

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

**FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y
ELECTRÓNICA**

**ARQUITECTURAS Y MODELOS DE REFERENCIA PARA
SISTEMAS IOT**

**ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE ARQUITECTURAS DEFINIDAS
PARA SISTEMAS IOT**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO REQUISITO
PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO/A EN TECNOLOGÍAS DE LA
INFORMACIÓN**

CARLOS EDUARDO TONATO CHUQUIMARCA

carlos.tonato@epn.edu.ec

DIRECTOR: SORAYA LUCÍA SINCHE MAITA

soraya.sinche@epn.edu.ec

DMQ, FEBRERO, 2022

CERTIFICACIONES

Yo, Carlos Eduardo Tonato Chuquimarca declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

Carlos Eduardo Tonato Chuquimarca

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por Carlos Eduardo Tonato Chuquimarca, bajo mi supervisión.

Soraya Lucía Sinche Maita

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

Carlos Eduardo Tonato Chuquimarca

Soraya Lucía Sinche Maita

DEDICATORIA

El presente trabajo lo dedico a mi familia, en particular a mi madre quien supo enseñarme que la dedicación y el esfuerzo al final siempre dan frutos. A mi segunda madre, mi abuelita María quien me cuido y crio con amor, siempre supo guiarme por el camino de lo correcto y el respeto.

También dedico este trabajo a mi novia y a mi hija, Berenice y Meilyn, quienes son el motor de vida y siempre están allí para darme palabras de apoyo y acompañarme en cada uno de los momentos importantes en mi vida

AGRADECIMIENTO

Agradezco a la Dra. Soraya Sinche, quien con su experiencia supo guiarme en todo momento para la realización de este trabajo.

Agradezco a su vez al MSc. Pablo Hidalgo, quien siempre estuvo dispuesto a ayudarme en toda mi vida universitaria.

También creo pertinente agradecer a todos los docentes y compañeros que estuvieron presentes a lo largo de este tramo de mi vida, de quien me llevo enseñanzas y buenos recuerdos.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA	II
DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTO	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO	V
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VII
ÍNDICE DE TABLAS.....	VIII
RESUMEN.....	IX
ABSTRACT	X
1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 OBJETIVO GENERAL.....	2
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	2
1.3 ALCANCE	2
1.4 MARCO TEÓRICO.....	3
1.4.1 INTRODUCCIÓN A LOS SISTEMAS IOT.....	3
1.4.2 DEFINICIÓN.....	4
1.4.3 ELEMENTOS DE LOS SISTEMAS IOT.....	5
1.4.4 APLICACIONES IOT	6
1.4.4.1 Casas Inteligentes	7
1.4.4.2 Ciudades Inteligentes	7
1.4.4.3 Agricultura y Ambiente.....	8
1.4.4.4 Cuidado de la Salud	8
1.4.4.5 Transporte y Logística	10
1.4.5 DESAFÍOS	11
2 METODOLOGÍA.....	13
2.1 ESTUDIO Y ANÁLISIS COMPARATIVO	15
2.1.1 ARQUITECTURA DE 3 CAPAS	15
2.1.1.1 CAPAS DE LA ARQUITECTURA	16
2.1.1.2 Capa de Percepción	17
2.1.1.3 Capa de Red	18
2.1.1.4 Capa de Aplicación.....	19
2.1.2 ARQUITECTURA DE 5 CAPAS	20
2.1.2.1 CAPAS DE LA ARQUITECTURA	20
2.1.2.2 Capa de Percepción	21
2.1.2.3 Capa de Transporte.....	22

2.1.2.4	Capa de Gestión de Servicios	23
2.1.2.5	Capa de Aplicación.....	25
2.1.2.6	Capa de Negocio.....	26
2.1.3	MODELO DE REFERENCIA ITU Y.4000/Y.2060	27
2.1.3.1	CAPAS DEL MODELO DE REFERENCIA	27
2.1.3.2	Capa de Dispositivos [24].....	28
2.1.3.3	Capa de Red [24]	30
2.1.3.4	Capa de Apoyo a Servicios y Aplicaciones (SSAS) [24]	30
2.1.3.5	Capa de Aplicación [24].....	32
2.1.3.6	Capacidades de Gestión y Seguridad [24].....	32
2.1.4	COMPARACIÓN DE ARQUITECTURAS Y MODELO DE REFERENCIA PARA SISTEMAS IOT	34
3	RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	42
3.1	RESULTADOS	42
3.2	CASOS DE ÉXITO	43
3.2.1	ARQUITECTURA REFERENCIAL DE 3 CAPAS.....	43
3.2.1.1	Adaptación para Hábitats Inteligentes	44
3.2.1.2	Adaptación para Agronomía Urbana.....	46
3.2.2	ARQUITECTURA REFERENCIAL DE 5 CAPAS.....	47
3.2.2.1	Adaptación para Sistemas de Transporte	47
3.2.2.2	Propuesta para Tecnología Blockchain.....	50
3.2.3	MODELO REFERENCIAL ITU Y.4000/2060	52
3.2.3.1	Framework para BoT (Blockchain of Things)	52
3.2.3.2	Framework para VLC (Visible Light Communications).....	54
3.3	CONCLUSIONES	56
3.4	RECOMENDACIONES.....	58
4	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	59
5	ANEXOS.....	I
	ANEXO I. Investigación para la selección de los Modelos/Arquitecturas de referencia	II
	ANEXO II. Número de Apariciones por Modelo/Arquitectura.....	VI
	ANEXO III. Tablero Kanban Actualizado según el trabajo realizado en la semana 10	VII

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Elementos de un sistema IoT adaptado de [8]	5
Figura 1.2. Ejemplo de ambiente IoT en un Hospital adaptado de [13]	10
Figura 2.1. Tablero Kanban creado.....	13
Figura 2.2. Arquitectura de 3 capas adaptado de [15] (a) y [19](b).....	16
Figura 2.3. Capa de Percepción adaptada de [20]	17
Figura 2.4. Capa de Red adaptada de [20]	18
Figura 2.5. Capa de Aplicación adaptada de [20].....	19
Figura 2.6. Arquitectura de 5 capas adaptado de [15] (a) y [19](b).....	21
Figura 2.7. Tecnología usada en la Capa de Percepción adaptado de [19].....	22
Figura 2.8. Tecnología usada en la Capa de Transporte adaptado de [19]	23
Figura 2.9. Funcionamiento de la Capa de Gestión de Servicios en base a [19]	24
Figura 2.10. Tecnologías de la capa de Gestión de Servicio basado en [14] y [21].....	25
Figura 2.11. Protocolos usados en la Capa de Aplicación adaptado de [19]	25
Figura 2.12. Funciones de la Capa de Negocio basado en [19]	26
Figura 2.13. Modelo referencial Y.4000/2060 adaptado de [24]	28
Figura 2.14. Capacidades de la capa de Dispositivos del Modelo ITU Y.4000/2060 basado en [24].....	28
Figura 2.15. Capacidades de los dispositivos del modelo ITU Y.4000/2060 basado en [24]	29
Figura 2.16. Capacidades de los <i>gateways</i> del modelo ITU Y.4000/2060 basado en [24]	29
Figura 2.17. Capacidades de la capa de Red del modelo ITU Y.4000/2060 basado en [24]	30
Figura 2.18. Capacidades de la capa de Apoyo a Servicios y Aplicaciones del modelo ITU Y.4000/2060 basado en [24]	31
Figura 2.19. Capacidades de Gestión y Seguridad del modelo ITU Y.4000/2060 basado en [24]	33
Figura 2.20. Capas de las Arquitecturas y modelos Estudiados	35
Figura 3.1. Capas de la adaptación para ambientes Inteligentes adaptado de [28].....	45
Figura 3.2. Implementación de la adaptación propuesta, adaptado de [28].....	45
Figura 3.3. Capas de la propuesta para agronomía urbana adaptado de [29].....	47
Figura 3.4. Adaptación de la arquitectura referencial de 5 capas para sistemas de Transporte adaptado de [30].....	48
Figura 3.5. Aplicaciones de IoT en el Transporte adaptado de [30].....	49
Figura 3.6. Arquitectura adaptada a Blockchain adaptado de [23].....	51
Figura 3.7. Modelo adaptado a Blockchain of Things, adaptado de [25].....	53
Figura 3.8. Servicios IoT y VLC, adaptado de [26]	55
Figura 3.9. Modelo adaptado a IoT y VLC, adaptado de [26]	56

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Ventajas y Desventajas de las arquitecturas y modelos de referencia estudiados.	39
Tabla 2.2. Análisis Comparativo según la presencia de las Capas	40
Tabla 2.3. Análisis Comparativo según las características y funcionalidades por Capa...	40

RESUMEN

Los sistemas IoT son una de las soluciones actuales para la automatización de procesos. Su desarrollo es importante para presentar soluciones que se adapten a las nuevas tecnologías. Pese a su grado de utilización no se cuenta con alguna arquitectura o modelo de referencia estandarizado que permita desarrollar un sistema IoT de manera sencilla. El desarrollo de un sistema IoT puede resultar complicado aún más cuando no se posee una única guía.

El presente trabajo realiza un estudio comparativo de dos arquitecturas y un modelo de referencia utilizados para el desarrollo de sistemas IoT. Se expondrán las características y funcionalidades de las distintas capas de los casos seleccionados y se compararán las mismas para conocer las ventajas y desventajas de su uso. El objetivo es obtener un documento que sirva como guía para la elección de una arquitectura o modelo cuando se necesite implementar un sistema IoT, mismo que cuente con un respaldo para su uso; es decir que ya se lo haya utilizado.

El documento consta de 3 capítulos; el primer capítulo presenta una introducción a los sistemas IoT, su terminología, aplicaciones y desafíos. El segundo capítulo explica la metodología a usarse para el desarrollo del trabajo, la exposición de características y funcionalidades por capa, así como el estudio comparativo. Finalmente, el capítulo 3 muestra los casos de éxito donde las arquitecturas y modelo fueron utilizados para resolver un problema, así como las conclusiones y recomendaciones obtenidas a partir de la realización del trabajo.

PALABRAS CLAVE: Sistemas IoT, Arquitecturas, Modelos de referencia, Aplicaciones IoT.

ABSTRACT

IoT systems are one of the current solutions for process automation. Its development is important to present solutions that adapt to new technologies. Despite its degree of use, there is no architecture or reference model standardized that allows the development of an IoT system in a simple way. Developing an IoT system can be even more complicated when you don't have an unique guide.

The present document makes a comparative study of two architectures and one reference model used for the development of IoT systems. The characteristics and functionalities of the different layers of the selected cases will be exposed and they will be compared to know the advantages and disadvantages of their use. The goal is to obtain a document that serves as a guide for the choice of an architecture or model for the realization of an IoT system, which has a support for its use; that is, it has already been used.

The document consists of 3 chapters; The first chapter presents an introduction to IoT systems, their terminology, applications, and challenges. The second chapter explains the methodology to be used for the development of the work, the presentation of characteristics and functionalities by layer, as well as the comparison. Finally, chapter 3 shows the success cases where the architectures and model were used to solve a problem, as well as the conclusions and recommendations obtained from the completion of the document.

KEYWORDS: IoT Systems, Architectures, Reference Models, IoT Applications.

1 INTRODUCCIÓN

Los sistemas IoT (Internet of Things) pueden ser considerados el futuro de los sistemas electrónicos inteligentes y automatizados; sin embargo, debido a su rápido avance han surgido diversas arquitecturas y modelos referenciales para el desarrollo e implementación de dichos sistemas. De este modo se ha vuelto una tarea bastante difícil que todos los componentes puedan interactuar de una forma fácil al momento de implementar una aplicación IoT. Esto se debe a que los sistemas y dispositivos existentes trabajan bajo distintos modelos de referencia o arquitecturas. Es por ello que se considera importante la posibilidad de proponer una arquitectura referencial que permita trabajar con dispositivos heterogéneos, es decir, que las distintas arquitecturas con las que se trabajen permitan el uso de cualquier tipo de dispositivos IoT, permitiendo de este modo la interoperabilidad [1].

Al no poseer un conocimiento claro de las distintas arquitecturas existentes, la falta de experiencia se convierte en una limitante a la hora de poner en marcha un sistema IoT desde cero, ya que por costumbre se busca una referencia de alguna implementación a modo de guía y por el momento no existe un estándar generalizado para la creación de estos sistemas inteligentes. Además, se debe considerar la oportunidad de mercado que IoT significa; como se menciona en [2] el potencial de la tecnología IoT para la economía es considerable y aun así no se tienen lineamientos totalmente definidos.

El presente Trabajo de Integración Curricular plantea estudiar y analizar 3 de las arquitecturas/ modelos utilizados al momento de desarrollar e implementar un sistema IoT, de modo que futuros proyectos puedan usar una arquitectura o modelos de referencia que permita una implementación sencilla y un conocimiento íntegro de los problemas futuros en cuanto a compatibilidad de código o trabajo se refiere [3].

Para ello se propone realizar una búsqueda académica para reunir información sobre las arquitecturas y modelos de referencia planteados en los últimos 5 años para el desarrollo de sistemas IoT. Con ello se espera obtener un panorama general de las distintas arquitecturas existentes al momento del desarrollo del presente trabajo.

Se conoce que existen varias arquitecturas y modelos de referencia para el desarrollo de sistemas IoT, que van desde propuestas generales a casos específicos acorde a la variedad de áreas de aplicación existentes. Sin embargo, en busca de realizar un estudio comparativo más conciso se seleccionará y hará énfasis en 3 arquitecturas o modelos de referencia, enfocándose en el éxito obtenido por cada arquitectura elegida en las distintas áreas de trabajo, para obtener un documento que sirva de guía al momento de diseñar e implementar un sistema IoT en un futuro.

1.1 OBJETIVO GENERAL

Analizar comparativamente las arquitecturas más utilizadas en la implementación de sistemas IoT

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Estudiar los conceptos generales sobre los sistemas IoT y sus aplicaciones.
2. Seleccionar las 3 arquitecturas más populares para el desarrollo IoT acorde al uso y éxito obtenidos.
3. Describir las arquitecturas seleccionadas en cuanto a sus capas o módulos, así como las tecnologías admitidas.
4. Comparar las arquitecturas seleccionadas en conjunto con los casos de éxitos para mostrar su validez como arquitecturas recomendadas.

1.3 ALCANCE

El presente trabajo iniciará con una Fase Teórica, donde se estudiarán los conceptos de los sistemas IoT, así como los campos de aplicación de estos sistemas. Una vez comprendidos los conceptos, se procederá con la recopilación de información sobre las arquitecturas y modelos de referencia más utilizados dentro de estos sistemas. Para ello se realizará una acotación a los parámetros de búsqueda de dicha información, reduciendo el rango de búsqueda a fuentes cuya publicación se encuentre dentro de los últimos 5 años.

Con la información obtenida y luego de su estudio, mediante una Fase de análisis metodológico se procederá a elegir las tres arquitecturas o modelos de referencia con mayor uso o éxito dentro de las distintas áreas de aplicación de los sistemas IoT. Para ello, la selección de dichas arquitecturas y/o modelos estará basada en los resultados de búsqueda en bases de datos relevantes a nivel de esta área. Una vez seleccionadas las arquitecturas se procederá a realizar un estudio más detallado de sus principales características de manera individual, con el objetivo de conocer su funcionamiento y limitantes en cuanto al manejo de sus capas y/o módulos.

Una vez estudiadas las arquitecturas elegidas, para el análisis comparativo entre las mismas, se definirán ciertos parámetros, comunes o únicos. En esta fase se buscará obtener las características en las cuales cada arquitectura o modelo destaca, para, así identificar cuáles son las debilidades de cada uno. De este modo se obtendrán ciertas ventajas o desventajas de las arquitecturas y/o modelos elegidos.

Finalmente, tras el análisis comparativo, se procederá a la fase de análisis de los resultados obtenidos, con el fin de exponer los mejores ambientes o áreas de trabajo donde se pueden aplicar las arquitecturas y/o modelos estudiados. Para ello se expondrán al menos 2 casos de éxito por cada arquitectura o modelo seleccionado, de modo que se puedan hacer sugerencias sobre el uso adecuado de cada arquitectura para el desarrollo futuro.

1.4 MARCO TEÓRICO

1.4.1 INTRODUCCIÓN A LOS SISTEMAS IOT

Desde el nacimiento del Internet, el ser humano ha buscado la mejor manera de utilizar el poder de esta gran red de comunicaciones para facilitar el acceso a la información y resolver problemas del diario vivir en diferentes ámbitos. Uno de los objetivos buscados es obtener cierto grado de automatización para las tareas que pueden ser repetitivas o que exigen menor cantidad de errores.

En [4], Bonilla indicó que entre más usuarios obtienen acceso al Internet, mayor va a ser la capacidad de esta red, como una gran infraestructura de información y comunicación. Siendo el siguiente paso permitir que objetos y maquinas se comuniquen y coordinen entre ellos. De este modo se planteó la idea de la comunicación entre maquinas, para ayudar al ser humano.

Los sistemas IoT poco a poco se están implementado en distintas áreas como, por ejemplo: el control de la salud, las denominadas casas o ciudades inteligentes, los electrodomésticos inteligentes, juguetes, etc.[5] Estos necesitan acceso a la información de sus usuarios y para ellos el Internet es primordial, facilitando la comunicación..

Un ejemplo que demuestra la versatilidad de los sistemas IoT es la implementación de controles de entrada a lugares públicos o restringidos por efectos de la pandemia. Se crearon sistemas para detectar la temperatura de las personas, y en base a umbrales permitir o no la entrada de estas a ciertos lugares debido al indicador de posible contagio con el virus Codiv-19.

Los sistemas IoT ofrecen para un mismo problema una gran variedad de soluciones. Además, gracias a la versatilidad de implementación es posible que cada usuario cree una solución que se ajuste a sus necesidades. Sin embargo, la versatilidad no garantiza que la implementación sea sencilla.

Si bien pueden existir sistemas sencillos, al no tener un estándar definido es posible que se complique la implementación y en el caso de los sistemas más complejos, este grado de complicación puede ser aún mayor. Por otro lado, debido a su rápida evolución, el

trabajo de estandarización no es fácil y no se tiene en claro un único modelo o arquitectura, que permita implementar sistemas IoT de manera sencilla y eficiente en cualquier área de aplicación.

Aun así, se han dado a conocer ciertas arquitecturas dentro de proyectos IoT existentes, que llegan a ser bastante novedosas. De la misma forma, organizaciones como la ITU (*International Telecommunication Union*) han publicado recomendaciones para orientar a los investigadores en cuanto al desarrollo de aplicativos de la tecnología IoT. Sin embargo, al no existir un estándar como tal, para un usuario es posible crear un sistema IoT bajo su propia lógica y de este modo desarrollar una arquitectura propia.

El problema de interoperabilidad es evidente dentro de los sistemas IoT, ya que no al existir un único estándar para estos sistemas, los fabricantes pueden producir dispositivos que funcionen bajos ciertas tecnologías que no están contempladas en alguna de las arquitecturas o modelos de referencia.

En este contexto, se busca tener un estándar único, sea arquitectura o modelo referencial, para que cualquier tipo de implementación IoT, no tenga problemas de interoperabilidad y pueda así trabajar con dispositivos heterogéneos [6]. Lo que permitirá combinar dispositivos de distintos fabricantes sin tener que reestructurar el sistema completo o tener problemas al momento de integrarlos.

El reto de la estandarización es complicado debido a la gran cantidad de dispositivos existentes. Además, tomando en cuenta la velocidad de evolución de la tecnología, la lista de nuevos dispositivos que se integran a un sistema IoT está en un constante aumento, por ello se debería disponer de un estándar único que permita disminuir este problema.

1.4.2 DEFINICIÓN

Se conoce como IoT (*Internet of Things*) a la tecnología que involucra la conexión de todo dispositivo físico disponible con el Internet. Dichos dispositivos pueden ir desde un simple sensor hasta complejos aparatos que unen sensores, actuadores y tecnología de comunicación [4]. Uno de sus objetivos principales es el brindar facilidades en el diario vivir de las personas o en su defecto volver de cierta manera inteligente a todo objeto capaz de adaptarse a esta tecnología. Pasando a una visión superior, IoT hoy en día es usado para la creación de sistemas de automatización.

Cuando en un sistema IoT se accede al manejo de datos personales o privados, los dispositivos se pueden volver una puerta poco segura hacia la privacidad de los usuarios, mismos que desconocen si dichos dispositivos son seguros. Este problema ocurre por la

baja importancia que dan los fabricantes e implementadores de sistemas IoT a la seguridad, al no poseer una guía para tratar con este tema.

Un dispositivo IoT que tenga la misma funcionalidad u objetivo de uso, puede no responder de la misma manera según la implementación realizada si tienen distinto fabricante, a la par de no funcionar o poseer errores. En [7], Pötter y Sztajnberg hacen referencia a la falta de compatibilidad en cuanto a dispositivos IoT se refiere, proponiendo una posible solución, donde conectan varios equipos mediante diferentes estándares de comunicación como USB, Bluetooth, Zigbee.

Día tras día los dispositivos IoT están evolucionando, logrando adaptarse a nuevas tecnologías de comunicación o adquisición de datos. Los cambios constantes permiten comprender que este tipo de tecnología será muy usada en el futuro para volver más simples los procesos y algunos trabajos

1.4.3 ELEMENTOS DE LOS SISTEMAS IOT

Para comprender el alcance de los sistemas IoT es importante reconocer sus elementos básicos y el papel que desempeñan. Un sistema de este tipo está conformado por una serie de bloques funcionales, tales como:

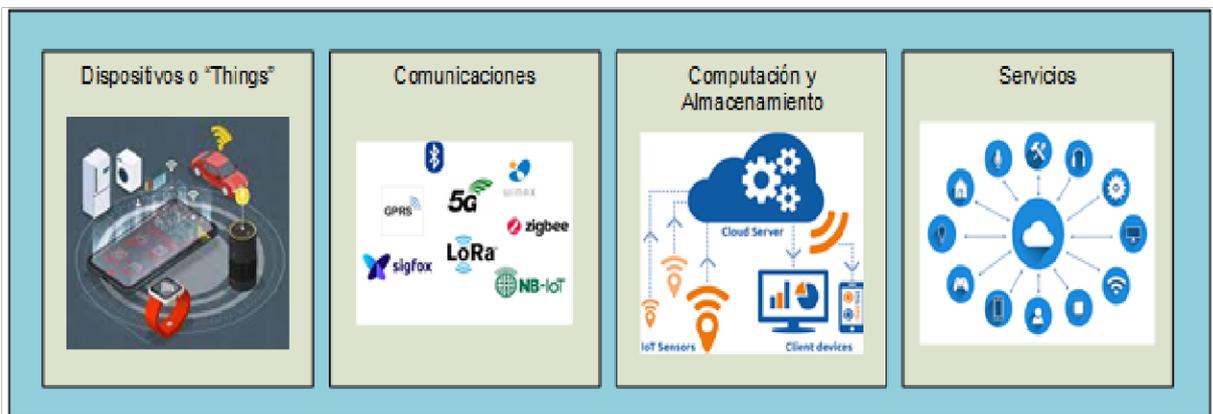


Figura 1.1. Elementos de un sistema IoT adaptado de [8]

- Dispositivos o "Cosas": cualquier dispositivo está dentro del alcance de los sistemas IoT, ya que existen varios gadgets que vuelve a un simple objeto en un dispositivo IoT; la premisa generalmente es que dicho objeto o cosa pueda acceder a Internet y pueda comunicarse con sus semejantes. Los sensores son recolectores de datos permiten tomar decisiones u obtener información del medio para su uso dentro de un sistema IoT. De igual manera hay ciertos dispositivos conocidos como actuadores, que reciben señales para ejecutar determinada acción como una alarma o un motor.

- Comunicaciones: en este bloque se definen diferentes tecnologías de red que permiten la comunicación entre los dispositivos que integren el sistema. De este modo se contemplan tecnologías como: Wifi, Bluetooth, Zigbee, redes celulares, redes satelitales, conexiones LAN, etc. que permitan alcanzar un grado de comunicación aceptable entre los dispositivos para la transmisión de los datos que estos obtienen del mundo real.
- Computación y almacenamiento: se refiere a la manipulación y análisis de los datos, mismos que a simple vista son solo números. Sin embargo, al procesarlos se pueden obtener escalas de medida o algún tipo de información que permita tomar decisiones acordes al área de aplicación o al sistema que se esté automatizando. La computación de los datos es vital para los sistemas IoT, generalmente es local pero es posible usar la computación en la Nube. Entre las tecnologías para el tratamiento de datos se tiene la minería de datos, Big Data, analítica de datos, entre otras. Este bloque también es el encargado de almacenar una gran cantidad de datos, que pueden estar disponibles tanto de manera local, en bases de datos; así como en el almacenamiento en la nube.
- Servicios: son las aplicaciones que ofrecen los sistemas IoT, es decir los lugares o ambientes donde serán implementados. Dentro de los mismo se tienen servicios de entrega, agregación o recolección de información (*Smart grid*), casas y ciudades inteligentes, el transporte inteligente y la automatización de procesos industriales, entre otros [2], donde se ven involucrados todos estos componentes de los sistemas IoT para lograr interactuar con los usuarios de los mismos.

1.4.4 APLICACIONES IOT

Para los sistemas IoT las áreas de aplicaciones pueden llegar a ser prácticamente infinitas, ya que cualquier planteamiento puede ser considerado para la creación de un sistema IoT, existiendo por ello aplicaciones complejas, así como proyectos relativamente mucho más sencillos.

Se puede considerar como sistema IoT a aquellos proyectos que poseen los elementos descritos en la sección 1.4.3. Todo sistema deberá al menos poseer los 4 bloques funcionales descritos, aunque el grado de aplicación de cada uno puede variar según el área de desarrollo. Otro punto importante es la necesidad de acceso remoto que todo sistema debe de cumplir.

Entre las áreas de aplicación más comunes y populares donde es posible integrar un sistema IoT, según Lea [9] existen algunas áreas de aplicación de IoT, tales como:

1.4.4.1 Casas Inteligentes

Las Casas Inteligentes son una de las mayores aplicaciones para la tecnología IoT, donde se puede evidenciar la existencia de sistemas complejos o muy simples. En sus inicios, se podría decir que una casa inteligente era aquella capaz de ser controlada a distancia con un dispositivo móvil, por ejemplo, el abrir o cerrar puertas y ventanas o el control de las luces, llegando dar información sobre el estado de la casa, temperatura, etc. [2]

En la actualidad, una casa inteligente puede brindar una mayor cantidad y variedad de servicios desde el control total y programable de las luces, puertas, así como la seguridad familiar, el monitoreo del estado de salud, alertas por parte de electrodomésticos para avisar sobre fallas o productos faltantes, alarmas contra robo o siniestros como los incendios, entretenimiento entre otros [4]. Y con todos estos servicios se deben integrar nuevas tecnologías que los sistemas IoT deben soportar para lograr un correcto funcionamiento y ser útil al usuario. Si bien todos los servicios no deben ser estrictamente necesarios, en algunos casos conocer las posibilidades permite planificar a futuro como integrar nuevos servicios volviéndolos más eficientes

A mayor número de servicios y componentes tecnológicos, los sistemas IoT de las casas inteligentes pueden llegar a tener problemas de interoperabilidad entre dispositivos heterogéneos. Ya que cada dispositivo que puede formar parte de una casa inteligente no siempre proviene del mismo fabricante, y es posible que no pueda trabajar con los elementos IoT que ya forman parte del sistema de la casa Inteligente.

Los aparatos electrónicos de un sistema IoT tienen acceso a gran cantidad de información de sus usuarios, así como de su entorno y costumbres. Es por ello que es posible escuchar acerca de casas con sistemas de seguridad biométricos, controles o monitores de salud en casa, alertas en tiempo real que son aplicaciones de IoT que podrían realizarse como un único sistema.

Al no existir una estructura que defina como incorporar los servicios o que protocolos usar para un mejor desempeño, pueden ocurrir errores durante la implementación. Las casas inteligentes poseen una gran variedad de soluciones para un mismo proceso, mismas que existen debido a las consideraciones que cada desarrollador aumenta o quita en su sistema.

1.4.4.2 Ciudades Inteligentes

Según Al-Fuqaha [2] una ciudad inteligente posee un ambiente con varios sistemas basado en tecnología de automatización e IoT. Llegando a proveer a sus habitantes no solo de la

comodidad de una casa inteligente, sino de una mejora en cuanto a sistemas de transporte, ambiente entre otros servicios que tratan de mejorar la calidad de vida de los habitantes.

En [10], Sethi y Sarangi explican que uno de los aspectos más importantes y aplicables para el desarrollo de una ciudad inteligente es la implementación del transporte Inteligente y el control de los servicios de agua. De este modo se plantea el uso de sistemas de Identificación por Radiofrecuencia (RFIDs) para gestionar el tráfico vehicular, identificar posibles conductores ebrios, disponibilidad de lugares de parqueo, etc. Este tipo de prácticas tratan de mejorar la seguridad y atención de siniestros dentro de los límites de la ciudad inteligente.

1.4.4.3 Agricultura y Ambiente

Como se ha mencionado, dentro de los sistemas IoT se tienen dispositivos llamados sensores que permiten obtener datos del medio físico que los rodea, mismos que son usados en los sistemas con varios propósitos. Por un lado, se tiene la posibilidad de obtener datos del medioambiente para indicar a los usuarios el estado del clima, por ejemplo, la temperatura, humedad, radiación solar, etc.[11] Si se piensa a gran escala es posible obtener los datos climatológicos de cualquier parte del mundo en tiempo real.

Siguiendo la lógica de la obtención de datos ambientales, se ha planteado la creación de sistemas que permitan obtener indicadores del grado de contaminación del aire y agua en grandes ciudades, buscando crear un monitoreo medioambiental inteligente que alerte a los usuarios del exceso de contaminación para tomar medidas preventivas y correctivas.

Dentro de la misma categoría se tiene el cuidado de plantas y sembríos, que gracias a los sistemas IoT se pueden considerar un tanto autónomos. Mediante los sensores es posible obtener datos del suelo y aire, para mediante un sistema IoT automatizar el proceso de riego para ayudar a mantener los cultivos en condiciones óptimas, generando mayores beneficios [12]. Con esto se busca disminuir los fallos humanos en cuanto al cuidado de los sembríos ya que es posible que ciertas plantas mueran por un mal cuidado, sus frutos no estén maduros a tiempo, o produzcan una cosecha en menor cantidad de la esperada.

1.4.4.4 Cuidado de la Salud

Los Sistemas IoT también han incursionado dentro del área de la salud, donde nuevamente se hace uso de diversos sensores y el procesamiento de datos para obtener datos reales del paciente de manera sencilla, permitiendo un diagnóstico que en ocasiones ya no requiere del contacto físico, algo esencial en los tiempos actuales, donde una pandemia requiere cierto distanciamiento social. Domínguez y Vargas [13] indican que es común el

uso de sistemas IoT para la integración de soluciones en hospitales incluso antes de los inicios de la pandemia.

La premisa del cuidado de la salud se basa en otorgar una mejor atención al paciente y facilitar el trabajo a los doctores. Un hospital puede optar por implementar un sistema IoT que agilite el proceso de ingreso de los pacientes por medio de dispositivos IoT que envíen los datos de los signos vitales directamente al sistema. De la misma manera se habla de la posibilidad de usar dispositivos IoT para mejorar la respuesta ante solicitudes de pacientes internados o ante las posibles emergencias que existan, mejorando así sus tiempos de respuesta y por ende logrando salvar un mayor número de vidas.

Por otro lado, el uso de este tipo de tecnología no es exclusiva de centros hospitalarios o de personal estrictamente calificado. Hoy en día es común el uso de aplicaciones para la correcta realización y monitoreo de actividades físicas, en este caso el uso de sensores se aplica al control de las actividades realizadas a modo de un historial para conocer la cantidad de ejercicio realizado [8]. En el caso de las actividades físicas, la información es utilizada para mostrar la cantidad de calorías quemadas durante el ejercicio, el número de kilómetros recorridos, etc.

En [13] se presenta un ejemplo de ambiente integrado para un hospital basado en soluciones IoT. Como se presenta en la Figura 1.2, los casos donde puede un hospital implementar soluciones IoT son variados y se requiere de la recolección y procesamiento de la información.

Tecnologías como las WBAN (*Wireless Body Area Network*) se consideran el futuro de la medicina y control de la salud. El uso de redes inalámbricas que mediante sensores obtienen datos del estado de salud de la persona es una tendencia clara dentro de los sistemas IoT [13]. Sin embargo todas estas soluciones poseen ciertos riesgos, por lo que se procura otorgar un mejor control a los datos obtenidos o enviados a los pacientes en este tipo de soluciones, ya que cabe la posibilidad de que un agente externo, entiéndase un ciberdelincuente por ejemplo, puede modificar esta información y cambiar los parámetros dando falsas alertas, o por otro lado medicando erróneamente al paciente.



Figura 1.2. Ejemplo de ambiente IoT en un Hospital adaptado de [13]

1.4.4.5 Transporte y Logística

Otra área de aplicación importante para los sistemas IoT es su integración en los servicios de movilidad, no solo en las entregas a domicilio sino también en los sistemas de transporte tanto público como privado, para de este modo mejorar la circulación. La conexión entre vehículos y las redes vehiculares fueron identificadas como la tecnología clave para mejorar la seguridad vial y la eficiencia del transporte público y privado [14].

Los sistemas IoT dan soporte a las aplicaciones para la movilidad vehicular y la obtención de datos de forma inteligente, para lograr automatizar el transporte. Hace algunos años, en China se planteaba crear un sistema basado en IoT para mejorar su tráfico vehicular. Para ello se invirtió en la implementación de una policía electrónica, señales de tráfico inteligentes, servicio de Taxi inteligente, entre otros [14]. La idea procuraba que una ciudad inteligente debería tener una alta eficiencia en el transporte, para mejorar las condiciones

de vida y facilitar el control y aplicación de las leyes de tránsito a sus habitantes, brindándoles mayor seguridad

Esta área es importante ya que el número de vehículos (carros, autobuses, furgonetas, motocicletas) va siempre en aumento y es común que en grandes ciudades existan largas colas de tráfico ya sea por accidentes o por exceso de tráfico. Con las redes vehiculares, se plantea la solución de comunicar este tipo de percances a los conductores para la toma de vías alternas. Adicionalmente, se abre las puertas a mejorar el tiempo de respuesta de las autoridades cuando surge un problema vial.

1.4.5 DESAFÍOS

Pese a que IoT es una tecnología que lleva ya una cantidad considerable de años en la industria comercial, es bien conocido que la misma no cuenta con una única arquitectura estandarizada. Si bien se tienen varias recomendaciones acerca de cómo implementar sistemas IoT en diversas áreas de aplicación, existe también la posibilidad de crear una arquitectura propia para dar solución a determinados problemas.

Se podría decir que uno de los mayores problemas dentro de la tecnología IoT es el no disponer de una única arquitectura referencial para la implementación de sistemas IoT. La no existencia de un estándar único ha provocado que cada autor o investigador proponga una arquitectura a modo de solución para determinados problemas. Sin embargo, dichas soluciones pueden no ser válidas para otros y por ese motivo se crean nuevas propuestas. Esto provoca que las nuevas investigaciones progresen de manera lenta, al tener que plantear sus propias soluciones, provocando que la dificultad de implementación se incremente.

Por otro lado, la heterogeneidad de los dispositivos es un tema preocupante que va de la mano con la estandarización de una arquitectura, ya que debido a la ausencia de un solo estándar, los fabricantes crean dispositivos propietarios, que funcionan bajo ciertos parámetros definidos por ellos mismos. Esto puede provocar que sea difícil la interoperabilidad entre equipos de distintos fabricantes en un sistema IoT, ya que puede ocurrir que las tecnologías planteadas por una casa fabricante no sean las mismas que soporte un dispositivo distinto y por ello se limita trabajo entre estos dispositivos.

A un nivel similar, al manejar datos de sus usuarios, los sistemas deben asegurar la confidencialidad e integridad de estos. Por lo que se convierte en un desafío el nivel de seguridad que presenten los sistemas IoT, como es el caso de campos como la medicina o seguridad domiciliaria, donde puede ser vulnerado y por ende mal usado por un atacante en su afán de obtener información o mediante ataques deliberados. Es por ello que se

busca también que se aseguren los datos en los sistemas IoT, por medio de cifrado u otras técnicas de seguridad de la información.

En el presente trabajo de Integración Curricular se realizará un estudio comparativo entre 3 arquitecturas y/o modelos referenciales para la creación de sistemas IoT, para de este modo obtener una visión general de la estructura de éstas. Si bien este trabajo no se puede considerar un estándar, puede ser visto como una guía para un futuro trabajo de implementación de los sistemas IoT.

2 METODOLOGÍA

Para alcanzar los objetivos planteados se usará como base la metodología Kanban, como método organizacional para definir un flujo de tareas que permita llevar un control del desarrollo del trabajo de Integración Curricular. Al tratarse de un trabajo basado en componentes individuales, todas las tareas serán realizadas por una sola persona.

En primera instancia se crea el tablero con las tareas necesarias para lograr alcanzar los objetivos propuestos en este Trabajo de Integración Curricular, para ello se desglosan en pequeñas subtareas que permitan avanzar con el trabajo. Según como el trabajo se va realizado, dicho tablero se actualizará.

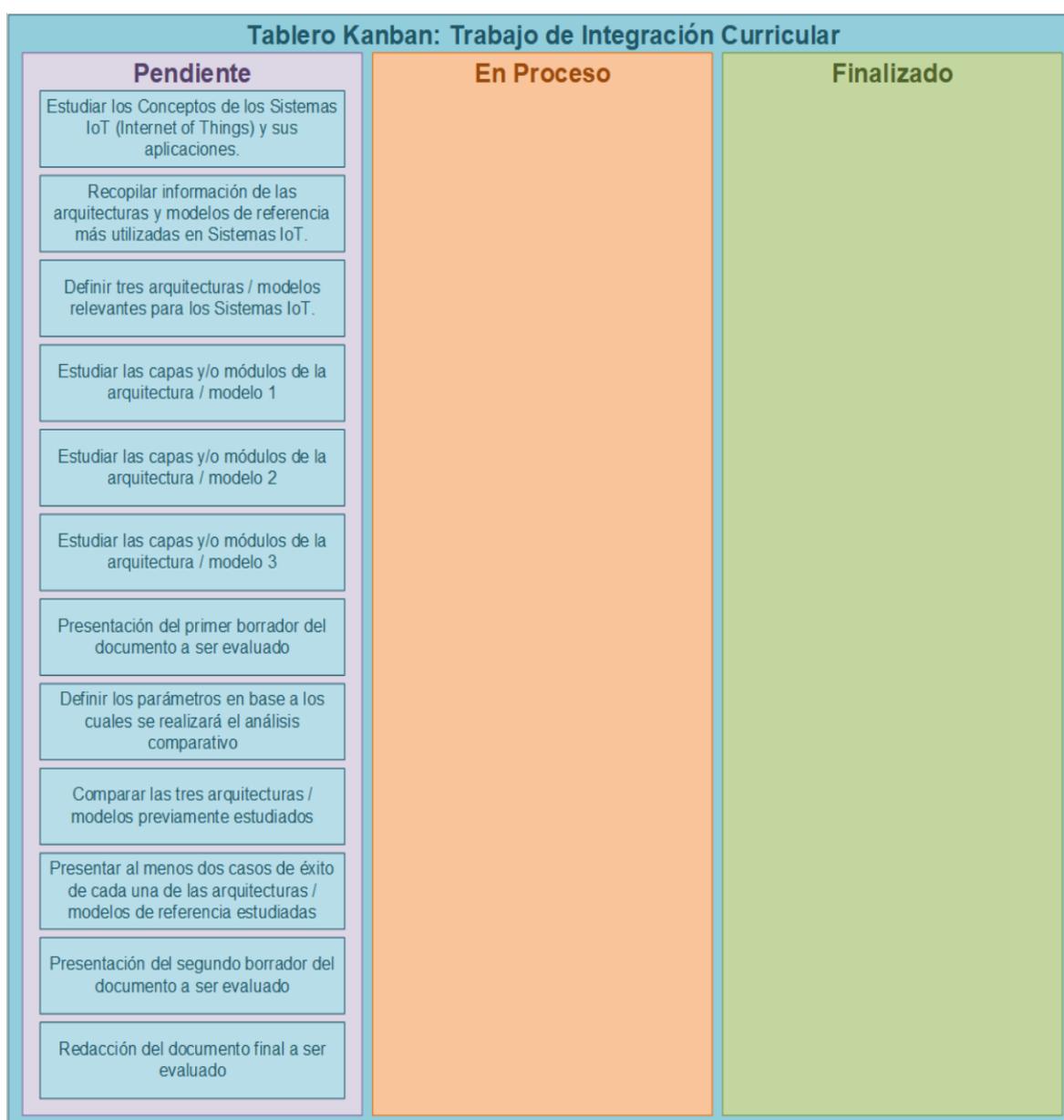


Figura 2.1. Tablero Kanban creado

Una vez planteado el camino a seguir (ver Figura 2.1), para cumplir con los objetivos, se inicia el trabajo con las primeras tareas a realizar. Para todas las fases se usa un enfoque cualitativo, donde se propone exponer y comparar las arquitecturas más populares en base a características que las mismas posean. Para cumplir el primer objetivo específico se estudiarán los conceptos de un sistema IoT y sus aplicaciones, en base a varios artículos o trabajos que expliquen el funcionamiento de los sistemas y la aplicabilidad que tiene IoT en los problemas actuales, obteniendo un resumen de los temas más importantes obtenidos con este estudio conceptual.

Para seleccionar las 3 arquitecturas a estudiar se procederá a recolectar la información necesaria, donde se propone usar un análisis documental teórico exploratorio. La investigación se basará en la recolección y revisión de documentos científicos (artículos publicados en revistas o conferencias, libros, etc.) que tengan información relevante para el tema del presente trabajo. Para ello se usan fuentes académicas como: IEEE Explorer, ACM, MPDI, Scholar Google, ITU-T; de donde se obtienen los documentos que serán analizados para seleccionar las arquitecturas.

Para la búsqueda se ajustan los resultados a los últimos 5 años, acorde a la fecha de publicación. Además, se hace uso de palabras clave como: IoT, Architecture, Reference Model, Applications IoT, etc. o una combinación de estas, en busca de obtener artículos con información relevante.

Luego de revisados estos documentos, se procede a realizar una categorización. La categorización permitirá organizar la información, que será depurada para obtener únicamente fuentes que contengan información sobre IoT y sus Arquitecturas. Una vez depurada esta lista de fuentes se procede a elegir las 3 arquitecturas más populares, basándose en la cantidad de información obtenida (número de apariciones) y la explicación que se obtenga de la estructura básica de la arquitectura.

Una vez seleccionadas las tres arquitecturas o modelos referenciales, se expondrá cada una de forma detallada. Para ello se hará uso de las referencias antes analizadas para ir explicando cada una de las capas, de la manera más clara posible, indicando la funcionalidad y tecnología usada para cumplir la misma. En este punto se recalca que para cada una de las arquitecturas se usará una referencia central de donde partirá la explicación, complementando la misma con ayuda de las otras referencias, para lograr una explicación más amplia y concisa de cada capa.

Una vez estudiadas las arquitecturas o modelos referenciales, se procederá con el análisis comparativo, donde se resaltarán las fortalezas y debilidades de las arquitecturas. Se

contrastarán las características expuestas en cada caso estudiado. En este punto, tras contrastar las 3 arquitecturas o modelos estudiados se procede a exponer los casos de éxito para cada uno, donde se evidencie su utilidad dentro de las diversas áreas de aplicación. Esta exposición de los casos de éxito se basará en la explicación de los sistemas o soluciones hallados, así como el uso de la arquitectura o modelo referencial para presentar una respuesta a los problemas a los cuales se les desea dar una solución mediante los sistemas IoT.

2.1 ESTUDIO Y ANÁLISIS COMPARATIVO

Tras recopilar una cantidad considerable de información sobre los modelos y las arquitecturas de referencia existentes para el diseño de sistemas IoT, se procede a depurar la bibliografía obtenida para seleccionar las arquitecturas que serán tomadas en cuenta para la realización del presente trabajo de titulación. El primer paso previo a la elección de las arquitecturas a estudiar es la selección de las principales fuentes disponibles para la obtención de información y que permitan explicar del funcionamiento de las arquitecturas o modelos por elegir.

Una vez seleccionadas aquellas referencias que aporten significativamente a la realización del presente trabajo, según el nivel de explicación de las arquitecturas propuestas en estas fuentes, se procede con la elección de las 3 arquitecturas o modelos referenciales que será estudiados; para ello se tomó como criterio de selección la cantidad de apariciones de las diversas arquitecturas en las fuentes consultadas, el grado de explicación de su estructura e información por cada capa y los casos de éxito. En el Anexo I se presenta la tabla con el desglose de las arquitecturas encontradas en las fuentes seleccionadas. En el Anexo II se muestra una tabla con la cantidad de apariciones de las arquitecturas y modelos, misma que permitió realizar la elección de las arquitecturas en base a los criterios mencionados anteriormente. Finalmente se eligieron las arquitecturas de: 3 capas, 5 capas y el modelo de referencia ITU Y.4000/2060 como objetivo de estudio del presente trabajo, para su posterior análisis comparativo y exposición de casos de éxitos.

2.1.1 ARQUITECTURA DE 3 CAPAS

Existen una gran cantidad de arquitecturas propuestas en pro de ayudar a comprender el concepto de IoT de una manera más precisa, de entre ellas una de las más usadas es la arquitectura de 3 capas. Si bien esta arquitectura define la estructura central básica para cualquier sistema IoT, la misma puede brindar todo tipo de servicios para las aplicaciones que resultan más complejas [15]. Este nivel de complejidad tiene que ver con la cantidad

de datos y el poder computacional requerido; además de las rutas que debe crear o elegir para la transmisión de la información obtenida [16].

Pese a lo básica que resulta esta arquitectura, es posible hallarla en soluciones que necesiten procesos complejos. Por ejemplo, existen algunas propuestas de arquitecturas de 3 capas para el desarrollo de las *Smart Grid* con tecnología IoT [17].

De la misma manera, modelos referenciales se derivan de la arquitectura de 3 capas dando así a conocer modelos con el mismo número de capas, pero con diferentes nombres. El modelo de referencia James-Smith [18], denominado de propósito general, fue usado para brindar servicios en tiempo real a aplicaciones embebidas en la red y su estructura muestra las 3 capas básicas indicadas en esta arquitectura.

2.1.1.1 CAPAS DE LA ARQUITECTURA

En el caso de la arquitectura de 3 capas, el nombre de cada una de las capas puede variar. Generalmente a la capa física, aquella que tiene mayor contacto con el mundo real, se la denomina capa de Percepción [15], siendo la capa más baja de esta arquitectura.

La segunda capa, que principalmente se encarga de las comunicaciones, es conocida como la capa de Red (*Network*) [15], aunque también es posible hallarla con el nombre de la capa de Transporte [19]. Si bien el nombre de capa de Transporte es menos usado, esto depende del autor, ya que no existe un estándar para el nombre de las capas o módulos dentro de las arquitecturas IoT.

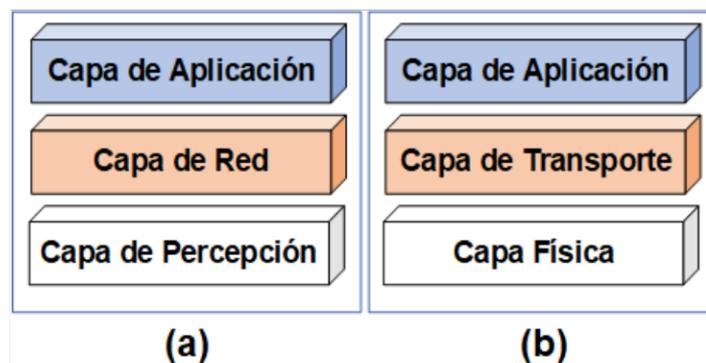


Figura 2.2. Arquitectura de 3 capas adaptado de [15] (a) y [19](b)

Finalmente, la última capa, la más cercana al usuario, lleva el nombre de la capa de Aplicación [15]. Este nombre es el más usado para la última capa, donde el sistema IoT interactúa con el usuario para brindarle sus servicios y así cumplir el propósito para el cual fue creado. Una vez definidos los nombres se procede a explicar con mayor detalle cada una de las capas que componen esta arquitectura.

2.1.1.2 Capa de Percepción

Es la primera capa de la arquitectura de 3 capas. Cumple con la función de obtener la información del ambiente por parte de los sensores [15]. Esto debido a que el medio ambiente contiene una gran cantidad de datos relevantes, según el tipo de sistema IoT implementando. El cómo estos datos son obtenidos es tarea de la capa de Percepción, que puede combinar el uso de varios sensores (temperatura, humedad, gas, IR, movimiento, etc.) hasta dispositivos más complejos (objetos inteligentes).

Otro nombre con el cual se conoce esta capa es el de “Capa de Sensor” (*Sensor layer*). En [16] se menciona que en esta capa es posible realizar no solo la medición de datos (sensar) sino a su vez procesar el estado de la información mediante el uso de dispositivos inteligentes asociados a los objetos (things). Pese a la diferencia de nombres, para ambos casos, la principal tarea de la primera capa es la recolección de los datos por medio del uso de sensores.

Por otro lado, se indica que otra de las funcionalidades de esta capa es la identificación de los dispositivos que forman parte del sistema IoT. En [19] se hace mención a un estudio sobre las investigaciones sobre sistemas IoT, donde se recalca que éstas buscaban un método único de identificación de objetos, para que la gestión y seguridad de estos sea más sencilla al nivel de esta capa, de modo que se admitan más dispositivos sin tener que perder el control sobre los datos obtenidos.

Con ello también se indica que otra de las funcionalidades de la primera capa es el descubrimiento de dispositivos y objetos dentro del sistema IoT. Para la arquitectura de 3 capas, el principal componente de la capa de percepción son los dispositivos y sensores, es por ello que la identificación y descubrimiento de los estos son consideradas funcionalidades de esta capa.



Figura 2.3. Capa de Percepción adaptada de [20]

En la Figura 2.3 se puede observar de manera más detallada los objetos encargados de la obtención de datos del medio ambiente que pueden verse involucrados en la primera capa

de la arquitectura. En [20], Zhong indica que la primera capa también puede encargarse del control, ya que si bien la capa recolecta datos con los dispositivos antes indicados, la capa también recibe ordenes de las capas superiores para controlar acciones de los actuadores; además de preparar los datos para su transmisión. A pesar de que esta funcionalidad no es considerada por los otros autores que obvian el control de los dispositivos, se puede considerar como una funcionalidad de esta capa.

2.1.1.3 Capa de Red

Una vez obtenida la información mediante la capa de Percepción, el siguiente paso es el proceso de transmisión de esta información; siendo este el trabajo de la siguiente capa de la arquitectura. La capa de Red en [15] se define como aquella encargada de la conexión de los dispositivos inteligentes, los dispositivos de red y los servidores. Donde sus funciones recaen en transmitir y procesar los datos obtenidos de sensores ubicados en el medio ambiente.

En [18], se menciona que el transporte de los datos, que llegan a la capa de Red, pueden ser transmitidos por medio de las redes de comunicación cableadas o inalámbricas, utilizando protocolos como IP, UDP y TCP. Sin embargo, no se mencionan otras tecnologías para la comunicación hecho que puede indicar que la arquitectura no está definida para una gran cantidad de tecnologías de comunicación.

En [19] se indica que la arquitectura de 3 capas también debe ser capaz de soportar tecnologías de comunicación como lo son: Ethernet, Wifi, Wifi-Max, Zigbee y BLE, entre otras.



Figura 2.4. Capa de Red adaptada de [20]

En la Figura 2.4 se listan algunas de las tecnologías de comunicación que pueden ser utilizadas por la capa de Red. Cabe mencionar que también esta capa puede incluir otras funcionalidades, como pueden ser la computación en la nube, Big Data, etc. Ya que generalmente esta capa debe proveer a la capa superior de información ya analizada para su presentación a los usuarios.

En trabajos como [19], [20] se le da el nombre de capa de Transporte; donde se detallan las mismas funcionalidades antes mencionadas, haciendo énfasis en la transmisión de datos mediante comunicaciones de corta y larga distancia.

Para las transmisiones de corta distancia, aparte de las tecnologías ya mencionadas, se pueden usar redes Ad-Hoc, redes Mesh, redes de comunicaciones industriales (industrial bus), etc. En cuanto a las distancias largas generalmente se pueden usar redes móviles (celulares), satélites, etc. [20], mismas que permiten ampliar la cantidad de tecnologías que debería soportar un sistemas IoT dependiendo del área de aplicación.

Si bien se menciona una gran cantidad de tecnologías para la comunicación, no todas son contempladas en los distintos trabajos, es por ello que dependiendo de la referencia un desarrollador puede o no contemplar ciertos dispositivos que no soportan tales tecnologías.

2.1.1.4 Capa de Aplicación

La Capa de Aplicación en [15] se define como aquella donde se ubican todos los servicios que el sistema brindará a sus usuarios, definiendo de esta manera el área de aplicación para la cual fue creada (Casas inteligentes, ciudades inteligentes, transporte inteligente, etc.) Esta es la única capa a la cual el usuario final tiene acceso y que conoce casi en su totalidad, siendo el resto de la estructura (capa de Percepción y Red) un proceso desconocido.

Por otro lado, en [19] la capa de Aplicación se define como la responsable de la interacción entre el sistema y los usuarios finales, esto gracias a que dicha capa provee a los usuarios de los servicios solicitados como pueden ser la automatización de una casa (casas inteligentes), cultivos inteligentes, monitoreo y cuidado de la salud de la tercera edad (medicina). El servicio a otorgar por parte de esta capa depende del diseño del sistema IoT, siendo posible controlar el sistema completo o tan solo monitorear las señales que fueron obtenidas mediante la capa de Percepción.



Figura 2.5. Capa de Aplicación adaptada de [20]

En las aplicaciones para *Smart Grid* se menciona que la capa de transporte no solo brinda acceso a los servicios, sino que se encarga de procesar la información obtenida por la capa de Percepción y que le es enviada por la capa de Red [17]. Anteriormente se mencionó que la capa de Red es la encargada del procesamiento, sin embargo, para este tipo de aplicaciones el procesamiento llega a suceder en esta capa. El sistema IoT necesita de soporte de las tecnologías de procesamiento y manejo de información, como pueden ser el uso de la computación en la nube, bases de datos, minería de datos, etc.

2.1.2 ARQUITECTURA DE 5 CAPAS

La arquitectura de 5 capas puede considerarse una evolución de la arquitectura de 3 capas; si bien el paso siguiente sería una arquitectura de 4 capas, se eligió la estructura de 5 capas debido a la versatilidad que presenta esta arquitectura para gestionar funcionalidades que están estrictamente relacionadas con el negocio, además de un método para permitir una implementación con dispositivos heterogéneos.

Para la arquitectura de 5 capas se observan trabajos que modifican la estructura de las capas para focalizar mejor los servicios otorgados, o que proponen una arquitectura cuyas capas son totalmente diferentes, pero con propósitos similares [21]. Este tipo de cambio sugiere que la arquitectura de 5 capas tiene capacidad de adaptarse de mejor manera gracias al mayor número de capas existentes, mismo que permite distribuir las tareas volviéndola así versátil para distintas áreas de aplicación.

2.1.2.1 CAPAS DE LA ARQUITECTURA

En [15] se indica que la arquitectura de 5 capas incorpora 3 capas nuevas, en comparación a la arquitectura de 3 capas, para designar algunas tareas a capas específicas. De este modo separa la capa de Red en 2 capas e incorpora una capa nueva al final del modelo. La arquitectura incluye las siguientes capas: Capa de Percepción, Capa de Transporte, Capa de Procesamiento, Capa de Aplicación y Capa de Negocio.

En [19], el modelo de 5 capas es el muy similar al expuesto en [15], salvo por el cambio de nombre de la capa de procesamiento, ya que se la presenta como la capa de gestión de los servicios, mismos que serán provistos en las capas superiores (Aplicación, Negocio). Este cambio de nombre agrega ciertas funcionalidades, manteniendo la capacidad de procesamiento.

Las capas propuestas para esta arquitectura guardan cierta relación con las mencionadas en la sección 2.1.1.1, no solo en cuanto al nombre planteado por los autores, sino en cuanto a funcionalidades se refiere. Para comprender de una mejor manera este hecho, se explica cada una de las capas de esta arquitectura.

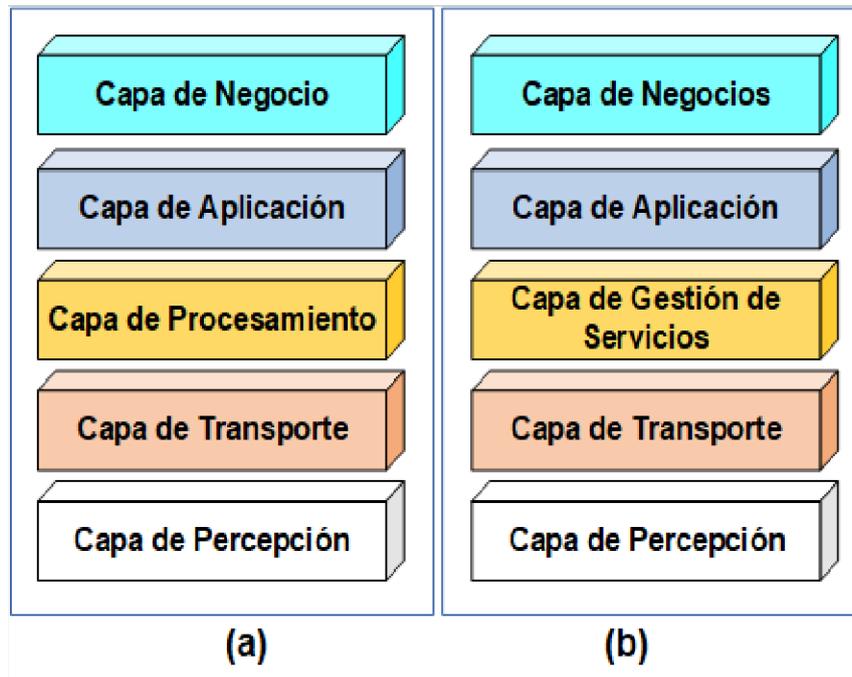


Figura 2.6. Arquitectura de 5 capas adaptado de [15] (a) y [19](b)

2.1.2.2 Capa de Percepción

En la arquitectura de 5 capas, se tiene como capa más baja la denominada capa de Percepción. La funcionalidad principal de esta capa es la obtención de datos por medio de sensores. Esta función es equivalente a la descrita para la arquitectura anterior, debido a que para un sistema IoT una de las primeras tareas generalmente es la recolección de datos.

La capa de Percepción puede definirse como el conjunto de objetos, cuya funcionalidad es ser los intermediarios entre el ambiente y el mundo digital para la obtención de datos [19]. Estos objetos permiten adquirir una cantidad considerable de información que será procesada por las capas superiores para otorgar un servicio a los usuarios finales, volviéndose así un pilar para el funcionamiento del sistema en la mayoría de los casos. Los objetos están conformados por los llamados sensores, dispositivos inteligentes y actuadores; que mediante su contacto con el medio ambiente logran obtener información en tiempo real.

Otra de las funcionalidades de esta capa es el reconocimiento e identificación de los distintos objetos que forman parte del Sistema IoT. En la Figura 2.3 se pueden observar con mayor detalle algunos ejemplos de estos objetos que forman parte del sistema y que deben ser identificados por esta capa.

De la misma manera, para esta arquitectura se consideran las tecnologías como Wifi, BLE, Zigbee, Z-wave, Sigfox, Redes 2G/3G/4G/5G, LoRaWAN [19] para la comunicación entre los dispositivos de la misma capa.

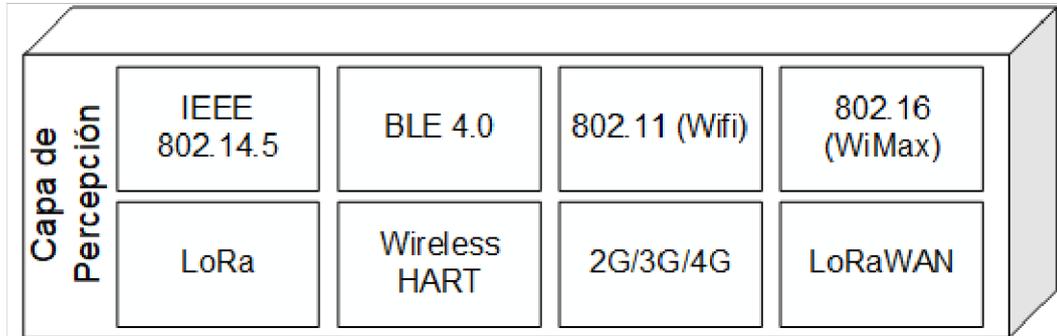


Figura 2.7. Tecnología usada en la Capa de Percepción adaptado de [19]

En otros trabajos como [15] y [22], la primera capa conserva el nombre y funcionalidades ya expuestas. Aun así, existen casos como el presentado por Lao en [23], donde la arquitectura de 5 capas es aplicada para poder usar la tecnología IoT dentro de los sistemas de las redes Blockchain, donde se mencionan nuevos objetos como los tags RFID y dispositivos NFC (*Near Field Communication*). En estos casos no se habla de las tecnologías expuestas en la Figura 2.7, simplemente se expresan las funcionalidades de la capa y el cómo pueden ser usados los datos obtenidos.

2.1.2.3 Capa de Transporte

La capa de Transporte es aquella que se encarga de la comunicación y transmisión de los datos obtenidos por la capa de Percepción. Como se presenta en [19], esta capa se complementa con la capa anterior ya que ambas presentan el uso de tecnologías de comunicación.

En la arquitectura de 5 capas, las funcionalidades de transporte plantean la implementación del control de la energía utilizada. Este es un punto importante dentro de la tecnología IoT, ya que ayuda a que los sistemas existentes y por implementarse tengan un bajo consumo energético y por ende sean considerados una mejor opción para la resolución de problemas.

En esta capa también deben solventarse los problemas que se ocasionan por los cambios en la red cuando se trabaja con topologías dinámicas [19]. En los sistemas IoT los cambios de topología pueden estar presentes si se usan dispositivos móviles inteligentes en la capa de Percepción o si se cambia de lugar de manera regular los sensores para mejorar la obtención de datos o por el mismo diseño del sistema.

En esta capa se hace uso de protocolos de red que permitan solventar o disminuir la afectación en la red cuando suceden cambios de topología, ya sean premeditados o por la movilidad que puede llegar a presentarse en un sistema IoT.

En [19], en la capa de Transporte se ven involucrados las mismas tecnologías indicadas en la Figura 2.7; además del uso de los protocolos como UDP y TCP. También se mencionan otros protocolos de red como: IPv4, IPv6, RPL (*Radio Link Protocol*), 6LoWPAN (IPv6 para redes WPAN), MIPv4 (IPv4 para redes Móviles), etc.

La lista puede llegar a extenderse, pero se hace énfasis en aquellas tecnologías que se consideran más influyentes al momento de desarrollar un sistema de este tipo. Esta arquitectura trata de abarcar la mayor cantidad de tecnologías para la comunicación.

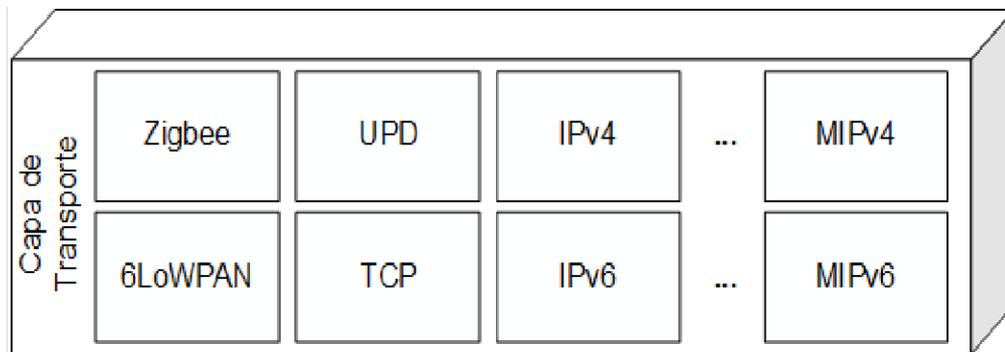


Figura 2.8. Tecnología usada en la Capa de Transporte adaptado de [19]

Tanto en [15] como en [22] se hace referencia a la misma capa dentro de sus investigaciones, conservando las funcionalidades de la capa, así como el nombre. Sin embargo, en otros trabajos como el de Lao, en la tecnología Blockchain el nombre de la capa se mantiene como en la arquitectura de 3 capas, introduciendo las mismas funcionalidades y explicando que la capa de Red permite conectar no solo con la capa de Percepción y sus sensores, sino que conecta los nodos del sistema, con sus hipervisores y las aplicaciones del usuario final [23].

2.1.2.4 Capa de Gestión de Servicios

La tercera capa es la capa de Gestión de servicios, según [19] esta capa sirve como intermediaria entre la capa de Aplicación y las capas inferiores de transporte y percepción, por lo que también es conocida con el nombre de *Middleware*. Con los datos ya obtenidos y usando distintos métodos de comunicación, el siguiente paso es el manejo de estos datos y es allí cuando se ve involucrada esta capa.

La principal función de esta capa es el procesamiento de los datos obtenidos por la primera capa, a la par que gestiona los servicios que brindará el sistema, de allí el nombre de la

capa. Para ello toma en cuenta las principales características de la información recolectada por los sensores: la gran cantidad de datos y la variedad de estos [19].

Se habla de variedad debido a la heterogeneidad de los sensores y dispositivos inteligentes, ya que según la casa fabricante de estos, aspectos como el rango de medida o las escalas pueden variar de manera significativa, hecho que provoca que un dispositivo para un mismo propósito obtenga distintos datos en función de su fabricante.

Esta capa representa una posible solución para el trabajo con dispositivos heterogéneos ya que busca facilitar el uso de cualquier dispositivo o sensor IoT. Por otro lado en [19], se indica que la capa está pensada para facilitar la prestación de servicio entre las capas ya que esta capa puede tener la capacidad de admitir la inclusión de nuevas librerías (funcionalidades), hecho que le permite ser adaptable a cualquier tecnología usada por las capas anteriores (Figura 2.7 y Figura 2.8) o por las capas superiores.

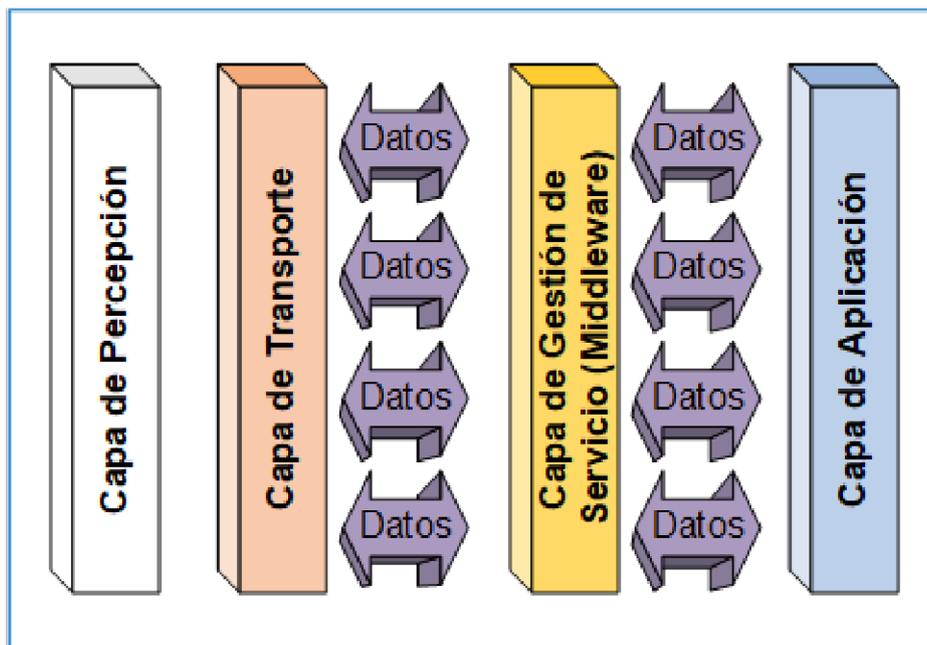


Figura 2.9. Funcionamiento de la Capa de Gestión de Servicios en base a [19]

En otros trabajos como en [14] y [21], es posible hallar esta capa con el nombre de Capa de Procesamiento. Donde el funcionamiento es el mismo que antes fue explicado. Sin embargo, la función de la capa se expande al almacenamiento y análisis de los datos previo al procesamiento de estos [22] o a la capacidad del uso de bases de datos (almacenamiento), computación en la nube (procesamiento) y big data (análisis) [15].

Estos artículos no contemplan la capa como una solución para el trabajo con dispositivos heterogéneos, sino como la capa encargada sobre todo del procesamiento de los datos.

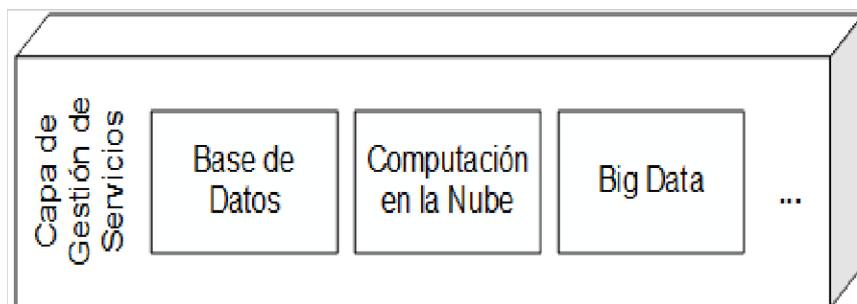


Figura 2.10. Tecnologías de la capa de Gestión de Servicio basado en [14] y [21]

2.1.2.5 Capa de Aplicación

La capa de Aplicación es aquella responsable de proveer servicios o aplicaciones específicas a los usuarios finales [19]. Según el tipo de sistema IoT, esta capa puede entregar una gran variedad de servicios al usuario. El tipo de sistema depende del área de aplicación, como se puede observar en la Figura 2.5.

En el caso de la arquitectura de 5 capas, se define de manera más integra los posibles protocolos que serán usados en la capa de aplicación para brindar los distintos servicios [15]. Entre estos protocolos podemos hallar aplicaciones desarrolladas, los protocolos MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*), CoAP (*Constrained Application Protocol*), HTTP (*Hypertext Transfer Protocol*), XMPP (*Extensible Messaging and Presence Protocol*), WebSocket, etc.

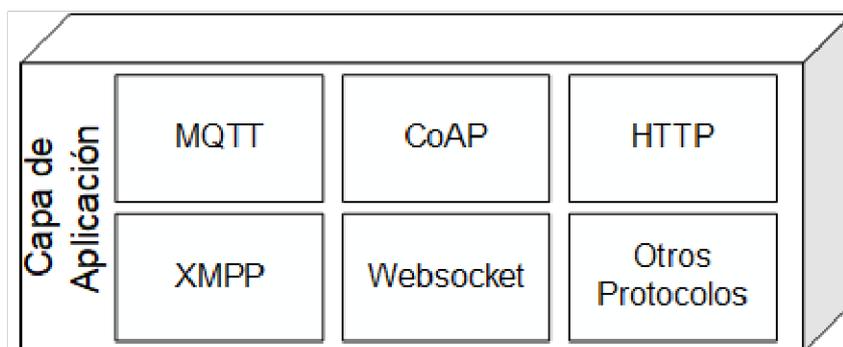


Figura 2.11. Protocolos usados en la Capa de Aplicación adaptado de [19]

La misma capa es presentada en otros trabajos, donde se mantienen las funcionalidades antes descritas. En [15] y en [22], esta capa representa la abstracción de los datos obtenidos para presentarlos al usuario final. Ya sea en forma de informe o como datos para los mismos, donde la aplicación a brindar depende enteramente del área de aplicación y del propósito del sistema IoT.

2.1.2.6 Capa de Negocio

Para la arquitectura de 5 capas, el nivel más alto es el negocio, de allí el nombre de la última capa. La capa de Negocio puede llegar a confundirse con la capa de aplicación; sin embargo, su funcionalidad no es la misma, pero se encuentran ligadas ya que esta capa se encarga de la supervisión de los sistemas IoT y de sus servicios [19].

Al ser la capa más alta también se halla relacionada con los usuarios finales. Sin embargo, dichos usuarios no son los típicos consumidores que procuran el servicio principal del Sistema IoT. La principal funcionalidad de capa está orientada al manejo del negocio para el cual fue implementado el sistema. Acorde con ello, los usuarios de esta capa generalmente son los dueños del negocio o personas que se vean involucradas en el mismo para gestionar este de una manera más eficiente.

Entre otras funcionalidades de esta capa se cuenta con la creación de modelos del negocio, diagramas de flujo y gráficos en base a los datos obtenidos de las capas inferiores [19]. Gracias a estas funciones es posible gestionar el negocio de una forma mucho más sencilla y de esta manera procurar que el servicio brindado cumpla con los requerimientos planteados por los dueños del sistema y los clientes.

Además, esta capa es la responsable de analizar, monitorizar y evaluar el sistema IoT y los elementos que se encuentran relacionados. No se debe confundir con en análisis de la información que se realiza en la capa de Gestión de Servicios, ya que si bien se realiza un análisis de información, como se mencionó, en la capa de Negocio el análisis se centra más en los procesos del propio negocio y sistema, que en la información como tal.

Por otro lado, la toma de decisiones es otra de las actividades primarias que se desenvuelven en esta capa, ya que, gracias a los modelos y gráficos generados, los usuarios pueden apoyarse en el sistema para tomar decisiones sobre el desarrollo y evolución del negocio y por ende del sistema.

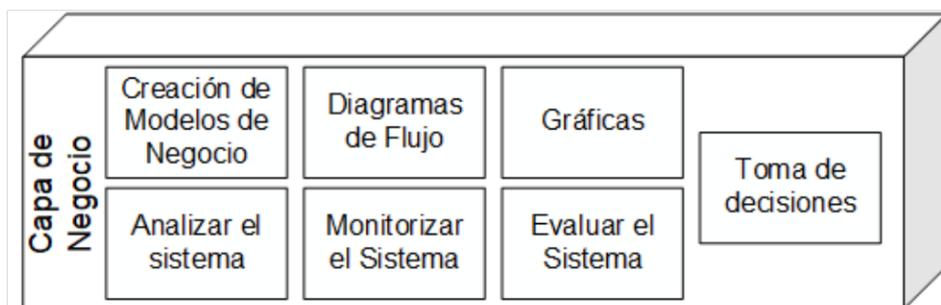


Figura 2.12. Funciones de la Capa de Negocio basado en [19]

Esta capa es también es mencionada en otros trabajos como [14] y [21], donde se mantiene el nombre y las funcionalidades de gestión, aunque no se encuentran del todo especificadas. Estos artículos ya entran en el terreno de la privacidad y seguridad que se debe tener en esta capa.

2.1.3 MODELO DE REFERENCIA ITU Y.4000/Y.2060

El modelo propuesto por la ITU puede considerarse la referencia más amplia dentro del campo de las tecnologías IoT, ya que tiene el respaldo de una organización reconocida. Aun así, este modelo es una recomendación propuesta por la ITU, por ello no es posible considerarla como un estándar para el desarrollo de sistemas IoT.

El modelo de referencia propuesto por la ITU lleva vigente como recomendación desde el año 2012, donde se le dió el nombre de la recomendación Y.2060 [24], para posteriormente ser actualizada bajo el nombre Y.4000 en el año 2016, siendo hasta el momento del desarrollo del presente trabajo uno de los modelos referenciales más utilizados dentro de las recomendaciones del organismo para el desarrollo de los sistemas IoT. Generalmente, dentro de las investigaciones y trabajos, este modelo de referencia es llamado Y.4000/2060, debido a la actualización antes mencionada.

2.1.3.1 CAPAS DEL MODELO DE REFERENCIA

El modelo Y.4000/2060 está compuesto por 4 capas, mismas que se relacionan entre sí para dar forma y sentido al sistema IoT. Estas capas llegan a ser similares con las propuestas en las otras arquitecturas ya estudiadas. Sin embargo, la amplitud que posee la ITU le ha permitido clarificar el objetivo que cada capa posee en su modelo.

De manera adicional y de forma paralela a las 4 capas, el modelo presenta capacidades para la gestión y la seguridad, un aporte significativo para los sistemas IoT que se desarrollen bajo esta propuesta. Las capas del modelo son: capa de Dispositivos, capa de Red, capa para el Soporte de las Aplicaciones y Servicios (SSAS), y la capa de Aplicación.

Las capacidades de gestión y seguridad se incluyen para comprender el alcance que puede llegar a poseer este modelo cuando son necesarias dichas capacidades para el desarrollo de un sistema IoT, las mismas que se definen de forma transversal a las capas.

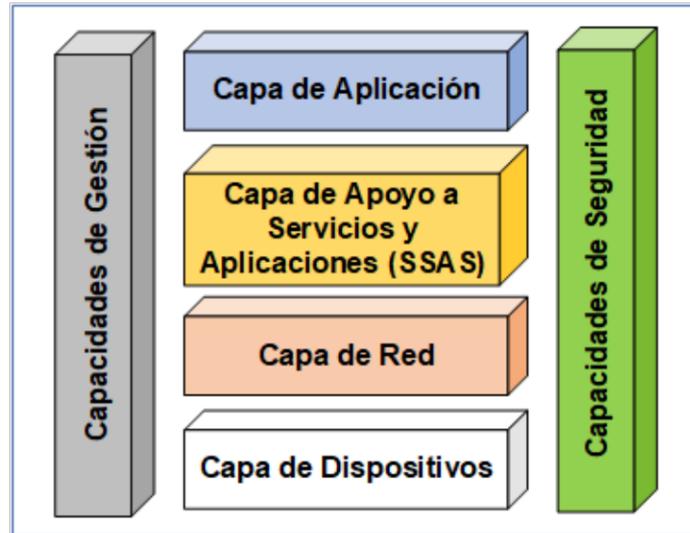


Figura 2.13. Modelo referencial Y.4000/2060 adaptado de [24]

2.1.3.2 Capa de Dispositivos [24]

La primera capa del modelo de referencia es conocida como la capa de Dispositivos, que se encarga de la gestión de dispositivos que forman parte del sistema IoT, mismos que deben recolectar la información para el funcionamiento de este.

Las funcionalidades de esta capa se clasifican en 2 grandes grupos: las capacidades de los dispositivos y de los *Gateway*. La capacidad de los dispositivos hace referencia a la posibilidad de que estos puedan interactuar con la red de comunicaciones de manera directa e indirecta para enviar y recibir información. Se habla de interacción directa cuando el mismo dispositivo hace uso de la red, mientras que la interacción indirecta ocurre cuando el dispositivo hace uso de un *gateway* para realizar el proceso de comunicaciones.

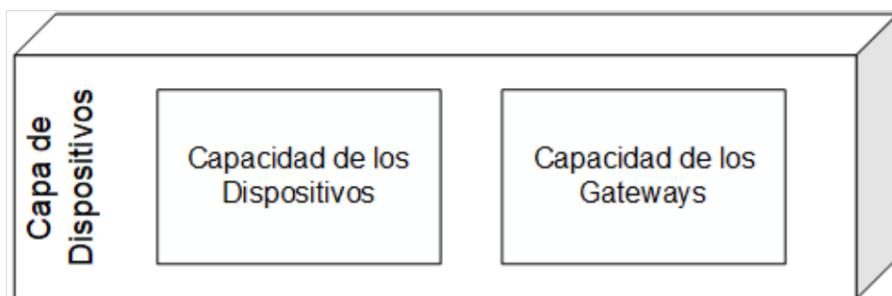


Figura 2.14. Capacidades de la capa de Dispositivos del Modelo ITU Y.4000/2060 basado en [24]

La recomendación indica que no es necesario que un dispositivo pueda realizar ambos tipos de interacción con la red de comunicaciones, pero sí recalca que al menos una de las

dos capacidades debe ser admitida para que dicho dispositivo pueda ser usado dentro del sistema a diseñarse.

Por otro lado, los dispositivos deben tener la capacidad de formar redes Ad-Hoc para mejorar las capacidades del sistema y la velocidad de despliegue. Además de soportar los modos de reposo y activo, para la gestión adecuada de la energía. De este modo se plantea un escenario donde la capa de Dispositivos pueda manejar la mayor cantidad de dispositivos pese a la carencia de ciertas funcionalidades, una posible solución para el trabajo con dispositivos heterogéneos.



Figura 2.15. Capacidades de los dispositivos del modelo ITU Y.4000/2060 basado en [24]

Para el caso de los *gateway*, estos deben dar soporte a múltiples interfaces para admitir una mayor cantidad de tecnologías de comunicación, ya sean de tipo alámbricas o inalámbricas. Entre estas tecnologías la recomendación menciona: CAN (*Controller Area Network*), ZigBee, Bluetooth o Wi-Fi para el caso de los dispositivos. Para el servicio o comunicación con la capa de Red, se indica que se deben soportar comunicaciones como la red telefónica pública conmutada (PSTN), las redes de telefonía celular 2G o 3G, las redes LTE, Ethernet o DSL.

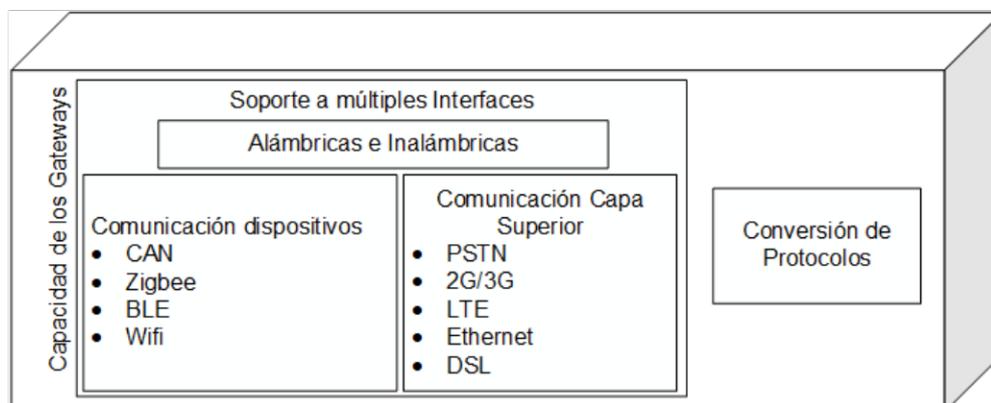


Figura 2.16. Capacidades de los *gateways* del modelo ITU Y.4000/2060 basado en [24]

También en esta capa se debe tener la capacidad de conversión de protocolos para las comunicaciones en la red [22]. Se debe asegurar que dispositivos que usen distintas tecnologías de comunicación puedan interactuar entre sí, es decir que se tenga la posibilidad de migrar un paquete de un protocolo a otro de manera rápida y sencilla, facilitando aún más el uso de cualquier tipo de dispositivo en el sistema.

2.1.3.3 Capa de Red [24]

La capa de Red permite la comunicación entre la capa de Dispositivos y las capas siguientes, para la transmisión de los datos obtenidos y envío de órdenes a los dispositivos. Las funcionalidades de esta capa se dividen en dos grupos: red y transporte. Si bien pueden ser consideradas como una misma capacidad, el modelo presentado las divide para indicar que tanto la conexión entre pares, así como la capacidad para enviar datos deben ser tomadas en cuenta al momento de diseñar un sistema.

Las capacidades de la red deben abordar funciones como el control de acceso, control de recursos de transporte, gestión de la movilidad, autenticación, autorización y *accounting*. Para el caso de la capacidad de transporte, ésta debe ser capaz de suministrar conectividad para que sea posible el envío y recepción de datos o información de gestión y control.

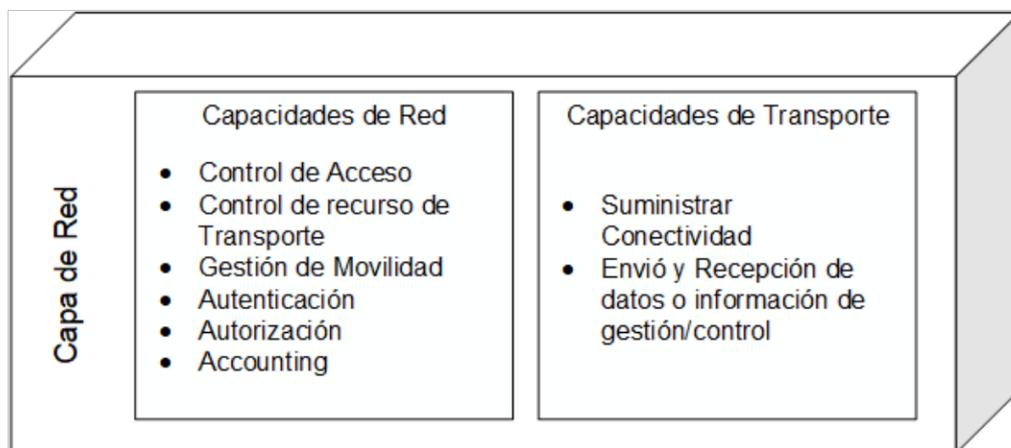


Figura 2.17. Capacidades de la capa de Red del modelo ITU Y.4000/2060 basado en [24]

El modelo orienta las capacidades de la capa Red al transporte datos de manera correcta y a una buena velocidad, para que de este modo el sistema funcione correctamente.

2.1.3.4 Capa de Apoyo a Servicios y Aplicaciones (SSAS) [24]

La capa que propone el modelo Y.4000/2060 para otorgar soporte al funcionamiento del sistema IoT es denominada SSAS (por sus siglas en inglés: *Service Support and*

Application Support) o capa de Apoyo a Servicios y Aplicaciones. Su principal función es otorgar soporte a los servicios y aplicaciones para los cuales el sistema IoT fue implementado; de esta manera se busca facilitar el trabajo de la capa superior y optimizar las aplicaciones IoT que el sistema ofrece.

La capa de Apoyo a Servicios y Aplicaciones entre sus funcionalidades debe ser capaz de cumplir con dos grupos de capacidades: soporte genérico y soporte específico. El modelo especifica estos tipos de soporte para dar una mayor versatilidad al desarrollador al no imponer estas capacidades.



Figura 2.18. Capacidades de la capa de Apoyo a Servicios y Aplicaciones del modelo ITU Y.4000/2060 basado en [24]

Las capacidades de soporte genéricas están pensadas para solventar necesidades comunes de cualquier tipo de aplicación o servicio. Por ejemplo, el modelo plantea como capacidades genéricas al procesamiento y almacenamiento de los datos obtenidos de las capas inferiores. Se indica que existe la posibilidad de que una necesidad específica use una capacidad genérica para crear una del tipo específico.

Se habla del procesamiento y almacenamiento como capacidades genéricas ya que la mayoría de los servicios y aplicaciones necesitan almacenar y procesar los datos antes de ser usados en aplicativos complejos o para presentarlos a los usuarios finales. Pese a que se tenga que tratar a los datos con un método específico, el procesamiento como tal es considerado genérico.

Por otro lado, las capacidades específicas son aquellas que permiten atender las necesidades únicas que presentan los servicios o aplicaciones. El modelo no indica cuáles son las denominadas capacidades específicas, solo indica que existen varios grupos que solventan estas necesidades únicas.

Es posible que se haga referencia a procesos específicos de una determinada aplicación como puede ser la comparación de valores en una escala específica para un sistema o

tecnología ya predeterminado. Estas capacidades son importantes pues permiten apoyar a los servicios y aplicaciones con funcionalidades que solo será útiles en ciertos casos. Además, al no proponer una lista de este tipo de capacidades, el modelo indica que puede ser utilizado en cualquier tipo de área de aplicación pues como tal puede admitir cualquier tipo de funcionalidad.

2.1.3.5 Capa de Aplicación [24]

La capa más alta dentro del modelo de referencia Y.4000/2060 es la capa de aplicación, que permite la interacción del sistema IoT con sus usuarios finales y poder así cumplir con el propósito para el cual fue diseñado.

Similar al caso de la capa SSAS, el modelo no realiza ninguna mención a tecnologías admitidas en su modelo. Simplemente indica que la capa de aplicación es aquella que contiene las aplicaciones IoT.

Únicamente se puede expresar que dichas aplicaciones dependerán del área para la cual fue creado el sistema. Entre las posibles aplicaciones se tienen las expuestas en la Figura 2.5 u otras tecnologías como lo son Blockchain [25] o VLC [26]. El modelo no se centra en una única aplicación, pues debido a su diseño se puede decir que es adaptable a todo tipo de aplicación IoT.

2.1.3.6 Capacidades de Gestión y Seguridad [24]

Como se observa en la Figura 2.13 el modelo contempla capacidades adicionales que involucran a las capas antes definidas. Estas capacidades cubren las áreas de gestión y seguridad para los sistemas IoT. Las capacidades de gestión IoT acorde con el modelo abarcan: gestión de fallos, configuración, el rendimiento y seguridad. Estas mismas capacidades pueden clasificarse en genéricas y específicas.

Las capacidades genéricas son aquellas que permiten manejar los dispositivos (control remoto, diagnóstico, actualizaciones, etc.), gestionar la topología y el tráfico. De este modo el modelo trata de cubrir la gestión del sistema y sus comunicaciones, para obtener un mayor control sobre el sistema IoT.

Las capacidades específicas de la gestión vienen ligadas a los requisitos específicos de las distintas aplicaciones, es por ello que no se indican específicamente, pero se pueden entender como toda aquella capacidad que sea necesaria para el despliegue y correcto funcionamiento del sistema.

Para las capacidades de la seguridad, se define de la misma manera capacidades genéricas y específicas. Dentro de las capacidades genéricas, el modelo indica ciertas capacidades según las capas a las cuales será aplicada la seguridad

En la capa de aplicación, se debe otorgar seguridad por medio de la autorización, autenticación, confidencialidad, integridad, privacidad, auditorías y antivirus. Para la capa de Red se mantienen los mismos principios, excepto las auditorías y antivirus, pero aplicados a los datos de señalización. Para la capa inferior, se aplican los mismos principios indicados en la capa de Red, aumentando la validación de integridad de los dispositivos y los controles de acceso.

La seguridad planteada por el modelo en el ámbito genérico trata de cubrir todas aquellas brechas de seguridad clásicas y otorgar un cierto nivel de protección a la información que se encuentra dentro del sistema, ya sea generada por este o usada como parte del proceso.

Las capacidades específicas dependen estrictamente de los requerimientos de la aplicación. El ejemplo que propone el modelo es la seguridad que debe obtenerse cuando la aplicación integra formas de pago electrónicas. Donde se debe asegurar que tanto el sistema como la aplicación IoT sean seguros al momento de realizar los pagos por parte de los usuarios finales, generando de esta manera un ambiente de confianza entre el sistema y el usuario.

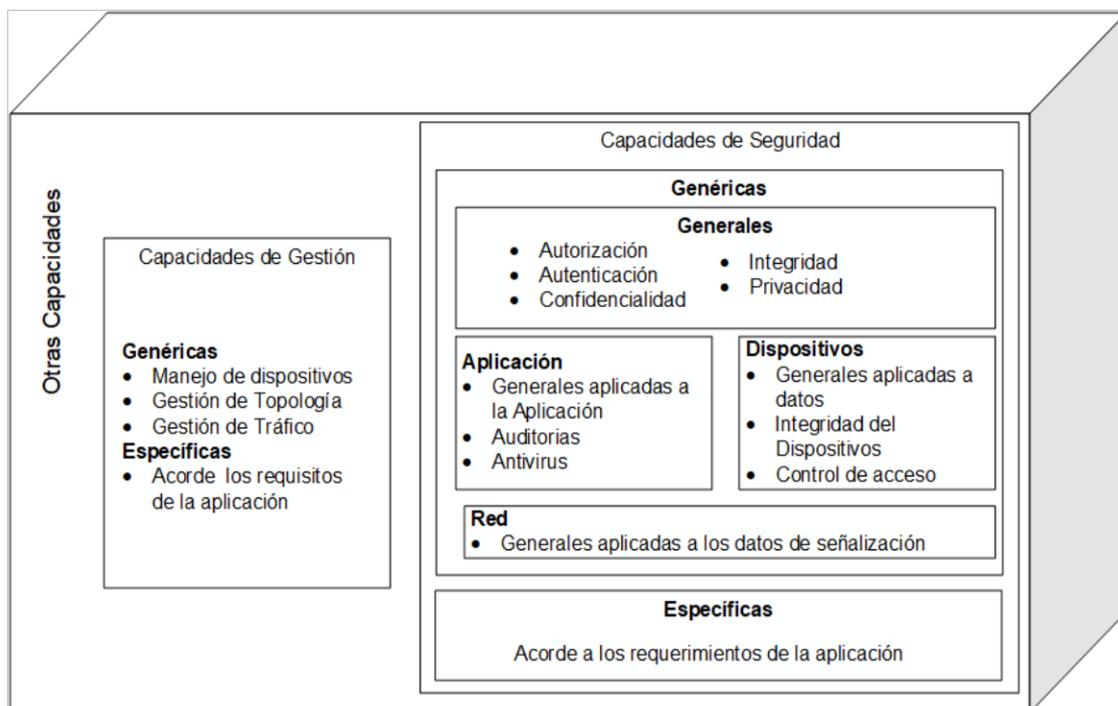


Figura 2.19. Capacidades de Gestión y Seguridad del modelo ITU Y.4000/2060 basado en [24]

2.1.4 COMPARACIÓN DE ARQUITECTURAS Y MODELO DE REFERENCIA PARA SISTEMAS IOT

Una vez expuestas las arquitecturas y el modelo referencia, se procede a realizar el análisis comparativo, partiendo de la información expuesta de la arquitectura de 3 capas, 5 capas y el modelo Y.4000/2060.

Como primer punto se tiene el número de capas propuestos por las arquitecturas y el modelo estudiados. En un lado se tiene a la arquitectura de 3 capas, misma que divide las funcionalidades básicas de cualquier sistema para que sean atendidas por sus capas y de este modo poder crear un sistema IoT.

En orden del número de capas, el siguiente caso es el modelo de referencia Y.4000/2060, que propone un total de 4 capas. Comparada con el primer caso, este modelo propuso la inclusión de una nueva capa tras el transporte de los datos que permita dar soporte a la capa de Aplicación dentro de sus funcionalidades. Además, incluye las capacidades de gestión y seguridad, que si bien no son capas como tal pueden considerar extensiones de estas.

La arquitectura de 5 capas tiene una clara diferencia en el número de capas. Con un total de 5 capas, esta arquitectura tratar de dividir de mejor manera las funcionalidades del sistema IoT. Orientado su estructura a un sistema básico, pero desde un enfoque que contempla el punto de vista del negocio y el sistema como tal.

Otro punto importante a comparar es la funcionalidad por capas, pese a la evidente diferencia en el número de capas que las arquitecturas y el modelo proponen. En [27], Bouaouad realizó un estudio cuyo resultado fue la información sobre la construcción de las arquitecturas de IoT basadas en una estructura por capas.

En dicho estudio se identificaron un total de 12 capas, donde se involucran las tecnologías comunes y la virtualización de los sistemas IoT. Con esta información es posible identificar estas capas dentro de la estructura de las arquitecturas y modelo de referencia, donde se puede evidenciar que se cumplen con las funcionalidades allí descritas. Sin embargo, en algunos casos una única capa puede contener varias de las capas indicadas en el estudio.

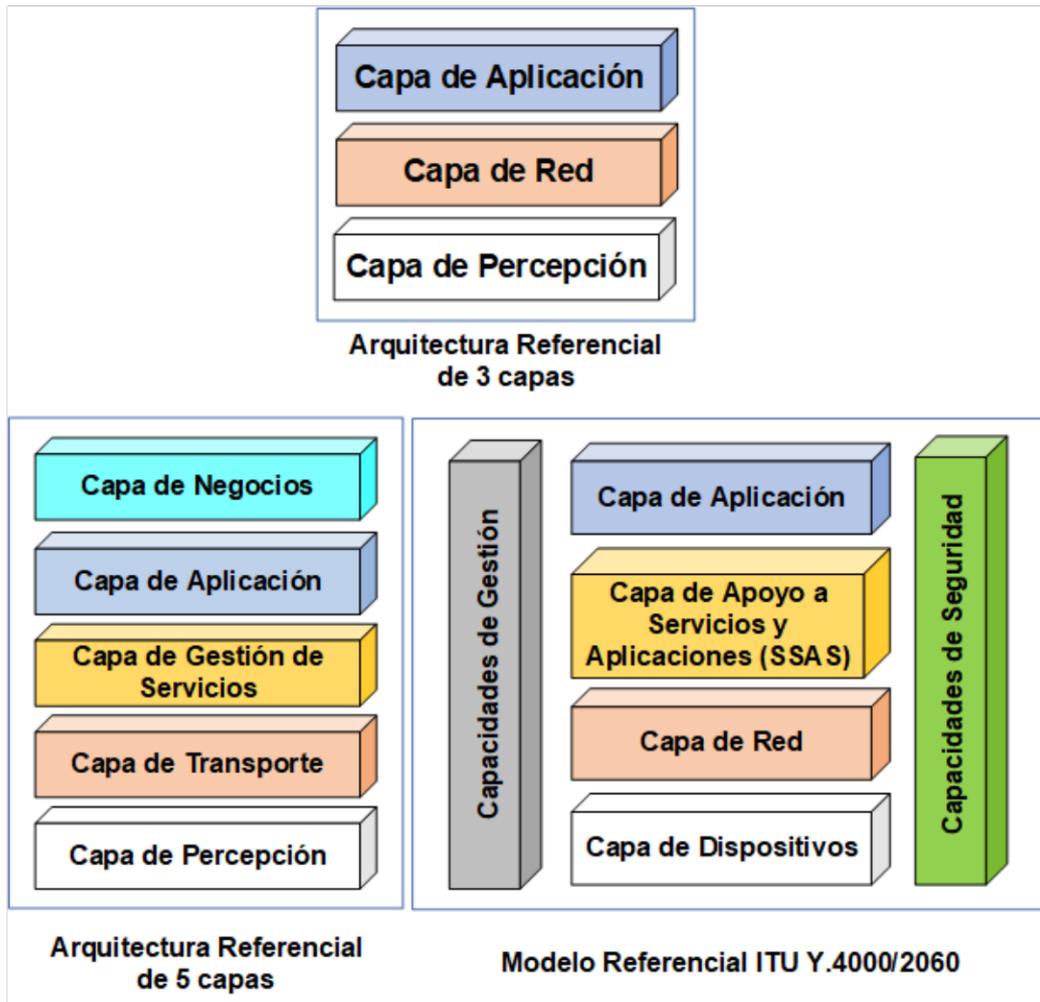


Figura 2.20. Capas de las Arquitecturas y modelos Estudiados

La capa de Percepción o capa de Dispositivos (Figura 2.20), para los 3 casos define como su función la recolección de datos mediante el uso de dispositivos y sensores. Para la arquitectura de 5 capas y el modelo de referencia se definen las tecnologías que se usarán para la comunicación entre los dispositivos y con la capa superior

En el caso de la arquitectura de 3 capas se hace énfasis en la identificación de los dispositivos y su detección, sin proponer como tal alguna tecnología que se encargue de estas funciones, de la misma manera que ocurre con las comunicaciones. Pese a ello se reconoce como primordial funcionalidad el obtener los datos del ambiente.

Para las arquitecturas y el modelo estudiado, la primera capa llega a cumplir con las funcionalidades descritas para las capas: L1 (objetos), L4 (comunicación entre objetos) y L5 (*Gateways* y Acceso) planteadas en el estudio [27]. Esto puede llegar a ser confuso, pero si se unifica las funciones de las capas antes mencionadas como resultado se puede

obtener una única capa de una estructura más grande como lo son los casos del modelo y la arquitectura de 5 capas.

Para la arquitectura de 3 capas, las funcionalidades de su primera capa son cubiertas únicamente por las 2 primeras capas del estudio, aunque solo de una manera parcial, esto debido a la falta de especificación de funcionalidades que esta capa posee.

La siguiente capa dentro del estudio es la capa de Red, para la arquitectura de 3 capas y el modelo Y.4000/2060, o también conocida como capa de Transporte por la arquitectura de 5 capas (Figura 2.20). Para las arquitecturas, esta capa define las tecnologías de comunicación que permitirá la transmisión de datos de la capa inferior hacia las capas superiores. Sin embargo, para la arquitectura de 3 capas, esta también asume el rol del procesamiento de datos; cosa que no sucede en la arquitectura de 5 capas.

Respecto al modelo de referencia, este define en sus capacidades ciertos mecanismos de control y seguridad (capacidades de Red) y las funcionalidades de transporte de los datos (capacidades de Transporte) sin hacer alusión alguna a un determinado tipo de tecnología, salvo la ya indicada en la capa anterior (Figura 2.16). Acorde a Bouaouad [27], los 3 casos cubren la funcionalidad descrita para la capa L6. Salvo la conexión con otras tecnologías de la nube, siendo la conexión con el resto del sistema que puede o no estar en la nube o algún servicio en línea.

Tanto el modelo de referencia de la ITU como la arquitectura referencial de 5 capas incorporan nuevas capas dentro de su estructura, mismas que son diferentes. Para el modelo de referencia, la capa siguiente es la de Apoyo a Servicios y Aplicaciones (Figura 2.20), capa que no define ningún tipo de tecnología, sino que indica que en ella se puede incluir cualquier tecnología que ayude a gestionar el sistema y facilite el trabajo de este. Esta capa es única, ya que en las otras arquitecturas no existe una capa que cumpla con dicha función e incluso no se halló una capa homóloga dentro del estudio de [27].

Para el caso de la arquitectura de 5 capas, se incluye una capa de Gestión de Servicios (Figura 2.6), la cual se encarga de procesar la información obtenida por las capas inferiores para que sea consumida por las capas superiores. Además de facilitar el trabajo con dispositivos heterogéneos, por lo cual es conocida como *middleware*. Este trabajo es realizado de manera parcial por otras capas en otros modelos o arquitecturas, como por ejemplo en la arquitectura de 3 capas, donde la capa de Red puede llegar a cumplir con las funciones de procesamiento. Acorde al estudio de [27], la capa L7 es la que permite este trabajo y es bastante conocida.

La siguiente capa conocida como la capa de Aplicación, es común para los 3 casos de estudio (Figura 2.20) donde se indica que esta capa es la más cercana a los usuarios finales del sistema IoT. Las funcionalidades son las mismas en los 3 casos, sin embargo, para la arquitectura de 5 capas es importante mencionar ciertas tecnologías que pueden ser usadas para crear estas aplicaciones. Mientras que los otros casos especifican que las aplicaciones dependen del área de aplicación, sin dar algún ejemplo concreto a modo de guía. En [27] la capa de aplicación es la capa L10, donde de igual manera se indica que esta capa provee al usuario de los servicios y aplicaciones que necesita.

Para el modelo de referencia IoT como para la arquitectura de 3 capas, se tiene como última capa, la de aplicación,. Sin embargo, en la arquitectura referencial de 5 capas se añade la capa de Negocios sobre la capa de aplicación, cuya funcionalidad puede considerarse similar a la capa de aplicación, pero que está pensada para definir el campo de negocios en el cual el propietario de un sistema IoT se encuentra trabajando.

El estudio indica que la capa de Negocio está por debajo de la capa de Aplicación, cuando en esta arquitectura se la propone como la capa final. Si bien concuerdan en las funcionalidades, la estructura cambiaría, aunque en cierto punto ambas capas están pensadas para la interacción con el usuario final, sea por motivos del negocio o como consumidores de los servicios y aplicaciones.

De manera adicional, en el modelo Y.4000/2060 se tienen otras capacidades, que, si bien no son consideradas como capas, le otorgan un mayor grado de complejidad y validez como modelo de referencia. Al contrario que las arquitecturas de 3 y 5 capas, el modelo de referencia plantea las capacidades de gestión y seguridad en paralelo a las capas del modelo.

Las capacidades de gestión llegan a tener cierta relación con la capa de negocio de la arquitectura referencial de 5 capas debido a la gestión del sistema; sin embargo, ésta no presenta como tal la funcionalidad de ayudar al negocio. En cuanto a las capacidades de seguridad, este modelo es el único que contempla la seguridad como un punto importante dentro de su estructura. La seguridad planteada se aplica a todas las capas del modelo referencial, donde se reconocen las capacidades genéricas como lo son la autenticación, autorización, integridad, etc. y las capacidades específicas, que de igual manera no se indica porque éstas dependen de la aplicación o servicio a brindar a los usuarios finales.

Una vez explicadas las diferencias en cuanto a estructura y funcionalidades, en un análisis comparativo en base a las capas, se puede detectar una serie de ventajas y desventajas para las arquitecturas referenciales y el modelo estudiados. Para el primer caso, la

arquitectura de 3 capas se puede destacar como ventajas su simpleza y facilidad de uso. Esta arquitectura es la que menos capas posee y aun así trata de dar solución a cualquier sistema IoT. Partiendo desde la posibilidad de adquirir datos, procesarlos y presentarlos a los usuarios.

Cabe mencionar que se indica la posibilidad de incluir otras tecnologías como ayuda para el despliegue de los sistemas que pueden llegar a usar esta arquitectura referencial. Sin embargo, debido a querer abarcar todas las funcionalidades necesarias para crear un sistema, se tuvo poco cuidado para ser más específico en cuanto a sus funcionalidades respecta.

Por un lado, se indica que una capa se encarga de adquirir los datos, nunca se menciona que existe comunicación dentro de la misma capa o que tecnologías puede usar para este propósito. Otro punto importante es el no abordar el trabajo con dispositivos heterogéneos, ya que esta arquitectura basa su funcionalidad en las tareas específicas de recolectar, transportar y presentar los datos. Sin preocuparse de que la propuesta pueda ser usada con cualquier dispositivo.

Respecto a la arquitectura referencial de 5 capas, ésta destaca en el grado de explicación y funcionalidades que propone. Si bien se aumentan un total de 2 capas más, dividiendo y asignando nuevas funcionalidades, la estructura básica se mantiene. Se da una mayor importancia al trabajo con dispositivos heterogéneos al hacer uso de la capa denominada *Middleware*, donde se trata de trabajar con cualquier tipo de dispositivo.

Además, presenta la funcionalidad de administración del sistema de manera separada, dando cierto grado de importancia a la administración en la vista del negocio de quien implemento el sistema IoT. El grado de complejidad es superior a los otros casos, hecho que es lógico debido al mayor número de capas y división de funcionalidades.

En cuanto a la capa de negocio, está claramente puede o no ser utilizada. Pensado ya en un estándar, es probable que algunas aplicaciones no necesiten como tal una visión del negocio por lo que esta capa puede llegar a depender del tipo de sistema que se esté diseñando para ser considerada dentro del mismo.

Finalmente se tiene al modelo de referencia Y.4000/2060, donde se debe destacar el respaldo que significa una entidad como la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU). Si bien este modelo referencial es una sugerencia de este organismo, este simple hecho lo vuelve más confiable que las otras arquitecturas antes mencionadas.

Con una estructura de 4 capas se mantiene la simplicidad en el modelo. El grado de explicación en cuanto a las capacidades de ciertas capas es superior a las explicaciones que los autores otorgan en otros casos, exponiendo las tecnologías soportadas en base a los elementos y las mismas funcionalidades.

Al ser un modelo de referencia, se recalca que las capacidades no son condiciones que se deben cumplir, sino que funcionan a modo de guía para la elección de los elementos, dando opciones en cuanto a las capacidades se refiere, hecho que puede considerarse como un intento para trabajar con dispositivos heterogéneos.

Si bien se agrega una capa para apoyar a la capa de aplicación, nunca se detalla con exactitud las capacidades de está, simplemente se indica que estas capacidades deben acoplarse a la aplicación en cuestión. De la misma manera para la capa final, simplemente se indica que esta contendrá a la aplicación del sistema sin indicar alguna tecnología como tal.

Para este punto la comparación de las arquitecturas y el modelo de referencia es clara, aun con sus diferencias los 3 casos buscan dar una solución factible para el desarrollo de los sistemas IoT. Proponiendo un mayor o menor grado de complejidad y con más o menos funcionalidades y capacidades, cada modelo es perfectamente aplicable para el desarrollo de un sistema IoT.

Para considerar la elección de una de las arquitecturas o del modelo, es importante definir cuáles son las capacidades necesarias para colaborar con el desarrollo del sistema. A la par debe considerarse la aplicación a desarrollarse, para que la elección llegue a cumplir con las expectativas de trabajar con uno de estos.

Tabla 2.1. Ventajas y Desventajas de las arquitecturas y modelos de referencia estudiados.

Caso	Ventajas	Desventajas
3 Capas	<ul style="list-style-type: none"> • Arquitectura simple y clara. • Permite obtener, transportar y presentar datos. • Posibilidad de incluir otras tecnologías. 	<ul style="list-style-type: none"> • Poca definición en cuanto a sus funcionalidades y tecnologías. • No abarcar el problema de heterogeneidad.
5 Capas	<ul style="list-style-type: none"> • División de Funcionalidades. • Mejor explicación en cuanto a tecnologías admitidas. • Abarca el problema de la heterogeneidad. 	<ul style="list-style-type: none"> • Mayor grado de complejidad. • La visión del negocio no siempre puede ser usada.

	<ul style="list-style-type: none"> • Propone una vista del sistema para el negocio. • Permite obtener, transportar, presentar datos y gestionar el sistema. 	
Y.4000/2060	<ul style="list-style-type: none"> • Respaldo de la ITU. • Grado alto en la explicación de las capacidades. • Abarca el problema de la heterogeneidad. • Permite obtener, transportar y presentar datos. • Capacidades de Gestión y Seguridad 	<ul style="list-style-type: none"> • Bajo grado de explicación en la nueva capa propuesta y la capa de aplicación. • A excepción de la capa SSAS, en esencia es el primer caso de estudio

Tabla 2.2. Análisis Comparativo según la presencia de las Capas

Nombre de la Capa	Modelos o Arquitecturas Referenciales		
	3 Capas	5 Capas	Y.4000/2060
Capa de Percepción	✓	✓	
Capa de Dispositivos			✓
Capa de Red	✓		✓
Capa de Transporte		✓	
Capa de Gestión de Servicios (Middleware)		✓	
Capa de Apoyo a Servicios y Aplicaciones (SSAS)			✓
Capa de Aplicación	✓	✓	✓
Capa de Negocio		✓	

Tabla 2.3. Análisis Comparativo según las características y funcionalidades por Capa

	Características/ Funcionalidades	Modelos o Arquitecturas Referenciales		
		3 Capas	5 Capas	Y.4000/2060
Capa de Percepción/Dispositivos	Indica los dispositivos soportados	✓	✓	
	Detección/Identificación de Dispositivos	✓	✓	
	Recolección de Datos	✓	✓	✓
	Procesamiento de Datos	✓		
	Soporte a múltiples Interfaces			✓
	Uso de Gateways			✓
	Formar Redes Ad-Hoc			✓
	Gestión Energética			✓
	Conversión de Protocolos			✓
	Propone Tecnologías para la comunicación		✓	✓

		Modelos o Arquitecturas Referenciales		
Características/ Funcionalidades		3 Capas	5 Capas	Y.4000/2060
Capa de Red /Transporte	Propone Tecnologías para la comunicación entre Capas	✓	✓	✓
	Procesamiento de Datos	✓		
	Soporte a otras Tecnologías (Computación en la Nube, Big Data)	✓		
	Gestión Energética		✓	
	Calidad de Servicio (QoS)		✓	
	Soporte a Topologías Dinámicas		✓	✓
	Control de Acceso			✓
	Autenticación			✓
	Autorización			✓
Capa de Gestión de Servicios (middleware)	Aborda el problema de Heterogeneidad de Dispositivos		✓	
	Procesamiento de Datos		✓	
	Adaptabilidad a nueva Tecnología		✓	
	Almacenamiento de Datos		✓	
	Análisis de Datos		✓	
	Soporte a otras Tecnologías (Computación en la Nube, Big Data, Bases de Datos)		✓	
Capa de Apoyo a Servicios y Aplicaciones (SSAS)	Soporte a las Aplicaciones y Servicios			✓
	Procesamiento de Datos			✓
	Almacenamiento de Datos			✓
	Funcionalidades Especificas Acorde al Servicio/Aplicación			✓
Capa de Aplicación	Interacción con Usuarios Finales	✓	✓	✓
	Define las aplicaciones para las cuales pueden ser aplicables	✓	✓	
	Define Tecnologías para sus Aplicaciones		✓	
Capa de Negocio	Supervisión del Sistema		✓	
	Soporte para el Negocio (Modelo, diagrama, gráfico)		✓	
	Toma de decisiones		✓	
Otras	Capacidades de Gestión	✓	✓	✓
	Capacidades de Seguridad			✓

3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

3.1 RESULTADOS

Una vez analizados y comparados, tanto las arquitecturas referenciales como el modelo seleccionado, se procede a exponer sus casos de éxito como evidencia de la usabilidad y validez de las arquitectura y modelo de referencia estudiados. Previo a dicha exposición, se pueden resaltar los siguientes puntos importantes con respecto al presente Trabajo de Integración curricular.

Tras el estudio y análisis comparativo presentado en la sección 2.1, se llegó a tener una vision más amplia respecto a los casos seleccionados. Si bien la estructura básica de los mismos es muy similar entre sí y con otros modelos o arquitecturas de otras tecnologías (OSI, por ejemplo), ninguno puede ser considerado un estándar como tal. Pese al grado de explicación en algunas referencias, a los próximos casos de éxito, ninguna de las arquitecturas o modelo referenciales es reconocido como un estándar a nivel global; simplemente pueden considerarse casos de estudio o propuesta de personas no calificadas para estandarizar una tecnología. Y, en el mejor de los casos pueden ser tomados como sugerencias al momento de realizar la implementación de un sistema IoT.

El presente trabajo muestra dos arquitecturas y un modelo de referencia para la implementación de sistemas IoT. Los que no pueden ser considerados como un estándar para el desarrollo de estos sistemas, sino como una guía para la implementación de los mismos en diferentes áreas de aplicación.

Basándose en el estudio y análisis comparativo se puede concluir que el mejor caso de estudio es el modelo referencial presentado por la ITU, Y.4000/2060. No solo por su estructura sencilla, hecho que es relevante. Sino que, a su vez, la recomendación tiene un gran respaldo y casos de éxito aplicables expuestos por la misma ITU. Además, es el único que toma en cuenta las capacidades de gestión y seguridad como una parte fundamental dentro del modelo referencial, que si bien no son capas, permitirían tener un mayor control del sistema y considerarlo seguro ante cierto tipo de ataques.

Si bien los otros casos estudiados pueden ser más sencillos o abarcar otras funcionalidades, la ITU puede llegar a solventar dichos problemas de manera sencilla debido a las consideraciones que tomó al momento de proponer su modelo de referencia. De cierto modo, la arquitectura de 3 capas posee una estructura más sencilla que el modelo de la ITU. Sin embargo este último mediante la capa de Apoyo a los servicios y aplicaciones

(SSAS) logra simplificar ciertos procesos para la capa superior logrando también ser algo simple de entender e implementar. Si se contrasta de la misma manera con la arquitectura de 5 capas, la capa de negocio puede ser parcialmente reemplaza por las capacidades de gestión.

El apartado de la seguridad es el punto clave donde ninguna de las arquitecturas puede competir con el modelo de la ITU, ya que ninguna capa indica explícitamente una funcionalidad que permita otorgar seguridad al sistema, si bien ciertos autores consideran importante la seguridad no la plantean como una función de una capa específica.

3.2 CASOS DE ÉXITO

Los casos de éxito a exponerse fueron obtenidos en conjunto con la selección de las arquitecturas y modelo referencial que fueron estudiados en el presente Trabajo de Integración Curricular. Este hecho se ve reflejado en el Anexo I donde se muestran las referencias que sustentan dicha selección.

Es necesario aclarar que los casos de éxito hallados no se remiten únicamente a aplicaciones directas de los casos estudiados. Si bien algunos son evidentemente una solución o implementación para casos puntuales, que resuelven un problema. Se eligieron a su vez como casos de éxito a las adaptaciones existentes, donde se puede observar que se parte del caso estudiado para en base a ciertas modificaciones o consideraciones se proponga una arquitectura para resolver un problema en un área específica o para una tecnología a fin.

De este modo se busca mostrar como resultado que tanto las arquitecturas de 3 y 5 capas, así como el modelo de la ITU Y.4000/2060 han sido utilizados para proponer soluciones tecnológicas. Y de este modo respaldar por qué fueron seleccionadas y así sentar las bases de una posible guía para la selección de una arquitectura competente al momento de implementar un sistema IoT.

3.2.1 ARQUITECTURA REFERENCIAL DE 3 CAPAS

La primera arquitectura referencial que fue estudiada es la de 3 capas; de la cual se conocen las distintas funcionalidades y tecnologías soportadas. En base a ellos se expondrán 2 casos de éxito, donde esta arquitectura fue utilizada para la implementación de un sistema o en su defecto una adaptación de ésta para la resolución de un problema específico.

3.2.1.1 Adaptación para Hábitats Inteligentes

El primer caso de éxito se explica en [28], donde se hace uso de la arquitectura referencial de 3 capas como base para adaptar la misma pensando en un uso referente a los hábitats inteligentes. Ruiz y otros [28] realizan una breve introducción hacia el modelo básico de la arquitectura IoT. Tras la explicación simple de las funciones de las 3 capas base (Percepción, Red y Aplicación), se habla de la propuesta basada en esta arquitectura. Para ello es importante definir la terminología de hábitat inteligente.

Se conoce como hábitat inteligente a cualquier espacio que pueda obtener datos, procesarlos y mostrarlos a los usuarios de este. De manera particular, como ejemplo de un hábitat inteligente, Ruiz y otros [28] proponen el uso de su adaptación de la arquitectura referencial de 3 capas al área de aplicación correspondiente a la medicina, es decir que su arquitectura planteada está pensada para ser usada dentro del dominio de la medicina.

Partiendo de la arquitectura de 3 capas, se explica que para los hábitats orientados a la medicina es muy importante el uso de los dispositivos móviles (Wearables), no solo por su soporte a múltiples tecnologías de comunicación; sino más bien por sus capacidades en la detección y obtención de datos. Sin embargo, también se menciona que dichos dispositivos no son del todo mencionados como dispositivos IoT en conjunto.

En pro de usar estos dispositivos, se plantea añadir una capa adicional a la arquitectura de 3 capas, de modo que estos dispositivos puedan ser parte del sistema IoT. La propuesta busca que los dispositivos IoT puedan relacionarse con la infraestructura de la salud mediante una interacción M2M (Machine to Machine) [28]. De este modo se pueden volver inteligentes este tipo de hábitats.

Hablar de las primeras capas de esta adaptación basada en la arquitectura referencial de 3 capas ya estudiada sería una simple redundancia. Basta con decir que para las capas de Percepción (Adquisición), Red (Red IoT) y Aplicación las funcionalidades y tecnologías antes mencionadas son homólogas; es decir que el funcionamiento y capacidades como tal son las mismas.

Es importante recalcar que para el caso de dispositivos móviles (*wearables*), todas sus funcionalidades no están representadas en su totalidad en las capas inferiores, por lo que es necesario incluir en el modelo la capa de penetración (*Pervasive*), en donde se encuentran embebidas tecnologías que hace uso de estos dispositivos (*wearables*) y las redes WBAN. Tecnologías que no fueron consideradas por las capas anteriores. Si bien este cambio hace pensar que la adaptación es una arquitectura completamente nueva, tras un breve análisis Ruiz y sus colaboradores explican que la capa propuesta más que una

capa superior es una capa auxiliar, que permitiría hacer uso de estas redes WBAN para obtener los datos médicos de los pacientes de una manera más rápida [28].

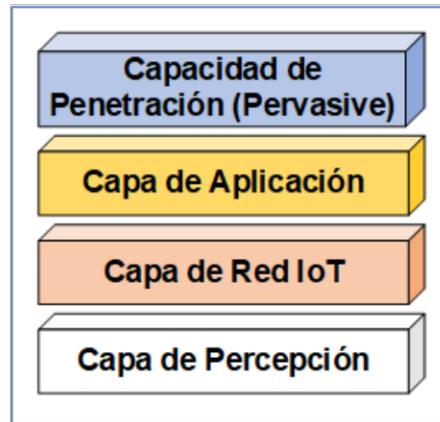


Figura 3.1. Capas de la adaptación para ambientes Inteligentes adaptado de [28]

En la Figura 3.2 se puede evidenciar la implementación de la adaptación de la arquitectura de 3 capas para ambientes inteligentes. Si bien permite observar de mejor manera las tecnologías implementadas en esta adaptación, a su vez es una evidencia grafica de cómo se halla funcionando el sistema IoT con la nueva capacidad.

Se puede observar claramente que la capa de Penetración se comunica con la capa de Red IoT y con la capa de Aplicación para comunicar los datos obtenidos a las mismas y de este modo monitorear al paciente gracias a la red WBAN de la cual es parte, misma que contiene una cantidad considerable de dispositivos móviles (wearables) y sensores para facilitar dichas adquisiciones.

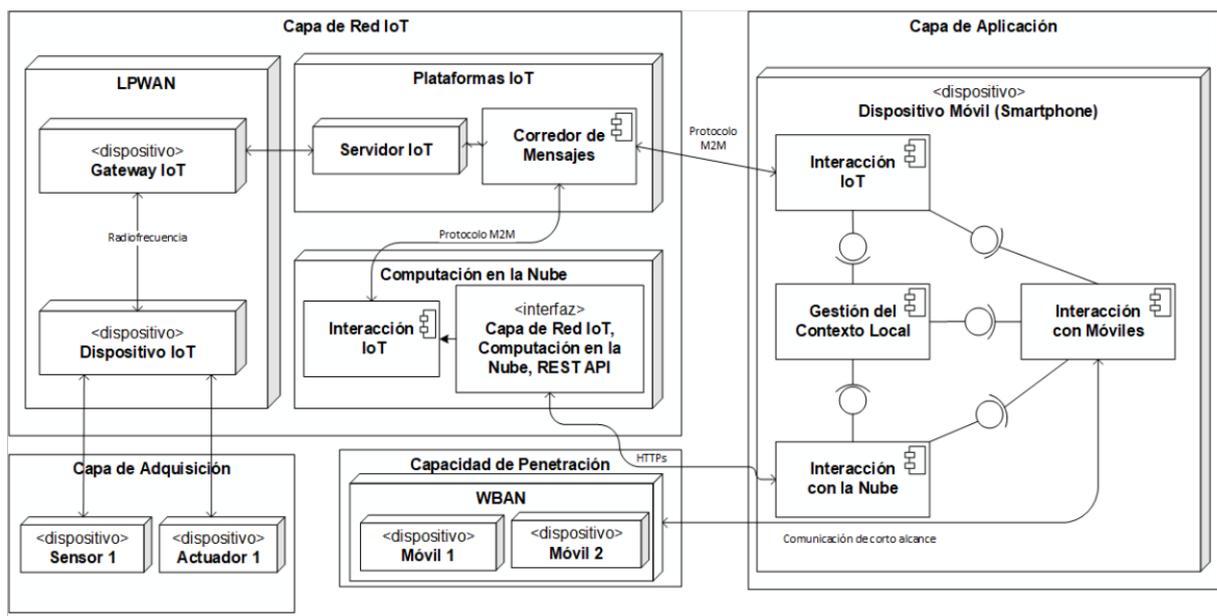


Figura 3.2. Implementación de la adaptación propuesta, adaptado de [28]

3.2.1.2 Adaptación para Agronomía Urbana

El siguiente caso de éxito propuesto es mencionado en [29], por Ordoñez, Siller y Begovich que usan directamente la arquitectura referencial de 3 capas. En busca de una solución a los problemas que representa la agronomía en la ciudad, desde un punto de vista histórico, explican como las ciudades han ido evolucionando en lo que a procesos se refiere, cambiando la estructura pasiva y obsoleta por una inteligente y que busca ser autosustentable.

La solución propuesta busca combinar las redes definidas por software (SDN) con la tecnología IoT, para en base a una arquitectura conjunta crear granjas en las zonas urbanas [29]. Esto gracias a una cultura de consumo de alimentos orgánicos y acorde con el requerimiento de la comida saludable, debido a que en los cultivos a gran escala, el uso indiscriminado de pesticidas y abonos químicos, no solo provocan alteraciones en los productos, sino que afectan a la salud de los consumidores.

Es conocido que los dispositivos IoT están encargados de la automatización, hecho que vuelve a una de estas granjas urbanas autosustentables. La idea de las granjas autosustentables busca mantener la conciencia de las zonas urbanas respecto a los beneficios de la agricultura, hecho que se ha ido olvidando y pensando únicamente que es una actividad propia y exclusiva de las zonas rurales.

La propuesta se basa en la Infraestructura de Tecnología de Comunicación (ICT), misma que está siendo usada por las Ciudades Inteligentes mediante la tecnología SDN (*software defined networking*) [29]. Las redes SDN permiten centralizar el control de toda una infraestructura, de modo que es mucho más sencilla su administración. Dicha tecnología está pensada para ser usada en sistemas o soluciones que requieran interacción entre maquinas (M2M) o el uso de dispositivos IoT.

La propuesta indicada en [29] mantiene la estructura base de la arquitectura de 3 capas, con un ligero cambio de nombres que mantiene las funcionalidades expuestas para esta arquitectura referencial.

Iniciando en la capa más baja, la propuesta presenta una capa semejante a la Capa de Percepción, la de Infraestructura. Capa donde se hallan los dispositivos del sistema para la creación de esta granja urbana.

La capa de Red es denominada como Control, llevando las mismas funcionalidades; es decir que se encarga de las comunicaciones. Es aquí donde viene el primer cambio, la introducción de una nueva tecnología. La capa de Control (Red) es la encargada de la

comunicación, para ello usa la Infraestructura de Tecnología de Comunicación (ICT) implementada sobre una red SDN [29].

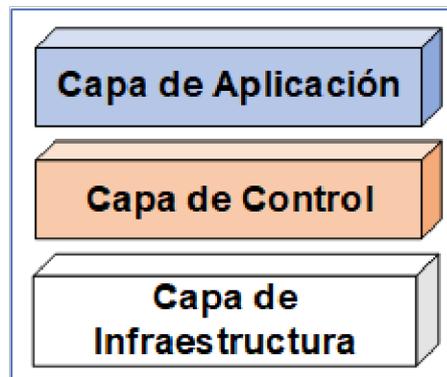


Figura 3.3. Capas de la propuesta para agronomía urbana adaptado de [29]

Finalmente, en la capa de aplicación se tiene la lógica de funcionamiento para la granja, intentando proveer al sistema de una mayor precisión [29]. En este caso ya se encuentran especificadas las aplicaciones del sistema, hecho que no se reflejaba claramente en el estudio. Aquí ya es posible afirmar que la aplicación está pensada para el cultivo y mejora de precisión de la agronomía urbana.

El principal cambio es el uso de la SDN para controlar el tráfico del sistema, que si bien es un tanto complejo permite tener un mejor control de las acciones que ocurren dentro del sistema, para lograr tomar una decisión acorde al momento para mantener esta agronomía urbana.

3.2.2 ARQUITECTURA REFERENCIAL DE 5 CAPAS

Una vez analizados los casos de éxito de la primera arquitectura, se procede a exponer los casos de éxito correspondiente a la arquitectura referencial de 5 capas. Donde se presentan 2 adaptaciones de esta arquitectura referencial, pensadas en dos tipos de tecnologías, a la par de áreas totalmente distintas: el transporte y las redes blockchain.

3.2.2.1 Adaptación para Sistemas de Transporte

En [30], Kumar propone una modificación de la arquitectura referencial de 5 capas a la que denomina arquitectura modificada, donde cambia el orden de las capas como se puede observar en la Figura 2.6. Este cambio o modificación de la arquitectura referencial común se proponen para obtener un modelo cuyo enfoque sea una aplicación más grande en el área de los sistemas de transporte. De este modo las capas de la arquitectura referencial de 5 capas modificada son: Capa de Aplicación, Capa Sensor (Sensing), Capa de Comunicación, Capa de Servicios y la capa de Infraestructura.

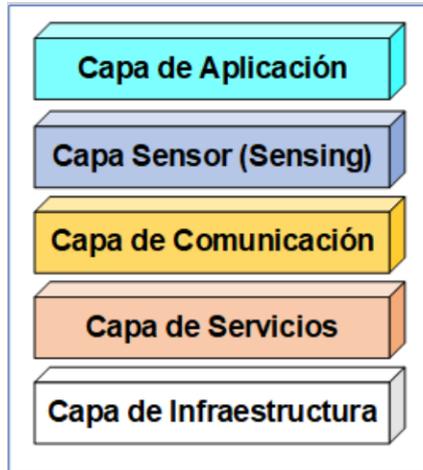


Figura 3.4. Adaptación de la arquitectura referencial de 5 capas para sistemas de Transporte adaptado de [30]

Como se puede observar en la Figura 3.4 las capas de la arquitectura modificada son distintas a las conocidas en cuanto a nombre se refieren; sin embargo, pese al cambio de nombre, las funcionalidades son las mismas. Cabe recalcar que también se vió modificada la estructura de la arquitectura.

La presentación de esta adaptación se plantea en la premisa de las numerosas oportunidades que la tecnología IoT presenta en el sector de transporte y su logística [30]. Dentro de las mismas, IoT permite monitorear los vehículos y de este modo obtener información acerca de su estado en todo momento, es decir que se puede saber su ubicación, velocidad y posibles riesgos que este posee al moverse por una determinada carretera. Además, desde el punto de vista del transporte de carga, la logística que requiere el transporte de ciertos insumos puede ser fácilmente monitoreada y controlada gracias a un sistema IoT que permita conocer la temperatura, humedad, condiciones de luz, etc. de la carga que es transportada [30]. Un extracto de las aplicaciones que propone Kumar para el uso de IoT en el transporte, bajo dicha arquitectura se presenta en la Figura 3.5

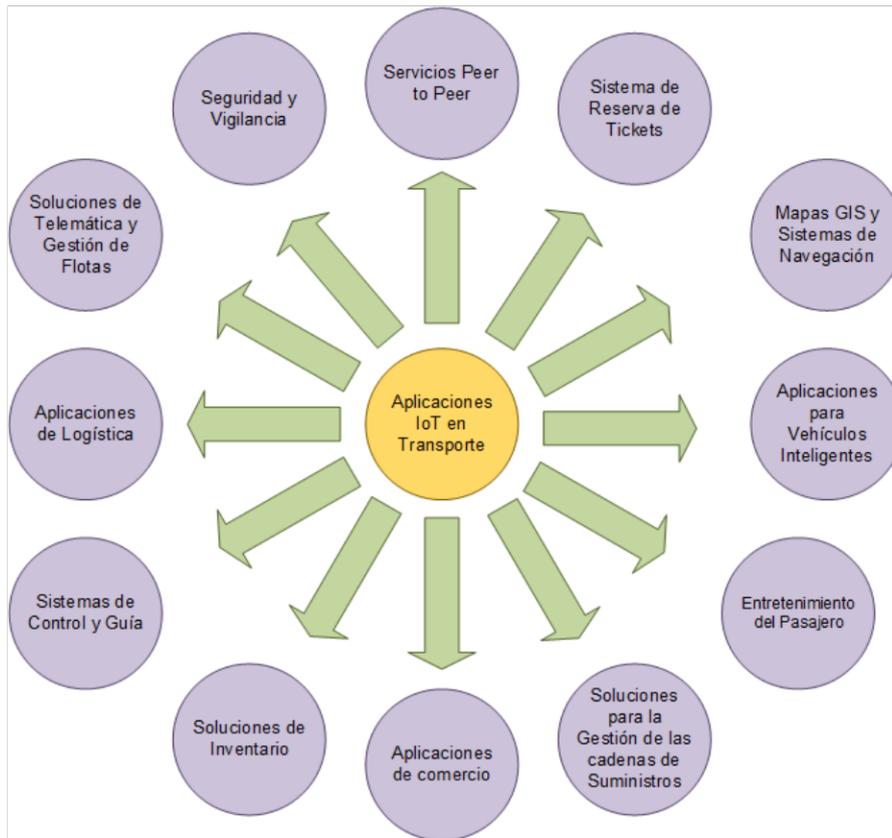


Figura 3.5. Aplicaciones de IoT en el Transporte adaptado de [30]

En la Figura 3.4 se pueden observar las capas de esta modificación pensada en la mejora de las aplicaciones para los sistemas de transporte. Las capas y sus funcionalidades son explicadas de manera breve:

- **Capa de Infraestructura:** Esta capa es la principal de la arquitectura modificada, ya que se enfoca en el negocio que representa el satisfacer las necesidades de los clientes, orientándolo al uso de tecnologías como GIS (*Geographic Information System*), computación en la nube, big data y facilidad de almacenamiento.
- **Capa de Servicio:** La capa de servicios es la encargada de ayudar en la realización de las tareas o necesidades del cliente. Puede considerarse una capa homóloga a la capa de Middleware, porque se encarga del procesamiento de la información que será de utilidad para el sistema.
- **Capa de Comunicación:** Esta capa es equivalente a la capa de Transporte, ya que se encarga de la comunicación entre la capa sensor y la capa de servicio, esto mediante la transmisión de los datos.

- **Capa Sensor (Sensing):** Esta capa es equivalente a la capa de Percepción antes descrita, permitiendo la interacción con la capa de Aplicación por medio del uso de sensores y dispositivos electrónicos.
- **Capa de Aplicación:** esta capa se encarga de la monitorización de los requerimientos del cliente. Para este caso de adaptación, la capa de aplicación se ve involucrada en tareas relacionadas con las personas, vehículos, etc.

Cabe recalcar que la capa Sensor ya no se considera la primera capa de la arquitectura, pese a que la misma sigue obteniendo los datos del ambiente. Esto se debe a la forma de trabajar de estos sistemas, que busca utilizar las tecnologías viales existentes (por ejemplo GIS) en conjunto con los datos obtenidos en tiempo real, para guiar de mejor manera a los conductores.

Tras esta breve explicación, se puede concluir que esta arquitectura introduce una gran cantidad de cambios para adaptarse a los requerimientos de las redes vehiculares y el uso de dispositivos IoT para lograr mejorar la tecnología de transporte.

3.2.2.2 Propuesta para Tecnología Blockchain

Una tecnología que en estos momentos se encuentra en auge son las conocidas redes de bloques, o por su nombre en inglés Blockchain. En [23] se propone una arquitectura para la integración de IoT en conjunto con la Tecnología Blockchain.

En [23] se exponen las arquitecturas referenciales de 3 y 5 capas, para luego proponer una arquitectura en base al caso de 5 capas que permita adaptar la tecnología IoT con la red blockchain. El uso de IoT dentro de blockchain es relativamente conocido; este tipo de tecnología busca implementar una red blockchain que este diseñada y optimizada para el uso de tecnologías y aplicaciones IoT [23]. Esto debido a la capacidad y versatilidad que, como ya se mencionó, posee este último.

Sin embargo, el uso general de estas aplicaciones incurre en ciertos fallos y problemas. Para mitigar este hecho, blockchain intenta proveer a las aplicaciones IoT de un nivel más alto en cuanto a seguridad y estabilidad se refiere [23]. Las capacidades que ofrece blockchain para la mejora de la tecnología pueden ser muy bien aprovechadas por IoT, volviéndolas mucho más eficientes.

La propuesta no busca impulsar las redes blockchain, sino permitir un mejor desarrollo de IoT basado en blockchain. Lao [23] presenta varios ejemplos de tecnología blockchain que se han visto beneficiados por el uso de IoT, como lo son: los pagos digitales, contratos inteligentes, almacenamiento de datos, etc.

En base a la arquitectura estudiada en la sección 2.1.2, se propone un cambio en la estructura del modelo mencionado manteniendo las capas base. La arquitectura propuesta tiene 5 capas, donde la capa superior ya no es la capa de negocios, puesto que esta es removida para introducir una capa propia de las redes blockchain [23].

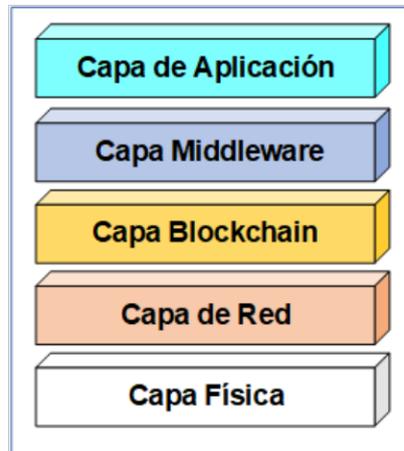


Figura 3.6. Arquitectura adaptada a Blockchain adaptado de [23]

En la Figura 3.6 se pueden observar las capas de la adaptación para la red Blockchain, donde se llegan a mantener las funcionalidades, pero se introducen a la vez nuevos conceptos que permitirán que IoT sea usado dentro de la red.

Iniciando en la capa Física (Percepción), en [23] se indica que esta adaptación mantiene la estructura general de la capa propuesta para IoT. En esta se incluyen todo tipo de dispositivos inteligentes y sensores que están involucrados con las aplicaciones IoT-Blockchain. De la misma manera, la capa de Red es la misma capa indicada para IoT, responsable de la comunicación entre las capas y los dispositivos IoT [23].

La propuesta introduce un cambio para la arquitectura referencial para lograr introducir la red Blockchain, para ello introduce una capa con el mismo nombre. La capa Blockchain introduce las funciones de una red blockchain para la combinación con IoT, se habla explícitamente del consenso, almacenamiento y compartición de datos [23]. Terminología propia de blockchain. Además, se indica que la arquitectura propuesta puede definir con qué tipo de red va a trabajar, como pueden ser: Plataforma de blockchain, Blockchain comercial o un blockchain público.

Finalmente se tiene las capas Middleware y de Aplicación, donde la funcionalidad se mantiene acorde a la arquitectura de IoT, donde se debe resaltar nuevamente que la primera es un intento por trabajar con dispositivos heterogéneos y además ahora se

encargará de gestionar la red blockchain [23]. Para la capa de aplicación de la misma manera está pensada para alojar API's para blockchain y aplicaciones IoT.

3.2.3 MODELO REFERENCIAL ITU Y.4000/2060

La ITU es la organización que respalda el modelo Y.4000/2060, y es por ello que dicho modelo es la base de muchas de las adaptaciones en cuanto a arquitecturas o modelos para IoT se refiere. En base a esta premisa, se procede a exponer 2 de los muchos casos de éxito que posee este modelo de la ITU, mismos que se hallan orientados a tecnologías diferentes pero que se piensa serán cada vez más populares y usadas en un futuro. La principal razón de elección en este caso es la fidelidad al modelo base original, mismo que es adaptado para ser usado en otras tecnologías.

3.2.3.1 Framework para BoT (Blockchain of Things)

Las redes Blockchain son bastante populares hoy en día, de modo que la ITU propuso una arquitectura pensada para aprovechar al máximo sus capacidades. Similar al caso de éxito de la arquitectura de 5 capas, la ITU en 2020 propuso una arquitectura para BoT, la combinación de blockchain con IoT.

En términos simples, se conoce como BoT (*Blockchain of Things*) a la aplicación de IoT para una red blockchain aprovechando la descentralización que esta ofrece [25]. Gracias a BoT, es posible crear sistemas que alberguen uno o más pares (peers) de BoT y a su vez brinden acceso a varias aplicaciones descentralizadas. BoT es una red que trabaja en un ambiente descentralizado, establecido mediante tecnologías afines y una plataforma de blockchain [25].

Este tipo de sistemas deben soportar algunas características y cumplir con ciertos requerimientos para ser considerados una BoT. La ITU propone como características comunes al cumplimiento de las recomendaciones Y.4000 y Y.4103, donde se describe los fundamentos de IoT [24] y las características fundamentales y de control, respectivamente. Basándose en estas características de IoT, se propone que BoT sea inherentemente descentralizada [25].

Así mismo, BoT debe soportar el almacenamiento y gestión descentralizado, hecho que es contrario al tradicional IoT, donde generalmente los servicios y datos almacenados se encuentran centralizados. Junto a esta característica, BoT debe asegurarse de brindar integridad, confidencialidad, privacidad y accesibilidad a todos los usuarios [25].

En base al modelo Y.4000/2060, la ITU propone una modelo referencial para BoT con capacidades comunes. En este modelo referencial se mantienen las capacidades y

funcionalidades expuestas en la sección 2.1.3, propias de los sistemas IoT. Pero, de manera adicional la ITU aumenta las capacidades propias de Blockchain of Things, necesarias para cumplir con las características comunes y sus respectivos requerimientos [25].

En cuanto a las nuevas capacidades que adquiere el modelo para ser aplicable a BoT, se pueden destacar las Capacidades para BoT en la capa SASS [25], donde debido a la red blockchain se deben admitir capacidades tales como:

- El control del acceso, debido a la descentralización.
- El consenso propio de BoT que le permite soportar a varios pares de BoT independientes.
- Soporte para crypto, donde se destaca la capacidad de encriptado, desencriptado, firmas digitales, etc.
- Almacenamiento y computación, característicos de una red BoT, debido a la capacidad de datos para la que está pensada y gran afluencia de transacciones. Además de soportar la virtualización.

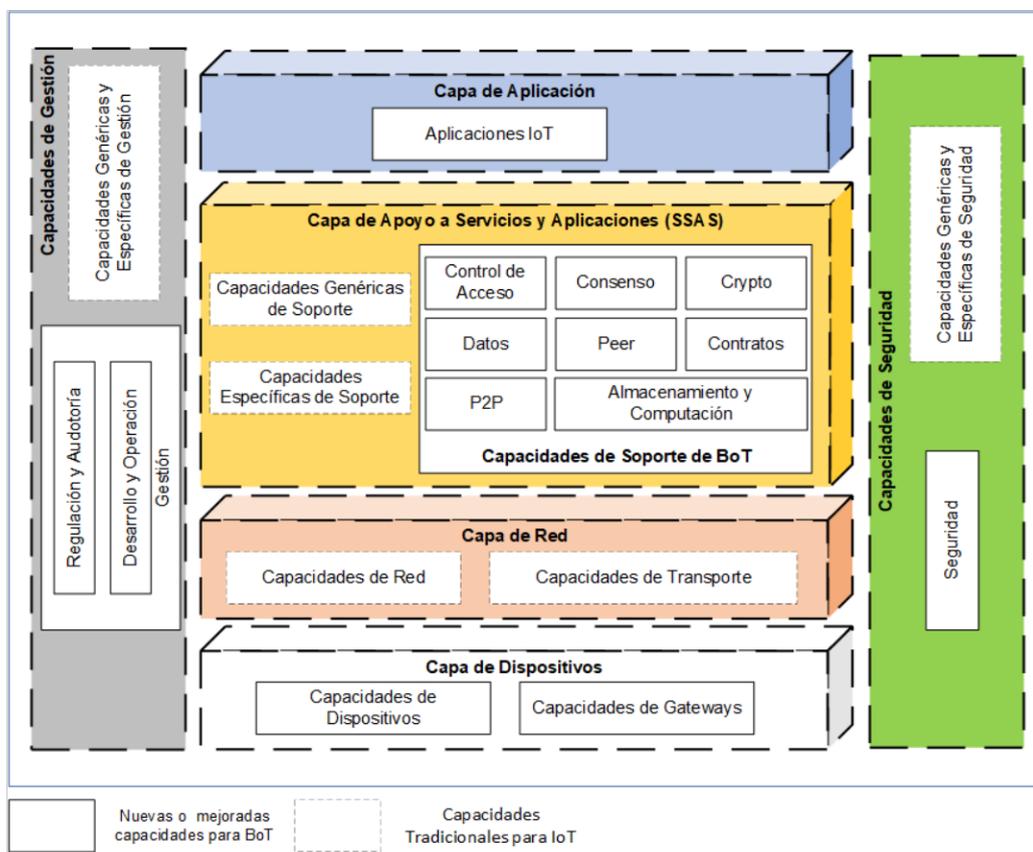


Figura 3.7. Modelo adaptado a Blockchain of Things, adaptado de [25]

De la misma manera se tienen otras capacidades como los contratos inteligentes, relaciones P2P (*Peer to Peer*), etc. [25] que permiten que el modelo trabaje con BoT. Cabe señalar que no solo en la capa SASS se evidencian nuevas capacidades; la capa de Dispositivos es adaptada para soportar la tecnología de BoT, e incluso a ciertos pares.

Dentro de las denominadas otras capacidades, Se implementan nuevos controles acorde a la regulación y auditoria que necesitaría la red, y el cómo gestionar el desarrollo y la operación de BoT. Así mismo, se mejoran las capacidades de seguridad debido a la descentralización del sistema. Si bien las capacidades expuestas en la sección 2.1.3.6 sirven hasta cierto punto, fue necesario mejorar las mismas para que BoT pueda dar mayor seguridad a la comunicación P2P, a la descentralización del almacenamiento, contratos inteligentes, permisos de acceso y otras funciones esenciales [25].

3.2.3.2 Framework para VLC (Visible Light Communications)

La tecnología VLC (*Visible Light Communications*) es uno de los puntos a los cuales hace referencia la ITU, es por ello que en [26] se propone un modelo adaptado a las comunicaciones VLC para IoT.

La tecnología VLC fue diseñada para permitir la transmisión de datos mediante los espectros de licencia libre o luz visible tales como: IR (infrarrojo) y UV (ultravioleta). Para este tipo de comunicaciones se tiene tramas VLC, que están codificadas digitalmente y son enviadas por diodos emisores de luz o láseres. La recepción está a cargo de un foto-diodo (*photo diode*) o un sensor de imágenes que puede recibir dichas tramas [26]. Aquellos dispositivos que brinden soporte para este tipo de comunicación se los llama dispositivos de iluminación (*lighting devices*)

La propuesta de la ITU plantea el uso de IoT en conjunto con las comunicaciones VLC, donde destaca 2 componentes importantes que se toman en cuenta la el modelo propuesto: la gestión de los dispositivos VLC en conjunto con la terminal del usuario y la capacidades necesarias para que las aplicaciones de IoT puedan ejecutarse en la terminal del usuario [26].

Los servicios IoT con comunicación VLC deben cumplir con las siguientes funcionalidades, acorde a la ITU [26]:

- Inicialización de los dispositivos, incluidos el descubrimiento y registro.
- Transporte de datos mediante VLC desde los dispositivos de iluminación hacia la terminal de usuario

- Transporte de datos mediante VLC desde la terminal de usuario a dispositivos de iluminación o radiofrecuencia desde la terminal al agente de dispositivos VLC.
- Control de luz
- Monitoreo

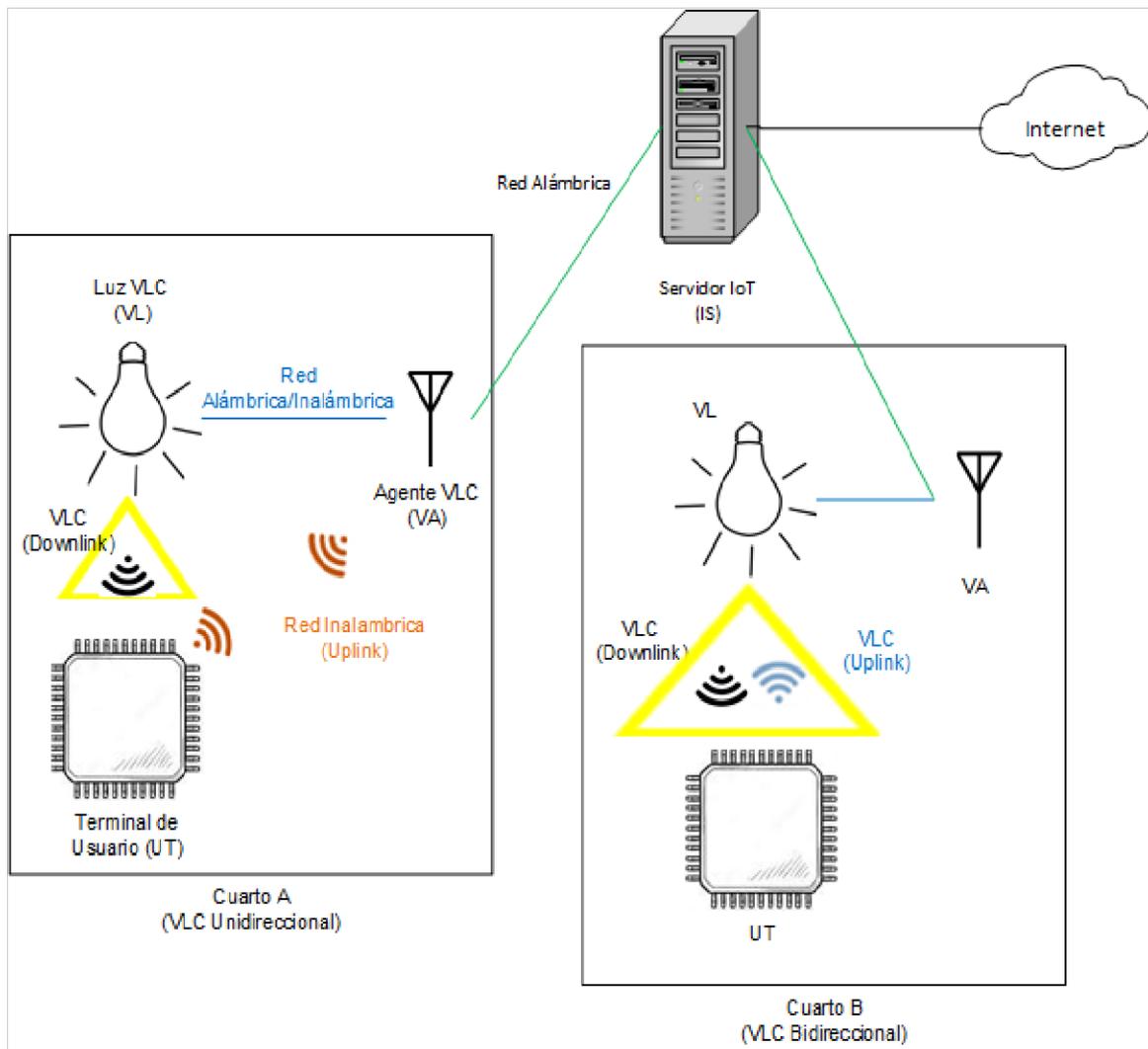


Figura 3.8. Servicios IoT y VLC, adaptado de [26]

El modelo presentado por la ITU está basado en el modelo de la recomendación Y.4000/2060 [24], manteniendo sus funcionalidades y capacidades. Como se explicó en la sección 2.1.3, el modelo Y.4000/2060 no indicaba de forma clara las capacidades específicas, esto debido a que las mismas depende de la tecnología y casos de uso. Este hecho se ve evidenciado pues, para este modelo adaptado para su uso con VLC incluye las nuevas capacidades como las capacidades específicas que antes no eran explicadas.

De manera adicional incluye nuevas capacidades para VLC en todas las capas y capacidades adicionales que el modelo base poseía. Esto se debe al tipo de tecnología que es VLC, ya que generalmente IoT usa comunicaciones cableadas e inalámbricas basadas en Radiofrecuencia; es decir que en el modelo base, para IoT considera el uso de tecnologías como Wifi, BLE, LoRa, Ethernet, Zigbee, etc. cuyos dominios no se involucran con la comunicación mediante la luz visible.

Tras la presentación del modelo la ITU indica los requerimientos para VLC basado en IoT, donde se vuelven a tomar en cuenta las funcionalidades antes indicadas con un grado mayor de explicación, para de esto modo sentar la base del modelo.

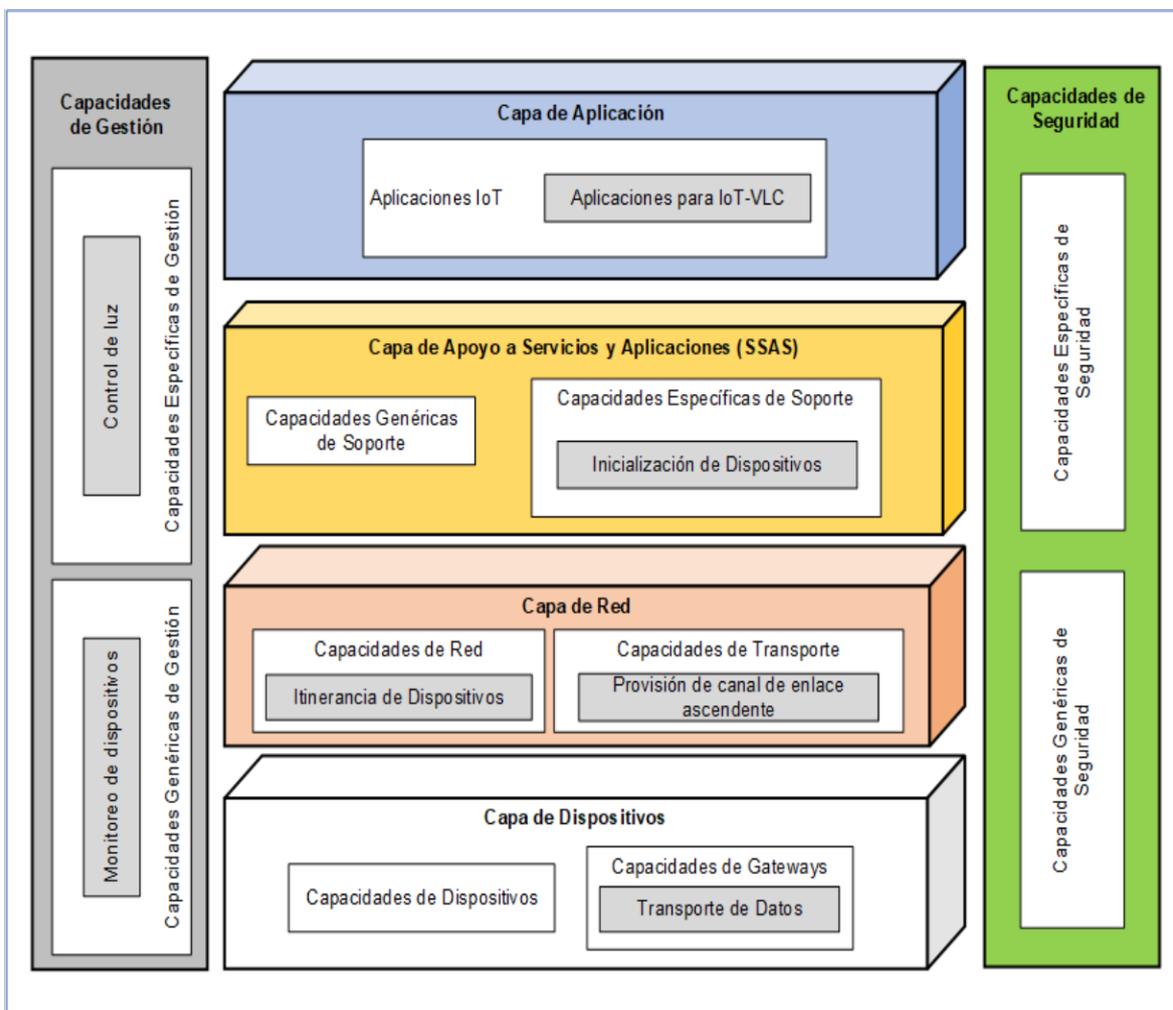


Figura 3.9. Modelo adaptado a IoT y VLC, adaptado de [26]

3.3 CONCLUSIONES

El presente Trabajo de Integración Curricular muestra las arquitecturas y modelos de referencia que, bajo el sustento de la investigación realizada, son de las más utilizadas dentro del desarrollo de los sistemas IoT.

Gracias a la Investigación se pudo realizar un estudio profundo referente a las propuestas de arquitecturas y modelos referenciales existentes para el desarrollo de los sistemas IoT. La selección de 3 modelos con posturas diferentes, pero con cierta similitud en su estructura, permite poner en evidencia la falta de una única arquitectura estándar para el desarrollo.

Mediante el análisis comparativo se mostró cómo cada caso estudiado posee ciertas características en común con las otras elecciones y también posee ciertas propiedades agregadas que pueden ser únicas y que aportan al desarrollo de un sistema IoT bajo una de las arquitecturas o modelo estudiados.

La arquitectura de 3 Capas posee la estructura más simple de los casos estudiados. Sin embargo, puede equipararse con el modelo de la ITU en cuanto a usabilidad. Aun así, debido a su sencillez es común observar que nuevas arquitecturas surgen tomando a esta como su base para el desarrollo. Hecho que provoca hallar varias arquitecturas de 3 capas que guardan mucha relación entre si pero no pueden ser consideradas una única arquitectura.

Se puede concluir que, de los casos comparados, el modelo Y.4000/2060 puede ser una de las mejores guías al momento de desarrollar un sistema IoT, pues sus capacidades se hallan especificadas a un nivel más global. Además, la ITU deja abierta la puerta para que futuros trabajos puedan proponer las denominadas capacidades específicas acorde al área de aplicación o tecnología para la cual se esté diseñando el sistema IoT.

Por otro lado, la arquitectura de 5 capas dedica un apartado completo para las funcionalidades del negocio, una característica importante para los sistemas IoT ya que generalmente están pensados como un negocio y el controlarlo y monitorizarlo es necesario para observar el crecimiento y tomar decisiones acertadas.

En cuanto a los casos de éxito, al no ser un estándar se tiende a modificar la estructura de las arquitecturas, aun si se mantienen las funcionalidades. Este hecho puede causar confusiones al analizar casos de éxito, puesto que los cambios pueden dar la idea de que la propuesta no es un caso de aplicación, sino un nuevo referente de una arquitectura para los sistemas IoT.

De los casos de éxito expuestos, los pertenecientes a la ITU son los únicos que mantienen intacta la estructura del modelo de referencia. Esto puede deberse a la facilidad que se otorga a los desarrolladores para proponer capacidades específicas acorde al sistema propuesto, sin necesidad de incluir nuevas capas o capacidades para solventar problemas de compatibilidad o de requerimientos.

3.4 RECOMENDACIONES

Para el desarrollo de los sistemas IoT, es necesario basarse en una arquitectura o modelo para simplificar el proceso de implementación y poder afrontar los posibles problemas, peso a la no existencia de un estándar.

Del mismo modo al hacer uso de una arquitectura o modelo referencial para adaptarlo a las necesidades de sistema, se debería optar por tratar de no modificar la estructura del este. Y de ser necesario, se podría optar por buscar otro referente que se adapte mejor, para de este modo evitar la propuesta de múltiples arquitecturas con modificaciones específicas.

Al momento de elegir una arquitectura o modelo, se debe pensar en las tecnologías que el sistema IoT usará, ya que pueden existir sugerencias para casos específicos que cumplan con los requerimientos del caso, evitando así crear una adaptación.

Una arquitectura o modelo referencial puede tener mayor validez si es planteado por una persona reconocida en el área o por una institución con peso Internacional. Es por ello que se recomienda tomar en cuenta la sugerencia de la ITU para el desarrollo de sistema IoT ya que la misma posee varias publicaciones que cubren ciertos áreas de aplicación de IoT.

EL uso de arquitecturas propuestas en artículos académicos o en publicaciones de conferencias es otra de las opciones para el desarrollo del proceso de estandarización de una arquitectura o modelo para los sistemas IoT. Aunque se debe considerar que los mismos son solo propuestas, no se debe descartar su uso como guía pero, teniendo en cuenta si la misma es una propuesta propia o una modificación de una estructura existente.

Previo a la elección de un modelo de referencia o arquitectura para el desarrollo de un Sistema IoT, se debe contar con una lista de los requerimientos de este. De este modo es más sencillo elegir un modelo o arquitectura que posea una estructura capaz de soportar todos estos requerimientos y no cambiar el mismo durante la implementación.

4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] S. Suman, T. Perumal, R. Yaakob, and N. Mustapha, "Device Verification and Compatibility for Heterogeneous Semantic IoT Systems," Nov. 2019.
- [2] A. Al-Fuqaha, M. Guizani, M. Mohammadi, M. Aledhari, and M. Ayyash, "Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications," *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 17, no. 4, pp. 2347–2376, Oct. 2015, doi: 10.1109/COMST.2015.2444095.
- [3] M. Sharaf, M. Abusair, H. Muccini, R. Eleiwi, Y. Shanaa, and I. Saleh, "Generating heterogeneous codes for IoT systems based on CAPS," in *Proceedings - 2019 ACM/IEEE 22nd International Conference on Model Driven Engineering Languages and Systems Companion, MODELS-C 2019*, Sep. 2019, pp. 736–737, doi: 10.1109/MODELS-C.2019.00113.
- [4] A. Tavizon Salazar, T. Guajardo, and C. Laines, "IOT, el internet de las cosas y la innovación de sus aplicaciones The Path of New Business Models and Innovation Management View project," 2016.
- [5] A. Modarresi and J. P. G. Sterbenz, "Multilevel iot model for smart cities resilience," in *ACM International Conference Proceeding Series*, Jun. 2017, vol. Part F128772, doi: 10.1145/3095786.3095793.
- [6] D. Rodríguez González, "Arquitectura y Gestión de la IoT," *Rev. Telem@tica*, vol. 12, no. 3, pp. 49–60, 2013, [Online]. Available: <http://revistatelematica.cujae.edu.cu/index.php/tele>.
- [7] H. B. Pötter and A. Sztajnberg, "Adapting heterogeneous devices into an IoT context-aware infrastructure," in *Proceedings - 11th International Symposium on Software Engineering for Adaptive and Self-Managing Systems, SEAMS 2016*, May 2016, pp. 64–74, doi: 10.1145/2897053.2897072.
- [8] S. L. Sinche Maita, "New models of reliability in the new generation of Internet of Things," Universidad de Coimbra, Coimbra, 2020.
- [9] P. Lea, *IoT and Edge Computing for Architects*, no. March. Packt Publishing, 2020.
- [10] P. Sethi and S. R. Sarangi, "Internet of Things: Architectures, Protocols, and Applications," *Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 2017. Hindawi Publishing Corporation, 2017, doi: 10.1155/2017/9324035.

- [11] S. Silvestre and J. Salazar, "Modernisation of VET through Collaboration with the Industry," 2019. [Online]. Available: <https://movet.fel.cvut.cz>.
- [12] M. R. Pérez, M. A. Mendoza, and M. J. Suarez, "IoT paradigm: from its concept towards its application in agriculture Contenido," *Espacios*, vol. 40, no. 18, pp. 6–6, 2019.
- [13] A. Domínguez and M. Vargas-Lombardo, "State of art: Smart health and internet of things," 2018. [Online]. Available: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>.
- [14] S. Chen, H. Xu, D. Liu, B. Hu, and H. Wang, "A vision of IoT: Applications, challenges, and opportunities with China Perspective," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 1, no. 4. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., pp. 349–359, Aug. 01, 2014, doi: 10.1109/JIOT.2014.2337336.
- [15] M. A. Jabraeil Jamali, B. Bahrami, A. Heidari, P. Allahverdizadeh, and F. Norouzi, "IoT Architecture," in *Towards the Internet of Things*, 2020, pp. 9–31.
- [16] J. Lin, W. Yu, N. Zhang, X. Yang, H. Zhang, and W. Zhao, "A Survey on Internet of Things: Architecture, Enabling Technologies, Security and Privacy, and Applications," *IEEE Internet Things J.*, vol. 4, no. 5, pp. 1125–1142, Oct. 2017, doi: 10.1109/JIOT.2017.2683200.
- [17] A. Ghasempour, "Internet of things in smart grid: Architecture, applications, services, key technologies, and challenges," *Inventions*, vol. 4, no. 1. MDPI Multidisciplinary Digital Publishing Institute, Mar. 01, 2019, doi: 10.3390/inventions4010022.
- [18] Dogukan AKSU and M. Ali AYDIN, "A Survey of IoT Architectural Reference Models," 2019, doi: 10.1109/SSD.2019.8893170.
- [19] S. N. Swamy and S. R. Kota, "An empirical study on system level aspects of Internet of Things (IoT)," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 188082–188134, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3029847.
- [20] C. Le Zhong, Z. Zhu, and R. G. Huang, "Study on the IOT Architecture and Access Technology," in *Proceedings - 2017 16th International Symposium on Distributed Computing and Applications to Business, Engineering and Science, DCABES 2017*, Jul. 2017, vol. 2018-September, pp. 113–116, doi: 10.1109/DCABES.2017.32.
- [21] W. Kassab and K. A. Darabkh, "A–Z survey of Internet of Things: Architectures, protocols, applications, recent advances, future directions and recommendations," *J.*

Netw. Comput. Appl., vol. 163, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.jnca.2020.102663.

- [22] N. Manoj Kumar and P. K. Mallick, "The Internet of Things: Insights into the building blocks, component interactions, and architecture layers," in *Procedia Computer Science*, 2018, vol. 132, pp. 109–117, doi: 10.1016/j.procs.2018.05.170.
- [23] L. Lao, Z. Li, S. Hou, B. Xiao, S. Guo, and Y. Yang, "A survey of IoT applications in blockchain systems: Architecture, consensus, and traffic modeling," *ACM Computing Surveys*, vol. 53, no. 1. Association for Computing Machinery, Feb. 01, 2020, doi: 10.1145/3372136.
- [24] ITU-T, "ITU-T Rec. Y.2060 (06/2012)- Y.4000 (02/2016) Overview of the Internet of things," 2016.
- [25] ITU-T, "ITU-T Rec. Y.4464 (01/2020) Framework of blockchain of things as decentralized service platform," 2020. [Online]. Available: <http://handle.itu.int/11.1002/1000/11>.
- [26] ITU-T, "ITU-T Rec. Y.4465 (01/2020) Framework of Internet of things services based on visible light communications," 2020. [Online]. Available: <http://handle.itu.int/11.1002/1000/11>.
- [27] A. E. Bouaouad, A. Cherradi, S. Assoul, and N. Souissi, "The key layers of IoT architecture," Nov. 2020, doi: 10.1109/CloudTech49835.2020.9365919.
- [28] A. Ruiz-Zafra, K. Benghazi, C. Mavromoustakis, and M. Noguera, "An IoT-Aware Architectural Model for Smart Habitats," in *Proceedings - 16th International Conference on Embedded and Ubiquitous Computing, EUC 2018*, Dec. 2018, pp. 103–110, doi: 10.1109/EUC.2018.00022.
- [29] A. Ordoñez García, M. Siller, and O. Begovich, "IoT Architecture for Urban Agronomy and Precision Applications.," 2017.
- [30] N. Manoj Kumar and A. Dash, "Internet of Things: An Opportunity for Transportation and Logistics," 2017. [Online]. Available: <https://ssrn.com/abstract=3213883>.

5 ANEXOS

ANEXO I. Investigación para la selección de los Modelos/Arquitecturas de referencia

ANEXO II. Número de Apariciones por Modelo/Arquitectura

ANEXO III. Tablero Kanban Actualizado según el trabajo realizado en la semana 10

ANEXO I. Investigación para la selección de los Modelos/Arquitecturas de referencia

Ref.	Año	Título	Arquitectura(s)	Capas	Aspectos importantes
[15]	2020	IoT Architecture	3 Capas	Capa de Aplicación Capa de Red Capa de Percepción	<ul style="list-style-type: none"> • Explicación y exposición de varias arquitecturas • Imágenes de referenciales a las arquitecturas • Tecnología aplicada a sistemas IoT • Dominios de aplicación de IoT
			5 Capas	Capa de Negocios Capa de Aplicación Capa de Procesamiento Capa de Transporte Capa de Percepción	
			SOA	Capa de interacción de la aplicación Capa de procesamiento de eventos Capa de Acceso al dispositivo	
			IoT Middleware	Capa en la Nube (cloud) Capa Fog Capa Terminal	
			IoT Fog	Capa de Aplicación Capa de Gestión C4ISR (protocolo de transporte) Capa de Comunicación de Gateways Capa de Detección física	
[16]	2017	A Survey on Internet of Things: Architecture, Enabling Technologies, Security and Privacy, and Applications	3 Capas	Capa de Aplicación Capa de Red Capa de Percepción	<ul style="list-style-type: none"> • Indica algunas tecnologías usadas por cada capa. • Explicación de Fog y Edge computing.
			SOA	Capa de Aplicación Capa de Servicio Capa de Red Capa de Percepción	
[17]	2019	Internet of Things in Smart Grid: Architecture, Applications, Services, Key Technologies, and Challenges	3 Capas	Capa de Aplicación Capa de Red Capa de Percepción	<ul style="list-style-type: none"> • Introducción a la tecnología de Smart Grid (SG) • Aplicaciones de IoT en SG • Arquitecturas de IoT SG • Explicación breve y concisa. • No indica ejemplos.
			4 Capas	Capa de Aplicación Capa de Administración en la Nube Capa de Red Capa de Percepción	

ANEXO I. Investigación para la selección de los Modelos/Arquitecturas de referencia (Cont.)

Ref.	Año	Título	Arquitectura(s)	Capas	Aspectos importantes
[18]	2019	A Survey of IoT Architectural Reference Models	Modelo de Referencia James-Smith	Capa de Aplicación Capa de Red Capa de Detección	<ul style="list-style-type: none"> • Explicación de los modelos y arquitecturas de referencia • Presenta modelos de propósito general no solo para IoT
			ITU-T M.3010	Capa de Negocio Capa de Servicio Capa de Red Capa de Ítems	
			ITU-T Y.2060	Capa de Aplicación Capa de Soporte Capa de Red Capa de Dispositivo	
			Industrial IoT (IIoT)	Internet industrial Sistema de Sistemas Sistemas Máquinas inteligentes	
[19]	2020	An empirical study on system level aspects of Internet of Things (IoT)	3 Capas	Capa de Aplicación Capa de Red Capa de Percepción	<ul style="list-style-type: none"> • Mayor explicación de Arquitecturas. • Define stack de protocolos por capa. • Define tecnologías de comunicación. • Define seguridades y paradigmas de la computación
			5 Capas	Capa de Negocios Capa de Aplicación Capa de Procesamiento Capa de Transporte Capa de Percepción	
[20]	2017	Study on the IOT Architecture and Access Technology	3 Capas	Capa de Aplicación Capa de Red Capa de Percepción	<ul style="list-style-type: none"> • Explica las capas de manera corta entendible y con ejemplos de tecnologías y dispositivos • Caso de aplicación en una cadena de hoteles
			4 Capas	Capa de Aplicación Capa de Red de Transmisión Capa de Red de Acceso Capa de Percepción	
			5 Capas	Capa de Aplicación Capa de Soporte a la Aplicación Capa de Red de Transmisión Capa de Red de Acceso Capa de Percepción	
[21]	2020	A-Z survey of Internet of Things: Architectures, protocols, applications, recent advances, future directions and recommendations	3 Capas	Capa en la Nube (cloud) Capa Fog Capa IoT	<ul style="list-style-type: none"> • Define terminología IoT • Define las capas de las arquitecturas • Explicación de tecnologías RF (Radiofrecuencia)
			5 Capas	Capa de Aplicación Capa de Transporte Capa de Red Capa de Enlace de datos Capa de Percepción	

ANEXO I. Investigación para la selección de los Modelos/Arquitecturas de referencia (Cont.)

Ref.	Año	Título	Arquitectura(s)	Capas	Aspectos importantes
[22]	2018	The Internet of Things: Insights into the building blocks, component interactions, and architecture layers	3 Capas	Capa de Aplicación Capa de Red Capa de Percepción	<ul style="list-style-type: none"> • Explicación básica de todas las capas de las arquitecturas estudiadas. • Definición de las bases de las arquitecturas o bloques para su construcción.
			5 Capas	Capa de Negocio Capa de Aplicación Capa de Procesamiento Capa de Transporte Capa de Percepción	
			6 Capas	Capa de Negocio Capa de Infraestructura Capa de Aplicación Capa de Transmisión Capa de Reconocimiento Capa de Enfoque	
			7 Capas	Capa de Aplicación Capa ASM Capa de Servicios Capa de Comunicación Capa de Red Capa de Dispositivos Capa Ambiente	
			FOG	Capa de Transporte Capa de Seguridad Capa de Almacenamiento Capa de Preprocesamiento Capa de Monitoreo Capa Física	
[23]	2020	A survey of IoT applications in blockchain systems: Architecture, consensus, and traffic modeling	3 Capas	Capa de Aplicación Capa de Red Capa de Percepción	<ul style="list-style-type: none"> • Explicación sobre Blockchain e IoT con sus respectivas aplicaciones individuales y en conjunto • Uso de la arquitectura de 5 capas adaptada para tecnología blockchain.
			5 Capas	Capa de Negocio Capa de Aplicación Capa Middleware Capa de Red Capa de Percepción	
[24]	2016	ITU-T Rec. Y.2060 (06/2012)-Y.4000 (02/2016) Overview of the Internet of things	ITU-T Y.4000/2060 Reference Model	Capa de aplicación Capa de Soporte de Aplicaciones y Soporte de Servicios Capa de Red Capa de Dispositivo	Explicación de generalidades de IoT y presentación de la recomendación de arquitectura de la ITU.

ANEXO I. Investigación para la selección de los Modelos/Arquitecturas de referencia (Cont.)

Ref.	Año	Título	Arquitectura(s)	Capas	Aspectos importantes
[25]	2020	ITU-T Rec. Y.4464 (01/2020) Framework of blockchain of things as decentralized service platform	ITU-T Y.4000/2060 Reference Model	Capa de Aplicación Capa de Soporte de Aplicaciones y Soporte de Servicios Capa de Red Capa de Dispositivo	Adaptación del modelo ITU-T Y.4000 para tecnología de Blockchain.
[26]	2020	ITU-T Rec. Y.4465 (01/2020) Framework of Internet of things services based on visible light communications	ITU_T Y.4000/2060 Reference Model	Capa de Aplicación Capa de Soporte de Aplicaciones y Soporte de Servicios Capa de Red Capa de Dispositivo	Adaptación del modelo ITU-T Y.4000 para tecnología VLC Visible light communications
[27]	2020	The key layers of IoT architecture	-	-	<ul style="list-style-type: none"> Estudio de capas propuestas en distintos artículos Mayor afluencia de las capas 1, 5,6,9,10 según la investigación
[28]	2018	An IoT-aware Architectural model for smart habitats	3 capas Modificada	Capa de Aplicación Capa de Red Capa de Adquisición	<ul style="list-style-type: none"> Explicación de las Capas Explicación de Arquitectura básica de 3 Capas en medicina Aplicación de la arquitectura de 3 capas básica
[29]	2017	IoT Architecture for Urban Agronomy and Precision Applications	3 Capas	Capa de Aplicación Capa de Control Capa de Infraestructura	<ul style="list-style-type: none"> Propuesta de arquitectura para la agronomía en base a la arquitectura de 3 capas.
[30]	2017	Internet of Things: An Opportunity for Transportation and Logistics	5 Capas Modificada	Capa de Aplicación Capa Sensor (Sensing) Capa de Comunicación Capa de Infraestructura	Adaptación de la arquitectura referencial de 5 capas para su uso dentro del sistema de Transporte.

ANEXO II. Número de Apariciones por Modelo/Arquitectura

Modelo/Arquitectura	Referencias															Total
	[15]	[16]	[17]	[18]	[19]	[20]	[21]	[22]	[23]	[24]	[25]	[26]	[28]	[29]	[30]	
3 Capas	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓				✓	✓		10
4 Capas			✓			✓		✓								3
5 Capas	✓				✓	✓	✓	✓	✓						✓	7
6 Capas								✓								1
7 Capas								✓								1
SOA	✓	✓														2
IoT Middleware	✓															1
IoT Fog	✓															1
James-Smith				✓												1
ITU-T M.3010				✓												1
ITU-T Y.4000/2060				✓						✓	✓	✓				4
Industrial IoT (IIoT)				✓												1
FOG								✓								1

ANEXO III. Tablero Kanban Actualizado según el trabajo realizado en la semana 10

