperación del sistema caído en cada oportunidad, N = Número de casos en los que el sistema observado entró en recuperación	$0 < X$, cuanto más pequeño, mejor.
Utilización de recursos	$X = A / B$, A = tiempo de los dispositivos de Entrada / Salida ocupados, B = tiempo especificado que está diseñado para ocupar dispositivos de Entrada / Salida.	$0 \leq X \leq 1$, cuanto más cerca de 1.0, mejor.
Analizabilidad	$X = A / B$, A = Número de fallas que el encargado de mantenimiento puede diagnosticar (utilizando la función de diagnóstico) para comprender la relación causa-efecto, B = Número total de fallas registradas.	$0 < X$, cuanto más pequeño, mejor.
Estabilidad	$X = A / N$, A = Número de fallas surgidas después de que la falla se resuelve mediante un cambio durante el período especificado N = Número de fallas resueltas.	$0 < X$, cuanto más pequeño, mejor.
Adaptabilidad	$X = 1 - A / B$, A = Número de funciones operativas de las cuales las tareas no se completaron o no resultaron suficientes para alcanzar los niveles adecuados durante las pruebas operativas combinadas con hardware ambiental, B = Número total de funciones que se probaron.	$0 \leq X \leq 1$, cuanto más cerca de 1.0, mejor.
Latencia	$L = R_p + T_e + T_c + R_{pr}$, R_p = Retardo de propagación, T_e = Tiempo de emisión, T_c = Tiempo de cola, R_{pr} = Retardo de procesamiento.	$L \leq 100$ ms, cuanto más cerca de 0, mejor.
Privacidad	$P = \sum G * NCP(G) / d * N$, NPC= Penalización de Certeza Normalizada, N = número de registros en la tabla original T, G = la cardinalidad de la clase de equivalencia G.	$0 \leq P \leq 1$, cuanto más cerca de 1.0, mejor.
Escalabilidad	$E = T_s / T_p$, T_s = tiempo de ejecución, T_p = radio de tiempo para resolver un problema.	$0 \leq E \leq 1$, cuanto más cerca de 1.0, mejor.
Rendimiento	$R = \text{Data} / T_t$, Data= cantidad de información útil, T_t = tiempo de transmisión.	$R \geq 5.5$ Mbps
Disponibilidad	$D = Dc1 * Dc2 * Dc3 * \dots * Dcn$, D= Disponibilidad del sistema, $Dc1$ = disponibilidad del componente 1, $Dc2$ = disponibilidad del componente 2, $Dc3$ = disponibilidad del componente 3, Dcn = disponibilidad del componente n.	$0\% \leq D \leq 100\%$, cuanto más cerca de 100%, mejor.

Fuente: Adaptado de (Software Engineering - Software product Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE) - Guide to SQuaRE) [19]

La ecuación 1. hace parte del modelo propuestos para calcular la calidad general de un ecosistema inteligente a partir de cada característica y subcaracterística de calidad.

$$CG = \frac{p_1C_1 + p_2C_2 + p_3C_3 \dots + p_nC_n \dots}{p_1 + p_2 + p_3 + \dots + p_n} \quad (1)$$

Donde C es valor de cada característica o subcaracterística de calidad y p es el peso de calidad que se le da a cada característica o subcaracterística. Mientras la Calidad General (CG) esté más cerca de 1.0, mejor la calidad del ecosistema inteligente.

Mediante el modelo propuesto se demostró la necesidad y utilidad de métricas para medir la calidad de las arquitecturas IoT. Si bien la gran mayoría características y subcaracterísticas fueron tomadas de la ISO 25000 como referente, sirvieron como base para el desarrollo de esta investigación. En base a la metodología utilizada se pudo identificar las características más idóneas para la construcción de un modelo ajustable a cualquier ámbito del IoT. Según algunas de las metodologías y modelos propuestos por otros autores como en el trabajo de Baños [12], el autor propone una metodología ajustable a diversas líneas de trabajo del IoT. Si bien esta metodología dispone de diferentes modelos matemáticos para evaluar la calidad de varias áreas del IoT, tiende a ser muy poco práctico y algunas veces confuso a causa del gran número de ecuaciones. Por otra parte, Mi [11], propone un modelo más simple y puntual, aunque cumple con el propósito de validar la calidad de un ecosistema IoT, no incluye algunas de las características y subcaracterísticas de calidad que para nuestra consideración son esenciales en un modelo de calidad IoT. Por consiguiente, el modelo de calidad propuesto en este trabajo abarca un gran número de características que se consideran fundamentales, logrando un modelo robusto y aplicable en cualquier entorno de los ecosistemas inteligentes.

Conclusiones

Una arquitectura IoT es la suma de complejas tecnologías como las redes inalámbricas, dispositivos embebidos, sensores y conectividad. Si bien su uso e implementación viene creciendo, las métricas de calidad para ecosistemas inteligentes se investigan poco, debido a la heterogeneidad de las comunicaciones y dispositivos de esta tecnología. Aunque la ISO 25000 no se acopla perfectamente en el ámbito de IoT, se adoptó como punto de partida para la selección y evaluación de las características y subcaracterísticas de calidad que allí se presentan. Por tal motivo, algunas de las características de calidad no se tomaron en cuenta debido a sus limitaciones y poca compatibilidad con el IoT. Debido a que la selección inicial de las características de calidad se realizó con una revisión sistemática de literatura, se requirió la ayuda de un grupo de expertos en el área del IoT para la validación y construcción del modelo. Por consiguiente, con la metodología propuesta en este trabajo se unificaron algunas de las áreas que el IoT abarca como salud, agricultura, industria y transporte en un modelo general, posibilitando la validación de la calidad en diversos ecosistemas inteligentes.

Además, mediante esta investigación se evidenció como a partir de la calidad del software se puede alcanzar una mejora continua en cada proceso y arquitectura del ecosistema de objetos inteligentes. Con la implementación del conjunto de métricas planteadas en este modelo es posible validar y verificar que aspectos de una red IoT operan de manera correcta y cuales necesitan intervención. Por consiguiente, este modelo podría ayudar a mitigar posibles vulnerabilidades presentes en las redes IoT, que debido al incremento de objetos interconectados enviando y recibiendo información, se vuelve necesario establecer requisitos mínimos de seguridad y calidad como los que se proponen en este modelo.

Referencias

1. L. Santo *et al.*, "Data Processing on Edge and Cloud: A Performability Evaluation and Sensitivity Analysis," *J Netw Syst Manage*, vol. 29, no. 27, pp. 1 - 24, 2021. DOI: <https://doi-org.ezproxy.unal.edu.co/10.1007/s10922-021-09592-x>
2. T. Wang *et al.*, "Mobile edge-enabled trust evaluation for the Internet of Things," *Information Fusion*, vol. 75, pp. 90 - 100, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2021.04.007>
3. A. Carvalho *et al.*, "At the Edge of Industry 4.0," *Procedia Computer Science*, vol. 155, pp. 276 - 281, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.08.039>
4. S. Rizvi *et al.*, "Threat model for securing internet of things (IoT) network at device-level," *Internet of Things*, vol. 11, pp. 1 - 21, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.iot.2020.100240>
5. N. Bouchemal y S. Kallel, "A Survey: WSN Heterogeneous Architecture Platform for IoT," *Computer Science*, pp. 321 - 332, 2019. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-19945-6_23
6. ISO/IEC, Software Engineering - Software product Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE) - Guide to SQuaRE. Suiza, 2016, p. 54.
7. F. Febrero, C. Calero y M. Á. Moraga, "Software reliability modeling based on ISO/IEC SQuaRE," *Information and Software Technology*, vol. 70, pp. 18 - 29, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2015.09.006>
8. C. M. Zapata *et al.*, "Esquemas preconceptuales ejecutables," *Revista Avances en Sistemas e Informática*, vol. 8, no. 1, pp. 15 - 24, ene., 2011.
9. J. M. Rueda, J. Smith y J. M. Portocarrero, "Framework-based security measures for Internet of Thing: A literature review," *Open Computer Science*, vol. 11, no. 1, pp. 346 - 354, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1515/comp-2020-0220>
10. J. R. Oviedo, M. Rodriguez y M. Piattini. "Certification of IPavement applications for smart cities a case study," *International Conference on Evaluation of Novel Approaches to Software Engineering (ENASE)*, pp. 244 - 249, abr., 2015.
11. K. Mi, "A Quality Model for Evaluating IoT Applications," *International Journal of Computer and Electrical Engineering*, vol. 8, no. 1, pp. 66 - 76, 2016. DOI: 10.17706/ijcee.2016.8.1.66-76
12. I. A. Baños, "Metodología para Evaluar la Calidad de un Producto Software de una Implementación de Internet de las Cosas," Tesis M.Sc., Fac. Ingenierías, Prog. Ing. Sist., Univ. Tecnológica de Bolívar, Cartagena, 2017.
13. Y. Xuanxia *et al.*, "Security and privacy issues of physical objects in the IoT: Challenges and opportunities," *Digital Communications and Networks*, pp. 1 - 12, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dcan.2020.09.001>
14. X. Yao *et al.*, "Security and privacy issues of physical objects in the IoT: Challenges and opportunities," *Digital Communications and Networks*, pp. 1 - 12, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dcan.2020.09.001>
15. R. Rani, V. Kashyap y M. Khurana, "Role of IoT-Cloud Ecosystem in Smart Cities: Review and Challenges," *Materials Today*, pp. 1 - 5, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.054>
16. R. Bharathi *et al.*, "Energy efficient clustering with disease diagnosis model for IoT based sustainable healthcare systems," *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, vol. 28, pp. 1 - 8, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.suscom.2020.100453>

17. S. Nižetić et al., "Internet of Things (IoT): Opportunities, issues and challenges towards a smart and sustainable future," *Journal of Cleaner Production*, vol. 274, pp. 1 -32, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122877>
18. R. S. Pressman, *Software Engineering. A Practitioner's Approach*. Asia: McGraw-Hill Education, 2010.
19. ISO/IEC. *Software engineering — Product quality — Part 1: Quality model, Part 2: External metrics, Part 3: Internal metrics, Part 4: Quality in use metrics*. International Standar ISO/IEC 9126-1, 2, 3, 4. USA: American National Standards Institute (ANSI), 2002.
20. B. Kitchenham, *Procedures for Performing Systematic Reviews in Software Engineering*. Durham: University of Durham. [En línea]. Disponible en https://www.elsevier.com/__data/promis_misc/525444systematicreviewsguide.pdf
21. K. Williamson, *Chapter 12 - The Delphi method, Research Methods for Students, Academics and Professionals*, no. 2, Australia: Chandos Publishing, 2002, pp. 209 - 220.
22. M. Kim, J.H. Park y N.Y. Lee, "A Quality Model for IoT Service," *Advances in Computer Science and Ubiquitous Computing*, vol. 421, pp. 497 - 504, 2016. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-10-3023-9_77
23. A. Ghotbou y M. Khansari, "VE-CoAP: A constrained application layer protocol for IoT video transmission," *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 173, pp. 1 - 27, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2020.102855>
24. P. Arbolea et al., "An IoT open source platform for photovoltaic plants supervision," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 125, pp. 1 - 11, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106540>
25. J. Ariza, et al., "IoT architecture for adaptation to transient devices," *Journal of Parallel and Distributed Computing*, vol. 148, pp. 14 - 30, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpdc.2020.09.012>
26. M. Hasan, et al., "Attack and anomaly detection in IoT sensors in IoT sites using machine learning approaches," *Internet of Things*, vol. 7, pp. 1 - 14, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.iot.2019.100059>
27. E. Geisler y R.N. Kostoff, "The unintended consequences of metrics in technology evaluation," *Journal of Infometrics*, vol. 7, no. 2, pp. 103 - 114, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.joi.2007.02.002>
28. Poniszewska et al., "Studying usability of AI in the IoT systems/paradigm through embedding NN techniques into mobile smart service system," *Computing 101*, pp. 1661 -1685, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00607-018-0680-z>
29. D.Ferraris y C. Fernandez, "TrUStAPIS: a trust requirements elicitation method for IoT," *International Journal of Information Security*, vol. 19, pp. 111 - 127, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10207-019-00438-x>
30. S. Valtolina et al., "Facilitating the Development of IoT Applications in Smart City Platforms," *Computer Science*, pp. 83 - 99, 2019. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-24781-2_6
31. H. Seokjun, K. Youngsun y K.J. Gerard, "Developing Usable Interface for Internet of Things (IoT) Security Analysis Software," *Computer Science*, pp. 322 - 328, 2019. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-24781-2_6
32. M. Shafiq et al., "Selection of effective machine learning algorithm and Bot-IoT attacks traffic identification for internet of things in smart city," *Journal Future Generation Computer Systems*, vol. 107, pp. 433 - 442, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.future.2020.02.017>
33. Y. Liu et al., "Capability-based IoT access control using blockchain," *Journal Digital Communications and Networks*, pp. 1 - 7 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dcan.2020.10.004>

34. D. Gopika y R. Panjanathan, "Energy efficient routing protocols for WSN based IoT applications: A review," *Journal Materials Today: Proceedings*, pp. 1 - 7, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.137>
35. B. Costa, P. F. Pires y F. C. Delicato, "Towards the adoption of OMG standards in the development of SOA-based IoT systems," *Journal of Systems and Software*, vol. 169, pp. 1 - 29, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jss.2020.110720>
36. A. Singh, A. Payal y S. Bharti, "A walkthrough of the emerging IoT paradigm: Visualizing inside functionalities, key features, and open issues," *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 143, pp. 111 - 151, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2019.06.013>
37. H. Zahmatkesh y F. Al-Turjman, "Fog computing for sustainable smart cities in the IoT era: Caching techniques and enabling technologies - an overview," *Sustainable Cities and Society*, vol. 59, pp. 1 - 15, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102139>
38. M. Bures *et al.* (2020, Nov.). A Comprehensive View on Quality Characteristics of the IoT Solutions, EAI International Conference on IoT in Urban Space. 2020. [En línea] (3). Disponible: https://doi-org.ezproxy.unal.edu.co/10.1007/978-3-030-28925-6_6
39. M. Singh, G. Baranwal, y A. Tripathi, "QoS-Aware Selection of IoT-Based Service," *Arab J Sci Eng*, vol. 45, pp. 10033 - 10050, 2020. DOI: <https://doi-org.ezproxy.unal.edu.co/10.1007/s13369-020-04601-8>
40. L. Khalid, "Internet of Things (IoT)," *Software Architecture for Business*, pp.107 -127, 2019. DOI: https://doi-org.ezproxy.unal.edu.co/10.1007/978-3-030-13632-1_7
41. G. Baranwal, M. Singh, M. y D. P. Vidyarthi, "A framework for IoT service selection," *Journal Supercompu*, vol. 76, pp. 2777 - 2814, 2020. DOI: <https://doi-org.ezproxy.unal.edu.co/10.1007/s11227-19-03076-1>
42. K. Kotteswari y A. Bharathi. (2019, Abr.) Spectral Expansion Method for Cloud Reliability Analysis, International Conference on Advances in Computing and Communication Engineering (ICACCE). [En línea]. Disponible: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9080012>.
43. M. Shahzad y A. Ganji. (2018, Nov) IoTm: A Lightweight Framework for Fine-Grained Measurements of IoT Performance Metrics, *IEEE 26th International Conference on Network Protocols (ICNP)*. [En línea]. (26). Disponible: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8526800>
44. S. Li y J. Huang, "GSPN-Based Reliability-Aware Performance Evaluation of IoT Services," *IEEE International Conference on Services Computing (SCC)*, pp. 483 -486, 2017. DOI: 10.1109/SCC.2017.70.
45. A. J. Rodrigues, L. T. Manera y M. Veloso, "Low-cost wireless sensor network applied to real-time monitoring and control of water consumption in residences," *Revista Ambiente & Água*, vol. 6, no.14, pp. 1 - 10, 2019. DOI: <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2407>
46. J. Bauwens *et al.*, "Portability, compatibility and reuse of MAC protocols across different IoT radio platforms," *Ad Hoc Networks*, vol. 86, pp. 144 - 153, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2018.11.013>
47. D. Huynh-Van *et al.*, "Development and Deployment of an IoT-Based Reconfigurable System: A Case Study for Smart Garden," *Industrial Networks and Intelligent Systems*, pp. 243 - 252, 2019. DOI: https://doi-org.ezproxy.unal.edu.co/10.1007/978-3-030-05873-9_20