

**Prototipo de plataforma de servicios basada en IoT para la monitorización de un sistema
de generación fotovoltaica (FV) integrado con vegetación**

Maria Alejandra Camargo Vila

**Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de Magíster en
Ingeniería de Telecomunicaciones**

Director

Homero Ortega Boada

Ph.D. En Ciencias de la Ingeniería

Codirector

German Alfonso Osma Pinto

Ph.D. en Ingeniería

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Maestría en Ingeniería de Telecomunicaciones

Bucaramanga

2019

Agradecimientos

Agradezco a la Universidad Industrial de Santander, a la Vicerrectoría de Investigación y Extensión, y a la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones, por participar en la formación de Master en Ingeniería de Telecomunicaciones.

Al profesor Homero Ortega Boada como director, German Alfonso Osma Pinto como codirector, por su tiempo, apoyo y dedicación en la realización del presente trabajo de investigación.

Al ingeniero Dario Alejandro Riaño Velandia quien como mucha dedicación me ayudó a llevar a cabo este gran proyecto.

Finalmente agradezco a todos los compañeros del grupo de investigación RadioGIS y GISEL, quienes aportaron un granito de arena para la realización de este proyecto y para mi crecimiento como persona.

A mi padre, aquel hombre que siempre está pendiente de que nunca me haga falta nada; a mi madre, una mujer que me ha enseñado a enfrentar la vida y a salir adelante a pesar de los obstáculos; y a mi hermano, mi compañero de vida con su inmenso amor incondicional. A toda mi familia que en la cercanía y en la distancia siempre saben hacer sentir su apoyo y amor hacía a mí.

A la persona que estuvo constante en todo mi proceso de aprendizaje, Angel con tus palabras serenas y calmas, alentándome a seguir día tras día, siempre viendo lo positivo de la situación.

A todos y cada uno de los que hicieron parte de esta gran experiencia, profesores y amigos, quienes con sus experiencias contribuyeron al desarrollo de este proyecto y más allá de ello me hicieron mejor persona.

Agradecida con Dios por darme la oportunidad de estar rodeada de personas tan especiales junto a las cuales he logrado escalar un peldaño más.

Maria Alejandra Camargo Vila

Contenido

	Pág.
Introducción	14
1. Descripción de la propuesta de investigación	19
1.1 Objetivo general.....	19
1.2 Objetivos específicos	19
1.3 Alcances.....	20
2. Marco Teórico.....	21
2.1 El internet de las cosas.....	21
2.1.1 Modelo de referencia de IoT.....	22
2.1.2 Arquitecturas de plataformas IoT.	23
2.1.3 Protocolos de comunicación para el IoT.....	25
2.1.4 Plataformas IoT.....	27
2.1.5 Conclusiones	31
2.2 Sistemas GRIPV	32
2.2.1 Monitorización de sistemas GRIPV.....	33
2.3 Arquitectura empresarial.....	40
2.3.1 Resumen de los marcos de referencia más utilizados.....	41
2.3.2 Conclusiones	46
3. Caso de estudio: sistema GRIPV del edificio de ingeniería eléctrica.....	46

3.1 Paneles fotovoltaicos y microinversores.....	47
3.2 Medidores avanzados de energía eléctrica.....	48
3.2.1 AcuRev2020	48
3.2.2 Acuvim IIR	50
3.3 Sistema de irrigación inteligente del sistema GRIPV	51
4. Metodología para el diseño e implementación de una plataforma de servicios basada en IoT	51
4.1 Descripción de la metodología.....	53
4.1.1 Definición del contexto del problema.....	54
4.1.2 Diseño de la arquitectura:	56
4.1.3 Implementación de la arquitectura:.....	66
5. Implementación y despliegue del modelo de la plataforma de servicios IoT	67
5.1 Definición del contexto del problema.....	67
5.1.1 Estado actual del negocio.....	68
5.1.2 Identificación de partes interesadas	68
5.1.3 Requerimientos y casos de uso	70
5.1.4 Evaluación de factibilidad.....	74
5.2 Diseño de la arquitectura	75
5.2.1 Dimensión de negocio.....	75
5.2.2 Dimensión de aplicaciones	76
5.2.3 Dimensión de infraestructura tecnológica y física.....	78
5.2.4 Modelo arquitectural del prototipo de plataforma de servicios basada en IoT	83
5.3 Implementación de la arquitectura.....	86
5.3.1 Capa de infraestructura tecnológica y física.	86

5.3.2 Capa de aplicaciones.....	93
5.3.3 Capa de negocios	100
6. Validación del prototipo desarrollado.....	103
6.1 Requerimiento funcional: Monitorizar el sistema GRIPV-E3T	104
6.2 Requerimiento funcional: Procesamiento de datos.....	104
6.3 Requerimiento funcional: Almacenamiento centralizado de la información	105
6.4 Requerimiento funcional: Visualización de la información	105
7. Conclusiones.....	109
Resultados	109
Conclusiones generales	110
8. Trabajos Futuros	112
Referencias Bibliográficas	113

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Modelo de referencia de IoT [12].....	23
Figura 2. Arquitectura plataforma IoT. (a) Tres capas. (b) Cinco capas.	25
Figura 3. Ciclo del Método de Desarrollo de la Arquitectura.....	42
Figura 4. Marco de referencia Zachman para arquitectura empresarial [52].....	44
Figura 5. Proceso de 6 pasos de desarrollo de arquitectura [53]	45
Figura 6. Sistema GRIPV del Edificio E3T.....	47
Figura 7. Comunicación de microinversores con la plataforma Enlighten [55]	48
Figura 8. AcuRev2020 [56]	49
Figura 9. Acuvim IIR [57]	50
Figura 10. Visión general de las etapas de la metodología propuesta.	54
Figura 11. Modelo de capas para el desarrollo de servicios IoT.	57
Figura 12. Capas del modelo arquitectural.	58
Figura 13. Modelo de terminal IoT.....	63
Figura 14. Diagrama de casos de uso.....	72
Figura 15. Capa de negocios del modelo arquitectural.....	76
Figura 16. Capa de aplicaciones del modelo arquitectural.	77
Figura 17. Capa de infraestructura física y tecnológica del modelo arquitectural.....	78
Figura 18. Nodo de terminales IoT y sus componentes.....	79

Figura 19. Nodo de servidores y componentes relacionados.....	81
Figura 20. Nodo de equipos de desarrollo	82
Figura 21. Internet y servidores de plataformas externas	83
Figura 22. Modelo arquitectural del prototipo de plataforma de servicios basada en IoT	84
Figura 23. Rutina Java para la comunicación y adquisición de datos de los medidores de energía.	89
Figura 24. Interfaz para el establecimiento de comunicación y lectura de variables.	90
Figura 25. Diagrama entidad-relación del sistema de riego inteligente.....	94
Figura 26. Diagrama entidad-relación de la base de datos del sistema GRIPV.	95
Figura 27. Modelo cliente servidor bajo el cual trabaja el servidor de aplicaciones.	97
Figura 28. Diagrama de casos de uso de la página web de la plataforma.....	101
Figura 29. Página de inicio de la aplicación web.....	102
Figura 30. Vista de las variables asociadas a los microinversores del sistema fotovoltaico.	106
Figura 31. Vista asociada a la comparación de variables entre microinversores.....	107
Figura 32. Visualización de variables asociadas a los medidores avanzados de energía.	107
Figura 33. Visualización de la temperatura de las zonas y el estado de las electroválvulas del sistema de riego inteligente.....	108
Figura 34. Visualización del contenido volumétrico de agua en el sistema de riego inteligente y ventanas de comparación de variables entre zonas.....	108

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Protocolos destacados en apoyo al IoT [14]	26
Tabla 2. Tipos de plataforma	27
Tabla 3. Monitorización de sistemas GRIPV	34
Tabla 4. Sistema de monitorización de PV	36
Tabla 5. Sistema de monitorización de PV con IoT	38
Tabla 6. Requisitos funcionales que debe cumplir la arquitectura del prototipo de plataformas de servicios IoT.....	70
Tabla 7. Requisitos no funcionales que debe cumplir la arquitectura del prototipo de plataformas de servicios IoT.....	71
Tabla 8. Caso de uso: monitorizar el sistema GRIPV-E3T	73
Tabla 9. Caso de uso: Procesamiento de datos	73
Tabla 10. Caso de uso: Almacenamiento centralizado de la información	73
Tabla 11. Caso de uso: Visualización de la información.....	74
Tabla 12. Tarjetas de desarrollo con sus principales características.....	88
Tabla 13. Características principales del servidor.	93
Tabla 14. Modelo de potencia Budeanu y Frize	98
Tabla 15. Modelo de potencia IEEE 1459-2010: Caso sistema 3ø tetrafilar (4 hilos)	98
Tabla 16. Validación de requerimientos funcionales por parte del usuario final.	103

Resumen

TÍTULO: PROTOTIPO DE PLATAFORMA DE SERVICIOS BASADA EN IoT PARA LA MONITORIZACIÓN DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN FOTOVOLTAICA (FV) INTEGRADO CON VEGETACIÓN*

AUTOR: MARIA ALEJANDRA CAMARGO VILA**

PALABRAS CLAVE: PLATAFORMA IoT, SISTEMAS GRIPV, ARQUITECTURA EMPRESARIAL, MONITORIZACIÓN Y CONTROL, PANEL FOTOVOLTAICO, TECHO VERDE.

DESCRIPCIÓN:

Este proyecto se enmarca dentro los sistemas GRIPV (por sus siglas en inglés, Green Roof Integrated Photovoltaics) y se enfoca principalmente en poder abrirle a este tipo de sistemas la posibilidad de afrontar la heterogeneidad de los objetos a través del Internet de las Cosas (IoT). Por consiguiente, en este trabajo de investigación se diseña e implementa un prototipo de plataforma de servicios basada en IoT para el monitoreo de variables en un futuro Smart-GRIPV. El diseño ha sido realizado con un enfoque de arquitectura empresarial (AE) con el fin de lograr un diseño con visión empresarial, que facilite la toma de decisiones que puedan surgir por las razones más diversas, tomando ToGAF como marco de referencia.

En cuanto a la implementación se realizó un prototipo de plataforma basada en el concepto de IoT que contemple la escalabilidad de este tipo de sistemas y su posible adaptación a infraestructuras con necesidades y características similares que abarquen áreas más allá de la generación fotovoltaica. La plataforma está compuesta principalmente por la capa de infraestructura tecnológica y física, la capa de aplicaciones y la de negocios. En la primera se logra solucionar los problemas de conectividad entre las tecnologías heterogéneas disponibles, en la capa de aplicaciones se implementaron las capacidades de almacenamiento y procesamiento de datos y en la capa de negocios se implementaron aplicaciones para los clientes finales.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones Maestría en Ingeniería de Telecomunicaciones Director Homero Ortega Boada Ph.D. En Ciencias de la Ingeniería Codirector German Alfonso Osma Pinto Ph.D. en Ingeniería

Abstract

TITLE: IoT-BASED SERVICES PLATFORM PROTOTYPE FOR MONITORING A PHOTOVOLTAIC GENERATION SYSTEM (PV) INTEGRATED WITH VEGETATION*

AUTHOR: MARIA ALEJANDRA CAMARGO VILA**

KEYWORDS: IoT PLATFORM SYSTEMS GRIPV, ENTERPRISE ARCHITECTURE, MONITORING AND CONTROL, PHOTOVOLTAIC PANEL, GREEN ROOF.

DESCRIPTION:

This project is framed within the GRIPV systems (Green Roof Integrated Photovoltaics) and focuses mainly on being able to open to this type of systems the possibility of facing the heterogeneity of objects through the Internet of Things (IoT). Therefore, in this research work a prototype of an IoT-based service platform for the monitoring of variables in a future Smart-GRIPV is designed and implemented. The design has been made with a focus on enterprise architecture (EA) in order to achieve a design with business vision, to facilitate decision-making that may arise from the most diverse reasons, taking TOGAF as a reference.

Regarding the implementation, a prototype platform was carried out based on the concept of IoT that contemplates the scalability of this type of systems and its possible adaptation to infrastructures with similar needs and characteristics that cover areas beyond photovoltaic generation. The platform is mainly composed of the technological and physical infrastructure layer, the application layer and the business layer. In the first one, it is possible to solve the connectivity problems between the heterogeneous technologies available, in the application layer the storage and data processing capabilities were implemented and in the business layer applications were implemented for the end customers.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones Maestría en Ingeniería de Telecomunicaciones Director Homero Ortega Boada Ph.D. En Ciencias de la Ingeniería Codirector German Alfonso Osma Pinto Ph.D. en Ingeniería

Introducción

El desarrollo de las ciudades ha estado durante mucho tiempo divorciado de la naturaleza; pero estamos a las puertas de un nuevo paradigma que busca combinar las necesidades de la construcción en armonía con el medio ambiente (edificaciones verdes), lo cual asocia toda una convergencia de temas como: el aprovechamiento de los recursos naturales, el uso de energías renovables, el reciclaje, el uso de tecnologías de la información y las comunicaciones, así como la inteligencia artificial y políticas de estado para favorecer a la naturaleza y a las personas que podrán vivir y trabajar en ambientes más confortables y saludables.

Este proyecto se enmarca en un tema más específico, los sistemas GRIPV (por sus siglas en inglés, Green Roof Integrated Photovoltaics), en el cual se busca armonizar el uso de techos verdes en las edificaciones con el uso de paneles fotovoltaicos (FV), lo cual van a ser cada vez más fundamental en las edificaciones verdes. Estas dos tecnologías son reconocidas en el sistema americano de certificación de sostenibilidad de edificaciones LEED (por sus siglas en inglés, Leadership in Energy & Environmental Design). En Colombia hasta la fecha el Consejo Colombiano de Construcción Sostenible (CCCS) en alianza con el Green Business Certification Inc. (GBCI) para el Programa LEED, han logrado certificar 151 proyectos y 223 más están en dicho proceso (“Programa LEED® en Colombia – Consejo Colombiano de Construcción Sostenible – CCCS,” n.d.).

Los sistemas GRIPV ofrecen entonces un nuevo ecosistema en pro de edificaciones verdes amigables con la naturaleza, con un efecto sinérgico para la reducción del efecto isla calor y la

producción de energía renovable. Estudios demuestran que con los sistemas GRIPV se logra un incremento moderado de la potencia fotovoltaica y del aislamiento térmico en las edificaciones si se compara con el uso de paneles solares sobre techos de concreto, es decir, se crea una interacción entre la vegetación y el panel FV, lo cual se debe al efecto de refrigeración por evapotranspiración que ayuda a que los paneles solares se mantengan a una temperatura más apropiada para su funcionamiento (Lamnatou & Chemisana, 2015a).

En la Universidad Industrial de Santander se viene desarrollando la línea de sistemas GRIPV liderada por el Grupo de Investigación en Sistemas de Energía Eléctrica-GISEL. El proyecto más reciente, financiado por Colciencias lleva por título “Viabilidad Técnica de la implementación de sistemas fotovoltaicos con vegetación como estrategia de generación distribuida y horticultura en entornos urbanos de clima cálido tropical”, en el cual podemos observar dos grandes novedades: los estudios para climas cálidos tropicales y la horticultura. Para ello se han creado las condiciones de experimentación en la terraza del edificio E3T, de la Universidad Industrial de Santander.

Con el apoyo del CentroTIC y del grupo RadioGIS se busca aprovechar los avances de las tecnologías de la información y las comunicaciones para soportar los sistemas GRIVP dentro de una plataforma IoT que brinde no solo soluciones a la necesidad de integración actual de todas las técnicas de sensado y control remoto sino que sirva como semilla para el ecosistema que se estará requiriendo a futuro para soportar no solo los requisitos de los investigadores de la UIS sino de todos los demás actores como los usuarios, las empresas, el gobierno e investigadores de otras latitudes, pero también de tecnologías diversas como las que pueden usarse de manera remota al incluir técnicas de almacenamiento y/o procesamiento en la nube, inteligencia artificial y ciencia de datos en general.

Con el presente trabajo se enfrentan los retos iniciales que se presentan en los sistemas GRIPV desde el punto de vista de las TIC. El desarrollo de los diferentes trabajos de investigación que se llevan a cabo en torno a este tipo de sistemas demanda la monitorización de las variables que describen el comportamiento del sistema FV, del techo verde, del sistema de irrigación y del edificio, para lo cual se cuenta con diferentes equipos de medición, como medidores de energía, dataloggers, tarjetas de desarrollo, sensores y actuadores (GISEL, 2014; GISEL, GIEMA, & GIEFIVET, 2016). Esta diversidad de equipos utilizados para la supervisión y control de los sistemas hace dispendiosas las labores de investigación, pues utilizan diferentes softwares para la adquisición y almacenamiento de datos.

Estas tecnologías son muy variadas, algunas de las cuales incluyen conexión con internet, aunque con aplicaciones propietarias cerradas que pretenden crear dependencia hacia ciertos proveedores de tecnología, mientras que otras ni siquiera incluyen la conectividad. Por esta razón muchos trabajos venían traducándose en tareas dispendiosas de recolección y almacenamiento de datos; para luego realizar una rigurosa integración manual de data sets para posteriores estudios y análisis. De otro lado, el Internet de las cosas (IoT) busca resolver este tipo de conflictos al brindarle cabida a prácticamente cualquier cosa mediante una plataforma de soporte, abierta no solo a diferentes tipos de tecnologías de sensado y control sino a las que aprovechan la nube y brindan la posibilidad de desarrollar aplicaciones propias para usuarios finales con diferentes necesidades.

Este término de internet de las cosas (IoT por sus siglas en inglés Internet of Things), fue usado por primera vez en 1999 por el británico Kevin Ashton para describir un sistema en el cual los objetos en el mundo físico podrían estar conectados a la Internet por medio de sensores (Rose, Eldridge, & Lyman, 2015). IEEE define IoT como “una red de dispositivos, cada uno embebido

con sensores, que se conectan a Internet”; y la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU) indica que es “infraestructura mundial al servicio de la sociedad de la información que propicia la prestación de servicios avanzados mediante la interconexión (física y virtual) de las cosas gracias al interfuncionamiento de tecnologías de la información y la comunicación (existentes y en evolución)” (Baccino, 2015; Rose et al., 2015).

El IoT es entonces, una red interconectada de objetos, caracterizados por su heterogeneidad y ubicuidad, comunicándose entre ellos a través de Internet (Hao, Lei, Yan, & Yang, 2012); para lo cual es indispensable contar con inteligencia integrada en los objetos, conectividad de estos a Internet e interacción entre ellos mismos. Lograr adquirir estas propiedades hace necesario la intervención de varios componentes tecnológicos, como por ejemplo los sistemas embebidos, las redes de sensores y actuadores, entre otros; y el desarrollo de software; apoyados sobre una infraestructura que permita conectar los objetos y equiparlos de la inteligencia precisa para su comunicación con otros objetos (González García, 2017).

En esta temática también cuentan los esfuerzos del CentroTIC que viene desarrollando el proyecto “PLATAFORMA IOT PARA EL DESARROLLO DE SERVICIOS INTELIGENTES DE APOYO AL MONITOREO AMBIENTAL”, financiado por la Vicerrectoría de investigación y extensión de la UIS y pensado para liderar desde esta institución el desarrollo de los más diversos servicios IoT.

El presente proyecto se enfoca principalmente en poder abrirle a los sistemas GRIPV la posibilidad de afrontar la heterogeneidad de los objetos que brindan diferentes proveedores y los que puedan desarrollarse localmente para potenciar nuevas e innovadoras aplicaciones con el uso de una gama más amplia de tecnologías. Esto conlleva a la siguiente pregunta de investigación:

¿Es posible solucionar los problemas derivados de la heterogeneidad entre dispositivos a través del desarrollo de un prototipo de plataforma de servicios basada en IoT?

Por consiguiente, en este trabajo de investigación se diseña e implementa un prototipo de plataforma de servicios basada en IoT para el monitoreo de variables en un futuro Smart-GRIPV. El diseño ha sido realizado con un enfoque de arquitectura empresarial (AE) con el fin de lograr un diseño con visión empresarial, que facilite la toma de decisiones que puedan surgir por las razones más diversas. Como es bien sabido, la AE una metodología que permite alinear procesos, datos, aplicaciones e infraestructura tecnológica con los objetivos estratégicos del negocio entendiendo la organización como un todo complejo (Castillo Santos & Castillo García, 2014), lo cual se traduce en facilidades para la toma de decisiones oportunas y la posibilidad de crear una abstracción transferible de la descripción del sistema (Sarasty España, 2015). En este proyecto se ha tomado el ToGAF como marco de referencia, pero en las AE existen otros marcos de referencia a seguir como DoDAF el cual es usado por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos y el Zharman.

En cuanto a la implementación se realizó un prototipo de plataforma basada en el concepto de IoT que contemple la escalabilidad de este tipo de sistemas y su posible adaptación a infraestructuras con necesidades y características similares que abarquen áreas más allá de la generación fotovoltaica. La plataforma está compuesta principalmente por la capa de infraestructura tecnológica y física, la capa de aplicaciones y la de negocios. En la primera se logra solucionar los problemas de conectividad entre las tecnologías heterogéneas disponibles, en la capa de aplicaciones se implementaron las capacidades de almacenamiento y procesamiento de datos y en la capa de negocios se implementaron aplicaciones para los clientes finales.

En este libro la investigación se distribuye en siete capítulos de la siguiente manera: el 2 capítulo presenta el soporte conceptual de trabajo de investigación; el siguiente capítulo describe las características del caso de estudio; en el capítulo 4 se presenta la metodología propuesta y en el siguiente su implementación; finalmente en el capítulo 6 se exponen las conclusiones y trabajos finales.

1. Descripción de la propuesta de investigación

A continuación, se presentan los objetivos del trabajo propuesto y sus respectivos alcances.

1.1 Objetivo general

Desarrollar un prototipo de plataforma de servicios basada en Internet de las cosas (IoT) para el monitoreo de un sistema de generación fotovoltaica (FV) integrado con vegetación.

1.2 Objetivos específicos

- Implementar la adquisición centralizada de datos para un conjunto de protocolos de comunicación.

- Establecer la arquitectura de una plataforma de servicio basada en IoT e integrada con cloud computing orientada al análisis de desempeño de un sistema energético con múltiples fuentes de información.
- Diseñar e implementar una aplicación web para la visualización y análisis del comportamiento del sistema GRIPV a partir de un sistema de indicadores de desempeño.

1.3 Alcances

El diseño e implementación de la plataforma de servicios basada en IoT que se desarrollará en este proyecto de investigación facilitará en su primera versión, las labores de investigación para el análisis y estudio del sistema GRIPV instalado en el Edificio de Ingeniería Eléctrica, ajustándose a los requerimientos específicos del mismo y aportando herramientas para una gestión centralizada, sincronizada y automática de los datos, que contribuyan con la integridad y seguridad de la información y la eficiencia de los procesos de control y monitorización. Esta plataforma sentará la base para el desarrollo de futuros servicios como la detección de fallas, el mantenimiento preventivo y favorecimiento del estudio de este tipo de sistemas, entre otros.

Para el objetivo específico N° 1, la adquisición centralizada de los datos para el conjunto de protocolos manejados dentro del sistema GRIPV permitirá recolectar la información de los dispositivos de medición y direccionarla a un mismo lugar de almacenamiento.

Para el objetivo específico N° 2, la arquitectura de la plataforma basada en IoT e integrada con cloud computing constituirá la herramienta operativa que soportará la etapa de diseño y concepción de la plataforma. Se establecerán las reglas de diseño que implica designar las funciones y especificar las interacciones de las capas o módulos y definir los protocolos de

integración. Además de tener presentes las funciones principales para las que se crea la plataforma, está también debe responder a los diferentes modos de operación, ocasionales y/o accidentales, de forma que se contemplen todos los posibles escenarios. De este modo se partirá del modelo de referencia IoT y se buscará apoyo en la literatura para continuar su desarrollo.

Adicionalmente el diseño de la arquitectura será evaluado bajo tres criterios, la seguridad de la información, y la escalabilidad y la adaptabilidad a otros sistemas con características similares

Para el objetivo específico N° 3, la aplicación web hará posible la visualización y consulta de los indicadores de desempeño e información proveniente de la base de datos del sistema, desde cualquier computador con acceso a internet.

2. Marco Teórico

Esta sección presenta generalidades sobre el Internet de las cosas (IoT), los sistemas GRIPV y la arquitectura empresarial (AE).

.

2.1 El internet de las cosas

IoT es una arquitectura emergente basada en la Internet global que facilita el intercambio de bienes y servicios entre redes, que pertenecen a una cadena de suministro y vela por la seguridad y privacidad de los interesados. Se ha convertido en una tendencia de amplio uso en sectores de la industria, ingeniería, medicina y sociedad, brindando nuevas oportunidades de acceso a datos,

servicios en la educación, asistencia sanitaria, transporte, etc., y convirtiéndose en pieza clave para aumentar la productividad en las empresas a través de redes locales y dispositivos inteligentes que se adaptan a las necesidades del cliente (Salazar & Silvestre, 2014).

2.1.1 Modelo de referencia de IoT. El modelo de referencia de IoT está conformado por cuatro capas: la capa de aplicación como su nombre lo indica, contiene todas las aplicaciones IoT; la capa de apoyo a servicios y aplicaciones consta de capacidades genéricas que pueden ser utilizadas por diferentes aplicaciones IoT y capacidades específicas que atienden las necesidades particulares de cada una de estas; la capa de red que ofrece capacidades de red y transporte; y finalmente la capa de dispositivo que cuenta con capacidades de dispositivo y pasarela (UIT, 2012).

Además de las cuatro capas mencionadas, este modelo también asocia a cada una de ellas capacidades de gestión y seguridad. Gestión de fallos, configuración, contabilidad, rendimiento y seguridad; y capacidades de seguridad, genéricas y específicas; las primeras asociadas a las capas de aplicación, red y dispositivo y las segundas con los requisitos específicos de la aplicación. La Figura 1 representa el modelo de referencia IoT (UIT, 2012).

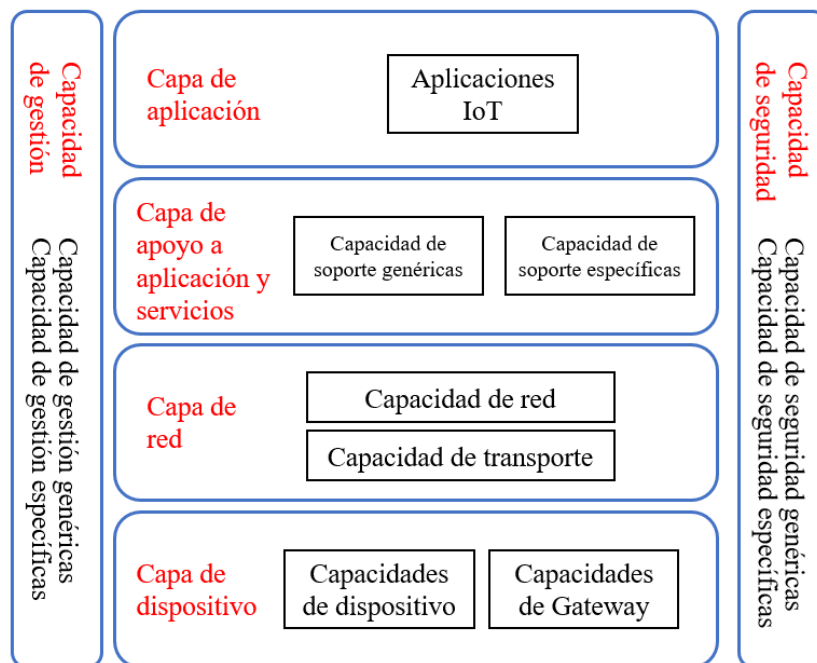


Figura 1. Modelo de referencia de IoT (UIT, 2012)

2.1.2 Arquitecturas de plataformas IoT. La esencia de una plataforma IoT es la interconexión de múltiples objetos heterogéneos con diferentes limitaciones y capacidades, a Internet., por ende, una arquitectura de capas flexible es una de las prioridades para el diseño y desarrollo de plataformas IoT. La arquitectura de IoT puede entenderse como sistema físico, virtual o un híbrido de los dos, que consta de un gran conjunto de objetos físicos, protocolos de comunicación, servicios en la nube, clientes, desarrolladores y componentes de negocio; la cual actúa como pilar fundamental para el desarrollo de servicios y atención de las necesidades del sistema (Ray, 2016).

Desde la introducción del concepto del IoT se han presentado un gran número de arquitecturas, que van desde el modelo básico conformado por tres capas (capa de aplicación, capa de red y capa de percepción), hasta las más recientes que han incorporado un modelo de cinco capas, el cual se describe brevemente a continuación (Al-Fuqaha, Guizani, Mohammadi, Aledhari, & Ayyash, 2015).

- Capa de objetos: Representa todos los dispositivos que van a ser interconectados, los cuales proporcionan los datos que van a hacer almacenados y procesados; y es la encargada de la transferencia de la información a la siguiente capa.
- Capa de abstracción de objetos: Se encarga del envío de la información a la capa de gestión de servicios, por medio de canales seguros; así como del desarrollo de procesos de computación en la nube.
- Capa de gestión de servicios: Encargada del procesamiento de los datos, la toma de decisiones y de proveer los servicios solicitados, por medio de protocolos de conexión a red.
- Capa de aplicación: Esta capa es la encargada de proporcionar los servicios solicitados por el cliente final.
- Capa de negocios: Su principal labor es la creación de un modelo de negocio a partir de los datos recibidos por la capa de aplicación, además del monitoreo y gestión de las cuatro capas subyacentes.

Este tipo de arquitecturas basadas en cinco capas es uno de los modelos más aplicables para las aplicaciones de IoT, ya que concentra y ataca en sus capas cada una de las necesidades del sistema, desde los objetos, el procesamiento y gestión de la información, las necesidades del usuario final y el modelo de negocios. La Figura 2 ilustra los dos tipos de arquitecturas mencionadas.

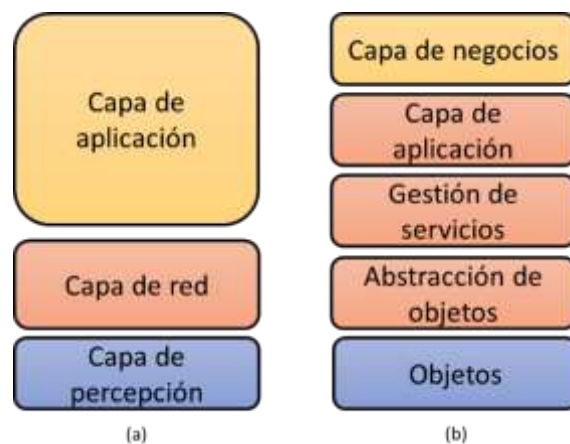


Figura 2. Arquitectura plataforma IoT. (a) Tres capas. (b) Cinco capas.

2.1.3 Protocolos de comunicación para el IoT. Los protocolos de comunicación hacen parte fundamental de las plataformas IoT pues permiten la transferencia de información a través de cada una de las capas de la arquitectura y entre objetos y personas. Actualmente existen muchos protocolos en apoyo al IoT, que han sido producto de la investigación de diferentes grupos y sectores, dentro de los cuales cabe mencionar el Consorcio World Wide Web (W3C), el Grupo de trabajo de ingeniería de Internet (IETF), EPC global, el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE) y El Instituto Europeo de Normas de Telecomunicaciones (ETSI). La

Tabla 1 proporcionada en (Al-Fuqaha et al., 2015) evidencia los protocolos más destacados y utilizados en plataformas IoT, que han sido establecidos por los grupos anteriormente mencionados, enmarcados en cuatro categorías principales.

Tabla 1.

Protocolos destacados en apoyo al IoT (Al-Fuqaha et al., 2015)

Protocolos de aplicación		DDS	CoAP	AMQP	MQTT	MQTT-SN	XMPP	HTTP	REST
Protocolos de descubrimiento de servicios		mDNS				DNS-SD			
Protocolos de infraestructura	Protocolo de enrutamiento	RPL							
	Capa de red	6LoWPAN		LPWAN		IPv4/IPv6			
	Capa de enlace	IEEE 802.15.4							
	Capa física/dispositivo	LTE-A		EPCglobal		IEEE 802.15.4		Z-Wave	
Otros protocolos influyentes		IEEE 1888.3, IPSec					IEEE 1905.1		

Los protocolos de aplicación hacen referencia a aquellos que se encargan de la comunicación entre una aplicación y un servidor, es decir que define como interacciona el cliente con el servidor. Para efectos de este proyecto, los protocolos más influyentes son HTTP y MQTT. En la categoría de protocolos de descubrimiento de servicios, se encuentra que son aquellos que se encargan de detectar automáticamente, es decir sin intervención humana, dispositivos y servicios prestados por dispositivos de red.

Finalmente, el último tipo de protocolos son los de infraestructura, relacionados directamente con los dispositivos IoT y la forma como estos se comunican con el mundo exterior. En esta categoría es posible destacar tecnologías como Lora y Sigfox enmarcados dentro del estándar LPWAN y Zigbee dentro de IEE 802.115.4. Para efectos del trabajo que se desarrolla en el presente

proyecto, es importante mencionar el protocolo Modbus, que puede ser ubicado en la capa física del dispositivo. Este protocolo es utilizado en la industria, maneja una arquitectura de maestro/esclavo y permite una fácil implementación.

Es así como el IoT es un conjunto de las más diversas tecnologías, en este caso los más variados protocolos, y resulta complejo poder tomar decisiones sobre el uso de una u otra. Por tanto esta clasificación presenta una orientación al lector para identificar los estándares más utilizados; pero se aclara que no todos ellos deben integrarse para el desarrollo de soluciones IoT; pues todo depende de la naturaleza de la aplicación IoT.

2.1.4 Plataformas IoT En la actualidad existen un gran número de plataformas de IoT cuyo objetivo principal es la interconexión de los objetos del mundo físico para ofrecer diversas funcionalidades en diferentes sectores como la salud, la industria, ciudades inteligentes, etc. De acuerdo a (García, Espada, Núñez-Valdez, & García-Díaz, 2014) existen cuatro grupos de plataforma los cuales se describen en la Tabla 2, cada una de esta plataformas según su modalidad, enfocan sus esfuerzo en ciertos tipos de servicios y por ende cada una de ellas difiere en la forma de conexión de los objetos y acceso, gestión, procesamiento y visualización de la información.

Tabla 2.

Tipos de plataforma

Tipo	Definición	Ejemplos
de negocios	Plataformas dedicadas a vender servicios	*Xively *Carriots
		*Exosite
		*SensorCloud
		*Etherios
		*ThingWorx

Tipo	Definición	Ejemplos
		*Azure IoT Suit *Amazon Web Services *IBM internet of Things
de investigación	Plataformas dedicadas al estudio de IoT	*QuadraSpace *SIoT *Paraimpu *Midgar
en estado beta	Plataformas para las cuales es necesario contar con una invitación para poder accederlas y usarlas o en su defecto solo visualizarlas	*Sensorpedia *Evrythng *Open.Sen
de código abierto	Plataformas que permite al usuario conectar objetos dentro de una red IoT proveyendo el software y servidor necesario	*ThingSpeak *Nimbits *Kaa

Dentro de las plataformas presentadas en la Tabla 2 se destacan las siguientes, iniciando con Xively creada en 2007 y actualmente parte de Google Cloud IoT, cuyo servicio principal es subir datos a la nube para que el usuario construya aplicaciones con estos. Para ello proporcionan librerías como la de Arduino, Java y Android que permiten la comunicación directa de estas plataformas con su tecnología. Además de ello es posible añadir disipadores que tiene como límite un acción de tipo REST que realiza una petición POST a un servicio http en formato JSON, XML y CSV; y es posible llamar la API Xively a través de IPv4 o IPv6 con HTTP, HTTPS, sockets o

websocket y protocolo MQTT (García Muelas, n.d.). Esta aplicación como se mencionó anteriormente está integrada con Google Cloud IoT, por tanto el acceso a sus servicios está limitado por las políticas de consumo de Google.

Carriots, plataforma como servicio (PaaS), en la actualidad conocida como Altair SmartWorks, diseñada para Internet de las cosas (IoT) y proyectos máquina a máquina (M2M), que permite almacenar y recopilar datos provenientes de dispositivos para construir soluciones a partir de estos e implementar y escalar, desde pequeños prototipos hasta miles de dispositivos. Es compatible con tecnologías como Arduino, Raspberry Pi, Beagle Bone, Fez Cerbuino y dispositivos móviles C4MAX, C4EVO y OBD Dongle, entre otros. La parte fundamental de dicha plataforma es el SDK Carriots, que hace referencia a bibliotecas internas las cuales pueden ser descargadas para desarrollar el software en dispositivos externos, los cuales interactuarán con ésta a través de la API REST Carriots, soportando formatos JSON y XML (García Muelas, n.d.). Ofrece una opción de prueba gratuita de 30 días donde es posible conectar hasta dos dispositivos; pero si se desea tener por completo todas sus características es necesario contactarse como sus agentes para obtener el plan y valor de este, que mejor se adapte a las necesidades.

En las plataformas de investigación cabe mencionar a Paraimpu y SIoT. La primera de estas es definida como una herramienta social en línea que permite gestionar los objetos a través del protocolo HTTP, ya sean físicos o virtuales, para la creación de aplicaciones. Admite tipos de datos de cadena, numéricos, JSON y XML y trabaja sobre un conjunto de clases predefinido que soporta actualmente 10 tipos de sensores y 13 tipos actuadores diferentes, entre los cuales se encuentran las tarjetas Arduino, Foursquare, Pachube, GoogleCal, GoogleMap, Facebook y Twitter, entre otros. Por otro parte, SIoT está enfocada al IoT Social, basada en una aplicación RESTful que soporta formatos CSV, JSON Y XML cuyo principal objetivo es permitir que los objetos tengan

sus propias redes sociales, así como los humanos tiene una, donde cada uno tiene una identidad propia y única y en torno a ello se desarrollan diferentes servicios. Esto con el propósito de establecer las relaciones entre objetos y personas, es decir poder conocer quién los ha creado, quién los ha diseñado, quién los ha fabricado, quién los vende y a quién le gustan; y junto con ello las reglas de interacción con entre ellos (González García, 2017).

Open.Sen.se, perteneciente a las plataformas en estado beta, soporta diferentes protocolos como HTTP, XMPP y CoAP. Permite crear interconexiones solo entre objetos y servicios web, ofreciendo gráficas sobre los datos de los objetos, para ser visualizados en un portal web o compartidos en otras páginas.

Finalmente, dentro de las plataformas de código abierto, se resaltan ThingSpeak y Nimbits. La primera de éstas ofrece servicios de recolección, procesamiento y visualización de datos de los objetos conectados, a través de una API de código abierto que soporta formatos JSON, XML y CSV y la cual es asistida por más de 500 servidores. Y es compatible con tecnologías como Arduino, Raspberry pi, Electric Imp, Freetronics, Netduino y Xbee wireless networks (García Muelas, n.d.). Por otra parte, Nimbits es una plataforma como servicio (PaaS) basada en el Google App Engine. Su núcleo que es el servidor, el cual proporciona servicios web REST para almacenar y recuperar datos, procesamiento de información y comunicación M2M, entre dispositivos y sensores como Arduino. Soporta los formatos de texto, GPS, JSON y XML (“Nimbits API,” n.d.).

Cada una de las plataformas anteriormente mencionadas tiene sus pros y sus contras en cada uno de los diferentes campos en los que se desempeñan y son utilizadas. En general se encuentra cada de una de ellas tiene dominios específicos en cuanto a soporte de formatos de texto, donde sobresalen JSON y XML; de igual forma son compatibles con ciertos dispositivos y tecnologías, lo que en cierto sentido juega en contra y a favor, ya que se especializan en estos, pero de igual

forma limitan su interoperabilidad con equipos que no son compatibles con sus protocolos de comunicación y tecnología; además de ello se resalta la utilización de APIs como la forma de intercambio de datos, tanto para suministrar como para consumir, como un formato más o menos estándar para dichas transferencias.

Finalmente una de las características que más ha llamado la atención para el desarrollo de este proyecto es la posibilidad de diseñar una plataforma de código abierto, que permita a cada uno de los interesados de la plataforma interactuar con esta para crear sus propias soluciones y ofrecer servicios especializados que se adapten a las necesidades a partir de las herramientas base que ésta pueda ofrecer y con ello garantizar la interconexión de objetos heterogéneos y la accesibilidad su información, independientemente del protocolo de comunicación que utilicen.

2.1.5 Conclusiones El IoT ha venido revolucionando el mundo tecnológico, atacando diferentes áreas como la salud, agricultura, educación, construcción, etc., una red inteligente que permite la interconexión de múltiples dispositivos y con ello el intercambio de información entre ellos y las personas en general. Para lograr la interconexión e interoperabilidad de objetos heterogéneos y ubicuos, el IoT ha venido afrontando una serie de desafíos, los cuales ha atacado desde diferentes perspectivas con el desarrollo de plataformas, arquitecturas y protocolos de comunicación, producto de los esfuerzos de grupos de investigación y de negocios.

Desde el punto de vista de la arquitectura, esta debe ajustarse a las necesidades de los investigadores y la industria, siendo la estructura de cinco capas la más aplicable para aplicaciones IoT, pues de este modo cada capa tiene funciones especializadas que desagregan la complejidad del sistema y permiten a los expertos enfocarse en el bloque de interés. Además de ello dicha

arquitectura debe contar con la característica de escalabilidad y permitir la interoperabilidad de dispositivos heterogéneos.

Por otra parte, existen diferentes protocolos de comunicación usados y enfocados en el IoT, cada uno de ellos con propiedades únicas y también compartidas con otros, que hacen que funcionen bien en escenarios y entornos específicos; por lo tanto, no es factible determinar un único método de desarrollo de aplicaciones IoT, la respuesta al mejor protocolo depende de la clase de dispositivos que tiene el sistema y el objetivo de la aplicación IoT.

Finalmente las plataforma IoT, un conglomerado de todos los componentes físicos y virtuales anteriormente mencionados y otros más que no han sido parte esencial de este estudio, es la solución tangible que permite la interconexión de objetos heterogéneos y su principal valor radica en el número y versatilidad de dispositivos compatibles con ella; por lo tanto debería ofrecer un conjunto de protocolos de comunicación amplio, de modo tal que los fabricantes de dispositivos puedan escoger el que mejor se adapte a su solución.

Además de ello es importante que cuente con las siguientes características: gestión de datos para acceso, análisis y procesamiento de un gran volumen de datos; almacenamiento en la nube, es decir recursos de almacenamiento y cómputo; infraestructura para poder consumir dicha información y de igual forma ofrecer servicios; y mecanismos que garanticen un uso y entrega confiable de estos.

2.2 Sistemas GRIPV

Los techos verdes y los paneles fotovoltaicos (FV) son tecnologías verdes que proporcionan beneficios ambientales. Por un lado, los paneles fotovoltaicos son una fuente de energía renovable

con bajas emisiones de carbono; y los techos verdes mitigan el efecto isla de calor urbano, mejorando la calidad del aire, regulando la temperatura y brindando protección a la envoltura del edificio, entre otros (Chemisana & Lamnatou, 2014; Schindler et al., 2016).

Estas dos tecnologías podrían pensarse por separado; pero un número creciente de estudios han demostrado que su combinación es una opción interesante para el uso del techo de las edificaciones, ya que esta configuración aprovecha en conjunto los beneficios anteriormente mencionados y en adición los posibles efectos sinérgicos entre las plantas y los FV (Chemisana & Lamnatou, 2014).

La integración de FV con techos verdes se conoce como Green Roof Integrated Photovoltaics (GRIPV), una tendencia reciente cuya principal ventaja es la mejora de la eficiencia fotovoltaica, gracias al efecto de enfriamiento de la capa de suelo-planta debido a la evapotranspiración y, en general, a la interacción planta-FV. Sin embargo, en la literatura se encuentran pocos estudios sobre este tipo de sistemas (Lamnatou & Chemisana, 2014).

2.2.1 Monitorización de sistemas GRIPV La monitorización de sistemas GRIPV proporciona la información necesaria tanto para el mantenimiento, operación y control de este tipo de sistemas, como para su estudio, ya sea para fines académicos o para la industria. Este seguimiento implica sensor diferentes tipos de variables eléctricas y ambientales, relacionadas con los PVs, la vegetación del techo verde y las condiciones climáticas del sitio donde está ubicado el sistema.

En la literatura existen diferentes trabajos que se dedican a estudiar la interacción techo verde-PV (M. Alshayeb & Chang, 2016; Helow, Drake, & Margolis, 2017; Lamnatou & Chemisana, 2014, 2015a, 2015b; Li, Ramshani, Khojandi, Omitaomu, & Hathaway, 2017; Nacer, Hamidat, & Nadjemi, 2014; Nagengast, Hendrickson, & Matthews, 2013; Nash et al., 2015; Ramshani,

Khojandi, Li, & Omitaomu, 2018; Scherba, Sailor, Rosenstiel, & Wamser, 2011; Schindler et al., 2016; Xue, 2017), para ello analizan las diferentes variables mencionadas en el párrafo anterior pero no dan información acerca del proceso de adquisición de datos y/o los dispositivos utilizados para ello. Por otro lado, estudios como (M. J. Alshayeb & Chang, 2018; Chemisana & Lamnatou, 2014; El Helow, 2018; Gupta, Anand, Kakkar, Sagar, & Dubey, 2017; Ogaili & Sailor, 2016; Tosi, 2016) permiten revisar algunos detalles sobre la obtención de la información y los equipos utilizados, los cuales están resumidos en la Tabla 3.

Tabla 3.

Monitorización de sistemas GRIPV

Ref.	(Chemisana & Lamnatou, 2014)	(Ogaili & Sailor, 2016)	(Tosi, 2016)	(El Helow, 2018)	(Gupta et al., 2017)	(M. J. Alshayeb & Chang, 2018)
Ubicación	España	Portland	East Austin	Toronto	Singapur	Kansas
Año	2013	2014	2016	2016	2017	2017
Dispositivos	Adquisición y comunicación *Piranómetro Kipp y Zonen CMP11 *Pinza amperimétrica Fluke i30s *Termopares de tipo K *Sensores de flujo de calor de película delgada *Anemómetros de película caliente *Termopares tipo T *Anemómetro Campbell 100R *Termopar tipo T *Registrador de datos de temperatura Elitech RC-4 *Inkbird THC-4 Registrador de datos de temperatura y humedad *Irradiancia = Webber Energy Group *Temperatura ambiente = Weather *Multiplexores de termopar de estado sólido de 25 canales - AM25T *Estación meteorológica a in situ *Registrador= voltaje y corriente *Estación meteorológica = anemómetro, humedad y temperatura *Piranómetro CM 6B *HOBO H8 pro de temperatura y la humedad *Termocuplas *Estación meteorológica Onset HOBO *Sensores inteligentes Onset HOBO *Sensor de temperatura del suelo, aire y agua *Piranómetro Onset HOBO *Sensor de velocidad del viento / ráfaga Onset HOBO *Sensor de dirección del viento Onset HOBO					

Ref.	(Chemisana & Lamnatou, 2014)	(Ogaili & Sailor, 2016)	(Tosi, 2016)	(El Helow, 2018)	(Gupta et al., 2017)	(M. J. Alshayeb & Chang, 2018)
	Underground database					
Tecnología de comunicación	Cable	Cable	Cable	Ethernet	Cable	Wifi/Cable
Datalogger	Campbell CR3000	*Inversor individual *Campbell Scientific CR1000	Todos los equipos cuentan con capacidad de registro	*Campbell Scientific - CR100 *Sistema TIGO	*Registrador	*Microinversores Enphase M250 *Registradores de datos Onset HOBO U12
Centro de monitoreo	PC	PC	PC	PC	PC	PC
Software SCADA	--	--	Creación manual de archivo Excel	CRBasic	--	--
Almacenamiento	--	--	--	--	--	--
Vía de acceso a la información	--	--	--	Software Logger Net	--	--

Almacenamiento y acceso de

En general en cuanto a la capa de dispositivos se encuentran sensores y dispositivos con capacidad de medición de variables eléctricas y climáticas, cada uno de ellos pertenecientes a una familia de fabricación en particular, lo que facilita la comunicación entre ellos y el envío de datos a dataloggers compatibles con ellos. En el caso de uso de información externa, por ejemplo, la proveniente de estaciones meteorológicas en sitio o de microinversores conectados directamente a los paneles, no hace referencia del proceso de integración. La tecnología de comunicación es cableada en su mayoría y un caso de uso de Wifi y otro de Ethernet se presentan. Finalmente, el centro de monitorización hace referencia a un pc y los aspectos sobre el software para la

adquisición de la información, los dispositivos de almacenamiento y visualización de esta no estuvieron disponibles, a excepción de los casos donde se utilizó Excel y el software Logger Net.

Una vez revisado el tema de monitoreo en los sistemas GRIPV, caso de estudio de esta investigación, se decidió explorar también la monitorización de sistemas que solo incluye PV, tanto aquellos que utilizan soluciones IoT (Adhya, Saha, Das, Jana, & Saha, 2016; Guamán, Vargas, Rios Villacorta, & Nogales, 2017; Pereira, Dupont, Carvalho, & Jicá, 2017; Suresh et al., 2018), como lo que no (Han, Choi, Park, Lee, & Kim, 2014; Prieto, Pernía, Nuño, Díaz, & Villegas, 2014; Shariff, Rahim, & Ping, 2015; Tina & Grasso, 2014; Touati, Al-Hitmi, Chowdhury, Hamad, & San Pedro Gonzales, 2016), con el propósito de ahonda en dicho tema.

La Tabla 4 muestra soluciones de monitoreo que no están asociadas al IoT, en ellas es posible observar que en la capa de adquisición y comunicación se utilizan sensores específicos, los cuales puede ser conectados fácilmente a un microcontrolador y este a través de una placa electrónica transmite la información, a software SCADA para su gestión y procesamiento y poder ser visualizada en la web. La tecnología de comunicación más frecuente es ZigBee y cableada, además de la introducción del protocolo Modbus. Finalmente, en relación con el almacenamiento, se hizo de uso de dispositivos específicos, como la ROM-EEPROM y apareció el servidor en línea.

Tabla 4.

Sistema de monitorización de PV

Ref.	(Tina & Grasso, 2014)	(Prieto et al., 2014)	(Shariff et al., 2015)	(Han et al., 2014)	(Touati et al., 2016)
Ubicación	Italia	España	Malasia	--	--
Año	2013	2013	2014	2014	2015

Ref.	(Tina & Grasso, 2014)	(Prieto et al., 2014)	(Shariff et al., 2015)	(Han et al., 2014)	(Touati et al., 2016)
Dispositivos	Adquisición y comunicación	*Sensores	*Transductor de	*Módem PLC	*Convertidor de
*Circuito integrado 4LEM LA100-P		*Sensor de corriente de Allegro (ACS711)	voltaje LV25-P de LEM	*Microinversor *Estación meteorológica	refuerzo de CC / CC
*Circuito integrado LM35		*Módulo de rango extendido	*Transductor de corriente LA25-NP		*LM35DT *ISP110 *HSM-20G *
*Sensor Honeywell HIH-4030		XBee-PRO-802.15.4	*Sensor de temperatura centígrado de precisión LM35		GP2Y1010AU0F
*Sensor de radiación solar SRS-100 de Davis		*Dispositivo MAX232 o FTDI FT245	*Piranómetro de Li-Cor		*Anemómetro de velocidad del viento *PT100
			*Microcontrolador PIC18F4553		
			*Tarjeta SKXBee Cytron		
Tecnología de comunicación		*Cable Xbee	*Cable *ZigBee	*Cable *Wifi *RS-485	*Cable *ZigBee
Datalogger		*Tarjeta de adquisición de datos ET-7017	Modulo X-Bee	Módulo Xbee-PRO-SERIE 1	Tarjeta MCU y tarjeta de extensión (REG) *Microcontrolador Atmega32 *Módulos inalámbricos XBee Pro de largo alcance
Centro de monitoreo	Almacenamiento y	PC	PC	PC	Dispositivos inteligentes
Software SCADA		--	--	GUI / software NetBeans	Servidor de gestión del sistema
					LabVIEW

Ref.	(Tina & Grasso, 2014)	(Prieto et al., 2014)	(Shariff et al., 2015)	(Han et al., 2014)	(Touati et al., 2016)
Almacenamiento	--	--	4LC1026 Electrically Erasable PROM	REG	Servidor en línea
Vía de acceso a la información	Web	--	web	web	web

Por otra parte, la Tabla 5 brinda información de los estudios encontrados en la literatura acerca de soluciones de monitoreo y control de sistemas FV apoyadas en IoT. Estas en cuanto a la capa de dispositivos para el sensado de variables y la capa de tecnologías de comunicación, no difieren mucho de los anteriores trabajos presentados; pero si aparece el desarrollo de software SCADA propios y la inclusión de bases de datos para el almacenamiento de los datos. Y en relación con el acceso a la información, esta puede ser consultada directamente en la web.

Tabla 5.

Sistema de monitorización de PV con IoT

Ref.	(Pereira et al., 2017)	(Adhya et al., 2016)	(Guamán et al., 2017)	(Suresh et al., 2018)
Ubicación	Brasil	--	Ambato-Ecuador	--
Año	2016	2016	2017	2018
Dispositivos	*Microcontrolador SanUSB	*Sensor de corriente	*Módulos Xbee	*Sensor de voltaje
Adquisición y	*Divisor resistivo por 4.6	*Sensor de voltaje	*Arduino Ethernet Shield	*Sensor de corriente
	* Sensor ACS712-5A	*Piranómetro	*Resistencias	
		*Sensor LM35	*Sensor ACS 712	
		*Convertidor serie		

Ref.	(Pereira et al., 2017)	(Adhya et al., 2016)	(Guamán et al., 2017)	(Suresh et al., 2018)
	*Sensor LM35 *Piranómetro LP02 *Sensor DHT11	to USB *Módulo SIM900 (GSM/GPRS)	*Sensor DHT 22 *Sensor SCT-013	
Tecnología de comunicación	*Comunicación serial *Interfaz USB *Wifi *Cable	*GSM / GPRS *RS-232	*Cable */ZigBee *Ethernet	Wifi
Datalogger	*Rpi	*Microcontrolador PIC18F46K22	*Arduino Mega	*Arduino
Centro de monitoreo	PC	PC	PC	PC
Software SCADA	Dispositivo de interfaz humana (HID)	Programa de registro de datos	Servicio web basado en la nube	Plataforma Thingspeak
Almacenamiento	MySQL / Servidor en la nube	Servidor PC	PostgreSQL.	--
Vía de acceso a la información	Web	Web	Web	Web

Almacenamiento y acceso de

En resumen, según los trabajos encontrados en la literatura que especifican detalles acerca de la monitorización de sistemas GRIPV y FV, se utilizan sensores y dispositivos que permiten un fácil proceso de adquisición y envío de datos, ya que por lo general todos estos pertenecen a un mismo fabricante o son compatibles entre sí a través de protocolos de comunicación en común. Por tanto, en casos como estos la centralización de información es más sencilla pues ésta es enviada por todos los equipos a una tarjeta de adquisición de datos que se encarga de comunicarse con el

centro de monitoreo y con el software SCADA, punto en el cual se logra su almacenamiento y visualización, generalmente en la web.

2.3 Arquitectura empresarial

Otro de los conceptos importantes introducidos en este trabajo es la arquitectura empresarial (AE), remontando su aparición a finales de los años 80, tiempos desde los cuales han surgido múltiples metodologías para su desarrollo, con un objetivo común, poner la tecnología al servicio del negocio (Daniel Ricardo Cerinza Mejia, 2015).

La ISO/IEEE define la AE como “La organización fundamental de un sistema, incluida en sus componentes, las relaciones entre ellos y los principios que gobiernan su diseño y evolución”; de modo que se convierte en una herramienta capaz de alinear el negocio con las tecnologías de información, pasando de ser un concepto teórico a uno aplicable en la organización (Castillo Santos & Castillo García, 2014).

La AE se compone principalmente de 3 partes (Mendieta Matute, 2014):

- *As-is Architecture*, como es la arquitectura, es decir una descripción del estado actual de la organización.
- *To-be Architecture*, para la arquitectura, una descripción de la meta o estado futuro deseado de la organización.
- *Transition Plan*, plan de transición, una descripción de la estrategia para la transición o el cambio del estado actual al estado futuro deseado.

Como se mencionó anteriormente existen diferentes marcos de referencia para el desarrollo de AEs, entre ellos los más utilizados TOGAF (por sus siglas en inglés The Open Group Architecture

Framework) (“The Open Group Library,” n.d.), Zachman (Zachman, 1987) y DoDAF (por sus siglas en inglés Department of Defense Architecture Framework) (Defense, 2011); y en apoyo a estas metodologías, lenguajes de modelamiento como ArchiMate y EPC (por sus siglas en inglés Event-driven process chain). A continuación, se presenta una breve descripción de cada uno de los frameworks mencionados.

2.3.1 Resumen de los marcos de referencia más utilizados Esta sección presenta un resumen de los principales marcos de referencia usados y conocidos en la industria para el desarrollo de AE. Muchos de estos han sido implementados en reconocidas compañías como Microsoft, Oracle, IBM, entre otras.

2.3.1.1 TOGAF. Este framework de arquitectura empresarial fue desarrollado por The Open Group, conocido como TOGAF (The Open Group Architecture Framework). Se enfoca en los cuatro dominios de la organización, delimitados en la arquitectura de negocio, arquitectura de datos, arquitectura de aplicación y arquitectura de tecnología (Mendieta Matute, 2014).

Está compuesto por su “Architecture Development Method” o ADM, el cual define el proceso de desarrollo de la arquitectura en las fases mostradas en la Figura 3, aplicándose forma iterativa durante todo el proceso (Josey et al., 2013).

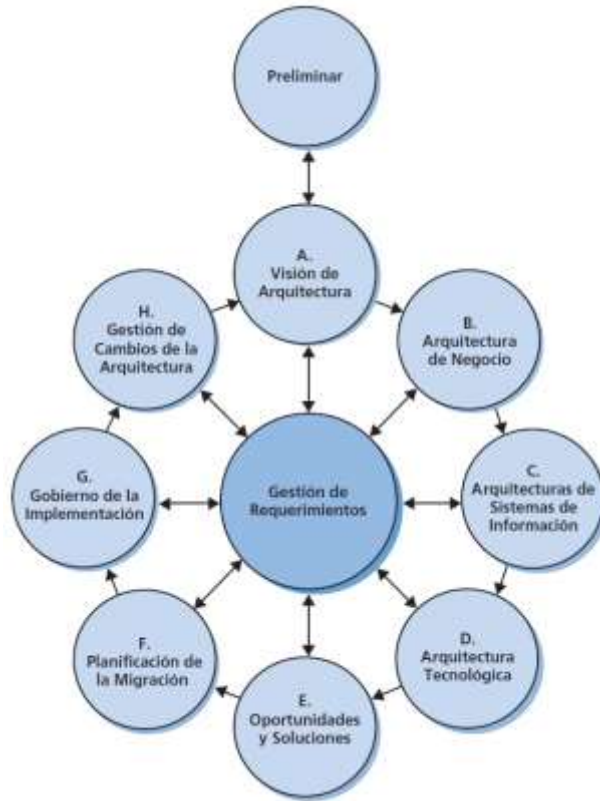


Figura 3. Ciclo del Método de Desarrollo de la Arquitectura

La fase A comprende el establecimiento del alcance, limitaciones y expectativas; visionando la arquitectura e identificando a los interesados. En las fases B, C y D se desarrolla la arquitectura en 4 dominios: negocio, aplicaciones, datos y tecnología. En las siguientes fases, E, F y G se realiza la planificación de la implementación, se desarrolla dicho plan y se supervisa. Finalmente la fase H proporciona un seguimiento continuo y un proceso de gestión de cambios (Josey et al., 2013).

2.3.1.2 Zachman. Este framework de AE fue creado por John A. Zachman en 1984, de donde adquiere su nombre. Se basa que una matriz 6x6, donde sus columnas hacen referencia a seis preguntas básicas claves (¿Qué?, ¿Cómo?, ¿Dónde?, ¿Quién?, ¿Cuándo?, ¿Por qué?) llamadas aspectos y sus filas a seis perspectivas (alcance, modelo conceptual del negocio, modelo lógico

del sistema, modelo físico tecnológico, componentes e instancias de operaciones), como es posible observar en la Figura 4. Su versión más reciente fue introducida en el año 2011 (Castillo Santos & Castillo García, 2014).

No existe una orientación clara para la implementación de este framework; pero su objetivo es enmarcar todos los aspectos de la empresa organizadamente, exponiendo de manera concreta las relaciones entre sus componentes para asegurar un sistema completo.

2.3.1.3 DoDAF. Este framework ha sido desarrollado por el Departamento de Defensa de Estados Unidos, proporcionando un método para la evaluación de inversiones, cambios e implementación de tecnología con un enfoque hacía misiones militares y civiles. Adecuado para grandes sistemas con integración e interoperabilidad, basa su proceso de desarrollo de arquitectura en 6 pasos de alto nivel, centrados en los datos y las relaciones entre ellos, en vez del producto (RUIZ SANCHEZ, 2014). La Figura 4 representa este marco de referencia.

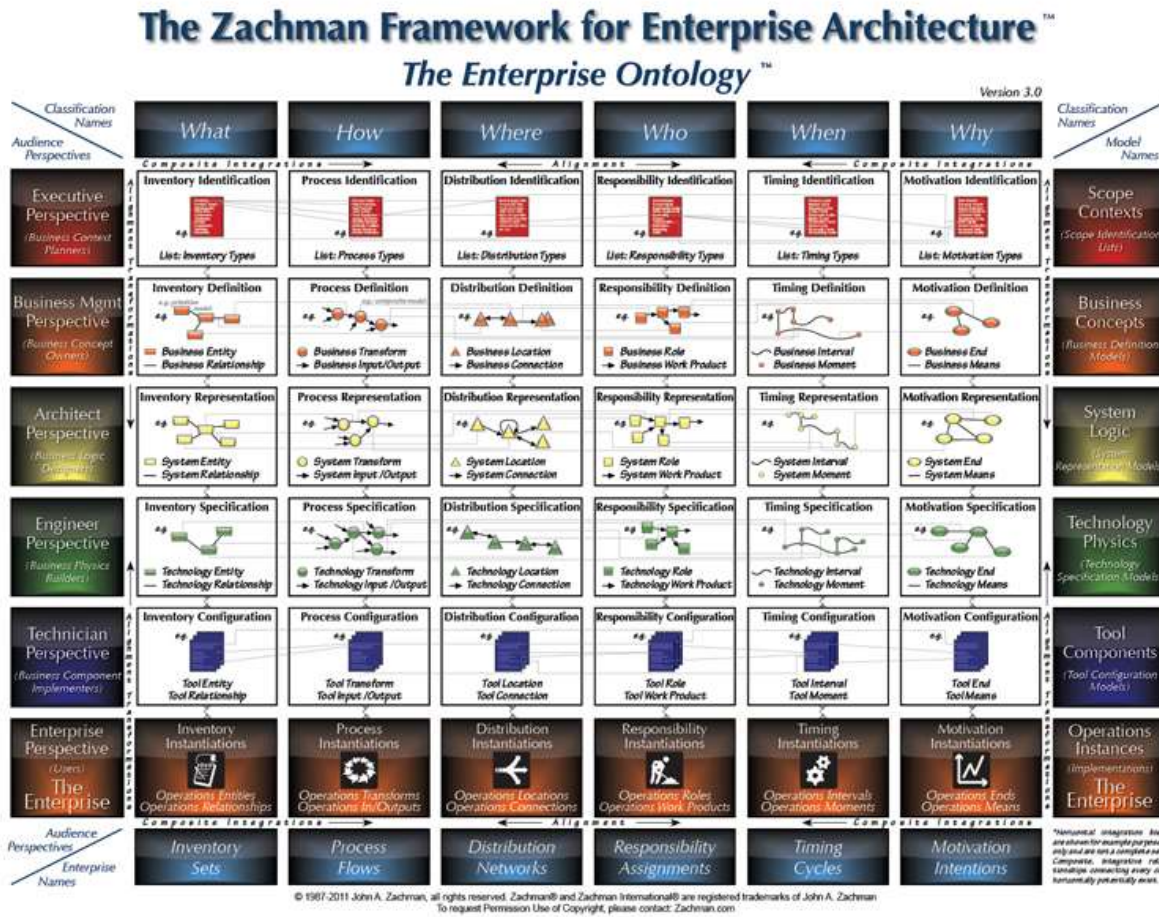


Figura 4. Marco de referencia Zachman para arquitectura empresarial (“The Zachman Framework Evolution by John P Zachman,” n.d.).

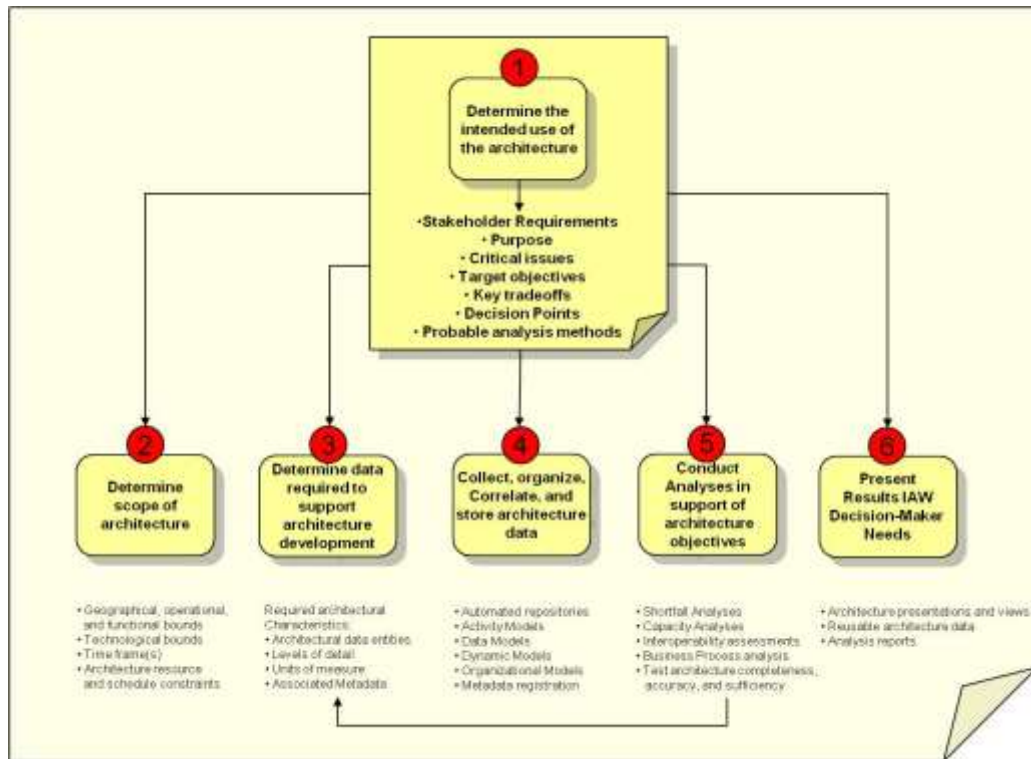


Figura 5. Proceso de 6 pasos de desarrollo de arquitectura (Officer DOD Deputy Chief Information, n.d.)

La Figura 5 muestra la metodología para el desarrollo de la arquitectura, la cual se diseñó contemplando cubrir el conjunto más amplio de escenarios y los pasos más usados por la comunidad arquitectónica:

1. Determinar el uso previsto de la arquitectura.
2. Determinar el alcance de la arquitectura.
3. Determinar los datos requeridos para apoyar el desarrollo de la arquitectura.
4. Recopilar, organizar, correlacionar y almacenar datos arquitectónicos.
5. Realizar los análisis de apoyo a los objetivos de la arquitectura.
6. Documentar los resultados de acuerdo con las necesidades de los que toman decisiones.

2.3.2 Conclusiones La AE es pieza clave dentro de una organización para el alineamiento del negocio con las tecnologías de información. La implementación de una AE disminuye el riesgo de desarrollar o adquirir productos y/o servicios que sean incompatibles y costosos de mantener, que tenga una funcionalidad duplicada y que no estén alineados con las estrategias de la planificación empresarial. Además de ello es posible dentro de la organización, mejorar los procesos, la satisfacción del cliente y la habilidad de intercambiar información entre las unidades de negocio (Esquetini Cáceres & Moscoso Zea, 2014).

De este modo la AE es una metodología que permite una mejora continua de la organización, alineando procesos, datos, aplicaciones e infraestructura tecnológica; metodología que puede ser aplicable para el desarrollo de proyectos de innovación tecnológica, pues precisamente permite una clara comunicación entre todos los interesados (personal de negocios y grupos de tecnologías de la información), facilita y apoya las decisiones de diseño y crea una abstracción transferible de la descripción del sistema para todos los involucrados (Sarasty España, 2015).

3. Caso de estudio: sistema GRIPV del edificio de ingeniería eléctrica

En el edificio E³T se encuentra instalado el sistema GRIPV caso de estudio de esta investigación, mostrado en la Figura 6. Este sistema de paneles fotovoltaicos integrados con techo verde hace parte de diversas investigaciones del grupo de investigación GISEL de las Universidad Industrial de Santander que se han estado desarrollando dentro del campus académico y en esta oportunidad es objeto de estudio desde la perspectiva del internet de las cosas. Por lo tanto, en esta sección se

detalla cada uno de sus componentes, desde los paneles fotovoltaicos hasta cada uno de los medidores y sensores encargados de su monitorización y funcionamiento en general.



Figura 6. Sistema GRIPV del Edificio E3T

3.1 Paneles fotovoltaicos y microinversores

En la actualidad el sistema fotovoltaico instalado cuenta con una capacidad de 9,63 kW, asociada a 37 paneles. Estos se encuentran distribuidos en dos sistemas uniformes de 18 paneles en la terraza superior del edificio y un panel solar instalado en el piso cinco, de este mismo, utilizado para investigaciones de seguimiento solar de dos grados de libertad. Cada uno de estos paneles tiene asociado un Microinversor M250 del fabricante Enphase Energy, cuya funcionalidad es entregar información de la inyección fotovoltaica al sistema eléctrico.

Los microinversores Enphase hacen uso de la plataforma Enlighten, proporcionado por sus fabricantes, para suministrar información de la potencia entregada por cada panel fotovoltaico, con una ventana de tiempo de 15 minutos, permitiendo la monitorización remota del sistema. Estos equipos se conectan a un dispositivo llamado Envoy mediante las líneas eléctricas de CA y este a

su vez con el router in situ, para transmitir los datos a la plataforma; lo cual es posible observar en la Figura 7.

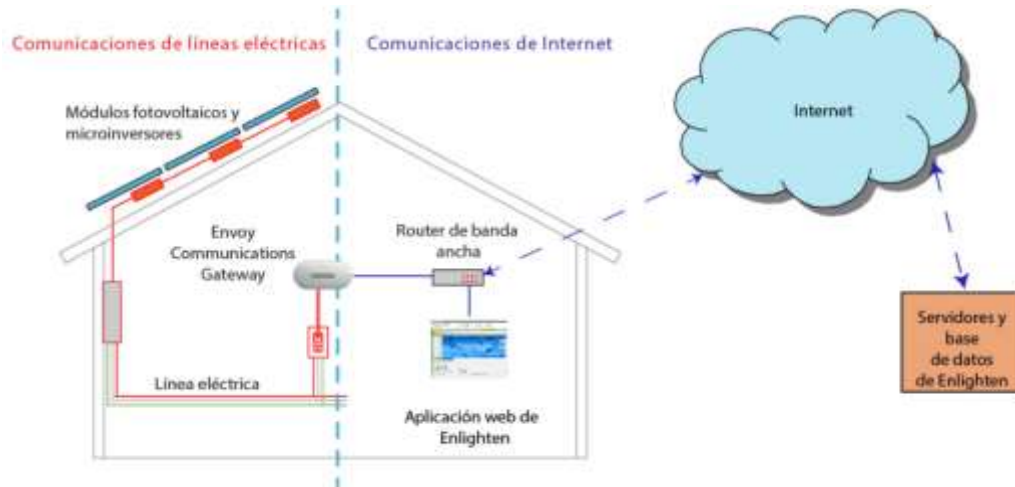


Figura 7. Comunicación de microinversores con la plataforma Enlighten (Enphase Energy Inc., 2014)

3.2 Medidores avanzados de energía eléctrica

El sistema GRIPV cuenta con medidores avanzados de energía, implementados por el grupo de investigación GISEL como herramientas que permiten cuantificar el estado actual del sistema eléctrico del edificio y los efectos de la inyección de energía fotovoltaica al sistema. A continuación, se describen cada uno de estos y sus principales características.

3.2.1 AcuRev2020 Medidor avanzado de energía del fabricante Accuenergy. Realiza mediciones en tiempo real, con una capacidad máxima de 18 circuitos monofásicos o 6 circuitos trifásicos en una unidad. Soporta el protocolo abierto de comunicación RS485 (Modbus RTU); interfaz Ethernet 10/100M con protocolo Modbus-TCP, HTTP, SMTP, SNMP, DLMS/COSEM;

y medidor de energía vía puerto infrarrojo. Monitorea variables como energía, potencia activa, reactiva y aparente, tensiones de fase y trifásicas, corrientes de fase, frecuencia, factor de potencia total y por fase, entre otras, las cuales almacena en una memoria de 8MB. Ver Figura 8.



Figura 8. AcuRev2020 (ACUREV 2000 Multi-Circuits Networked Multifunction Power Energy Meter, n.d.)

Este equipo cuenta con un software propietario que permite configurarlo, monitorear algunas de las variables en tiempo real y realizar la descarga de información. Los datos de las variables seleccionadas son guardados en la memoria del equipo la cual se encuentra dividida en 3 partes denominadas “Log”, cada una de ellas tiene una capacidad de memoria asignada por el usuario, por lo tanto, la cantidad de variables que es posible monitorear está sujeta a ello, es decir el equipo no puede almacenar el total de variables que ofrece sino una selección de ellas, de acuerdo con las necesidades del cliente. Los datos pueden ser descargados desde el software en formato CSV desde un computador, a través de un convertidor Modbus a USB.

Actualmente, el sistema GRIPV del edificio E³T cuenta con cuatro medidores de este tipo, dos se encuentra ubicados en su terraza superior, los cuales se encargan de medir las variables de los dos sistemas de paneles de esta zona; y los otros dos se encuentran en la zona de tableros generales de distribución del edificio y cada uno se encarga de sensar el comportamiento eléctrico del

edificio. Estos últimos a diferencia de los primeros, tienen puerto Ethernet, además del puerto RS485.

3.2.2 Acuvim IIR Medidor de potencia digital multifunción, también comercializado por Accuenergy, integra funciones de medición y visualización de energía trifásica, acumulación de energía, análisis de la calidad de la energía, alarmas, registro de datos y comunicación de red. Soporta el protocolo de comunicación Modbus RS485 (o puerto Ethernet opcional) y todos los parámetros de potencia y energía son visibles a través del software proporcionado por el fabricante. Cuenta con una memoria interna de 16 MB en la cual se almacenan los datos de las variables seleccionadas; pues cabe resaltar que no soporta el total de éstas sino una selección de acuerdo con la capacidad de la memoria. La descarga de datos, en formato CSV, desde el software a un computador se hace por medio de un convertidor de Modbus RS485 a USB. Ver Figura 9. Hoy en día, el sistema GRIPV cuenta con dos medidores de energía de este tipo, uno de ellos encargado de monitorizar variables eléctricas del edificio desde el sótano de este; y el otro ubicado en el cuarto técnico del 4 piso del edificio que monitoriza el sistema fotovoltaico.



Figura 9. Acuvim IIR (Acuvim II Series Power Meter, 2015)

3.3 Sistema de irrigación inteligente del sistema GRIPV

En adición a todos los componentes mencionados en los literales anteriores, el sistema GRIPV cuenta con un sistema de irrigación inteligente para las zonas verdes del techo del quinto piso y la terraza superior del edificio E³T. El control de este sistema se realiza en base al nivel de humedad del suelo de cada zona y además de ello se monitorea la temperatura del suelo de cada una de éstas, la temperatura ambiente y la temperatura interior de la(s) caja(s) donde se encuentra el sistema de automatización. Todo esto se realiza a través de sensores, para ser exactos, 8 sensores de humedad del suelo, 8 sensores de temperatura del suelo, 2 sensores de temperatura ambiente y 4 sensores de temperatura al interior de las cajas de control.

El sistema de control se basa en un módulo central (tarjeta de desarrollo Arduino) y cuatro módulos secundarios (tarjeta Arduino NANO). Estos últimos se encargan de recibir los datos directamente de los sensores y enviarlos al módulo central por medio del módulo XBee S2, es decir de forma inalámbrica a través del protocolo de comunicación ZigBee, para realizar las acciones de control necesarias, asociadas a cada técnica de irrigación.

4. Metodología para el diseño e implementación de una plataforma de servicios basada en IoT

La evolución que ha logrado el IoT en estos últimos años (“La evolución del Internet de las Cosas,” n.d.), ha permitido el desarrollo de múltiples servicios en diferentes campos como la salud, la

educación, la industria, el comercio, etc., sentando las bases para el desarrollo de nuevos ecosistemas inteligentes (Smart Environmental-SE) donde es posible la combinación de dispositivos, aplicaciones y servicios de formas nunca antes concebidas. Estos entornos inteligentes prometen muchos beneficios entre los cuales se pueden destacar un ofrecimiento de mejor seguridad y estilo de vida; así como también ayudar a reducir el consumo de energía global mediante la gestión inteligente del recurso energético, entre otros; convirtiéndose entonces en los llamados ambientes verdes inteligentes (Green Smart Environments-GSEs) (Narcis Cardona, 2016).

Este nuevo panorama ofrecido por el IoT trae consigo muchos desafíos entre los cuales se han decido abordar el modelamiento de la conectividad e interconectividad de los dispositivos a la red IoT y su interacción con los servicios que ofrecerán para conseguir aplicaciones que se adapten a necesidades particulares.

La solución que se plantea en este proyecto de investigación para la interconexión de objetos heterogéneos y ubicuos, dentro del contexto de un sistema de generación fotovoltaica integrado con vegetación, es la creación de una plataforma que soporte la comunicación unidireccional y/o bidireccional de los diferentes dispositivos, y a partir de ello ofrezca servicios que atienda las necesidades de los interesados.

Esta plataforma se plantea de manera modular para que sea posible su extensión a partir de la incorporación de diferentes módulos y permita una centralización de servicios de adquisición, almacenamiento, procesamiento y visualización de información, a través de una aplicación web que facilite todas estas tareas.

Por consiguiente, este capítulo presenta la metodología propuesta para el diseño e implementación del prototipo de plataforma de servicios basada en IoT, apoyada en el modelo del IoT y estructurada desde un enfoque de arquitectura empresarial (AE).

4.1 Descripción de la metodología

La monitorización de sistemas fotovoltaicos integrados con vegetación involucra diferentes tipos de variables eléctricas y climáticas, por lo cual es necesario la utilización de diferentes tecnologías de sensado, de medición, de control y de comunicación, cada una de las cuales ofrecen diversas alternativas. Para llevar a cabo el diseño e implementación de un sistema de monitoreo con un alto grado de complejidad como es este caso, proponemos sistematizar dichos procesos bajo una metodología que combina el enfoque de arquitectura empresarial y el modelo de referencia IoT. La Figura 10 muestra una visión general de la metodología propuesta, donde se identifican tres etapas principales:

1. Definición del contexto del problema
2. Diseño de la arquitectura
3. Implementación de la arquitectura

Cada una consta de tres pasos diferentes. Estas etapas se retroalimentan entre sí, con el fin de evaluar constantemente los resultados de cada proceso y contrastarlos con los requisitos planteados por los interesados, futuros usuarios, diseñadores y desarrolladores.

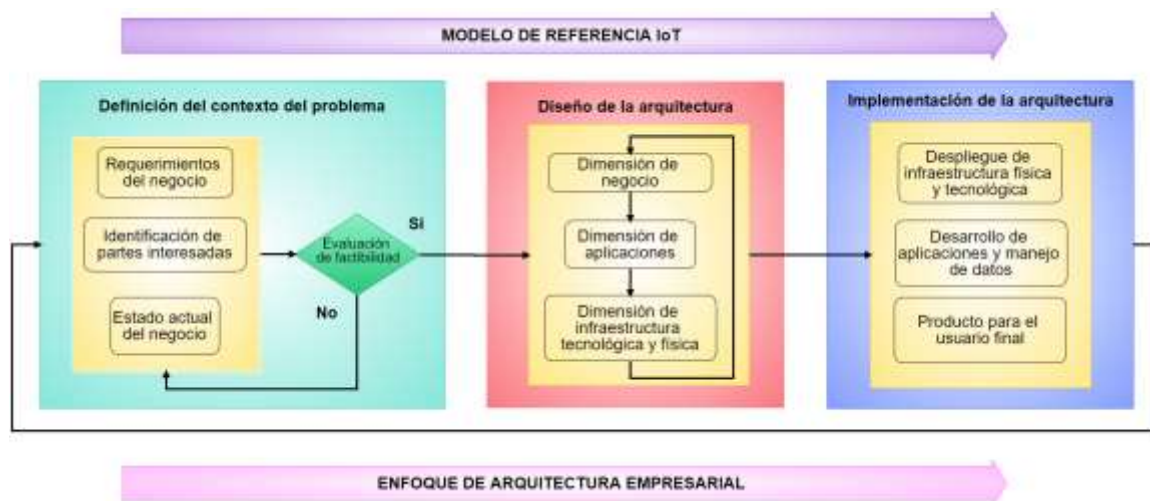


Figura 10. Visión general de las etapas de la metodología propuesta.

El planteamiento realizado para la construcción de la metodología propuesta se enmarca en el enfoque de arquitectura empresarial y cada una de sus fases se apoya en el framework TOGAF, uno de los más reconocidos y utilizados en el mundo y seleccionado en este trabajo gracias a que centra sus esfuerzos en las actividades, permitiendo un fácil entendimiento y vinculación mediante un lenguaje común que puede ser entendido por todas las personas vinculadas al negocio. Su método ADM permite el desarrollo genérico de arquitecturas, el cual puede ser modificado y adaptado para satisfacer las necesidades de todos los interesados.

A continuación, se analizan en detalle las tres etapas.

4.1.1 Definición del contexto del problema. Uno de los elementos más importantes para el desarrollo de servicios IoT es la identificación del escenario de trabajo, sus fortalezas y necesidades, en resumen, una visión global de lo que se denomina el negocio.

El negocio es definido como cualquier actividad, ocupación, sistema o método que tiene como objetivo principal la obtención de un beneficio económico (Rosas, 2019); pero en este trabajo no

solo importa lo monetario del proyecto si no que se ha extendido dicha definición para que abarque también el valor de la productividad académica y la investigación, con miras al desarrollo de servicios que sirvan a la sociedad en general y puedan ser en un futuro una fuente de ingresos para el mismo sector.

Aclarando dicho concepto, esta etapa de definición del contexto del problema es entonces la base fundamental de la cual se parte para el diseño de la plataforma de servicios IoT. Consta de cuatro pasos: estado actual del negocio, identificación de partes interesadas, requerimientos del negocio y evaluación de factibilidad, los cuales se detallan a continuación.

- ***Estado actual del negocio:*** Este paso inicia con la presentación del concepto a desarrollar y la definición general del problema, a partir de una descripción general del negocio, historia, antecedentes, estado actual y visión futura. Esta última debe centrarse en objetivos generales de modo que facilite la evaluación de la situación a los expertos y estos puedan dar un primer concepto de viabilidad.
- ***Identificación de partes interesadas:*** consiste en identificar cada uno de los contribuyentes del proyecto, es decir las partes interesadas, los futuros usuarios, los diseñadores y los desarrolladores, con el fin de comprometer su participación en la especificación de los requerimientos del negocio y con ello garantizar que no se escape ningún aspecto importante de cada uno de estos sectores.
- ***Requerimientos del negocio:*** Una vez se tenga un panorama claro del negocio de donde se encuentra y hacia dónde se quiere llegar, es momento de formalizar los requerimientos del negocio. Este paso se basa en discusiones con él o los ingenieros expertos, quienes se encargan de la comunicación con cada experto de dominio, según el área que se encuentre involucrada. Este es un proceso iterativo que refina los requerimientos, los cuales pueden

ser representados en diagramas de caso de uso UML sin especificar detalles de implementación.

- **Evaluación de factibilidad:** Finalmente el cuarto paso consta de una evaluación de factibilidad de los requisitos formulados para determinar si estos en primera instancia cubren las necesidades de las partes interesadas y de los usuarios finales; y por otra parte valorar la viabilidad de las soluciones propuestas, en caso de existir algún impedimento para llevar a cabo alguno de los requisitos, ya sea por la disponibilidad de recursos o limitaciones por factores externos, se haría necesario reformularlo para cumplir con lo estipulado.

4.1.2 Diseño de la arquitectura: El segundo paso se lleva a cabo con el objetivo de desarrollar una arquitectura conceptual que sea independiente de la tecnología a utilizar, para de este modo considerarla genérica y pueda ser adaptada fácilmente a otros casos de uso con necesidades similares.

Antes de entrar en detalle en cada una de las dimensiones de la arquitectura es importante traer a colación el modelo de capas para soluciones de IoT del CentroTIC, el cual puede ser visualizado en la Figura 11. Este modelo consta de 3 capas fundamentales, la capa IoT que contiene todos los terminales IoT encargados del sensado de variables, con la capacidad de conexión e internet, para el envío y recepción de datos; la capa de la nube con propiedades para el almacenamiento y procesamiento de datos; y la capa cliente, donde se desarrollan todas las aplicaciones tanto web como de datos, con las cuales el usuario final interactúa.

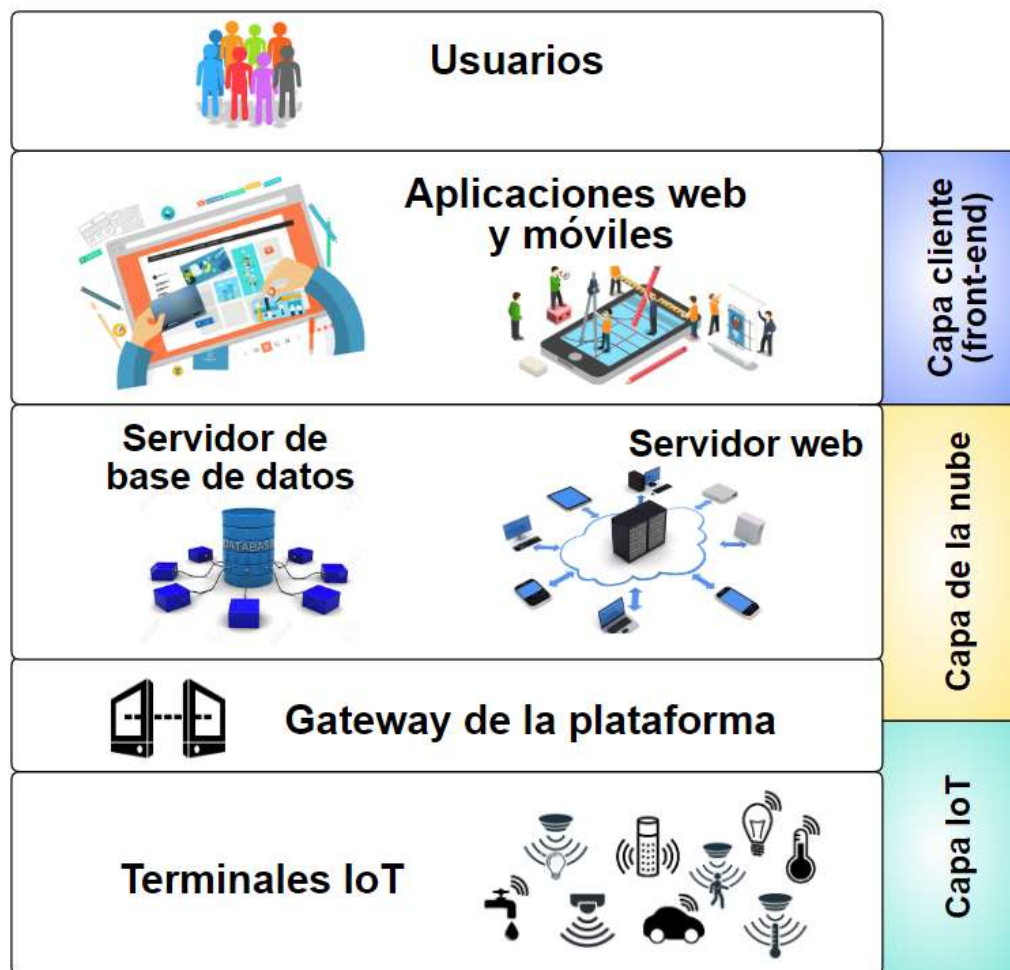


Figura 11. Modelo de capas para el desarrollo de servicios IoT.

Este modelo en capas presenta los componentes asociados a cada una de ellas, facilita la comprensión de un sistema dividiéndolo en partes más simples, para en cada una de ellas identificar y atacar los problemas. Este tipo de modelo es utilizado para desarrollo de servicios IoT; pero a pesar de presentar ciertos beneficios, existen unas desventajas relacionadas con un trabajo innecesario o redundante entre capas, la dificultad de diseñar con granularidad cada una de estas y pérdida de eficiencia. Además de ello, se encuentra que para gente no familiarizada, como

es el caso de las personas del mundo de los negocios, con este lenguaje le es difícil comprender y entender el sistema y cada uno de sus componentes y no se ubican dentro de este contexto.

A partir de este escenario, el diseño de la arquitectura se ataca desde un enfoque de AE, con el propósito de abordar el desarrollo de servicios IoT desde otro punto de vista que permita guiar la transformación de los sistemas en ambientes inteligentes, alineando los intereses de las partes interesadas con el nuevo paradigma del IoT, en una arquitectura que dé respuesta a dichas necesidades de agilidad y flexibilidad que el mundo digital hoy demanda.

La AE se desarrolla en torno a sus tres dimensiones, la dimensión de negocio, la dimensión de aplicaciones y la dimensión de infraestructura tecnológica y física. Cada una de estas dimensiones conforma las capas de la arquitectura (ver Figura 12) y están compuestas de bloques de construcción arquitectónicos reutilizables que proporciona la base sobre la cual se pueden construir arquitecturas más específicas.

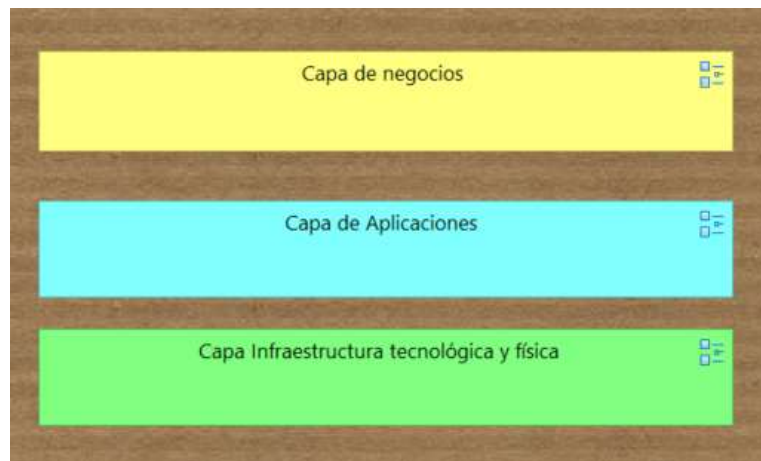


Figura 12. Capas del modelo arquitectural.

El diseño de la arquitectura se apoya en el lenguaje de modelado abierto e independiente ArchiMate para arquitecturas empresariales, uno de los más utilizados en este campo y definido

también por The Open Group. Este estándar permite la descripción, análisis y visualización de las relaciones entre las dimensiones del negocio de una manera inequívoca. El documento técnico (Josey, Lankhorst, Band, Jonkers, & Quartel, 2016) ofrece una descripción general de la especificación del lenguaje.

El objetivo principal de la utilización de este lenguaje de modelado es lograr una representación gráfica de la arquitectura que pueda ser interpretada de manera única y sirva como eje central para la toma de decisiones durante todo el proceso de diseño, ejecución y mejora continua del negocio, exponiendo las relaciones entre y dentro de las capas, de cada uno de sus componentes estructurales. Con ello es posible establecer una semántica clara entre todas las partes interesadas y dar el verdadero valor a la arquitectura propuesta para la toma de decisiones informadas.

A continuación, se detallan cada una de las dimensiones de la arquitectura.

- ***Dimensión de negocio:*** Esta dimensión es quizás la piedra angular de la arquitectura. Se fundamenta en la definición de requisitos realizada en la etapa anterior pues contiene la visión actual del negocio y la situación a la que se desea llegar. En ella se define el o los productos que el usuario final obtendrá con las características y aspectos relevantes que se alineen con el objetivo del negocio pero que a la vez sean independientes de los sistemas y tecnologías a usar, trabajando en un ámbito netamente conceptual.

En la capa de negocio encontramos el producto final que el usuario va a manipular, es decir que es la parte visual del software y la única con la que éste se relaciona. Esta capa es la encargada de que el sistema interactúe con el usuario y de igual forma el usuario con el sistema, de forma que la información pueda ser consultada en un mínimo proceso, en ambos sentidos.

Esta interfaz de acceso al servicio IoT debe ser entendible y fácil de usar para el usuario, de modo que esconda la complejidad del sistema y simplifique su gestión a través de un simple clic.

Esta capa se comunica con la de aplicación, para transmitir las solicitudes y entregar los resultados, ya sea de consulta, almacenamiento o eliminación de información. La lógica de esta capa puede incluir clientes basados en navegadores, por ejemplo, componentes de Java ejecutados en un ordenador o clientes móviles ejecutados en un dispositivo portátil.

La capa de negocio dentro del modelo del CentroTIC se puede relacionar con la capa cliente. A diferencia de esta, en el enfoque de AE solo trabaja en un escenario puramente conceptual, plateando los requisitos que debe cumplir la o las aplicaciones con las que el usuario final va a relacionarse; es decir que no se desarrolla ningún tipo de tecnología para la interfaz de usuario.

- **Dimensión de aplicaciones:** Esta dimensión se centra en los componentes que darán soporte a el producto que se entregará al usuario final en relación con la definición de los datos que requiere el negocio y las aplicaciones para su procesamiento; Esta capa ofrece la posibilidad de acceso a los servicios de la capa de infraestructura tecnológica y física, pues se basa en las funciones de esta para completar el proceso de comunicación, ya sea entre usuarios o dispositivos. Proporciona una interfaz entre las aplicaciones que usa el cliente final y la red subyacente en la cual la información es transmitida.

La capa de aplicaciones con relación al modelo del CentroTIC se vincula con la capa cliente y de la nube, en el sentido en que en ella se desarrollan las aplicaciones que el usuario va a utilizar y también se encuentra el servicio de almacenamiento y procesamiento de datos; pero esta capa solo contempla dichas tecnologías de manera virtual; pues su ubicación física está definida dentro de otra capa.

Esta capa consta de dos entidades principales a partir de las cuales se despliegan diferentes servicios, el servidor de base de datos y el servidor de aplicación. El primero de estos se usa para la ejecución de gestores de base de datos y se encarga de la administración completa de los datos,

es decir, su almacenamiento, consulta, modificación y eliminación. Además de ello también gestiona el acceso a dicha información a través de conexiones de red, desde ordenadores remotos autorizados. Este servidor permite la conexión con la capa de infraestructura tecnológica y física por medio de un driver de conexión a base de datos.

Por otra parte, el servidor de aplicación se define como un programa instalado en un ordenador que permite el procesamiento de datos de una aplicación de cliente, allí se alojan los servicios que va a ser ofrecido. Esta tecnología permite la centralización y disminuye la complejidad a la hora del desarrollo de aplicaciones, pues estas son acopladas desde bloques proporcionados por dicho servidor. Igualmente, este tipo de servidor permite que varias terminales de trabajo puedan acceder de forma simultánea a una aplicación especializada, instalada en el servidor, concentrando las actividades del resto ordenadores conectados.

Estos dos tipos de servidor trabajan conjuntamente para realizar un comportamiento de aplicación colectivo, a través de transacciones información y están soportados dentro de un sistema operativo montado sobre la máquina virtual

- ***Dimensión de infraestructura tecnológica y física:*** La capa de infraestructura tecnológica y física comprende todas las capacidades de software y hardware necesarias para dar soporte a la implementación de los servicios de aplicaciones y negocios. En esta capa se encuentran la base que respalda todo el sistema y posee recursos tanto físicos como virtuales que se encargan de gestionar el flujo, almacenamiento, procesamiento y análisis de datos. En esta etapa los diseñadores evalúan las tecnologías con las que cuenta el negocio y proponen soluciones para alinearlas con las funcionalidades y restricciones deseadas o en su defecto incluir unas nuevas que cumplan con dicho propósito.

Esta etapa engloba dentro de ella la capa IoT del modelo del CentroTIC; pero además de ello también toda la infraestructura física y tecnológica para soportar los servicios de las capas superiores, de modo que todos los dispositivos son ubicados en ella y no se distribuyen entre ellas.

Los componentes principales de esta dimensión están definidos como nodos de servidores, de equipos de desarrollo y de terminales IoT, todos ellos conectados a una red local y estos a su vez a internet. A partir de estas grandes entidades se despliegan el resto de los elementos, por tanto, se describirán cada uno de ellos enmarcados dentro de ellas.

✓ **Terminales IoT:** El terminal IoT es uno de los componentes base de la arquitectura, pues es el encargado de la recolección de datos (sensor) y/o ejecución de órdenes o acciones específicas (actuador) y del envío y recepción de información. Estos terminales IoT presenta unas características esenciales para poder ser considerados de tal forma, de modo que no todos los dispositivos de sensado inicialmente cumplen con dichas especificaciones y es necesario dotarlos con ciertas capacidades para denominarlos de esta manera.

De este modo es importante identificar cada uno de los equipos que conforman el sistema y realizar una clasificación para determinar cuáles son terminales IoT y cuáles no. La definición más sencilla describe un terminal IoT como todo objeto que tenga conectividad a internet; pero dentro de este trabajo se describe un modelo más complejo, producto de los esfuerzos de investigación realizados por el grupo RadioGIS, definiendo un terminal IoT como un sistema compuesto por cuatro capas: capa de sensores y actuadores, capa del sistema administrable, capa de aplicaciones locales y capa de interfaz de comunicación, como es mostrado en la Figura 13. Este modelo representa un terminal IoT dotado de una gran capacidad de inteligencia; pero no se excluye la definición inicial, que resalta la característica más importante, la conexión a internet.

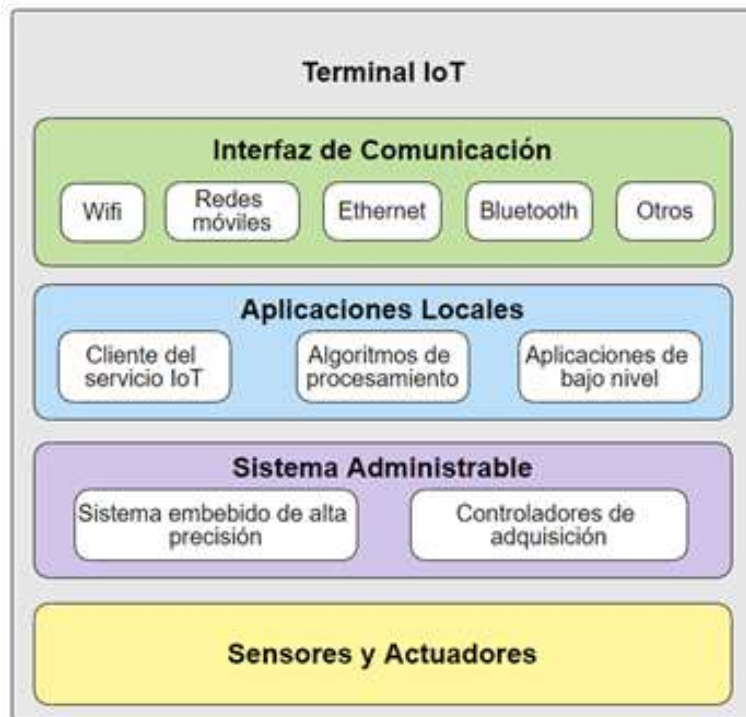


Figura 13. Modelo de terminal IoT.

En la capa más baja, como su nombre lo indica se pueden encontrar los sensores y/o actuadores, para realizar la medición de variables físicas y/o acciones de control. Los datos son enviados a la capa de interfaz de comunicación, a través del sistema administrable, la cual interactúa con la capa de aplicaciones locales, donde se pueden encontrar los algoritmos de preprocesamiento y comunicación que son consumidos por algún servicio web. Finalmente, el terminal se conecta a la red a partir de un protocolo de comunicación, encontrado en la capa de interfaz de medición, una de las más importantes, ya que ésta dota al dispositivo de conectividad a internet, requisito indispensable para las soluciones IoT; allí la información puede ser simplemente almacenada y/o procesada para, en tal caso, generar un flujo ascendente de datos hacia los actuadores de la capa base.

Los equipos del sistema que cumpla con el modelo de terminal IoT representado, son denominados de tal forma y están listos para integrarse en la plataforma; por el contrario, en los casos de dispositivos que no cuente con estas características, deberán ser dotados de ellas por medio de otros dispositivos o tecnología, por ejemplo, tarjetas de desarrollo como Intel Galileo, Arduino, Raspberry, entre otras; que sobre todas las cosas permitan la comunicación con la red (internet).

- ✓ **Servidores:** Los servidores son otra de las entidades principales de la capa de infraestructura tecnológica y física, pues se encarga de la transmisión de la información para el correcto funcionamiento del sistema. Este elemento puede hacer parte físicamente del sistema o presentarse como un servicio en la nube, proporcionado por otro proveedor. Un servidor físicamente hace referencia a un ordenador u otro tipo de equipo informático, cuya principal tarea es proporcionar información a determinados clientes, ya sean personas o dispositivos que se encuentren conectados a él. Esta información pueden ser archivos de texto, videos, imágenes, bases de datos, etc.

Como se mencionó anteriormente un servidor puede ser propio del sistema que lo utiliza, de modo que se encuentra dentro de sus instalaciones y sus encargados deben estar pendiente de su mantenimiento, gestión y supervisión; o por otra parte, ser los servidores en la nube (cloud servers), una nueva alternativa, donde la infraestructura en la nube es posible gracias a que existen servidores físicos que pueden ser controlados por medio de un software que virtualiza la plataforma. Este servicio es ofrecido por diferentes proveedores, los cuales brindan la posibilidad de tener un servidor a medida de las necesidades del sistema, de modo tal que dichas capacidades puedan ir ajustándose conforme a su crecimiento y actividad, esto se traduce en flexibilidad de recursos y reducción de costos para el cliente.

Además de ello, este tipo de servicio garantiza un óptimo funcionamiento, respalda cualquier volumen de información requerido por el sistema, brinda mayor disponibilidad de la información, provee una implementación sencilla, ofrece altos estándares de seguridad, actualizaciones automáticas y facilidad para el control del servicio. También es importante mencionar que hacer uso de cloud servers implica que no es necesario contar con un espacio físico para su ubicación y por ende el gasto de energía es menor, pues solo es necesaria la consumida por los equipos que ingresen a la información; y así mismo, en caso de fallos o reparaciones, el proveedor del servicio es el responsable de dichas tareas.

De esta manera, la arquitectura propuesta contempla las dos opciones de servidores, para que los interesados puedan elegir la que más se ajuste a sus necesidades.

Adicional a los servidores propios del sistema, la arquitectura permite el acceso a servidores externos, para la consulta de información, de dispositivos con plataformas externas. En este caso la información puede ser accedida por medio del protocolo HTTP y ser usada por el sistema, para cuya finalidad disponga.

✓ **Equipos de desarrollo:** Los equipos de desarrollo son una herramienta útil que permiten el desarrollo de la plataforma, así como su continuo mejoramiento. Su función principal es dar acceso al servidor ya sea por SSH (por sus siglas en inglés Secure Shell), un protocolo de administración remota para controlar y modificar los servidores a través de internet, o mediante FTP (por sus siglas en inglés File Transfer Protocol), el cual es un protocolo de red para la transferencia de archivos entre sistemas interconectados a Internet. Además de ellos es posible mediante estos equipos modificar algoritmos, dar soporte a la base de datos y en general realizar cambios en todo el sistema.

4.1.3 Implementación de la arquitectura: La última etapa de la metodología consiste en la implementación de la arquitectura diseñada, modelando y creando prototipos del sistema, que deben ser aprobados por todas las partes interesadas del negocio. Esto se convierte en un proceso iterativo que poco a poco va refinando la arquitectura y evaluando su rendimiento, hasta satisfacer todas las necesidades planteadas.

Este proceso se divide en tres pasos que pueden ser ejecutados de manera paralela, ya que una vez definida la arquitectura, los expertos en cada área pueden trabajar simultáneamente en el desarrollo de las soluciones de cada capa.

- ✓ **Despliegue de infraestructura física y tecnológica:** Los expertos en esta área dedican sus esfuerzos a alinear los componentes de esta capa con las directrices de la arquitectura e implementar nuevas soluciones que contribuyan con el cumplimiento de los objetivos. Estas personas son las encargadas de dar soporte a toda todos los dispositivos que realizan la recolección y envío de datos del negocio.
- ✓ **Desarrollo de aplicaciones y manejo de datos:** Los desarrolladores se encargan de poner en marcha el modelo de datos con la creación de las bases de datos y de igual forma de las aplicaciones que darán soporte al procesamiento de dicha información, estableciendo el puente entre el usuario final y la capa de infraestructura física y tecnológica.
- ✓ **Producto para el usuario final:** Finalmente el producto para el usuario final queda terminado y este puede hacer uso de ello, validando que cumpla con todos los requisitos establecidos. En caso de no satisfacer dichas necesidades o precisar alguna mejora, los diseñadores debe corregir dichos errores o complementar cualquier vacío, verificando cada una de las etapas desarrolladas, hasta que todas las partes interesadas estén de acuerdo con que el sistema esté listo.

5. Implementación y despliegue del modelo de la plataforma de servicios IoT

En los capítulos previos se presentó el problema existente a resolver con este trabajo de investigación y la posible solución para solventarlo. Por este motivo en esta sección se presenta el despliegue de la metodología propuesta sobre el sistema caso de uso.

El prototipo de plataforma que será implementado a través de la metodología propuesta se encarga de la centralización de todos los datos de los diferentes sensores y/o actuadores, permitiendo la interacción y comunicación entre ellos por medio de la creación de una red ubicua, resolviendo así el problema de la interconexión de objetos heterogéneos. Esta plataforma soporta el registro de objetos, el envío, recepción y procesamiento de datos y la gestión de la información de todo el sistema GRIPV.

En las secciones siguientes se detalla la puesta en práctica de la metodología propuesta cuyo resultado final es el prototipo de plataforma de servicios basada en IoT para la monitorización del sistema GRIPV del edificio E³T de la Universidad Industrial de Santander.

5.1 Definición del contexto del problema

La primera fase de la metodología es la definición del contexto del problema, por consiguiente, en esta sección se desarrolla cada uno de los pasos asociados a ella, los cuales se detallan a continuación.

5.1.1 Estado actual del negocio Describir el estado actual del negocio es fundamental para conocer sus fortalezas y necesidades. En este sentido, el sistema GRIPV instalado en la terraza del edificio de la escuela de ingenierías eléctrica, electrónica y de telecomunicaciones, es el negocio caso de estudio de este trabajo. Este sistema es objeto de diferentes proyectos de investigación liderados por el grupo de investigación GISEL, adscrito a la escuela de ingenierías eléctrica, electrónica y de telecomunicaciones, de la Universidad Industrial de Santander. Para tales fines es indispensable la monitorización de las variables eléctricas y climáticas del conjunto de paneles fotovoltaicos instalados, de la vegetación que conforma el techo verde de la construcción y del edificio en sí mismo, lo cual es llevado a cabo por medio de diversos equipos y dispositivos encargados de dichas tareas de monitoreo, los cuales hacen uso de diferentes tecnologías de comunicación y almacenamiento y descarga de datos.

La información proveniente de todos los equipos del sistema se maneja descentralizadamente lo cual implica que los datos deban ser integrados manualmente para posteriores análisis, una labor dispendiosa que requiere una supervisión humana constante y de largos periodos de tiempo.

Esta problemática es el punto del cual se parte para visionar una plataforma de servicios que supla esta necesidad inicial del sistema GRIPV, lo cual implica unos procesos internos de diseño, para lograr la conectividad de todos los equipos a internet y obtener acceso centralizado y remoto a la información de cada uno ellos, para su procesamiento y posterior visualización.

5.1.2 Identificación de partes interesadas Identificar las partes interesadas es el primer paso de esta fase, por tanto en el contexto del caso de uso de este trabajo, se tienen dos interesados principales, los integrantes del grupo de investigación GISEL y RadioGIS.

Los integrantes del grupo GISEL buscan inicialmente una solución que se adapte a las necesidades actuales del sistema GRIPV sobre el cual trabajan en relación con la gestión y procesamiento de la información que recolectan en su labor diaria de investigación; y más allá de eso, una solución IoT que en el futuro les ofrezca más servicios, como lo puede ser el control del sistema. Lo anterior es resumido en los siguientes requisitos:

- Envío automatizado de la información de cada uno de los dispositivos de medición del sistema.
- Almacenamiento centralizado de la información.
- Acceso remoto a la información en todo instante de tiempo.
- Procesamiento de los datos entregados.
- Visualización de la información.
- Seguridad de la información.
- Capacidad de escalabilidad.
- Capacidad de ofrecer otros servicios en el futuro.

En el caso del grupo RadioGIS se busca una solución IoT integradora, capaz de abarcar diferentes áreas tales como la educación, la salud, la industria, etc., con el objetivo de ofrecer múltiples servicios a través de la misma plataforma. A continuación, se listan los requisitos:

- Solución integradora.
- Plataforma IoT modular.
- Soporte de diversos dispositivos.
- Soporte de múltiples protocolos de comunicación.
- Plataforma abierta para el desarrollo de nuevos servicios.
- Capacidad de escalabilidad.

- Facilidad de migración a plataformas de mayores recursos tecnológicos.
- Seguridad e integridad de la información almacenada y de los servicios ofrecidos.

Este paso permitió entonces conocer los principales actores relacionados con el proyecto y con ellos conocer de manera informal los requisitos de las dos partes interesadas sobre los cuales se fundamenta la arquitectura de la plataforma para su fase de diseño.

5.1.3 Requerimientos y casos de uso Una vez exploradas cada una de las capas base de la arquitectura, se pasa a establecer formalmente los requerimientos funcionales y no funcionales que debe cumplir el prototipo de plataforma, de tal manera que permitan atender las necesidades detectadas y mediante estos gestionar de manera eficiente el monitoreo del sistema GRIPV.

5.1.3.1 Requisitos funcionales Los requisitos funcionales se presentan como la descripción de los servicios que debe proporcionar el prototipo de plataforma para la monitorización del sistema GRIPV, estos han sido descritos en la Tabla 6.

Tabla 6.

Requisitos funcionales que debe cumplir la arquitectura del prototipo de plataformas de servicios IoT

Código	Requerimiento	Descripción
REF01	Monitorizar el sistema GRIPV-E ³ T	La arquitectura debe permitir monitorear el sistema GRIPV, con el fin de obtener información de su estado en tiempo real y tener un registro de esta información.
REF02	Procesamiento de datos	La arquitectura debe permitir el procesamiento de los datos de monitorización, para

Código	Requerimiento	Descripción
		proporcionar información del estado del sistema.
REF03	Almacenamiento centralizado de la información	Además del requerimiento anterior, en el que se procesan los datos, la arquitectura debe permitir su almacenamiento centralizado para contar con un registro histórico de todas las variables del sistema.
REF04	Visualización de la información	La arquitectura debe permitir la visualización de la información en tiempo real e histórico de la monitorización del sistema GRIPV.

5.1.3.2 Requisitos no funcionales Los requerimientos no funcionales hacen referencia a las características generales y restricciones del prototipo de plataforma, por ello teniendo en cuenta los aspectos mencionados en secciones anteriores de este capítulo, se presentan los requisitos no funcionales a cumplir en la Tabla 7.

Tabla 7.

Requisitos no funcionales que debe cumplir la arquitectura del prototipo de plataformas de servicios IoT

Código	Requerimiento	Descripción
REF05	Disponibilidad	La arquitectura de la plataforma debe garantizar el acceso a la información integrada
REF06	Seguridad	La información que el sistema manipula está protegida contra posibles pérdidas o uso para propósitos no establecidos con anterioridad.
REF07	Escalabilidad	La arquitectura del sistema debe tener la capacidad de reaccionar y adaptarse para hacerse más grande e integrar nuevas soluciones

Código	Requerimiento	Descripción
		y servicios IoT, dentro de un contexto similar al desarrollado.

5.1.3.3 Casos de uso Los casos de uso permiten direccionar el desarrollo de la arquitectura desde las diferentes vistas presentes, así como también es posible observar la interacción de cada uno de los actores del sistema con las funcionalidades de este. La Figura 14 representa el diagrama de los casos de uso del sistema y posteriormente se presenta cada uno con sus respectivos actores, procesos y salidas en las tablas Tabla 8 a la Tabla 11.

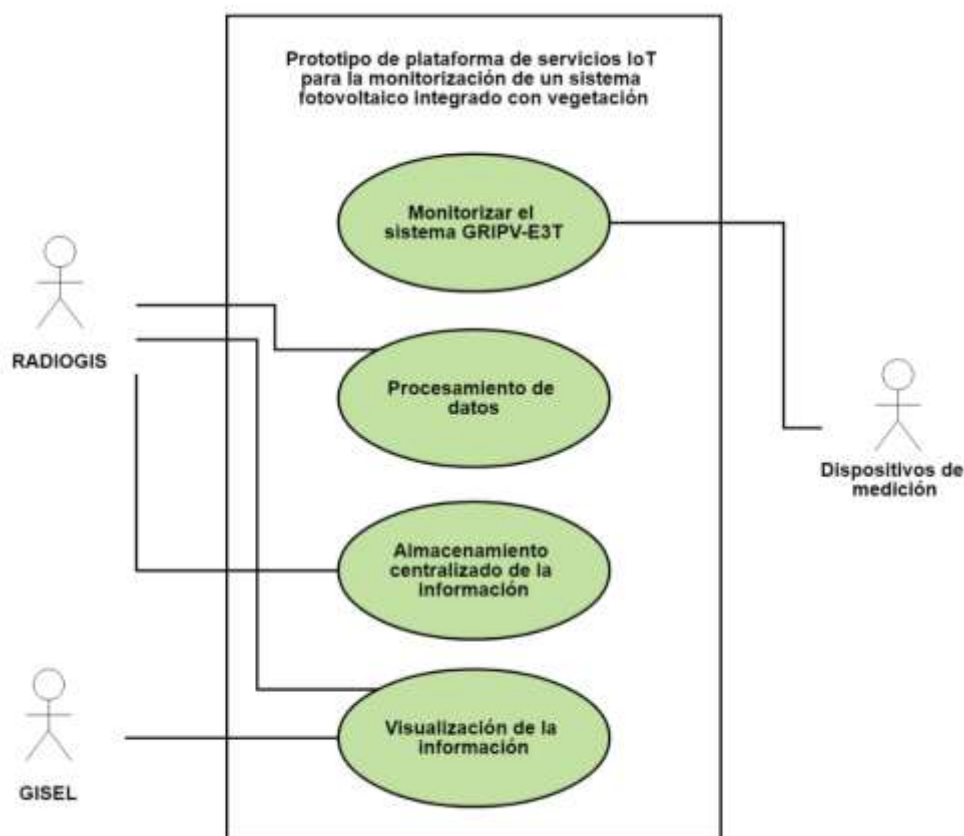


Figura 14. Diagrama de casos de uso

Tabla 8.

Caso de uso: monitorizar el sistema GRIPV-E3T

CASO DE USO	MONITORIZAR EL SISTEMA GRIPV-E ³ T
Actores	Dispositivos de medición del sistema GRIPV
Entradas	Señales eléctricas de cada uno de los dispositivos de medición.
Proceso	Permite sensor el estado del sistema GRIPV, por medio de cada uno de los equipos de medición instalados y sensores y de esta forma obtener cada uno de los datos en tiempo real.
Salida	Datos sin procesar de las variables del sistema GRIPV

Tabla 9. Caso de uso: Procesamiento de datos

CASO DE USO	PROCESAMIENTO DE DATOS
Actores	RADIOGIS
Entradas	Datos de cada uno de los dispositivos de medición.
Proceso	Permite el pre y/o procesamiento de los datos entregados por los dispositivos de medición, para convertirlos en información que presente el estado del sistema en tiempo real. Todo esto de acuerdo con la configuración realizada al sistema por el personal de RADIOGIS.
Salida	Información del estado del sistema GRIPV (Indicadores)

Tabla 10.

Caso de uso: Almacenamiento centralizado de la información

CASO DE USO	ALMACENAMIENTO CENTRALIZADO DE LA INFORMACIÓN
Actores	RADIOGIS
Entradas	Datos pre y procesados de los dispositivos de medición.
Proceso	Permite almacenar los datos sin tratamiento de cada una de las variables medidas, al igual que la información que ha sido procesada, lo que hace posible tener un registro histórico del

CASO DE USO	ALMACENAMIENTO CENTRALIZADO DE LA INFORMACIÓN
	comportamiento del sistema. Dicho almacenamiento se realiza de forma centralizada.
Salida	Registro de cada una de las variables e indicadores del sistema GRIPV.

Tabla 11.

Caso de uso: Visualización de la información

CASO DE USO	Visualización de la información
Actores	RADIOGIS-GISEL
Entradas	Registro de variables e indicadores del sistema GRIPV.
Proceso	En este caso, tanto el personal de RADIOGIS como el de GISEL, tiene acceso a la información del sistema a través de una página web. Dicha información está disponible para su descarga de acuerdo con las especificaciones de tiempo que el usuario configure.
Salida	Página web para visualización y descarga de información del sistema GRIPV.

5.1.4 Evaluación de factibilidad La funcionalidad y necesidades presentadas por todas las partes interesadas y futuros usuarios fueron inspeccionadas por el diseñador con el apoyo de expertos en cada una de las áreas pertinentes. Su análisis arrojó que el desarrollo del prototipo de plataforma de servicios basada en IoT para la monitorización de un sistema de generación fotovoltaica integrado con vegetación es técnicamente viable y realizable; reconociendo como un desafío la interconexión de los objetos heterogéneos del sistema, que va de la mano con los retos actuales del IoT.

5.2 Diseño de la arquitectura

El diseño de la arquitectura como se mencionó en el capítulo anterior se contempla bajo tres dimensiones, el negocio, las aplicaciones y la infraestructura tecnológica y física. Por ello, bajo las pautas establecidas en la metodología propuesta, se realiza el diseño de la arquitectura con ayuda de la herramienta de diseño y modelado visual gratuita y de código abierto Archi.

Cada una de las dimensiones es detallada a continuación.

5.2.1 Dimensión de negocio Tomando como base los requerimientos planteados en la fase anterior, la capa de negocio es modelada con se presenta en la Figura 15, representando el producto final que es entregado al cliente, una página web para el acceso y administración de todo el sistema y su información. En esta capa se diferencian dos componentes, el usuario servicio IoT y la interfaz de acceso al servicio IoT. La primera entidad simboliza, como su nombre lo indica, al interesado que va a hacer uso del producto final, en este caso ese papel es adquirido hasta el momento por los miembros del grupo de investigación GISEL. Estos, a través del segundo elemento de la capa que se comporta como un punto de acceso, podrán acceder a los servicios de aplicaciones que están disponibles.

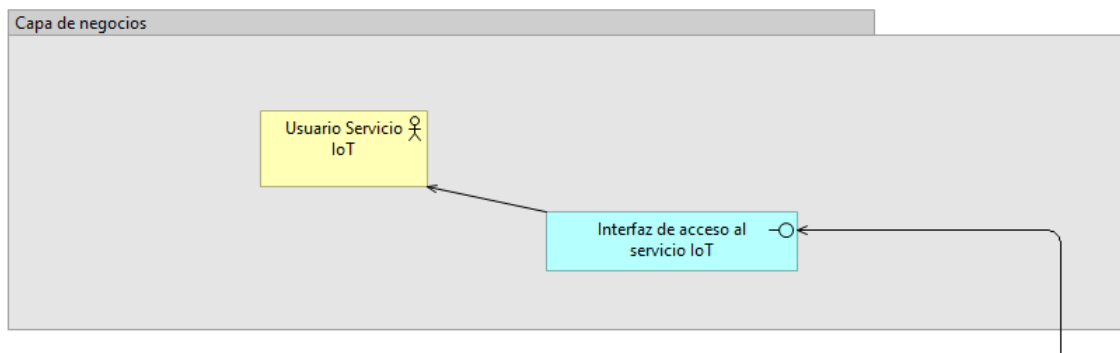


Figura 15. Capa de negocios del modelo arquitectural.

La interfaz de acceso contempla todos los requisitos funcionales plateados en la capa anterior, por tanto esas son las directrices que rigen dicho elemento, para que los expertos en el tema puedan desarrollar el servicio solicitado por el usuario final.

5.2.2 Dimensión de aplicaciones Esta dimensión se encarga de dar soporte a las aplicaciones con las que el usuario final interactúa, estableciendo un puente entre estas y la capa subyacente de la que se transmite la información. El modelo de dicha capa se muestra en la Figura 16 y consta de los dos elementos principales, mencionados en la fase anterior, el servidor de base de datos y el servidor de aplicaciones. Estos son llamados componentes de aplicación, dentro del lenguaje de modelado ArchiMate y comprenden las funcionalidades de la aplicación, su comportamiento y datos, exponiendo los servicios y haciéndolos accesibles a través de interfaces.

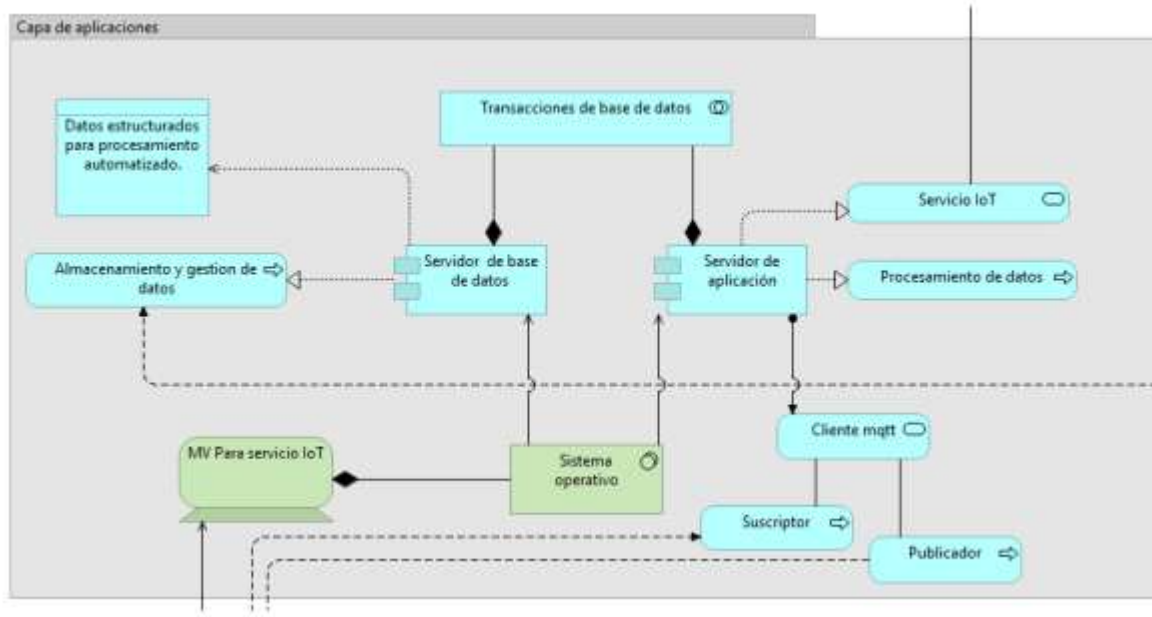


Figura 16. Capa de aplicaciones del modelo arquitectural.

Estos dos componentes principales comparten un elemento de colaboración de aplicaciones, el cual representa precisamente el trabajo conjunto que llevan a cabo para soportar los servicios que son entregados al usuario final. Por una parte el servidor de base de datos juega un papel crítico en el proceso de aplicación de almacenamiento y gestión de los datos y en el objeto de datos estructurados. Y por otro lado, el servidor de aplicación utiliza dicha información para realizar el procesamiento de datos y finalmente ofrecer el servicio de aplicación.

Otro elemento común a estos dos tipos de servidor es el sistema operativo, un software que proporciona un entorno para el almacenamiento, ejecución y manejo de software o datos desplegados en él. Este sistema operativo está almacenado e implementado sobre un recurso físico denominado Máquina virtual para servicio IoT.

Finalmente, el servidor de aplicaciones asocia un componente más de tipo servicio de aplicación, el cliente MQTT. Este cliente es añadido para habilitar las funcionalidades de este protocolo de comunicación para dispositivos limitados a un ancho de banda bajo o a una red poco

confiable, (“MQTT,” n.d.) ofrece una descripción de este protocolo de conectividad máquina a máquina. Además, debido a la naturaleza de MQTT, tiene una relación de asociación a los dos últimos elementos de la capa de aplicación, el suscriptor y publicador, ya que se basa en el modelo de mensajería de publicación-suscripción.

5.2.3 Dimensión de infraestructura tecnológica y física La capa de infraestructura tecnológica y física está compuesta de tres bloques principales, el nodo de terminales IoT, el de servidores y el de equipos de desarrollo. Dicha infraestructura modelada bajo el lenguaje ArchiMate es mostrada en la Figura 17, además de la conexión de plataformas externas a través de la red.

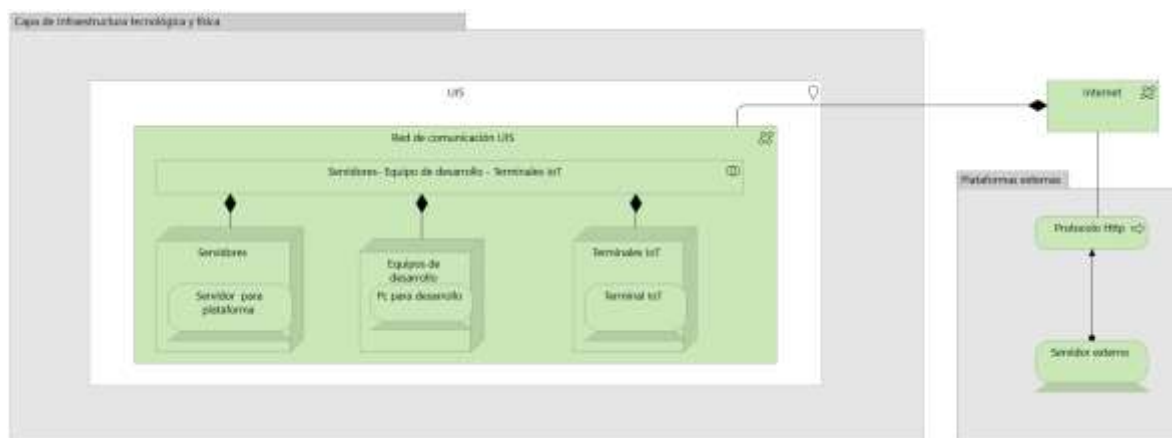


Figura 17. Capa de infraestructura física y tecnológica del modelo arquitectural.

Los nodos son recursos tanto computacionales como físicos, en los cuales se alojan, manipulan y/o interactúan otros recursos de este mismo tipo. En el caso del nodo de terminales IoT, es posible hacer un acercamiento para detallar sus componentes, representados en la Figura 18 y descritos a continuación: (1) Sensores y actuadores que conforman la base del terminal IoT. (2) Interfaz de

comunicación que permite el envío y recepción de datos entre los sensores y actuadores y el sistema operativo. (3) Sistema operativo embebido responsable de procesos como: (4) transferencia de información en la web mediante el protocolo HTTP; (5) procesamiento y (6) sensado de datos, los cuales (7) trabajan juntos para entregar un (12) mensaje; (8) servicio de cliente MQTT para envío y recepción de información a través de (9) suscriptores y (10) publicadores; y finalmente un (11) conector a base de datos para el almacenamiento de la información. Además de ellos se cuenta con la (13) dependencia para el terminal IoT que establece su ubicación física dentro del sistema.

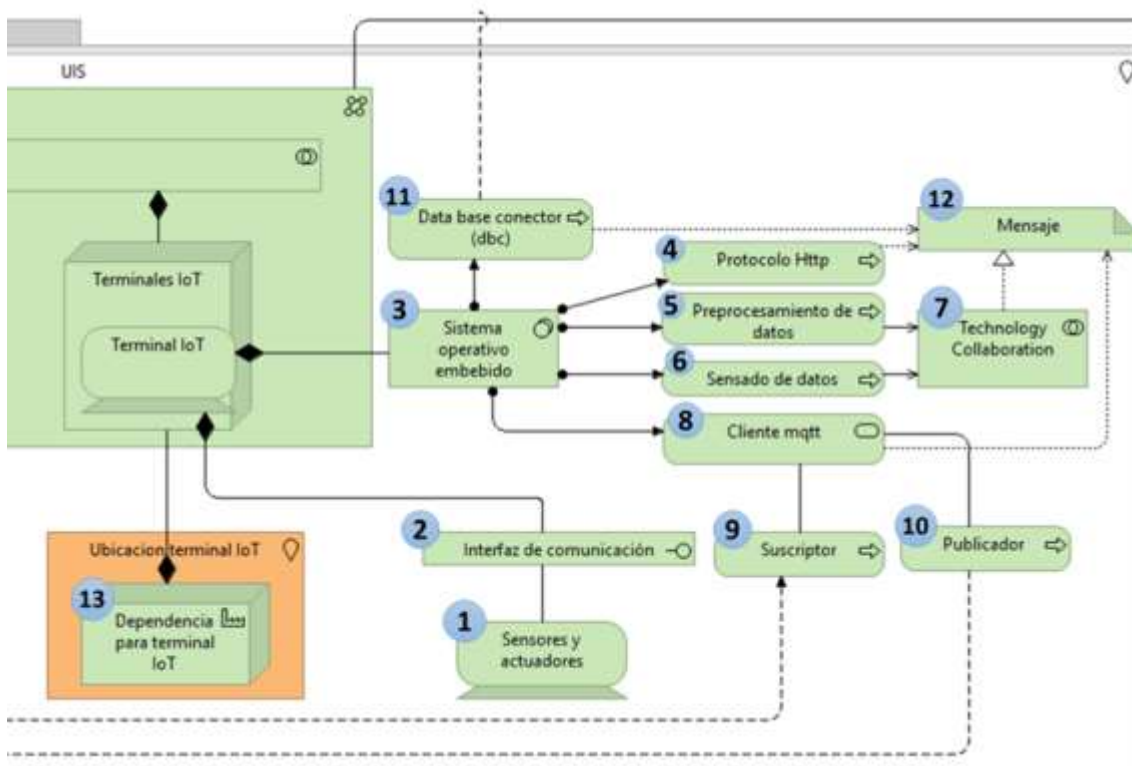


Figura 18. Nodo de terminales IoT y sus componentes.

Es importante resaltar que la arquitectura soporta en el momento los protocolos para el envío de información, HTTP, MQTT que se soporta sobre el anterior y la última opción hace referencia

al conector de base de datos, mecanismo que hace posible que un lenguaje de programación se conecte y trabaje contra una base de datos. La selección del protocolo queda a disposición del que mejor se adapte a las necesidades de solución a desarrollar.

Los componentes del nodo de servidores se muestran en la Figura 19 y la configuración mostrada hace referencia a un servidor físico, montado dentro de las instalaciones del sistema. Se cuenta con un (1) KVM (Cloud) software que ofrece el servicio de virtualización de sistemas operativos, lo que permite dividir el servidor en diferentes máquinas virtuales y así poder soportar diferentes tecnologías al tiempo, las cuales muchas veces nos son compatibles entre sí. En este caso proporciona sus funcionalidades al servicio de comunicación mediante MQTT y al servidor de aplicación y de bases de datos en la capa de aplicaciones. (2) máquina virtual (MV) para el bróker que atiende el servicio de MQTT para la (3) conmutación de mensajes entre suscriptores y publicadores. Y finalmente (4) la ubicación física del servidor.

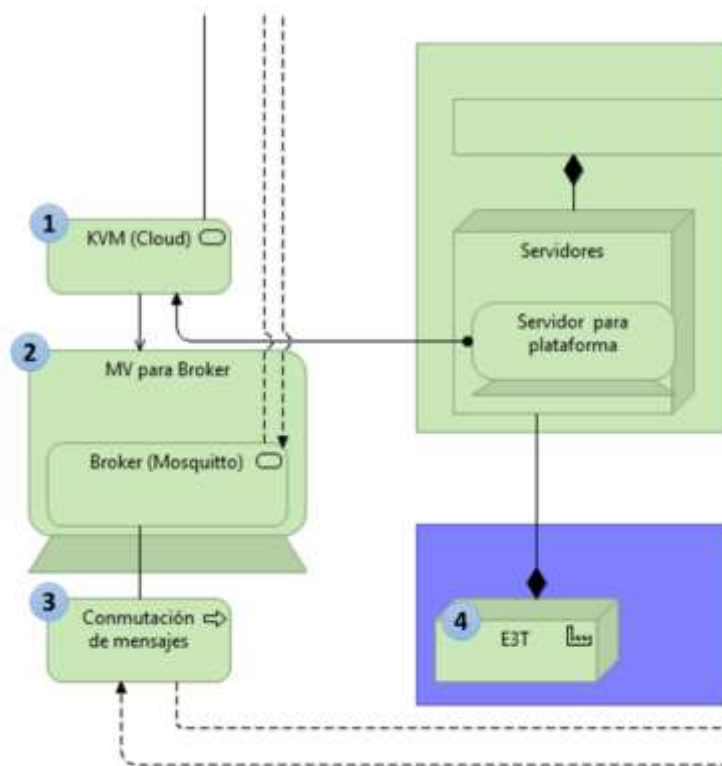


Figura 19. Nodo de servidores y componentes relacionados.

El nodo de equipos de desarrollo modelado es mostrado en la Figura 20, asociado con una función de tecnología, capaz de permitir el acceso al servidor a través de los protocolos de comunicación SSH y FTP. Además de ello también cuenta con su dependencia física.

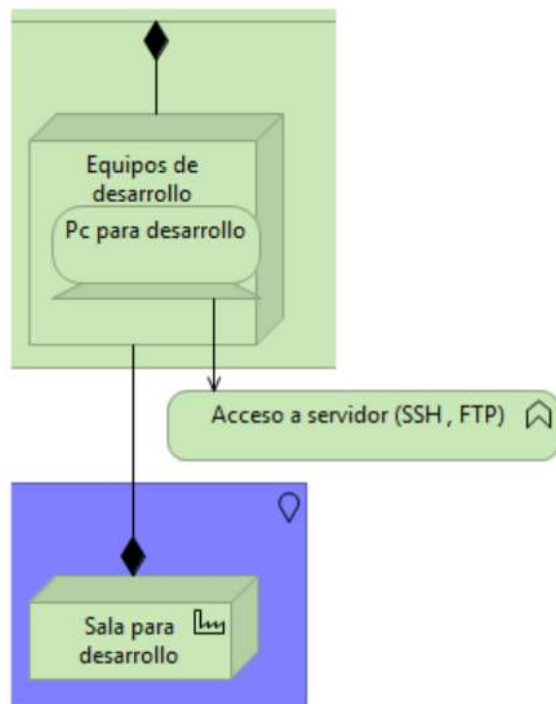


Figura 20. Nodo de equipos de desarrollo

Finalmente, todos estos nodos conectados dentro de la red de comunicación UIS se conectan a la red de comunicación más grande, el internet, a través del cual es posible acceder a los servidores de plataformas externas para compartir información, por medio del protocolo de comunicación Http, como es mostrado en la Figura 21.

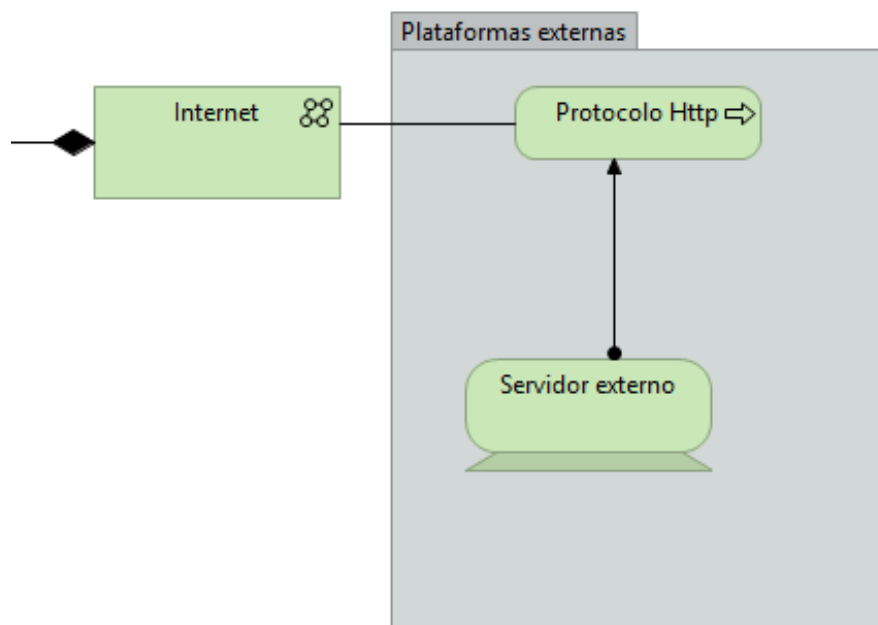


Figura 21. Internet y servidores de plataformas externas

5.2.4 Modelo arquitectural del prototipo de plataforma de servicios basada en IoT El modelado de cada una de las dimensiones de la arquitectura da con resultado final el modelo arquitectura del prototipo de la plataforma, representado en la Figura 22. La vista general de todas las capas permite apreciar todos y cada uno de los componentes de la arquitectura y como estos se relacionan dentro y fuera de cada una de estas.

El diseño de esta arquitectura bajo el enfoque de AE, resuelve la problemática asociada a la interconexión de objetos heterogéneos dentro del contexto de un sistema de generación fotovoltaica integrado con vegetación. Todos los equipos y sensores del sistema han sido integrados en la plataforma bajo el concepto de terminales IoT.

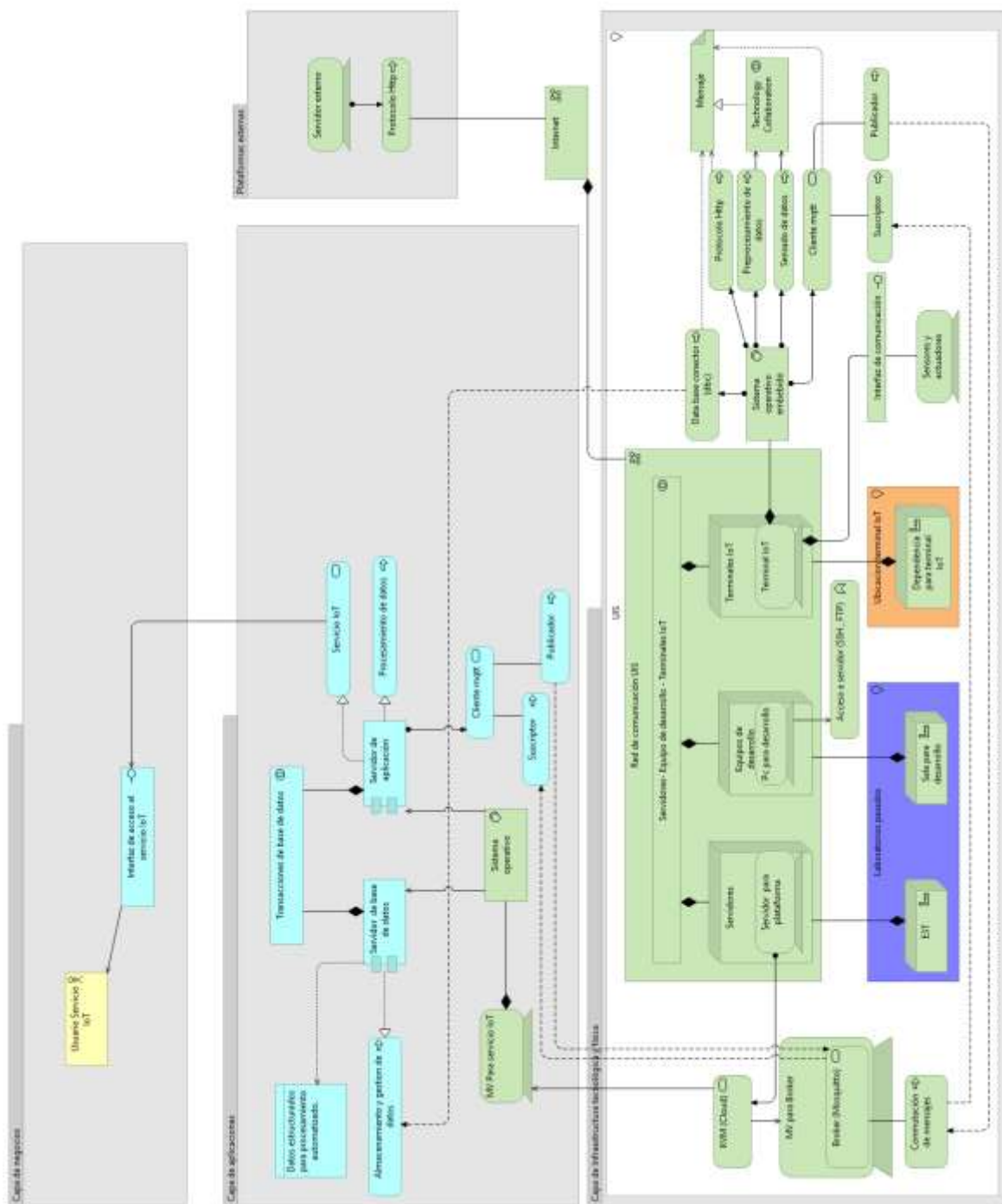


Figura 22. Modelo arquitectural del prototipo de plataforma de servicios basada en IoT

Los datos provenientes de cada una de las fuentes de información del sistema han sido almacenados centralizadamente en la base de datos, de forma tal que están disponibles para su

procesamiento y consulta en todo instante de tiempo y de manera remota, a través de la interfaz de usuario modelada.

La arquitectura propuesta sienta las bases para el despliegue de servicios más allá de la monitorización de este tipo de sistemas; con la cantidad y selección de datos extraídos del sistema GRIPV es posible desarrollar servicios que involucren la inteligencia artificial o machine learning, con el objetivo, por ejemplo, de mejorar la eficiencia energética de los paneles fotovoltaicos en conjunto con la vegetación y el sistema de riego inteligente asociado; y también la del edificio en general, convirtiéndose en una plataforma foco de proyectos en torno a estas líneas de investigación.

Este modelo arquitectural permite entonces alinear los conceptos del IoT con los negocios, de forma tal que las soluciones desarrolladas a partir de él sean pensadas desde un principio desde el negocio, centrándose en los actores y procesos a los cuales se les debe dar soporte y no en la herramienta que realizará tal tarea; ya que muchas veces esto lleva al fracaso de estas implementaciones que no tiene un norte definido y cualquier camino les parece correcto.

Además de ello, la metodología seguida para el diseño del modelo permite acercar dichas soluciones a la realidad de las necesidades de las personas y del mundo entero; para que estas no queden olvidadas, sino que por el contrario sean herramientas al servicio de la sociedad y en pro de un estilo de vida más amigable con el planeta.

Es importante recalcar que la transformación de los diferentes sectores de la sociedad entorno a las TIC, no reside únicamente en las tecnologías disponibles, sino también en la gestión que hacemos sobre ellas, punto clave para el éxito o fracaso de este tipo de proyectos; por tanto dicho cambio debe ser estratégicamente planificado, de modo tal que las decisiones tomadas no sean aisladas de un propósito global que establezca las directrices a seguir. En este escenario cobra

valor el enfoque de AE que aporta una visión y comprensión del todo el sistema, sus interesados, componentes y procesos, que permiten una estructuración, organización y planificación fija del camino a seguir para dicha transformación.

En el caso del sistema GRIPV descrito, el modelo definido bajo este enfoque permite tener una especie de mapa de navegación que incluye los componentes del sistema y la relación entre ellos dentro y fuera de cada una de las capas. Esta visión posibilita reconocer posibles oportunidades de integración y reutilización de recursos y aplicaciones, así como también su optimización. Por tanto, cada uno de los interesados en este escenario debe ser consciente de los beneficios adquiridos para dar el verdadero valor al modelo desarrollado, de modo tal que cualquier futura decisión que vaya a ser tomada en cualquiera de sus capas, se rija por dichas directrices y así poder garantizar una mayor probabilidad de éxito en lo propuesto.

5.3 Implementación de la arquitectura

En la sección anterior se obtuvo el modelo arquitectural del prototipo de plataforma de servicios, por tanto el siguiente paso de la metodología es el despliegue e implementación de este. Los pasos que incluyen esta fase se pueden realizar en paralelo por tanto presentamos en detalle el proceso de ejecución iniciando con la capa de infraestructura tecnológica y física hasta llegar al producto del usuario final.

5.3.1 Capa de infraestructura tecnológica y física. La implementación de esta capa abarca toda la infraestructura tanto tecnológica como física que se encarga de la captación y recolección de datos que van a ser utilizados con insumos de las capas superiores.

Se inicia con el desarrollo y estructuración de toda la parte de infraestructura física y tecnología que va a soportar los procesos es la capa de aplicación. Para ello primeramente se deben identificar cada uno de los equipos, sensores y/o actuadores del sistema, todos los objetos que van a ser conectados y a partir de los cuales se obtendrán los datos, con el objetivo de identificar aquellos que son terminales IoT y aquellos que no. En este caso se tiene un grupo de dispositivos formados por equipos de medición de energía (Acuvim y Acurev) y por sensores (humedad y temperatura) que no clasifican como terminales IoT; y otro grupo que si pueden ser denominados de esta manera conformado por los microinversores de los paneles fotovoltaicos.

Una vez realizada la diferenciación de los equipos del sistema, se procede a dotar a los equipos del primer grupo con las capacidades de un terminal IoT, priorizando ante todo la conectividad a internet. Y para el caso del segundo grupo se realiza una inspección del proceso de transferencia de información que ofrecen los equipos.

5.3.1.1 Medidores de energía Acuvim y Acurev Estos dos medidores de energía pertenecen a la misma familia fabricante, Accuenergy; pero cada uno maneja un software de gestión diferente, mediante el cual una persona de forma manual puede configurar el equipo, descargar información en archivos con extensión .csv y visualizar algunas de sus variables en tiempo real. Estos dos softwares son propiedad del proveedor de dichos equipos y no están abiertos a modificaciones, motivo por el cual no es posible agregar nuevas funcionalidades o servicios.

En este punto se hizo necesaria la intervención de los equipos para alcanzar dos objetivos, el primero lograr su conectividad a internet y el segundo que los datos registrados por cada uno de ellos pudieran ser descargados y almacenados de manera automática en una base de datos, ya que los respectivos softwares no permitían dicha opción. Por tanto, siguiendo la metodología de la

arquitectura, a través de una tecnología intermediaria se debe añadir a los dispositivos de una interfaz de comunicación que permita la transferencia de datos con un sistema operativo embebido y la conectividad a internet.

Para ello se recurrió, por una parte, a una de las características que tiene en común estos dos dispositivos, el soporte de comunicación a través del protocolo de comunicación Modbus RTU, por medio del cual es posible acceder al equipo y administrarlo, tanto para tareas de configuración como de descarga de datos. Y por otro lado al uso de una tarjeta de desarrollo, la Raspberry Pi 3 B+, seleccionada según criterio costo beneficio, como es posible observar en la Tabla 12.

Tabla 12.

Tarjetas de desarrollo con sus principales características.

Características	Raspberry Pi 3 B+	Arduino Mega	Intel Galileo Gen 2
Procesador	Broadcom BCM2837B0, Cortex-A53 (ARMv8) 64-bit SoC	ATmega2560	Intel® Quark™ SoC X1000
RAM	1GB	8KB	8MB
Wifi	Si	--	Si
Puerto Ethernet	1	--	1
Puerto USB	4	--	1
Alimentación	5V, 2A	7V – 12V	7V – 15V
Precio Promedio	\$165.000= COP	\$154.700= COP	\$260.000= COP

A partir de la adición de esta tarjeta de desarrollo es posible desarrollar un código encargado en primera instancia de establecer comunicación con los equipos, en este caso por medio del protocolo Modbus RTU. Para ello se tomó como base una librería de código abierto especializada

en dicho protocolo (“EasymodbusTCP Modbus Library for .NET/Java and Python – Communication library and professional tools for industrial communication,” n.d.), programada en Java y se realizaron las respectivas modificaciones para adecuar dicha solución a las necesidades de los medidores de energía.

Las primeras pruebas se realizaron en los equipos de desarrollo, en el entorno de desarrollo NetBeans. La conexión de los medidores de energía al computador es posible gracias a un convertidor USB a RS485 y de igual forma se realiza en las tarjetas Raspberry, donde se ejecutó el producto final. Como resultado se obtuvo una rutina que atiende los procesos representados en la Figura 23.

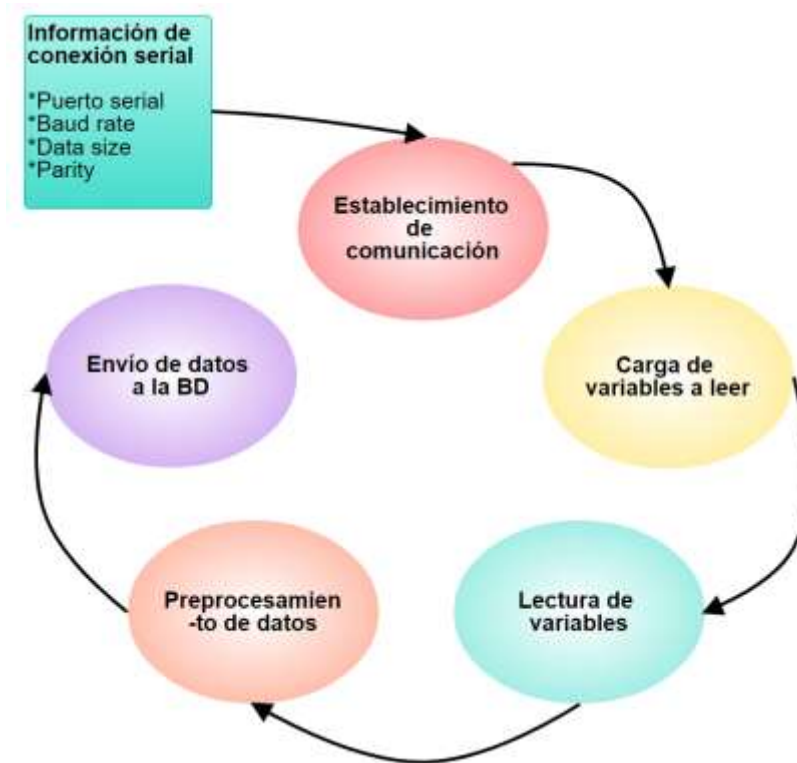


Figura 23. Rutina Java para la comunicación y adquisición de datos de los medidores de energía.

Inicialmente se configura la información de conexión serial, definida dentro de los estándares del protocolo Modbus, esta configuración están por defecto en código desarrollado para los medidores de energía del sistema, pero es posible modificarla en caso de que sea necesario. Después de ello es posible establecer la comunicación con los equipos y la lectura de variables indicando: la dirección del puerto, el número de lecturas a realizar, el intervalo de tiempo entre cada lectura y la dirección, tipo y ubicación del equipo, a través de la interfaz mostrada en la Figura 24.

The screenshot shows a software window titled "Design Preview [Principal]". Inside, there is a configuration panel for serial communication. At the top, there is a "Puerto" dropdown menu currently showing "COM1". To its right is a button labeled "probar conexión". Below the dropdown is another button labeled "Detectar puertos". Further down, there are two input fields: "Numero de lecturas" and "tiempo en segundos", followed by a "Leer" button. At the bottom, there is a section titled "Direcciones equipos" which contains six rows. Each row has a checkbox, a label (dir 1 through dir 6), a dropdown menu showing "acurev.csv", and another dropdown menu showing "SAV1".

Figura 24. Interfaz para el establecimiento de comunicación y lectura de variables.

Seguido de ello se realiza un preprocesamiento de los datos, pues debido a la naturaleza del protocolo de comunicación estos son entregados en formato de bits, por lo que es necesario aplicar

una conversión a la trama entregada, según el tipo de dato y factor de conversión de cada variable, definidos en el manual de usuario.

Una vez realizadas las anteriores tareas la rutina finaliza con el envío de información a la base de datos, proceso que se realiza primero a través de un túnel SSH para establecer conexión con el servidor y luego por medio del conector de base de datos (JDBC, en español: conectividad a bases de datos de Java) para comunicarse con la base de datos. Este JDBC fue elegido en este caso para la conexión a base de datos debido a la sensibilidad en el envío de información, ya que para uno de los interesados es importante que no exista pérdida de información y este tipo de conexión cumple con dicho requisito.

Los datos enviados para el almacenamiento están en formato JSON, por ser un formato ligero que facilita el intercambio de datos, simple de escribir y leer para los usuarios y fácil de interpretar y generarlo para las máquinas. JSON sigue la sintaxis de un objeto de JavaScript; pero puede ser usado independiente de este y es muy útil cuando se desea transmitir datos a través de una red.

Para concluir esta sección, el conjunto de tarjetas de desarrollo, convertidores USB a RS485 y equipos de medición conformaron los primeros terminales IoT del sistema, de modo que estos últimos adquirieron capacidad de conectividad a internet para poder realizar la transmisión de información gracias a los otros componentes. Además, es importante mencionar que este trabajo se realizó en conjunto con el desarrollo de un proyecto de pregrado, el cual apoyó las tareas de adaptación de la librería Modbus y cada una de las pruebas de validación del sistema de comunicación Modbus creado, en él es posible encontrar en detalle todo el proceso.

5.3.1.2 Sensores del sistema de riego inteligente En capítulos anteriores se describe el sistema de riego inteligente diseñado para el sistema GRIPV. La combinación de sensores y actuadores

con los módulos secundarios (tarjetas Arduino NANO) y el módulo central (tarjeta de desarrollo Arduino) conforman los terminales IoT de esta sección, ya que cuentan con las características definidas en la arquitectura y por tanto están listos para ser integrados a la plataforma.

El módulo central, denominado coordinadores recibe la información de cada uno de los sensores por medio de los módulos secundarios y es esta información la que es debe ser almacena en la base de datos, proceso que se realiza a través de un driver (DBC) que permite que el Arduino vía Ethernet acceda a esta. Los datos transmitidos están en formato JSON, utilizado es toda la plataforma para la transferencia de información.

5.3.1.3 Microinversores de los paneles solares Los microinversores asociados a los paneles solares pertenecen a la familia de Enphase Energy y como se mencionó en capítulos anteriores, cuenta con su propio sistema para la transmisión de información hacia la plataforma Enlighten, del mismo proveedor. Este sistema permite la conectividad directa a internet, por tanto, dentro del marco definido en este trabajo son considerados terminales IoT.

Una vez identificados estos equipos como terminales IoT, la forma de acceso a los datos de rendimiento del sistema fotovoltaico proporcionada por el fabricante es a través de una API (Application Programming Interface, por sus siglas en inglés) basada en JSON. Por medio de esta API es posible conectar la plataforma IoT con la información que es almacenada en los servidores de la plataforma Enlighten. Para ello es necesario contar con un ID de usuario y una clave API proporcionados por el proveedor y de esta forma realizar cada una de las solicitudes necesarias. Para más información dirigirse a la página oficial <https://developer.enphase.com/docs/>.

Este tipo de terminales IoT son soportados por la plataforma, pues a través del protocolo de comunicación HTTP es posible acceder a dichas plataformas externas, esta vez por medio de la API, que establece dicho puente.

5.3.2 Capa de aplicaciones La capa de aplicaciones, encargada de proporcionar la interfaz entre la red subyacente que soporta todos los datos transmitidos y las aplicaciones que usa el usuario final, se ejecutó bajo los dos componentes principales, el servidor de bases de datos y el servidor de aplicación.

El almacenamiento y procesamiento de la información es soportado por el servidor del sistema que se encuentra en las instalaciones del edificio E³T. Cuenta con un sistema operativo Linux Mint, una distribución de GNU/Linux comunitarias; cuyas características principales se describen en la Tabla 13.

Tabla 13.

Características principales del servidor.

SERVIDOR DDL 160 G9		
Ítem	Descripción	Cantidad
Procesador	HP PROLIANT DL 160 SMART BUY-1X INTEL XEON 8 CORE E5-2609V4/1,7GHZ, 8GB DDR4 SDRAM, SMART ARRAY B140I SIN FBWC, 4LFF, 1GB, ADDAPTADOR NC361 DE 2 PUERTOS 1X550W PS 1U RACK	1
Memoria	32 GB DE RAM	--
Discos duros	HP SS DATA 6G DE 1TB 7.2K 3.5 HOT PLUG	2
Tarjetas de red	HP BGB (1X8GB) SINGLE RANK X8 DOR4-2400CAS-17-17-17 REGISTERED MEMORY KIT	1
	HP ETHERNET 1GB 2-PORT 332T ADAPTER	1
	HPE ILO ESSENTIALTSU E-LTU	1

En este servidor se encuentran instalado el servidor de base de datos y el servidor de aplicaciones, cada uno con tareas definidas como se explicó en secciones anteriores; por tal motivo se detallan por separado a continuación.

5.3.2.1 Servidor de base de datos El servidor de base de datos corresponde a MySQL, una de las más populares bases de datos de código abierto y gratuito, que permite la administración de bases de datos relacionales. Este servidor solo puede ser accedido por consola, por tal motivo se hace uso de los gestores de Workbench y SQLyog. El primero de ellos es una herramienta que permite diseñar, modelar, generar y administrar bases de datos visualmente, por tanto, en este proyecto fue utilizado para diseñar y modelar una base de datos que atiende el sistema de riego inteligente y otra a los medidores de energía del sistema GRIPV, mostradas en la Figura 25 y Figura 26 respectivamente; gracias a que facilita dicha tarea para usuarios no expertos.

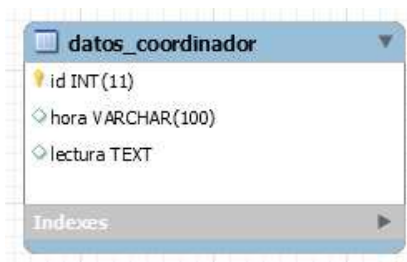


Figura 25. Diagrama entidad-relación del sistema de riego inteligente.

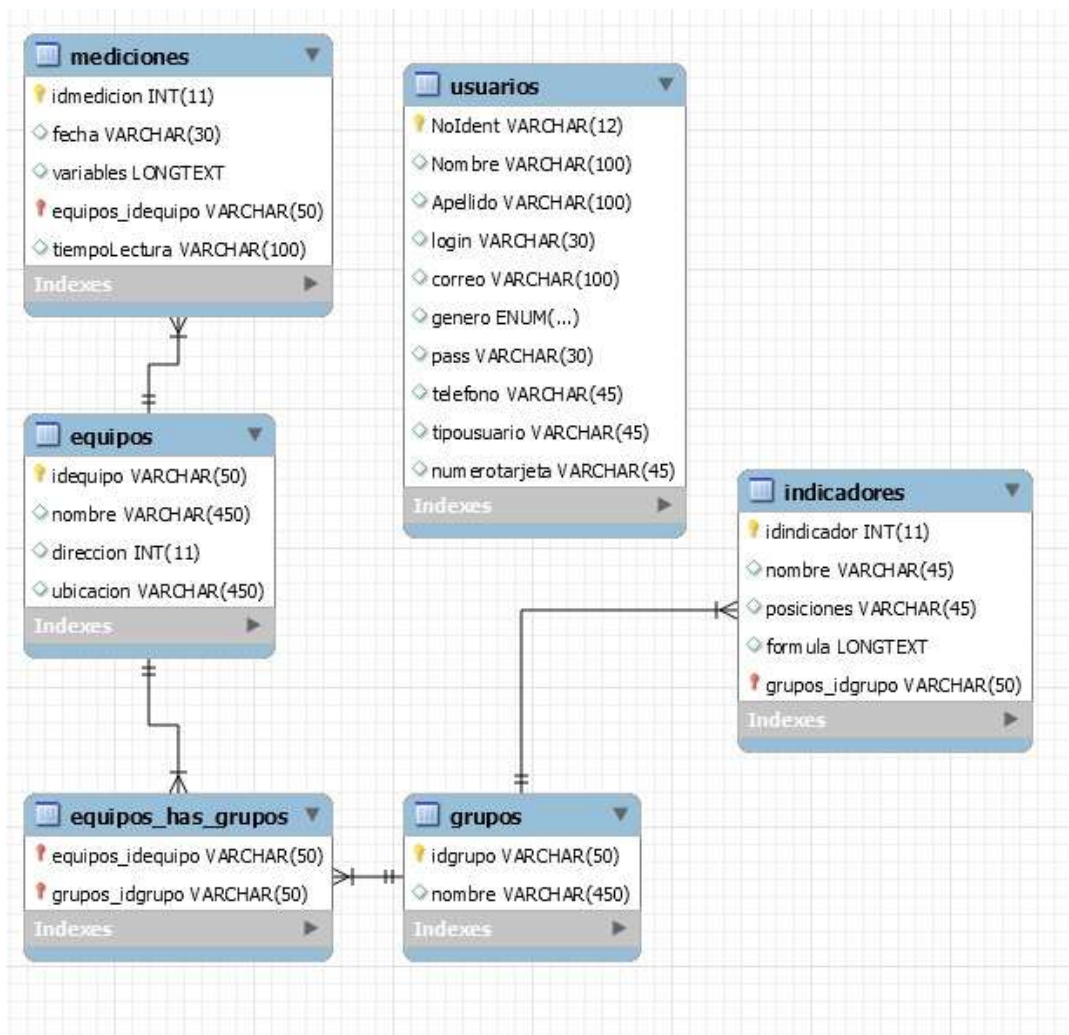


Figura 26. Diagrama entidad-relación de la base de datos del sistema GRIPV.

El diseño de las bases de datos está sujeto a los requerimientos del sistema, por tanto, para la base de datos del sistema de riego inteligente solo es necesario almacenar los datos que el coordinador recibe, representado en una sola tabla que contiene los campos correspondientes a la identificación de la lectura, la estampa de tiempo y el valor de la lectura.

Por otra parte, la base de datos que soporta a los medidores de energía cuenta con 5 tablas principales y cada una de ellas contiene los campos que guardan la información necesaria según sea el caso. En la tabla “equipos” se almacena la información de cada medidor de energía; en la

tabla “mediciones” todo lo referente a las variables leídas y sus estampas de tiempo; la tabla “equipos_has_grupos” surge para relacionar precisamente las tablas con dichos nombres, donde la tabla “grupos” corresponde a la información de los grupos en que son clasificados los indicadores del sistema y la tabla “indicadores” lo relacionado a ellos, tema del que se hablará en una sección posterior; Y finalmente la tabla usuarios que contiene los datos de las personas que pueden acceder a la información de sistema, a través de la aplicación web.

Una vez definido el diagrama entidad-relación de cada una de las bases de datos son puestas en marcha y para su administración se utiliza el programa SQLyog, una excelente interfaz gráfica que permite trabajar de manera rápida y ágil con el servidor de base de datos MySQL y es fácil de usar por usuarios inexpertos; pero a la vez una excelente herramienta para administradores de bases de datos.

De esta manera quedan definidas las bases de datos para el sistema GRIPV en general, las cuales se encuentran alojadas dentro del mismo servido de base de datos y en la medida que sea necesario, es posible modificarlas para ajustarla a nuevos requerimientos o mejoras.

5.3.2.2 Servidor de aplicaciones El servidor de aplicaciones pertenece a un Apache Tomcat, un servidor HTTP especializado en aplicaciones Java. Este servidor se encarga del servicio IoT, por tanto, recibe las peticiones del cliente y realiza las respectivas transacciones con el servidor de base de datos para entregar al usuario la respuesta a su solicitud, bajo el modelo cliente-servidor, representado en la Figura 27.

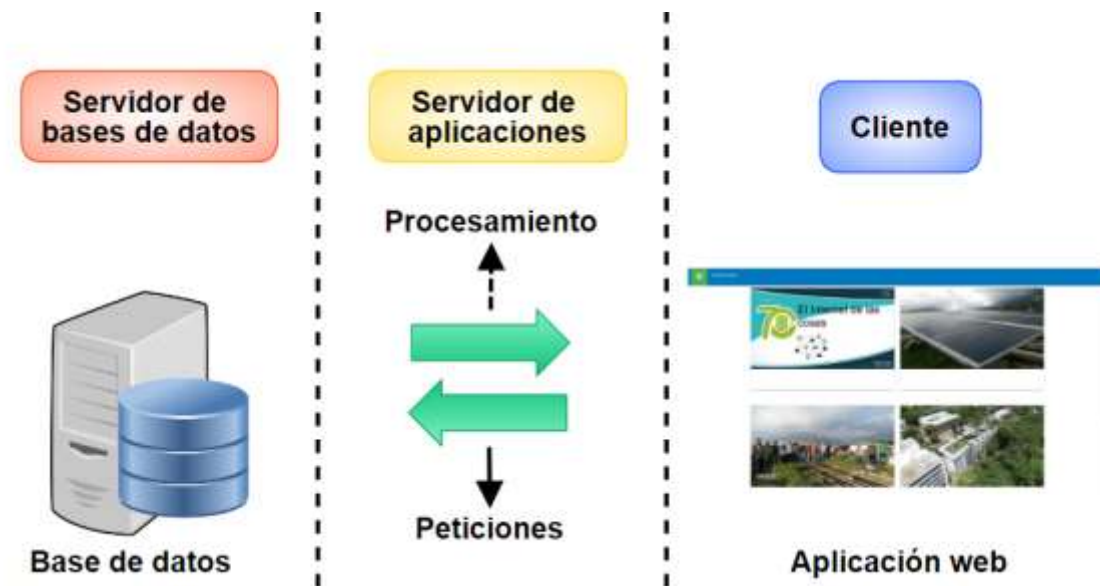


Figura 27. Modelo cliente servidor bajo el cual trabaja el servidor de aplicaciones.

Las peticiones que genera el cliente pueden implicar o no el procesamiento de datos; por ejemplo, cuando se desea ingresar a la plataforma es necesario escribir el id de usuario y la contraseña, esta información es verificada por el servidor de aplicaciones quien consulta la base de datos e identifica si se encuentra registrado y si la contraseña corresponde, de ser correcto permite el acceso y de modo contrario le indica al usuario que compruebe sus credenciales. En este tipo de petición no hay procesamiento de datos, solo consulta de información.

Por otra parte, una de las peticiones que si genera procesamiento de información está relacionada con los indicadores de desempeño del sistema, desarrollados en base a los requerimientos del cliente, por tal motivo estos se describen en la siguiente sección.

5.3.2.2.1 Indicadores de desempeño del sistema GRIPV. Los indicadores de desempeño del sistema GRIPV tienen como objeto ofrecer un informe del comportamiento del sistema y por ende de las variables que están siendo monitorizadas. Dentro del marco del desarrollo del proyecto

COLCIENCIAS que se desarrolla en paralelo a este trabajo, fueron entregados dichos indicadores bajo el marco del modelo de potencia de Budeanu y Frize y el modelo de potencia IEEE 1459-2010 para el caso de sistema 3ø tetrafilar (4 hilos); representados en la Tabla 14 y la Tabla 15 respectivamente.

Tabla 14.

Modelo de potencia Budeanu y Frize

Indicador	Fórmula	Unidad
Potencia Aparente	$S = V_{rms} \cdot I_{rms}$	VA
Potencia Activa	$P = \sum_{h=1}^H V_{h_rms} I_{h_rms} \cos(\theta_{vh} - \theta_{ih})$	W
Potencia Reactiva-B	$Q_B = \sum_{h=1}^H V_{h_rms} \cdot I_{h_rms} \sen(\theta_{vh} - \theta_{ih})$	VAr
Potencia de Distorsión-B	$D_B = \sqrt{S^2 - P^2 - Q_B^2}$	VAr
Potencia Reactiva-F	$Q_F = \sqrt{S^2 - P^2}$	VAr

Tabla 15.

Modelo de potencia IEEE 1459-2010: Caso sistema 3ø tetrafilar (4 hilos)

Nombre	Fórmula	Unidad
Tensión equivalente	$V_e = \sqrt{\frac{V_{rs}^2 + V_{st}^2 + V_{tr}^2 + 3 \cdot V_{rn}^2 + 3 \cdot V_{sn}^2 + 3 \cdot V_{tn}^2}{18}}$	V
Tensión efectiva fundamental	$V_{e1} = \sqrt{\frac{V_{rs1}^2 + V_{st1}^2 + V_{tr1}^2 + 3 \cdot V_{rn1}^2 + 3 \cdot V_{sn1}^2 + 3 \cdot V_{tn1}^2}{18}}$	V
Resistencia	$p_N = \frac{R_N}{R_L}$	
Corriente equivalente	$I_e = \sqrt{\frac{I_r^2 + I_s^2 + I_t^2 + \rho_N I_n^2}{3}}$	A

Nombre	Fórmula	Unidad
Corriente efectiva fundamental	$I_{e1} = \sqrt{\frac{I_{r1}^2 + I_{s1}^2 + I_{t1}^2 + \rho_N I_{n1}^2}{3}}$	A
Tensión efectiva no fundamental	$V_{eh} = \sqrt{V_e^2 - V_{e1}^2}$	V
Corriente efectiva no fundamental	$I_{eh} = \sqrt{I_e^2 - I_{e1}^2}$	A
Potencia aparente efectiva	$S_e = 3 \cdot V_e \cdot I_e$	VA
Potencia aparente efectiva de la componente fundamental	$S_{e1} = 3 \cdot V_{e1} \cdot I_{e1}$	VA
Potencia aparente efectiva fundamental debida al desbalance	$S_{u1} = \sqrt{S_{e1}^2 - S_1^2}$	VA
Potencia aparente efectiva no fundamental	$S_{eN} = \sqrt{S_e^2 - S_{e1}^2} = \sqrt{D_{eI}^2 + D_{eV}^2 + S_H^2}$	VA
Potencia activa de secuencia positiva	$P_1^+ = 3 \cdot V_{rn1}^+ I_{r1}^+ \cos(\theta_{vrn1^+} - \theta_{ir1^+})$	W
Potencia reactiva de secuencia positiva	$Q_1^+ = 3 \cdot V_{rn1}^+ I_{r1}^+ \sin(\theta_{vrn1^+} - \theta_{ir1^+})$	VAR
Potencia aparente efectiva de distorsión de corriente	$D_{eI} = 3 \cdot V_{e1} \cdot I_{eh}$	VA
Potencia aparente efectiva de distorsión de tensión	$D_{eV} = 3 \cdot V_{eh} \cdot I_{e1}$	VA
Potencia aparente efectiva armónica	$S_H = 3 \cdot V_{eh} \cdot I_{eh}$	VA
Potencia de distorsión armónica	$D_{eh} = \sqrt{S_H^2 - P_H^2}$	VAR
Potencia activa armónica	$P_H = P - P_1 = \sum_{h=2}^N P_h$	W
Factor de potencia efectivo	$fp = \frac{P}{S_e}$	

Los indicadores fueron válidos de forma manual por medio de la herramienta Microsoft Excel, tomando una muestra de mediciones de los equipos Acurev y Acuvim en un intervalo de tiempo y aplicado cada una de las fórmulas presentadas anteriormente. Dicha revisión implicó la intervención de los investigadores expertos en el tema que están trabajando en el proyecto.

Realizada la validación de los indicadores y aprobada su implementación, las fórmulas de cada uno de estos fueron almacenadas en la base de datos del sistema GRIPV en la correspondiente tabla a igual que la posición de las variables que intervienen de ellas, para posteriormente realizar los cálculos en el servidor de aplicaciones.

Para ello se hizo uso de un evaluador de expresiones algebraicas (Moreno Parra, 2013), código implementado sobre el lenguaje Java. Esta rutina se correó sobre el servidor de aplicaciones cada vez que el cliente solicita ver los indicadores del sistema; pero no es visible para él, este servidor se encarga internamente del procesamiento de los datos y entrega el resultado final, el cual se puede observar a través de una gráfica.

5.3.3 Capa de negocios EL producto final para el cliente es el desarrollo de una aplicación Java (página web), cuyas funcionalidades fueron establecidas al inicio. El diseño de la página web se basó en Material Design, un framework CSS que permite crear diseños de sitios y aplicaciones web por medio componentes y clases predefinidas que facilitan su creación (“Materialize,” n.d.).

Esta página web se ejecuta dentro del servidor de aplicaciones y es posible accederla desde cualquier navegador web o dispositivo celular. Esta aplicación maneja dos tipos de acceso, uno público donde es posible solo consultar la información que no maneja ninguna restricción de confidencialidad y se bloquea la opción de descarga de datos; y otro de acceso privado que concede permisos para la consulta y descarga de toda la información del sistema. La Figura 28 muestra los

casos de uso que contempla la plataforma hasta la finalización de este trabajo y la Figura 29 es un ejemplar de la página de inicial de la aplicación web.

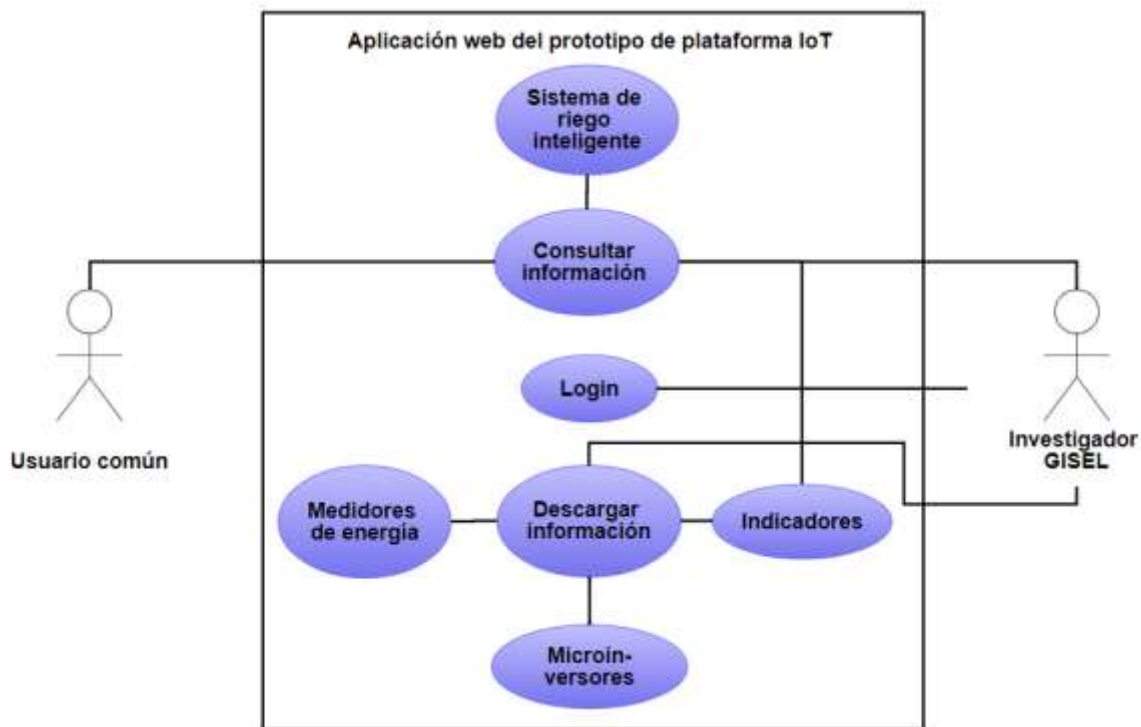


Figura 28. Diagrama de casos de uso de la página web de la plataforma



Figura 29. Página de inicio de la aplicación web

6. Validación del prototipo desarrollado

Para validar el prototipo desarrollado se hizo entrega del producto al usuario final, en este caso la validación estuvo lidera por el profesor German Alfonso Osma Pinto, integrante del grupo de investigación GISEL; para que pudiera interactuar con él. Una vez que este declaró haber terminado de explorar la solución se procede a realizar la siguiente valoración de los requerimientos funcionales establecidos, indicando si cumple o no con lo establecido, lo cual se puede observar en la Tabla 16.

Tabla 16.

Validación de requerimientos funcionales por parte del usuario final.

Código	Requerimiento	Subíndices	Cumple
REF01	Monitorizar el sistema GRIPV-E3T	Medidores avanzados de energía (Acuvim y AcuRev)	SI
		Microinversores Enphase	SI
		Sistema de riego inteligente	SI
REF02	Procesamiento de datos	--	SI
REF03	Almacenamiento centralizado de la información	--	SI
REF04	Visualización de la información	Vista: Sistema fotovoltaico	SI
		Vista: Mediciones eléctricas	SI
		Vista: Sistema de riego	SI

6.1 Requerimiento funcional: Monitorizar el sistema GRIPV-E3T

Para el caso del requerimiento con referencia REF01, se realizó una primera inspección en relación con los medidores avanzados de energía. Este tipo de equipos fueron dotados de capacidades de comunicación y procesamiento de datos para ser denominados terminales IoT; por tanto se hicieron unas minuciosas pruebas para comparar los datos que los dispositivos almacenan en su memoria interna con los datos que fueron extraídos a través del desarrollo de hardware y software propio. Esto se llevó a cabo con el apoyo del trabajo de pregrado denominado IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE GESTIÓN DE BASE DE DATOS APLICADO A LOS DESARROLLOS DE GENERACIÓN FOTOVOLTAICA Y CULTIVO DE LAS TERRAZAS VERDES DEL EDIFICIO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, desarrollado por la estudiante Maria Claudia Villareal Ardila. Los resultados obtenidos fueron favorables, ya que las pruebas realizadas demostraron que al comparar los datos obtenidos de las dos fuentes, estos coincidían con un porcentaje de error no mayor al 5%.

En el caso de los datos asociados a los microinversores del sistema fotovoltaico y al sistema de riego inteligente, estos son entregados directamente por los dispositivos a través de los protocolos de comunicación establecidos; por lo tanto se verificó que estos pudieran ser accedidos de tal forma para su posterior consulta a través de la plataforma.

6.2 Requerimiento funcional: Procesamiento de datos

El procesamiento de datos, hasta el momento en este prototipo, está asociado a los indicadores de desempeño del sistema, desarrollados bajo el marco del modelo de potencia de Budeanu y Frize y

el modelo de potencia IEEE 1459-2010 para el caso de sistema 3 ϕ tetrafilar (4 hilos). Estos indicadores fueron calculados previamente en la herramienta Microsoft Excel y una vez revisados y aprobados por los interesados se pasó a automatizar dicho proceso en la plataforma.

La validación en este punto se basó en la comparación de la información de un mismo intervalo de tiempo, obtenida de la hoja de cálculo con la calculada en la plataforma, con un porcentaje de error del 0%. Los datos fueron ajustados en su totalidad para tal fin y con ello se aprobó el cálculo de los indicadores.

6.3 Requerimiento funcional: Almacenamiento centralizado de la información

El almacenamiento centralizado de la información concentró los datos de los medidores avanzados de energía, los microinversores del sistema fotovoltaico y el sistema de riego inteligente en la base de datos de la plataforma, de forma tal que el usuario puede acceder a dicha información remotamente desde ella. De este modo el usuario testeó que fuera posible consultar la información de estos equipos, dentro de los intervalos de tiempo establecidos.

6.4 Requerimiento funcional: Visualización de la información

La visualización de la información se divide en tres pestañas principales, la primera de ellas es la del sistema fotovoltaico donde es posible consultar dentro de un intervalo las variables asociadas a los microinversores, en este caso generación diaria y acumulada, medida en kW, como es posible observar en la Figura 30. Además de ello también se puede comparar las variables de un microinversor gracias a las ventanas mostradas en la Figura 31.

La segunda pestaña se denomina mediciones eléctricas y en ella es posible consultar las variables de todos los medidores avanzados de energía y de igual forma los indicadores del sistema, lo cual se encuentra dividido en grupos. Un ejemplo de esta visualización es presentado en la Figura 32.

La última pestaña es la del sistema de riego inteligente, en ella se encuentra la información de variables como la temperatura, el estado de las electroválvulas y el contenido volumétrico de agua. Además de ello también es posible realizar la comparación de información entre zonas. Todo esto es mostrado en las Figura 33 y Figura 34.



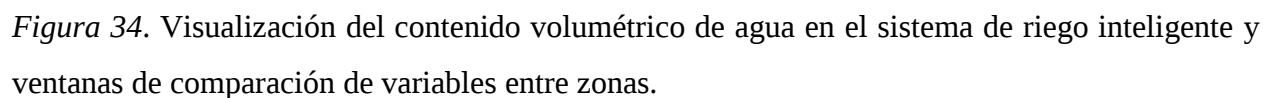
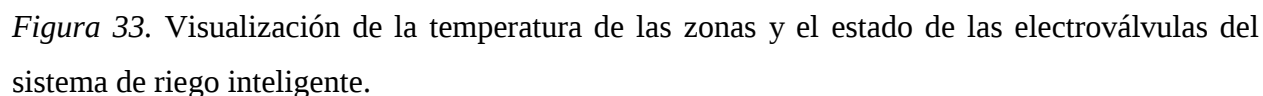
Figura 30. Vista de las variables asociadas a los microinversores del sistema fotovoltaico.



Figura 31. Vista asociada a la comparación de variables entre microinversores.



Figura 32. Visualización de variables asociadas a los medidores avanzados de energía.



El desarrollo de cada una de estas pestañas de visualización de la información estuvo delimitado por las especificaciones definidas por el usuario, quien una vez el producto estuvo listo para su

testeo, procedió minuciosamente a revisar la interfaz, dictando las mejoras necesarias y consolidando el prototipo para su aceptación, lograda hasta el desarrollo de este trabajo.

7. Conclusiones

A continuación se presentan los resultados obtenidos en la culminación del presente trabajo y las conclusiones generales.

Resultados

La metodología desarrollada para el diseño e implementación de una plataforma de servicios basada en IoT para la monitorización de un sistema de generación fotovoltaica integrado con vegetación, permitió el análisis de los requisitos necesarios para la integración de diversos objetos heterogéneos en el escenario descrito anteriormente, validados mediante el prototipo implementado.

Se diseñó e implementó un prototipo de plataforma bajo la metodología propuesta en este documento para el sistema GRIPV de la E3T de la Universidad Industrial de Santander, planteado como un escenario flexible que permita analizar los principales retos en la adopción de este tipo de tecnologías verdes y proyectado como soporte para el desarrollo de nuevas investigaciones en áreas afines y sistemas con características similares.

El prototipo implementado permitió la optimización y automatización de tareas como la recolección de información de los diferentes equipos y sensores del sistema; su integración bajo una base de datos que soporta toda la infraestructura de datos del sistema; y su acceso remoto y en

todo instante de tiempo. Además de ello, sienta la base para el desarrollo de nuevos algoritmos de procesamiento para el análisis de datos, así como el uso futuro de la inteligencia artificial, el machine learning; entre otros, cómo mecanismos de control sobre el sistema y análisis de información.

Se estima que el diseño modular, basado en capas y componentes de la arquitectura propuesta con el enfoque de AE, permite que la adaptación e implementación de una solución con la misma, sea rápido y fácil de probar haciéndola ideal no sólo para pruebas de conceptos en fases de prototipado sino también para implementaciones finales.

Existen diversas interfaces entre hardware, software y componentes de red producto de las diferentes combinaciones posibles entre la microelectrónica y tecnologías de comunicación e informáticas; por tanto la arquitectura propuesta centra sus esfuerzos en la integración de éstas dentro del contexto de un sistema GRIPV; pero su diseño proporciona la base para la inclusión de nuevas tecnologías que la hagan ser más robusta y con la capacidad de soportar otros objetos con características diferentes a los que ya han sido integrados en la plataforma.

Conclusiones generales

La suma sinérgica conseguida con la inclusión de AE en el desarrollo de servicios IoT, provee conceptos, modelos e instrumentos para afrontar los retos que representa la articulación de los requerimientos de los interesados y los procesos de negocios con las áreas de TI, con lo cual es posible generar mayor valor, mejorar el desempeño, la comunicación y la integración. Además de ello se comprobó como la AE también se puede adaptar a las necesidades de desarrollo de servicios IoT para sistemas GRIPV.

En este trabajo se ha demostrado por construcción que fue posible desarrollar una arquitectura para sistemas GRIPV, una arquitectura en capas con un enfoque de AE y basada en el modelo de

referencia IoT. La arquitectura presentada en este trabajo es una aportación a las arquitecturas existentes en la comunidad de internet de las cosas dado que al momento del desarrollo de este trabajo no se han encontrado trabajos que abarquen la estructura que debe tener un sistema GRIPV.

El IoT impulsa a los sistemas hacia un futuro más tecnológico, convirtiendo cada escenario en un ambiente inteligente, capaz de ser consciente de lo que sucede a su alrededor y de tomar decisiones consecuentes a ello. En este sentido los sistemas GRIPV no escapan del IoT y gracias a la red interconectada de objetos es posible su monitorización y actuación de forma remota, potenciado sus capacidades. Con ello podemos afirmar que el IoT más que un gran aliado de las tecnologías verdes es parte fundamental de ellas.

Con la idea del IoT de interconectar todos los objetos del mundo y debido a la gran diversidad de tecnologías existentes, se hace necesario idear una estrategia para su gestión e implementación en los diferentes escenarios y sectores posibles, con el fin de proveer servicios a las personas. En este sentido se puede decir que se ha utilizado el enfoque de arquitectura empresarial para un diseño IoT completo que trajo consigo ventajas como la alineación del IoT con los negocios, bajo un lenguaje estándar que permite el entendimiento del sistema por cada uno de los interesados; una visión global del negocio para la toma de decisiones futuras en respuesta a las necesidades cambiantes y crecientes de sistema; y una contribución al crecimiento de los sistemas GRIPV desde la perspectiva de las TIC en combinación con las AE, apoyando las labores de investigación desde la UIS.

.

8. Trabajos Futuros

El prototipo de plataforma desarrollado centró sus esfuerzos en la integración de objetos heterogéneos dentro del contexto de un sistema GRIPV; debido a ello características como la seguridad de la información no fueron abordadas de manera intensiva por lo cual se recomienda el desarrollo de trabajos que tengan como objetivo mejorar los niveles de seguridad de la plataforma implementada, como un aspecto transversal a la arquitectura propuesta.

El desarrollo de conceptos como la inteligencia artificial sería un componente deseado para lograr dotar a los objetos de mayor inteligencia y agregar nuevas funcionalidades que beneficien la monitorización, control y análisis del sistema. Por ello se propone el desarrollo de proyectos enfocados en opciones como la lógica difusa, Machine Learning, Visión por computadora o Procesamiento de Lenguaje Natural.

Referencias Bibliográficas

- ACUREV 2000 Multi-Circuits Networked Multifunction Power Energy Meter*. (n.d.). Retrieved from <https://www.accuenergy.com/files/acurev/AcuRev-2000-Multi-Phase-Tenants-Meter-Brochure.pdf>
- Acuvim II Series Power Meter*. (2015). Retrieved from <https://www.accuenergy.com/files/acuvim-ii/Acuvim-II-Power-Meter-User-Manual-1040E1303.pdf>
- Adhya, S., Saha, D., Das, A., Jana, J., & Saha, H. (2016). An IoT Based Smart Solar Photovoltaic Remote Monitoring and Control unit. *2016 2nd International Conference on Control, Instrumentation, Energy & Communication (CIEC)*, 432–436. <https://doi.org/10.1109/CIEC.2016.7513793>
- Al-Fuqaha, A., Guizani, M., Mohammadi, M., Aledhari, M., & Ayyash, M. (2015). Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications. *Ssrn*, 17(4), 2347–2376. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3170749>
- Alshayeb, M., & Chang, J. D. (2016). Photovoltaic Energy Variations Due to Roofing Choice. *Procedia Engineering*, 145(May), 1104–1109. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.04.143>
- Alshayeb, M. J., & Chang, J. D. (2018). Variations of PV panel performance installed over a vegetated roof and a conventional black roof. *Energies*, 11(5). <https://doi.org/10.3390/en11051110>
- Baccino, B. (2015). *Internet of Things - Oportunidades y desafíos*. (August). <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.5157.5527>
- Castillo Santos, R., & Castillo García, H. (2014). *Arquitectura Empresarial y las Organizaciones Estatales*. 1(1), 1–9. Retrieved from http://www.fuac.edu.co/recursos_web/documentos/ing.sistemas/ojs/index.php/UACISIS/article/view/15

- Chemisana, D., & Lamnatou, C. (2014). Photovoltaic-green roofs: An experimental evaluation of system performance. *Applied Energy*, 119, 246–256. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.12.027>
- Daniel Ricardo Cerinza Mejia. (2015). *Modelo Para Medir Los Beneficios De Una Arquitectura Empresarial*.
- Defense, U. S. D. of. (2011). Home DoDAF-DM2 WG DoDAF Journal DoD Meta Data Registry IDEAS Links The DoDAF Architecture Framework Version 2.02. *The DoDAF Architecture Framework Version 2.02.*, 1–289. Retrieved from <http://cio-nii.defense.gov/sites/dodaf20/index.html>
- EasymodbusTCP Modbus Library for .NET/Java and Python – Communication library and professional tools for industrial communication. (n.d.). Retrieved May 25, 2019, from <http://easymodbustcp.net/en/>
- El Helow, D. (2018). *Performance of Green Roof Integrated Solar Photovoltaics in Toronto*.
- Enphase Energy Inc. (2014). *Manual de instalación y funcionamiento Envoy Communications Gateway*.
- Esquetini Cáceres, C., & Moscoso Zea, O. (2014). *Propuesta de un marco de referencia de gestión de organizaciones usando Arquitectura Empresarial*. 70–88.
- García, C. G., Espada, J. P., Núñez-Valdez, E. R., & García-Díaz, V. (2014). Midgar: Domain-specific language to generate smart objects for an internet of things platform. *Proceedings - 2014 8th International Conference on Innovative Mobile and Internet Services in Ubiquitous Computing, IMIS 2014*, 352–357. <https://doi.org/10.1109/IMIS.2014.48>
- García Muelas, C. (n.d.). *Integración de Redes Telemáticas IoT con Raspberry pi*. Retrieved from <http://openaccess.uoc.edu/webapps/o2/bitstream/10609/40187/6/cgmuelasTFC0115memoria.pdf>
- GISEL. (2014). *Validación experimental del beneficio energético de la implementación de sistemas fotovoltaicos (FV) integrados con techos verdes para entornos tropicales con clima cálido*. 1–40.

- GISEL, GIEMA, & GIEFIVET. (2016). *Viabilidad técnica de la implementación de sistemas fotovoltaicos (FV) integrados con vegetación como estrategia de generación distribuida y horticultura en entornos urbanos de clima cálido tropical*. 1–46.
- González García, C. (2017). *MIDGAR: Interoperabilidad de objetos en el marco de Internet de las Cosas mediante el uso de Ingeniería Dirigida por Modelos*. (February), 626. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.26332.59529>
- Guamán, J. I., Vargas, C., Rios Villacorta, A., & Nogales, R. (2017). *Solar Manager : Acquisition , Treatment and Isolated Photovoltaic System Information Visualization Cloud Platform*. (March).
- Gupta, S., Anand, P., Kakkar, S., Sagar, P., & Dubey, A. (2017). *Effect of evapotranspiration on performance improvement of photovoltaic-green roof integrated system*.
- Han, J., Choi, C., Park, W., Lee, I., & Kim, S. (2014). *PLC-Based Photovoltaic System Management for Smart Home Energy Management System*. 60(2), 184–189.
- Hao, L., Lei, X., Yan, Z., & Yang, C. L. (2012). The application and implementation research of smart city in China. *Proceedings 2012 International Conference on System Science and Engineering, ICSSE 2012*, (70172014), 288–292. <https://doi.org/10.1109/ICSSE.2012.6257192>
- Helow, D. El, Drake, J., & Margolis, L. (2017). *Testing the Potential Synergy of Green Roof-Integrated Photovoltaics at the University of Toronto Green Roof Innovation Testing (GRIT) Laboratory*. 0–8.
- Josey, A., Harrison, R., Homan, P., Rouse, M. F., Sante, T. van, Turner, M., & Merwe, P. van der. (2013). *TOGAF Versión 9.1 - Guía de Bolsillo*. In *Business Management*.
- Josey, A., Lankhorst, M., Band, I., Jonkers, H., & Quartel, D. (2016). *An Introduction to the ArchiMate® 3.0 Specification*.
- La evolución del Internet de las Cosas. (n.d.). Retrieved November 14, 2018, from <https://www.genexus.com/es/global/noticias/leer-noticia/la-evolucion-del-internet-de-las-cosas>

- Lamnatou, C., & Chemisana, D. (2014). Photovoltaic-green roofs: a life cycle assessment approach with emphasis on warm months of Mediterranean climate. *Journal of Cleaner Production*, 72, 57–75. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.03.006>
- Lamnatou, C., & Chemisana, D. (2015a). A critical analysis of factors affecting photovoltaic-green roof performance. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43, 264–280. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.11.048>
- Lamnatou, C., & Chemisana, D. (2015b). Evaluation of photovoltaic-green and other roofing systems by means of ReCiPe and multiple life cycle-based environmental indicators. *Building and Environment*, 93(P2), 376–384. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.06.031>
- Li, X., Ramshani, M., Khojandi, A., Omitaomu, O., & Hathaway, J. M. (2017). *AN AGENT BASED MODEL FOR JOINT PLACEMENT OF PV PANELS AND GREEN ROOFS*. (Administration 2015), 1133–1144.
- Materialize. (n.d.). Retrieved May 29, 2019, from <https://materializecss.com/>
- Mendieta Matute, M. I. (2014). *Propuesta De Framework De Arquitectura Empresarial Para Pymes Basado En Un Analisis Comparativo De Los Frameworks De Zachman Y Togaf*. Retrieved from <http://dspace.ucuenca.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/5105/1/TESIS.pdf>
- Moreno Parra, R. A. (2013). *Desarrollo de un evaluador de expresiones algebraicas. Versión 2.0*.
- MQTT. (n.d.). Retrieved September 5, 2019, from <http://mqtt.org/>
- Nacer, T., Hamidat, A., & Nadjemi, O. (2014). Feasibility study and electric power flow of grid connected photovoltaic dairy farm in Mitidja (Algeria). *Energy Procedia*, 50, 581–588. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.06.071>
- Nagengast, A., Hendrickson, C., & Matthews, H. S. (2013). *Variations in photovoltaic performance due to climate and low-slope roof choice*. 64, 493–502.
- Narcis Cardona, C. (2016). *Cooperative Radio Communications for Green Smart Environments*.

- Nash, C., Clough, J., Gedge, D., Lindsay, R., Newport, D., Ciupala, M. A., & Connop, S. (2015). Initial insights on the biodiversity potential of biosolar roofs: a London Olympic Park green roof case study. *Israel Journal of Ecology and Evolution*, 62(1–2), 74–87. <https://doi.org/10.1080/15659801.2015.1045791>
- Nimbits API. (n.d.). Retrieved March 30, 2019, from <https://www.programmableweb.com/api/nimbits>
- Officer DOD Deputy Chief Information. (n.d.). DODAF - DOD Architecture Framework Version 2.02. Retrieved May 21, 2019, from https://dodcio.defense.gov/Library/DoD-Architecture-Framework/dodaf20_arch_development/
- Ogaili, H., & Sailor, D. J. (2016). Measuring the Effect of Vegetated Roofs on the Performance of Photovoltaic Panels in a Combined System. *Journal of Solar Energy Engineering*, 138(6), 061009. <https://doi.org/10.1115/1.4034743>
- Pereira, R. I. S., Dupont, I. M., Carvalho, P. C. M., & Jicá, S. C. S. (2017). IoT Embedded Linux System based on Raspberry Pi applied to Real-Time Cloud Monitoring of a decentralized Photovoltaic plant. *Measurement*. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.09.033>
- Prieto, M. J., Pernía, A. M., Nuño, F., Díaz, J., & Villegas, P. J. (2014). *Development of a Wireless Sensor Network for Individual Monitoring of Panels in a Photovoltaic Plant*. 2379–2396. <https://doi.org/10.3390/s140202379>
- Programa LEED® en Colombia – Consejo Colombiano de Construcción Sostenible – CCCS. (n.d.). Retrieved June 10, 2019, from <https://www.cccs.org.co/wp/capacitacion/talleres-de-preparacion-leed/>
- Ramshani, M., Khojandi, A., Li, X., & Omitaomu, O. (2018). *Optimal Planning of the Joint Placement of Photovoltaic Panels and Green Roofs Under Climate Change Uncertainty*. (August). <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.27111.50081>
- Ray, P. P. (2016). A survey on Internet of Things architectures. *Abakós, Belo Horizonte*, 1(2), 78–95. <https://doi.org/10.5752/P.2316-9451.2013v1n2p78>
- Rosas, A. (2019). ¿Qué es un negocio? (definición, tipos y diferencia con una empresa). Retrieved

September 4, 2019, from <https://www.crecenegocios.com/que-es-un-negocio/>

Rose, K., Eldridge, S., & Lyman, C. (2015). The Internet of Things: an overview. *Internet Society*, (October), 53. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

RUIZ SANCHEZ, D. F. (2014). *DISEÑO DE ARQUITECTURA EMPRESARIAL EN EL SECTOR EDUCATIVO COLOMBIANO: CASO COLEGIOPRIVADO EN BOGOTÁ*. Retrieved from <https://www.bps.go.id/dynamictable/2018/05/18/1337/persentase-panjang-jalan-tol-yang-beroperasi-menurut-operatornya-2014.html>

Salazar, J., & Silvestre, S. (2014). Internet de las Cosas. *PMQuality*, 1–27. Retrieved from <http://jeuazaru.com/wp-content/uploads/2014/10/Internet-of-Things.pdf>

Sarasty España, H. F. (2015). *DOCUMENTACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS PRINCIPALES FRAMEWORKS DE ARQUITECTURA DE SOFTWARE EN APLICACIONES EMPRESARIALES*.

Scherba, A., Sailor, D. J., Rosenstiel, T. N., & Wamser, C. C. (2011). *Modeling impacts of roof reflectivity, integrated photovoltaic panels and green roof systems on sensible heat flux into the urban environment*. 46, 2542–2551. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.06.012>

Schindler, B. Y., Blank, L., Levy, S., Kadas, G., Pearlmutter, D., & Blaustein, L. (2016). Integration of photovoltaic panels and green roofs: review and predictions of effects on electricity production and plant communities. *Israel Journal of Ecology and Evolution*, 62(1–2), 68–73. <https://doi.org/10.1080/15659801.2015.1048617>

Shariff, F., Rahim, N. A., & Ping, H. W. (2015). *Zigbee-based data acquisition system for online monitoring of grid-connected photovoltaic system*. 42, 1730–1742.

Suresh, M., Meenakumari, R., Ashok Kumar, R., Alex Stanley Raja, T., Mahendran, K., & Pradeep, A. (2018). *Fault Detection and Monitoring of Solar PV Panels using Internet of Things* *Fault Detection and Monitoring of Solar PV Panels using Internet of Things*. (August).

The Open Group Library. (n.d.). Retrieved May 16, 2019, from <https://publications.opengroup.org/?catalogno=I>

- The Zachman Framework Evolution by John P Zachman. (n.d.). Retrieved May 16, 2019, from <https://www.zachman.com/ea-articles-reference/54-the-zachman-framework-evolution>
- Tina, G. M., & Grasso, A. D. (2014). *Remote monitoring system for stand-alone photovoltaic power plants : The case study of a PV-powered outdoor refrigerator*. 78, 862–871.
- Tosi, A. F. (2016). *Green roofs and solar panels as a single assembly system in Austin , Texas*.
- Touati, F., Al-Hitmi, M. A., Chowdhury, N. A., Hamad, J. A., & San Pedro Gonzales, A. J. R. (2016). Investigation of solar PV performance under Doha weather using a customized measurement and monitoring system. *Renewable Energy*, 89, 564–577. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.12.046>
- UIT. (2012). *Visión general de la Internet de las cosas (ITU-T Y.4000/Y.2060 (06/2012))*. 20. Retrieved from <http://handle.itu.int/11.1002/1000/11559>
- Xue, J. (2017). Economic assessment of photovoltaic greenhouses in China. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 9(3). <https://doi.org/10.1109/MCOM.2004.1362547>
- Zachman, J. (1987). A framework for information systems architecture,. *IBM Systems Journal*, 26(3)(3), 276–292. Retrieved from <http://www.ise.fiu.edu/Courses/Downloads/6936/John-Zhackman-paper1.pdf>