



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CD. GUZMÁN

PROGRAMA DE MAESTRÍA EN CIENCIAS

DE LA COMPUTACIÓN

TESIS

TEMA:

**ROBUSTEZ EN UN SISTEMA IoT EN AGRICULTURA DE
PRECISIÓN**

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS DE LA COMPUTACIÓN

PRESENTA:

Ernesto Ruiz Angeles

DIRECTOR:

M.C. FELIPE ALFONSO ORDOÑEZ GARCÍA

Revisores:

DRA. MARÍA GUADALUPE SÁNCHEZ CERVANTES

DR. JESUS EZEQUIEL MOLINAR SOLIS

CD. GUZMÁN JALISCO, MÉXICO, AGOSTO DE 2019



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Ciudad Guzmán

"2019, Año del Caudillo del Sur, Emiliano Zapata"

Cd. Guzmán, Jal. a **13/Agosto/2019**

Oficio No. DEPI/50/19

ASUNTO : AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN

C. ERNESTO RUIZ ÁNGELES
N.C. M17290013

En cumplimiento con el documento normativo de las disposiciones para la operación de estudios de posgrado del Tecnológico Nacional de México y con base en la aprobación del Comité Tutorial comisionado para su revisión; la División de Estudios de Posgrado e Investigación le otorga la autorización de impresión de su trabajo de tesis intitulado:

"ROBUSTEZ EN UN SISTEMA IoT EN AGRICULTURA DE PRECISIÓN"

dirigido por el **M.C. Felipe Ordoñez García**, desarrollado como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias de la Computación, de acuerdo al plan de estudios MCCOM-2011-05.

Sin otro asunto en particular, quedo de usted.

ATENTAMENTE


DR. HUMBERTO BRACAMONTES DEL TORO
JEFE DE LA DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN



S.E.P. TecNM
INSTITUTO TECNOLÓGICO
DE CD. GUZMAN
DIVISION DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E
INVESTIGACION

C.p. Archivo

Av. Tecnológico No. 100 C.P. 49100 A.P. 150

Cd. Guzmán, Jal. Tel. Conmutador (341) 5752050
www.tecnm.mx | www.itcg.edu.mx



Contenido

Resumen.....	i
Abstract	ii
Agradecimientos	iii
Índice de Figuras	iv
Índice de Tablas	vi
1 INTRODUCCION.....	1
1.1 Planteamiento del problema	2
1.2 Motivación	3
1.3 Objetivo general	4
1.3.1 Objetivos específicos.....	4
1.4 Hipótesis.....	4
2 ESTADO DEL ARTE	5
3 MARCO TEORICO	8
3.1 Agricultura	8
3.2 Agricultura de precisión	9
3.3 Internet de las cosas (IoT)	9
3.3.1 1Arquitectura del Internet de las Cosas.....	11
3.4 UART	13
3.5 I2C.....	14
3.5.1 Especificación I2C	15
3.6 ZigBee	16
3.6.1 Arquitectura del protocolo.	16
3.6.2 Espectro ZigBee.....	18
3.6.3 Funcionalidad.....	20
3.6.4 Topologías	21
3.6.5 Dispositivos ZigBee	23
3.6.6 Comunicación de los dispositivos Xbee.....	25
3.6.8 Especificaciones de los dispositivos.....	27
3.7 Perdida de Trayectoria (Path Loss).	28

3.8 Modelos de propagación	29
3.8.1 Modelo dependiente de las particiones de un sitio.....	33
3.9 Sistemas de control	35
3.9.1 Clasificación de los sistemas de control.....	35
3.10 Función de transferencia	36
3.10.1 Modelo matemático para sistemas de lazo cerrado	37
3.11 Control PID	38
3.12 Robustez.....	39
3.13 RSSI.	40
3.14 Indicador del enlace de la señal.....	41
4 PROPUESTA GENERAL DEL PROYECTO	42
4.1 Arquitectura de la propuesta	43
4.1.1 Capa fog	45
4.2 Metodología propuesta.....	47
5 PRUEBAS Y VALIDACION DE ROBUSTEZ EN LAS COMUNICACIONES.....	49
5.1 Escenarios propuestos	49
5.2 Seguimiento de la metodología	50
5.2.1 Elegir modelo matemático	50
5.2.2 Diseño de la red a partir del modelo matemático.....	50
5.2.3 Validar que haya comunicación	54
5.2.4 Definir funcionamiento de los nodos	57
5.2.5 Enviar y Recibir datos	57
5.2.6 Presentación de los datos.....	64
6 RESULTADOS.....	67
7 CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO	75
7.1 Conclusiones	75
7.2 Trabajo futuro.....	76
8 REFERENCIAS BIBLIGRAFICAS	77
9 GLOSARIO	81
ANEXO	83

Resumen

En los próximos años cuando la mayoría de las personas vivan en las ciudades y los campos sean reducidos en proporción a las mismas, será necesario contar con estructuras y modelos que ayuden a la población para ser abastecidos de alimentos del campo, para ello contar con granjas urbanas autónomas será de suma importancia. En el presente trabajo, se hace una propuesta de una arquitectura IoT de cinco capas para los sistemas IoT de agricultura de precisión, que permita disminuir la redundancia de los datos en el almacenamiento y se disminuya la cantidad de procesamiento de los datos para un control de las variables, presentándose una metodología para que la interacción entre un prototipo de granja urbana y equipos de cómputo sea la esperada, aplicando modelos matemáticos para conexiones inalámbricas con protocolo ZigBee. Se presentan varias pruebas utilizando los modelos matemáticos y haciendo uso de otros protocolos como UART e I2C, obteniendo métricas que nos garantizaran que hay robustez en el sistema IoT de la granja urbana.

Palabras clave: Agricultura de precisión, granja urbana, Modelo matemático, ZigBee, I2C, UART, IoT, protocolo.

,

Abstract

In the coming years when the most people living in cities and fields are reduced, it will be necessary to have structures and models that help the population to be supplied with food from the countryside, to do so have autonomous urban farms will be sum importance. In this work, a proposal is made for a five-layer IoT architecture for precision farming IoT systems, which allows reducing the redundancy of data in storage and decreasing the amount of data processing for a control of the variables, presenting a methodology so that the interaction between an urban farm prototype and computer equipment is as expected by applying mathematical models for wireless connections with ZigBee protocol. Several tests are presented using the mathematical models and using other protocols such as UART and I2C, obtaining metrics that will guarantee us that there is robustness in the urban farm's IoT system.

Keywords: Precision farming, urban farm, Mathematical model, ZigBee, I2C, UART, IoT, protocols.

Agradecimientos

Agradezco en primer lugar a mis padres por el apoyo incondicional que siempre han tenido a mi persona.

A las personas que me quieren y siempre me han apoyado.

A mis maestros, que, sin su guía, esto no sería posible.

A CONACyT por el apoyo económico brindado.

Sólo porque algo no haga lo que era previsto

No quiere decir que sea inútil el esfuerzo.

Thomas Alba Edison.

Índice de Figuras

Figura 1 Dominios del IOT	10
Figura 2 Arquitectura IoT en tres capas.....	11
Figura 3 Arquitectura IoT de nivel 5.....	12
Figura 4 Diagrama a bloques UART.....	14
Figura 5 Especificación I2C.....	16
Figura 6 Pila de capas del protocolo ZigBee.....	17
Figura 7 Diferencia espectro ZigBee y IEEE 802.11 b.....	20
Figura 8 Árbol de clústeres.	21
Figura 9 Topologías WSN.....	22
Figura 10 Ruta entre A y B	23
Figura 11 Mejor camino cuando un nodo deja de funcionar.....	23
Figura 12 Dispositivos ZigBee.....	24
Figura 13 Comunicación entre dispositivos Xbee.....	25
Figura 14 Estructura de un paquete API	26
Figura 15 elementos de un sistema de comunicaciones inalámbrico.....	28
Figura 16 Teorema de reciprocidad	31
Figura 17 Sistema de lazo abierto	36
Figura 18 Sistema de lazo cerrado	36
Figura 19 Sistema de lazo Cerrado	37
Figura 20 Diagrama a bloques de un PID	39
Figura 21 Ciclo de los datos.....	42
Figura 22 Arquitectura propuesta.....	43
Figura 23 Interacción entre capas de la arquitectura propuesta	45
Figura 24 Capa fog.....	45
Figura 25 Punto de unión entre protocolos	46
Figura 26 Elementos de la capa fog	47
Figura 27 Metodología propuesta.	48
Figura 28 Escenarios prueba	49
Figura 29 Escenario uno.....	50
Figura 30 Escenario dos	52
Figura 31 Escenario tres.....	53
Figura 32 Los nodos están a menos de cinco metros de distancia	54
Figura 33 Nodo sensor a diez metros	55
Figura 34 Tercer nodo (router), incrementa la señal	55
Figura 35 Red formada por cuatro nodos ya a una distancia de 149 metros.....	55
Figura 36 Distribución de nodos para simulación en Opnet	56
Figura 37 Estado de dalla del nodo W	57
Figura 38 Diseño prototipo	58
Figura 39 IDENT	59
Figura 40 Función de transferencia.....	60

Figura 41 Valores PID	62
Figura 42 Diagrama con valores del PID	63
Figura 43 Resultado con temperatura objetivo a 30 grados	63
Figura 44 Presentación de datos.....	64
Figura 45 Presentación datos.....	65
Figura 46 Ventana de control de la temperatura	65
Figura 47 Control de la intensidad de las luces en el prototipo	66
Figura 48 Comportamiento RSSI y el Modelo matemático con respecto a la distancia del escenario uno.....	69
Figura 49 Comportamiento RSSI y el Modelo matemático con respecto a la distancia del escenario dos	70
Figura 50 Distribución de nodos escenario tres con un nodo en fallo.....	70
Figura 51 Envío y recepción de paquetes.....	71
Figura 52 Comportamiento RSSI y el Modelo matemático con respecto a la distancia del escenario tres	72
Figura 53 Comparativo métricas esperadas en los escenarios.....	73
Prot 1 Prototipo	67

Índice de Tablas

Tabla 1 Comparación Estado del Arte	7
Tabla 2 Comparativa entre ZigBee, Bluetooth e IEEE 802.11 b	19
Tabla 3 Descripción de elementos de un paquete API.....	27
Tabla 4 Especificaciones Xbee S2C.....	27
Tabla 5 Representación de la red en forma de Tabla escenario tres	56
Tabla 6 Métricas para comunicaciones robustas	68
Tabla 7 Valores de prueba en línea de vista.....	68
Tabla 8 Valores prueba del edificio P al invernadero	69
Tabla 9 Formación de la red sin un nodo	71
Tabla 10 Comportamiento modelo matemático escenario tres	72
Tabla 11 Valores de métricas de los diferentes escenarios	73

CAPITULO 1

1 INTRODUCCION

El internet de las cosas está cambiando todo (Bahga et al., 2014). En estos días de la cuarta revolución industrial, es decir, en la era del conocimiento, se hacen indispensables las redes de información y su robustez, ya que son factores indispensables para la obtención confiable de datos que se usaran para la toma de decisiones. Es decir, el poder conectar dispositivos en red que e inclusive a internet, con el propósito de indicar cuando hace falta algún recurso, o solo con el hecho de estar informado del estado de aquello que estamos monitoreando. Para que la conexión de los dispositivos sea adecuada se incorporan protocolos de comunicación que facilitan la obtención de los datos requeridos, estos protocolos deberán ser lo suficientemente robustos para generar la menor perdida de datos, y una menor latencia en la transferencia de información.

La tendencia en la producción de cultivos dentro de las ciudades a través de las granjas urbanas donde la mayoría de las regiones ofrecen condiciones óptimas para la producción, sin embargo, es importante considerar los diferentes tipos de clima del país utilizando la agricultura de precisión para obtener el nivel de tecnificación requerido. Se prevé que la superficie de producción en ambientes controlados siga creciendo ya que cada vez la gente en espacios cerrados genera sus propios alimentos a través de innovación en técnicas agrícolas (Moran, 2010).

En la presente tesis se hará uso de diferentes protocolos de comunicación como I2C, UART, ZIGBEE, definiendo así el mejor mecanismo para que se den comunicaciones robustas y, así poder tomar decisiones oportunas en el momento correcto.

1.1 Planteamiento del problema

Los países de América Latina y el Caribe, al igual que el resto del mundo, se encuentran en una situación en la que deben encontrar formas para alimentar a más y más gente con una cantidad limitada de tierra, agua y otros recursos naturales. (López et al., 2017). Lamentablemente muchos agricultores aún utilizan técnicas convencionales para sus procesos de cultivo, lo que provoca un bajo rendimiento de las cosechas y productos naturales. La agricultura al ser vital para la especie humana ofrece áreas de oportunidad para la implementación de tecnología. Por lo que se deben aprovechar de manera oportuna y racional el uso de sistemas de información que den aproximaciones de lo que sucede en los plantíos ya sean en grandes extensiones de tierra o en granjas urbanas incluso dentro de los hogares.

1.2 Motivación

Cuando se sobrevuela una ciudad se pueden observar los avances tecnológicos que han venido dándose a lo largo del tiempo y, que han tenido un impacto profundo en nuestro estilo de vida. La comunicación es uno de los aspectos centrales en la evolución, permitiendo así transmitir información en los humanos a través de experiencias de vida. Teniendo las redes de información que facilitan la transferencia de esta por todo el mundo, compartiendo experiencias y metodologías para lograr mejoras en la humanidad.

Se debe aprovechar que se han desarrollado nuevas tecnologías en el área de automatización, que han generado un abaratamiento de los dispositivos de monitoreo y control de los procesos industriales, en especial en la agricultura de precisión.

Existen técnicas como la hidroponía que es una técnica para cultivar plantas sin el uso del suelo como medio de para su crecimiento. En esta técnica se utiliza una solución en agua para proporcionar los nutrientes necesarios a la planta.

Con el uso de tecnologías en cultivos y/o invernaderos, surge la necesidad de tener siempre la información de estos correctamente almacenados para que se puedan realizar posteriores análisis y/o toma de decisiones. Así al tener comunicaciones robustas en los sistemas de información en cultivos y/o invernaderos se necesita ya que los datos son esenciales en todo sistema y que lleguen de forma adecuada y sin problemas es parte de la robustez que se necesita.

Automatizar de manera eficiente y proporcionar inteligencia para las implementaciones de agricultura urbana e integrar las soluciones globales de una manera transparente y escalable, es necesario para mantener en operación los múltiples componentes que generan información en un sistema de agricultura de precisión, siendo sus principales retos funcionar a pesar de las condiciones climáticas y la existencia de grandes volúmenes de información. Siendo este el objetivo principal de la presente tesis.

1.3 Objetivo general

Validar que haya comunicaciones robustas en un prototipo IoT dentro del ITCG utilizando protocolos de comunicación en agricultura de precisión.

1.3.1 Objetivos específicos

- Diseñar un prototipo de pruebas para la obtención de datos en una red de sensores.
- Diseñar una red de sensores haciendo uso de algún modelo matemático.
- Probar que haya robustez en las comunicaciones entre las redes de sensores y el prototipo.
- Dejar en funcionamiento el sistema de obtención de datos.
- Mostrar los datos obtenidos en un sistema de cómputo en la niebla (fog).

1.4 Hipótesis

Dado el diseño e implementación de un prototipo de un sistema ciber físico en Agricultura y con el uso de protocolos de comunicación Adhoc, se tendrá la robustez requerida.

CAPITULO 2

2 ESTADO DEL ARTE

De acuerdo a lo que se comenta en Jen (2005) donde un ambiente que se caracteriza por su incertidumbre, adversidad y rápidos cambios, la falla en los sistemas es una situación de ocurrencia común, sea ésta por fallas en el diseño o por causas naturales, por su parte Bonfil et al.,(2006) establecen que el concepto de optimización robusta se aplica para trabajar con incertidumbre y tomar decisiones menos sensibles a las variaciones de los datos de entrada; una solución es considerada robusta si el desempeño del escenario actual se mantiene cercano al escenario óptimo esperado en un ámbito de incertidumbre.

El trabajar modelos a capas es más efectivo como lo plantea Qiu et al., (2013) que define una capa de sensores, capa de transmisión, capa de control y capa de aplicación, donde la capa de transmisión es la encargada de enviar los datos a los usuarios finales, para esto utiliza ya sea GSM o ZigBee, según la distancia a donde enviara la información. Así mismo Ferreira et al., (2013) proponen una arquitectura con un maestro y varios esclavos para obtener datos de dispositivos, este maestro será también un servidor, que presentará los datos a los clientes.

Obtener datos de diferentes granjas urbanas a disposición de las personas que pudiesen requerir algún análisis de datos obtenidos (Simelane et al., 2015), todo esto a través de redes WIFI y utilizando los teléfonos o dispositivos móviles que tengan acceso a un punto de acceso. Se propone tener un microcontrolador por cada sensor (Chen et al., 2015), y enviar esa información a través de una red con el estándar 802.15.4, donde cada módulo tendría un dispositivo ZigBee para enviar los datos un nodo que cuente con conexión WIFI y con acceso a internet y llegar directo a los dispositivos que cuenten con una aplicación donde se presentaran los datos.

Un sistema de irrigación de agua en cultivos es una propuesta de Harun et al., (20015), considerando variables como PH, Temperatura, Humedad relativa y humedad del suelo, utilizando redes de sensores inalámbricas y, siendo comparados con redes alámbricas, resultando con gran ventaja las redes de sensores inalámbricas ya que pueden formarse donde las cableadas no podrían. Se propuso un proyecto para hidroponía donde se desean adquirir datos de los sensores de suelo a través de puertos UART y de ahí a internet (Nalwade et al.,

2017), considerando enviar avisos a través e GSM cuando alguno de los valores no sea el esperado.

Las comunicaciones inalámbricas con línea de visión (LoS) y sin línea de visión (NLoS), se busca tener eficacia (Fitriawan et al., 2017), en la que hacen pruebas de perdida de paquetes a diferentes velocidades de transmisión, con tal de lograr la robustez en las comunicaciones.

EL monitoreo inalámbrico basado en el bus 1-Wire como lo hacen en Cuifen et al., (2010), donde obtienen los valores de la temperatura y humedad de un granero, utilizando microcontroladores, y trasmisores Rf, donde los datos son almacenados en una base de datos. Por otro lado, Kumari et al., (2017) proponen la conexión de un FPGA (matriz de puertas programables) como maestro y un MEMS (Microelectromechanical systems) como esclavo a través de un protocolo I2C, Se propone una metodología de 5 pasos para la conexión de un rapsberry (Sharma et al., 2015), utilizando un Pc a través del protocolo UART, en la cual probaron diferentes velocidades en Baudios para envió de archivos de texto, imágenes, video y voz.

En la Tabla 1 se observa una comparativa de la literatura leída, con el fin de mostrar a forma de resumen lo que se ha realizado dando como perspectiva de los protocolos que se utilizarán y darán forma a la propuesta.

La propuesta consiste en utilizar diferentes protocolos de comunicación en una capa local denominada FOG y hacer el almacenamiento de los datos para su análisis y procesamientos según se requiera y, manejarlo a través de un MIDDLEWARE.

Cuadro de análisis de antecedentes						
Nombre	UART	I2C	ZIGBEE	WIFI	FOG	MIDDLEWARE
Tianchen Qiu			x		x	
Hiro Gabriel			x	x		
Phumlani T. Simelane				X		
Ahmad Nizar Harun			x	x		x
Mr. Rahul Nalwade	X				x	x
Jui-Ho Chen			x	x		x
Helmy Fitriawan			x		x	
Lun Cuifen	x				x	
Dr.R. Shantha Selva Kumari	x	x		x		
Manisha Sharma	x				x	
Propuesta	x	x	x	x	x	x

Tabla 1 Comparación Estado del Arte

CAPITULO 3

3 MARCO TEORICO

3.1 Agricultura

La agricultura es una actividad económica en la cual se tienen técnicas y conocimientos para el cultivo de la tierra a través de la explotación de los recursos de la tierra mediante acciones humanas (Flores, 2007).

En términos generales, la Agricultura Urbana (AU) considera el cultivo, procesamiento, distribución y consumo de productos agrícolas dentro del área de la ciudad, utilizando con fines productivos espacios que no son utilizados, como terrenos baldíos y azoteas; Incluye no sólo la producción de vegetales comestibles, como frutas y hortalizas, sino también una amplia gama de especies destinadas a medicina natural, fibras vegetales para cestería y floricultivos, entre otros.

El fenómeno de la AU se caracteriza por su gran adaptabilidad y movilidad, sirviendo de base alimentaria y económica a comunidades urbanas y periurbanas, a través del desarrollo creativo de estrategias agro-productivas que contribuyen a mejorar la calidad alimentaria. La Agricultura Urbana no se limita exclusivamente a un nivel de alimentación, también incorpora la posibilidad de cultivos recreativos y de autoconsumo en grupos socioeconómicos medios, de operaciones comerciales de pequeña escala para microempresarios, familias, actividades terapéuticas y educativas, mediante el desarrollo agrícola en patios traseros, terrazas, balcones, jardines escolares, hospitales, prisiones y otros establecimientos.

En la actualidad, la agricultura urbana tiene un rol creciente en la agenda internacional, donde de hecho se está reconociendo como parte esencial de una estrategia global para lidiar con los retos colocados por el rápido crecimiento urbano en los países en desarrollo. La agricultura urbana no es una solución total para los problemas que irán enfrentando en el futuro las ciudades de los países en desarrollo, pero sí es ingrediente fundamental de cualquier programa que busque tornar las ciudades en desarrollo y mejorar la vida de sus habitantes el ascenso de la agricultura urbana en la agenda internacional estaría acompañado

por el creciente involucramiento en este tema de varias organizaciones del sistema de la ONU, a menudo en colaboración con investigaciones pioneras que estaban siendo apoyadas por el Centro Internacional de Investigaciones para el Desarrollo (IDRC) (Mougeot, 2006).

3.2 Agricultura de precisión

Agricultura de precisión es un sistema a través del cual los granjeros pueden detectar variaciones en las granjas y tomar decisiones respecto a ello y así incrementar su administración (Hashmi, 2014).

Así mismo (Srivastava et al., 2012) menciona que el objetivo de la agricultura de precisión es enfocarse en el uso de cualquier entrada, en el lugar correcto, tiempo y cantidad tal que el granjero mejore y reduzca algún impacto del medio ambiente en los campos.

Además de utilizar la agricultura de precisión para administrar los nutrientes de los cultivos, en National Research Council, (2010), se menciona que se ha propuesto un programa de manejo preciso de alimentos (PFM) como una estrategia para

reducir la acumulación de fósforo en el suelo al limitar la compra de alimentos y fertilizantes y al aumentar la producción de forraje de cosecha propia de alta calidad. (Kant, 2013) menciona que la agricultura de precisión se presta a la mayoría de las aplicaciones agrícolas y se puede implementar en cualquier nivel requerido. La agricultura de precisión se basa en la tecnología de la información.

Una de estas tecnologías es la tecnología de red como se menciona en (Wang et al., 2019). Ahora, siendo la agricultura de precisión el concepto emergente en este campo, se puede implementar una red de sensores para estudiar los parámetros ambientales como la temperatura, el contenido de humedad del suelo, el nivel de nitrógeno y el tipo de cultivo. Por lo tanto, la interconexión de dispositivos inalámbricos.

3.3 Internet de las cosas (IoT)

Según la normatividad de ITU-T Y.2060 (Ashton, 2009), el IoT puede verse como una infraestructura global para la sociedad de la información, que proporcionan servicios avanzados interoperables existentes y en evolución para interconectar (física y virtual)

“cosas” utilizando las tecnologías de información y comunicación. Dichas “cosas”, son objetos del mundo físico (“cosas físicas”) o del mundo de la información (“mundo virtual”) que pueden identificarse e integrarse en las redes de comunicación. Las “cosas” tienen información asociada, que puede ser estática y dinámica (Evans, 2011). Las “cosas” físicas existen en el mundo físico y son capaces de ser detectadas, manipuladas y conectadas. Los ejemplos de cosas físicas incluyen el entorno circundante, robots industriales, electrodomésticos, etc.

En la Figura 1, se muestra la clasificación del Internet de las Cosas, de los distintos dominios de aplicación de IoT (Bahga et al., 2014).

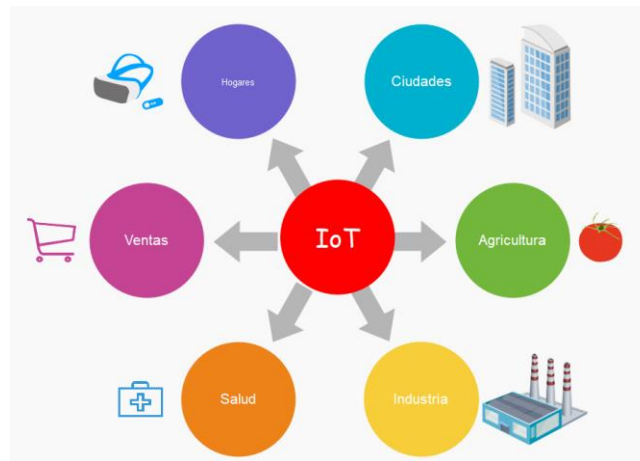


Figura 1 Dominios del IOT

3.3.1 1Arquitectura del Internet de las Cosas

El Internet de las Cosas está compuesto por una arquitectura, que contiene capas (Bahga et al., 2014), como se observa en la Figura 2.



Figura 2 Arquitectura IoT en tres capas

A continuación, se menciona la forma como interactúa la arquitectura de tres capas:

Capa de dispositivo, se encuentran los dispositivos que proveen el sensado, actuación, monitoreo y funciones de control.

Capa de comunicación, proporciona la comunicación para un sistema IoT.

Capa de servicio, un sistema IoT usa varios tipos de servicios tales como servicio de monitoreo, dispositivo de control de servicios, y servicio de dispositivo de descubrimiento.

En las capas de comunicación y servicios es necesario llevar una adecuada administración y seguridad tal como se observa en la Figura 2.

Capa de aplicación, las aplicaciones IoT requieren interfaces para el monitoreo y control de los sistemas IoT.

Las arquitecturas IoT se clasifican en seis niveles (Bahga et al., 2014), cada nivel cumple con distintas necesidades y alcances distribuyendo de manera distinta sus componentes, estos siendo distribuidos de forma local o externa, como por ejemplo las necesidades que se presentan en una arquitectura de nivel 1 todos los componentes se encuentran de forma local, en el nivel 2 el componente de aplicación se encuentra en la nube, en el nivel 3 componente de análisis se encuentra en la nube, en el nivel 4 el análisis se encuentra de forma local. En la Figura 3 se muestra la distribución y componentes de una arquitectura de nivel 5.

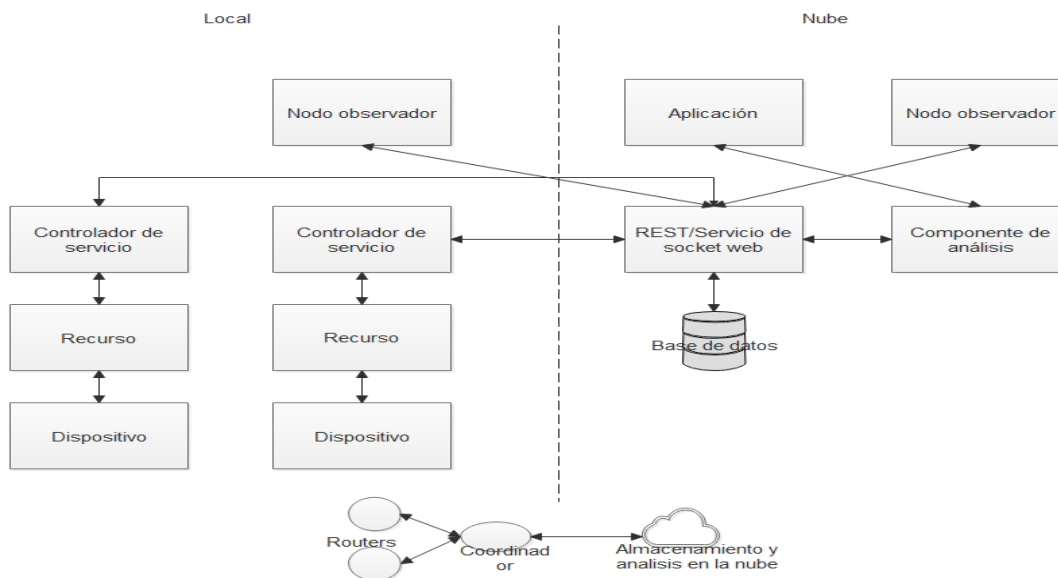


Figura 3 Arquitectura IoT de nivel 5

Fuente (Bahga et al., 2014).

A continuación, se explica la interacción entre los componentes de la Figura 3:

Dispositivos: son encargados de recolectar información, activar actuadores a través de funciones de control o de forma manual.

Recursos: son componentes de software en los dispositivos IoT para el acceso, procesamiento y almacenamiento de información.

Controlador de servicio: es un servicio nativo que interactúa con los servicios Web.

Base de datos: es el almacenamiento en la nube de los datos generados por el sistema IoT, el componente de análisis es el responsable de analizar los datos generados por el sistema y presentarlos al usuario de una forma entendible.

Aplicación: proporciona visualización, control y monitoreo del sistema que el usuario tendrá

3.4 UART

Un puerto Serial es un módulo de comunicación digital para un sistema embebido. Es decir, permite la comunicación entre dos dispositivos digitales. Cuenta con dos conexiones, RX y TX. Lo que nos indica los modos de comunicación que puede manejar, Full-duplex, Duplex y Simplex. Además, podemos considerar como su principal ventaja la sencillez de su protocolo de comunicación. Sin embargo, también tiene desventajas como que sólo se puede comunicar a un puerto dos dispositivos (Sharma et al., 2015).

La función principal de un puerto serial, es la de empaquetar y desempacar paquetes de datos binarios seriales. Como resultado, la serialización significa convertir un dato paralelo (byte) a un conjunto de pulsos seriales que puedan ser recibidos y enviados por una línea de transmisión. En primer lugar, el protocolo serial opera mediante tres condiciones digitales básicas: inicio de transmisión (IT), paridad (P) y fin de transmisión (FT). Estas condiciones son sincronizadas mediante un oscilador interno. El generador permite controlar la velocidad del puerto serial. Por lo tanto, la velocidad se mide en BAUD.

Al módulo serial también se le conoce como UART o USART o EUSART.

- UART – Universal Asynchronous Receiver and Transmitter que en español se traduciría como Transceptor Asíncrono.
- USART – Universal Synchronous and Asynchronous Receiver and Transmitter, que significa en español Transceptor Síncrono y Asíncrono.
- EUSART – Enhanced Universal Asynchronous Receiver and Transmitter o Transceptor Asíncrono Universal Mejorado.

UART toma bytes de datos y los trasmite en orden secuencial del lado del destinatario un segundo UART reensambla los bits para completar bytes. Este protocolo es asíncrono por lo cual no requiere de una señal de reloj, pero la estructura para la transmisión de los datos consiste en un mensaje de inicio y otro de finalizado (Blessington et al., 2017).

En la Figura 4 se observa el diagrama a bloques UART.

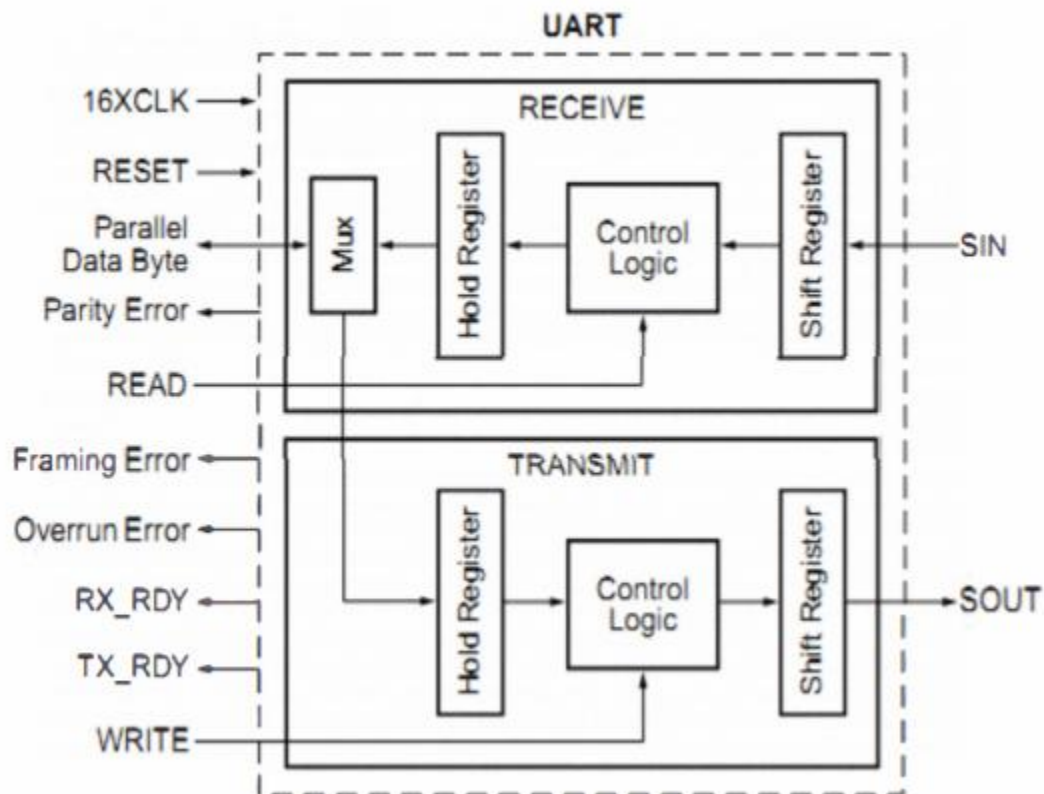


Figura 4 Diagrama a bloques UART

Fuente (Blessington et al., 2017).

3.5 I2C

La mayoría de las transmisiones seriales son de un punto a un punto, es decir, de uno a uno. Estos usan la multiplexación de los datos para el envío de mensajes a múltiples dispositivos, haciendo que la conexión sea más compleja (Hu, 2010).

Inter Integrate Circuit (I2C) es un protocolo de bus serial encontrado por Philips semiconductores, es utilizado para comunicar dispositivos de baja velocidad a procesadores, es decir, dispositivos más rápidos se puede comunicar con dispositivos más lentos sin pérdida de paquetes.

3.5.1 Especificación I2C

I2C es un bus serial de transferencia de datos por medio de 8 bits usando solo dos líneas de señal de transmisión de datos SCL y SDA, el primero es la línea de reloj la cual es unidireccional y el segundo es la línea de transmisión de datos la cual es bidireccional, ambas son usadas para hacer la transferencia de los datos entre el maestro y los esclavos (Hu, 2010).

El maestro I2C se encarga de controlar al cable de reloj, por sus siglas en inglés llamada SCL (Serial Clock). Además, el maestro se encarga de iniciar y parar la comunicación. La información binaria serial se envía sólo por la línea o cable de datos seriales, en inglés se llama SDA (Serial Data). esto ejemplificado en la Figura 5. Dos Maestros no pueden hacer uso de un mismo puerto I2C. Puede funcionar de dos maneras, como maestro-transmisor o maestro-receptor. Sus funciones principales son (Kumari et al., 2017):

- Iniciar la comunicación – S
- Enviar 7 bits de dirección – ADDR
- Generar 1 bit de Lectura o Escritura – R/W
- Enviar 8 bits de dirección de memoria
- Transmitir 8 bits de datos –
- Confirmar la recepción de datos – ACK – ACKnowledged
- Generar confirmación de No-recepción, NACK – No-ACKnowledged
- Finalizar la comunicación

El esclavo I2C, generalmente suele ser un sensor. Este elemento suministra de la información de interés al maestro. Puede actuar de dos formas: esclavo-transmisor o esclavo-receptor. Un dispositivo I2C esclavo, no puede generar a la señal SCL. Sus funciones principales son:

- Enviar información en paquetes de 8 bits.

- Enviar confirmaciones de recepción, llamadas ACK

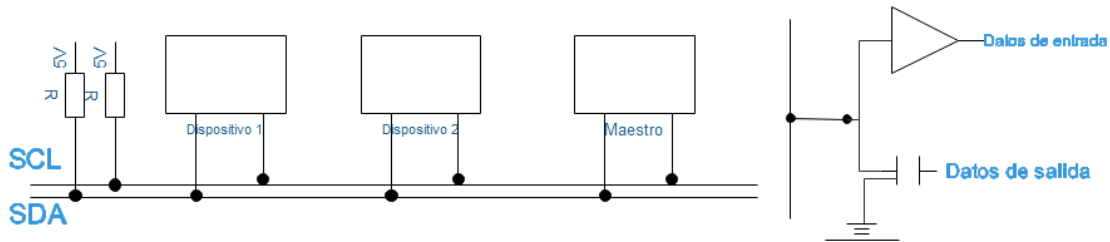


Figura 5 Especificación I2C

Fuente (Kumari et al., 2017).

3.6 ZigBee

ZigBee es un estándar que define un set de protocolos para comunicaciones a bajo-coste (Wheeler, 2007), el estándar ayuda a reducir costos de implementación simplificando los protocolos de comunicación (Alliance, 2006).

Las comunicaciones ZigBee se realizan en la banda libre de 2.4GHz. A diferencia de Bluetooth no utiliza FHSS, sino que realiza las comunicaciones a través de una única frecuencia, es decir, de un canal. Normalmente puede escogerse un canal de entre 16 posibles. El alcance depende de la potencia de emisión del dispositivo, así como el tipo de antenas utilizadas como cerámicas, dipolos, entre otras (Alliance, 2006).

3.6.1 Arquitectura del protocolo.

La forma en la que las redes se forman es usando capas de red. Cada capa es responsable de ciertas funciones en la red las capas normalmente pasan datos o comandos directamente a las capas que se encuentren arriba o debajo de ellas (Farahani, 2008).

Los dispositivos ZigBee deben respetar el estándar de WPAN de baja tasa de transmisión IEEE 802.15.4. Éste define los niveles más bajos: el nivel físico y el control de acceso al medio. El estándar trabaja sobre las bandas de radio Industriales, Científicas y Médicas (ISM por sus siglas en inglés) de uso no regulado, que son bandas reservadas internacionalmente

para uso no comercial de radiofrecuencia electromagnética en dichas áreas (Alliance, 2006). La pila del protocoló ZigBee se presenta en la Figura 6.

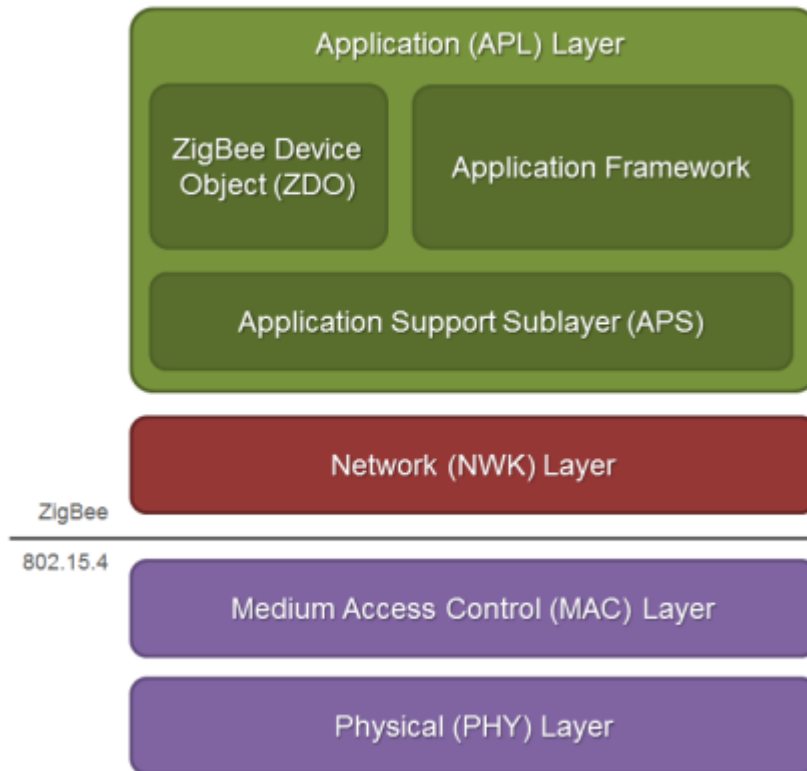


Figura 6 Pila de capas del protocolo ZigBee

Fuente (Alliance, 2006).

Como se observa en la Figura 6 la pila de capas del protocolo ZigBee está basado en el modelo OSI, el dividir un protocolo en capas tiene varias ventajas; si llegase a ocurrir algún cambio en el protocolo, sería más fácil el cambio o reemplazo de una capa que todo el protocolo (Farahani, 2008).

La capa de más bajo nivel es la capa física (PHY), que en conjunto con la capa de acceso al medio (MAC), brindan los servicios de transmisión de datos por el aire, punto a punto. Estas dos capas están descritas en el estándar IEEE 802.15.4 (Fitriawan et al., 2017).

La capa de red (NWK) tiene como objetivo principal permitir el correcto uso del subnivel MAC y ofrecer una interfaz adecuada para su uso por parte de la capa de aplicación. En esta

capa se brindan los métodos necesarios para: iniciar la red, unirse a la red, enrutar paquetes dirigidos a otros nodos en la red, proporcionar los medios para garantizar la entrega del paquete al destinatario final, filtrar paquetes recibidos, cifrarlos y autentificarlos.

La siguiente capa es la de aplicación que es la responsable de mantener el rol que el nodo juega en la red, filtrar paquetes a nivel de aplicación, mantener la relación de grupos y dispositivos con los que la aplicación interactúa y simplificar el envío de datos a los diferentes nodos de la red. La capa de Red y la capa de aplicación. Es en esta última capa donde se encuentran los ZDO que se encargan de definir el papel del dispositivo en la red, si el actuara como coordinador, router o dispositivo final; la subcapa APS y los objetos de aplicación definidos por cada uno de los fabricantes.

La capa Física y Mac situadas el fondo de la pila están definidas por el estándar IEEE 802.15.4(Ramachandran et al.,2006), y las capas de red, aplicación y seguridad adoptan estas capas como parte del protocolo de red ZigBee.

3.6.2 Espectro ZigBee.

La característica fundamental del estándar 802.15.4 entre las WPAN son los costos de fabricación excepcionalmente bajos por medio de la sencillez tecnológica, sin perjuicio de la generalidad o la adaptabilidad.

Se definen hasta 16 canales en el rango de 2,4 GHz, cada uno de ellos con un ancho de banda de 5 MHz.

Un dispositivo que implementa el estándar IEEE 802.15.4 puede transmitir en una de tres posibles bandas de frecuencia (Alliance, 2006).

- 868-868,8 MHz: Europa, permite un canal de comunicación.
- 902-928 MHz: Norte América, hasta diez canales.
- 2400-2480 MHz: uso en todo el mundo, hasta dieciséis canales.

3.6.2.1 Diferencia de espectro de los estándares 802.11b y 802.15.4 y Bluetooth

IEEE 802,11 es una familia de estándares; IEEE 802.11 b se selecciona aquí porque opera en una banda de 2,4 GHz, que es común con Bluetooth y ZigBee. IEEE 802.11 b tiene una alta velocidad de datos (hasta 11 Mbps), y proporcionar una conexión inalámbrica a Internet es una de sus aplicaciones típicas. La gama de interiores de IEEE 802.11 b es típicamente entre 30 y 100 metros. Bluetooth, por otro lado, tiene una velocidad de datos más baja (menos de 3 Mbps) y su rango interior es típicamente de 2 – 10 metros. Una aplicación popular de Bluetooth es en los auriculares inalámbricos, donde Bluetooth proporciona los medios para la comunicación entre un teléfono móvil y un auricular manos libres. ZigBee tiene la menor velocidad de datos y complejidad entre estos tres estándares y proporciona una vida útil de la batería significativamente mayor, Si el objetivo de la comunicación inalámbrica es transmitir y recibir comandos simples y/o recopilar información de sensores como sensores de temperatura o humedad, ZigBee proporciona la mayor potencia y la solución más rentable en comparación con Bluetooth e IEEE 802.11 b la Tabla 2 se muestra una comparativa entre estos 3 estándares (Farahani, 2008).

	Velocidad de datos	Alcance	Aplicaciones
Zigbee	20 a 250 Kbps	10-100 mts	Wireless sensor network
Bluetooth	1 a 3 Mbps	2-10 mts	auriculares, mouse, transferencia de datos
IEEE 802.11b	1 a 11 Mbps	30-100 mts	Internet

Tabla 2 Comparativa entre ZigBee, Bluetooth e IEEE 802.11 b

3.6.2.2 ZigBee vs IEEE 802.11 b

Los dispositivos ZigBee (802.15.4) y (802.11 b) trabajan en la frecuencia 2.4 GHz, la cual abarca de los 2400 MHz hasta 2480 MHz.

Lo primero que hacen es repartir esos 80MHz en los diferentes canales, utilizando una técnica llamada Acceso Múltiple de División de Frecuencias (FDMA).

WIFI crea hasta 12 canales de un ancho de banda de 22 MHz cada uno y ZigBee como se mencionó anteriormente hasta 16 canales de un ancho de banda de 5 MHz.

En el estándar 802.15.4, la frecuencia en 2.4 GHz está distribuida en sus 16 canales en base a su ancho de banda Figura 7, por lo que tiene menor interferencia en la transmisión de señales, por otro lado, en el estándar 802.11, exclusivamente en tres de sus doce canales no existiría interferencia, dichos canales son el 1,6, y 11, que precisamente los que utilizan la mayoría de las redes IEEE 802.11 b, como se ve visualiza en la Figura 7.

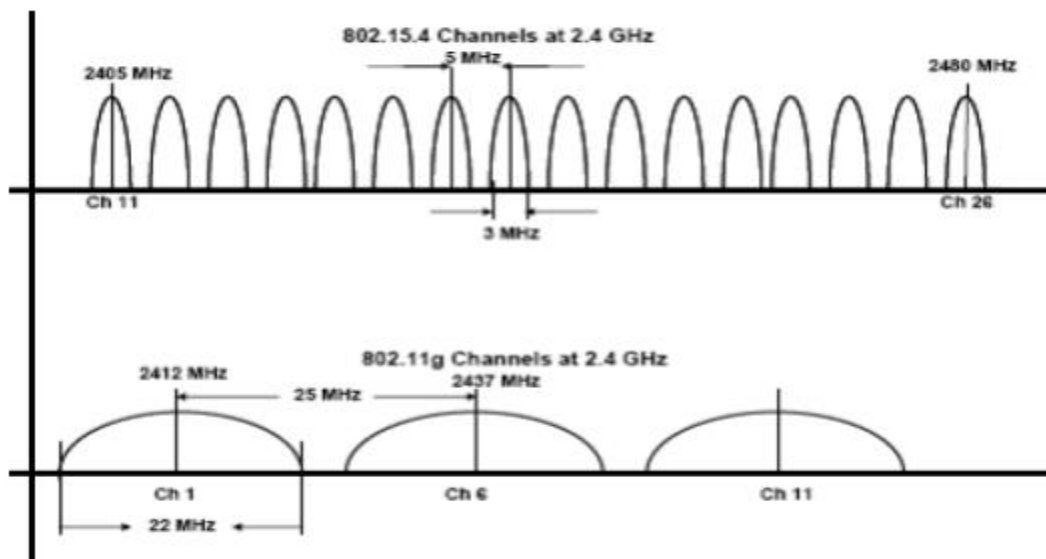


Figura 7 Diferencia espectro ZigBee y IEEE 802.11 b

3.6.3 Funcionalidad.

- Dispositivo de funcionalidad completa (FFD por sus siglas en inglés): este puede encaminar mensajes en la red, que lo distingue de los RFD.
- Dispositivo de funcionalidad reducida (RFD por sus siglas en inglés): estos tienen necesidades de comunicación más limitada, por lo tanto, sólo pueden comunicarse con los FFD, y no podrían llegar a ser coordinadores.

Toda red necesita al menos de un FFD que debe tener la función de coordinador. En las redes de sensores los dispositivos cuentan con un identificador único de 64 bits, aunque si se dan las condiciones podrían utilizarse identificadores de 16 bits.

Las redes de área personal PAN (Personal Area Network) punto a punto pueden formar patrones arbitrarios de conexiones y su extensión está limitada únicamente por la distancia entre los nodos. Forman la base de redes AD-HOC auto organizativo. El estándar no define un nivel de red, porque no se soportan funciones de ruteo de forma directa, aunque si dicho nivel se añade pueden realizarse comunicaciones en varios saltos.

En concreto el estándar indica el árbol de clústeres como una estructura que aprovecha que los RFD solo pueden conectarse con un FFD al tiempo de formar una red, con esta condición se pueden formar redes en malla genéricas cuyos nodos sean árboles de clúster con un coordinador local para cada clúster, junto con un coordinador global (Digi, 2015). En la Figura 8 se muestra una la estructura de un árbol de clúster.

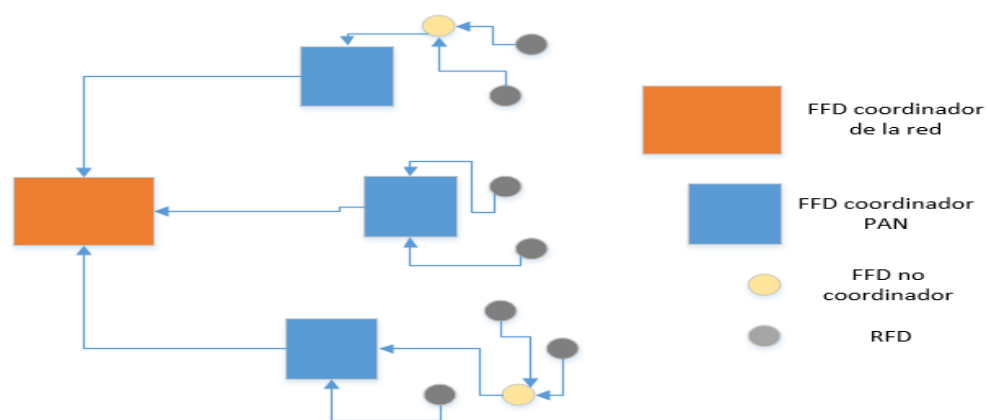


Figura 8 Árbol de clústeres.

3.6.4 Topologías

El protocolo ZigBee permite tres topologías de red:

- Topología en estrella: el coordinador se sitúa en el centro.
- Topología en árbol: el coordinador será la raíz del árbol.

- Topología en malla: los nodos se pueden conectar a múltiples nodos en el sistema y pasar los datos por el camino de mayor confiabilidad.

En la Figura 9 se observan las topologías descritas para el protocolo ZigBee.

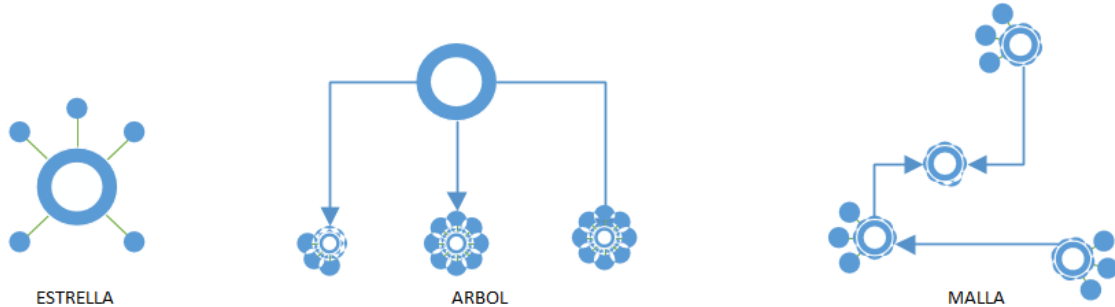


Figura 9 Topologías WSN.

De las topologías que utiliza el protocolo ZigBee es la topología en malla la más adecuada ya que esta permite que si en un momento dado, un nodo del camino falla y se cae, pueda seguir la comunicación entre todos los demás nodos debido a que se rehacen todos los caminos. La administración de los caminos es tarea del coordinador (Digi, 2015).

3.6.4.1 Topología en malla.

Una red en malla tiene tres beneficios importantes:

- Ruteo: el mensaje se propaga saltando de nodo en nodo hasta llegar a su destino final.
- Creación Ad – Hoc: este es un proceso automático para crear la red sin intervención humana.
- Auto organizativo: otra de las ventajas es que si un nodo era utilizado para enviar información de un nodo a otro y este deja de funcionar, la red buscará el mejor camino para lograr alcanzar su destino.

En la Figura 10 se ejemplifica que el nodo A requiere alcanzar el nodo B.

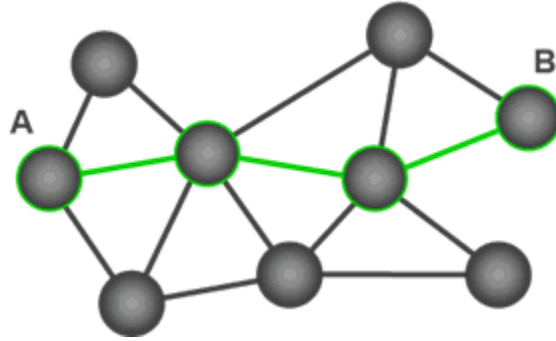


Figura 10 Ruta entre A y B

En una red en malla la distancia entre los nodos no es relevante si se quiere llegar del nodo A al B, mientras existan los nodos necesarios para llevar el mensaje de un nodo al otro.

Si un nodo en la red deja de operar, los demás nodos ayudarán a que el mensaje llegue desde A hasta B. como se ve en la Figura 11. (Digi, 2015)

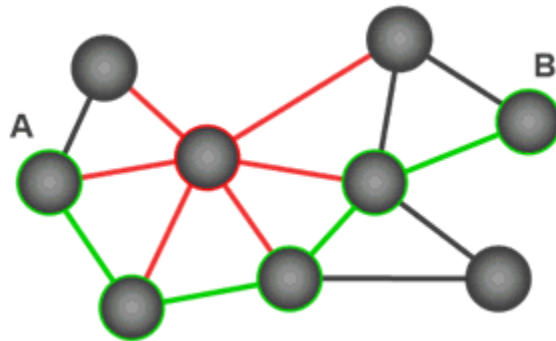


Figura 11 Mejor camino cuando un nodo deja de funcionar

3.6.5 Dispositivos ZigBee

Los dispositivos ZigBee son aquellos que conforman la red y estos pueden ser:

- Coordinador.
- Router.

- Dispositivo final.

En la Figura 12 se observa una distribución de los dispositivos ZigBee.

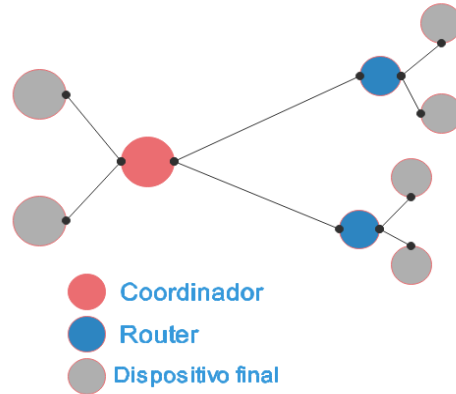


Figura 12 Dispositivos ZigBee

3.6.5.1 Coordinador.

El Coordinador ZigBee cuenta con las siguientes funciones:

- Iniciar la Red.
- Seleccionar el PAN ID (Identificador de Red de Área Personal) para la red.
- Permitir a los dispositivos ingresar o dejar la red.
- Ejecutar todas las funciones del router ZigBee.
- Servir como centro de seguridad en una red con seguridad.

3.6.5.2 Router.

El Router ZigBee (ZR) tiene las siguientes funciones: Enrutar datos entre dispositivos ZigBee.

- Permitir a los dispositivos ingresar o dejar la red.

- Manejar los mensajes para los dispositivos finales hijos.
- Opcionalmente ejecutar todas las funciones de los dispositivos finales.

3.6.5.3 Dispositivo final.

El ZED, (ZigBee End Device) es un RFD, con las siguientes funciones:

- Entrar en modo de sueño para almacenar energía.
- Requiere de pocos recursos de memoria, porque no almacena la información de la red y no ejecuta servicios de red (Farahani, 2008)

3.6.6 Comunicación de los dispositivos Xbee.

En una red ZigBee la comunicación se da inalámbricamente entre los módulos Xbee, sin embargo, pueden comunicarse con dispositivos inteligentes por interfaz serial. Los dispositivos inteligentes como microcontroladores o PC pueden controlar los módulos Xbee y así manipular los mensajes que llegan de forma inalámbrica (Digi, 2015).

Se pueden identificar dos maneras de comunicarse en los procesos de comunicación en los módulos Xbee, como se observa en la Figura 13:



Figura 13 Comunicación entre dispositivos Xbee

Fuente (Digi, 2015).

- Comunicación inalámbrica: Esta es entre los dispositivos Xbee, para que esta comunicación se logre, los módulos deben pertenecer a la misma red, así como estar en la misma frecuencia.

- Comunicación Serial: esta se da entre el dispositivo Xbee y el dispositivo inteligente, conectados mediante interfaz serial.

3.6.7 Modo API.

Los módulos XBEE por defecto están configurados en modo transparente y todos los datos enviados serán recibidos de igual manera, sin ninguna información adicional.

Para minimizar las limitaciones de trabajar en modo transparente, se tiene una alternativa que es trabajar en modo interfaz de programación para la aplicación (API), esta tiene una estructura donde los datos vienen organizados en paquetes en un determinado orden, lo que permite tener una comunicación más compleja entre los módulos XBEE sin que se tenga que definir un propio protocolo (Digi, 2015).

3.6.7.1 Estructura de un paquete en modo API

Los paquetes llamados frame en el modo API enviados desde el puerto serial a un dispositivo en modo inalámbrico contienen los datos enviados y alguna información adicional. En la Figura 14 se observa la estructura de un paquete API.:

```
IO Data Sample RX Indicator (API 1)
7E 00 12 92 00 13 A2 00 41 53 1C B9 69 CF 01
01 00 00 08 00 97 76
```

Figura 14 Estructura de un paquete API

En la Tabla 3 se describe cada uno de los elementos de la estructura del paquete API representado en la Figura 14.

7E	Inicio del frame.
00 12	Longitud del frame.
92	Tipo de frame.
00 13 A2 00 41 53 1C B9	Dirección Mac.
69 CF	Dirección de red (del coordinador).
01	Opciones de recepción.
01	Número de la muestra.
00 00	Digital
08	Análogo (número de pin).
00 97	Por cada pin analógico activo habrá dos bytes.
76	Checksum.

Tabla 3 Descripción de elementos de un paquete API

3.6.8 Especificaciones de los dispositivos.

Especificaciones de los dispositivos Xbee, con el propósito de que se puedan obtener resultados reales de las evaluaciones, son mostradas en la Tabla 4.

TABLA DE ESPECIFICACIONES Xbee S2	
Alcance indoor	poco mas de 40 mts
Alcance outdoor	poco mas de 120 mts
Potencia de transmisión	3 dBm
RF	250 Kbps
Sensibilidad de recepción	-95 dBm
Requerimientos de energía	
Voltaje	2.8-3.3V
General	
Frecuencia	2.4 GHz
Dimensiones	2.43 cm X 2.76 cm
Temperatura para operar	-40 a 85 grados
Tipos de antena	Whip, Chip, RPSMA o UFL
Topologías	Arbol, Estrella, Malla
Número de canales	16

Tabla 4 Especificaciones Xbee S2C

3.7 Pérdida de Trayectoria (Path Loss).

La pérdida de trayectoria entre un par de antenas es la relación entre la potencia transmitida y la recibida, generalmente expresado en decibelios. Incluye todos los posibles elementos de pérdida asociados con interacciones entre la onda de propagación y cualquier objeto entre la transmisión y la antena receptora (Saunders et al., 2007). En la Figura 15 se observan los elementos de un sistema de comunicaciones inalámbrico.



Figura 15 elementos de un sistema de comunicaciones inalámbrico

Fuente (Saunders et al., 2007).

De la Figura 15 se puede expresar la potencia en el receptor como:

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r}{L_t L_r} \quad (1)$$

Todas las ganancias G y pérdidas L expresados en potencia de radio y las potencias expresadas en watts, la ganancia de las antenas se consideran antenas isotrópicas, estas radian en todas las direcciones en potencias semejantes, los valores usados son los que corresponden a la dirección de la antena y no necesariamente es el valor máximo la potencia isotrópica efectivamente radiada (EIRP por sus siglas en inglés) está dada por:

$$EIRP = \frac{P_t}{G_t} = P_{ti} \quad (2)$$

Donde P_{ti} es la potencia isotr3pica transmitida y P_{ri} es la potencia isotr3pica recibida

$$P_{ri} = \frac{P_{rLr}}{G_r} \quad (3)$$

La ventaja de expresar la potencia en t3rminos de EIRP es que la p3rdida del camino, L , puede expresarse independientemente de los par3metros del sistema defini3ndolo como la relaci3n entre el EIRP transmitido y el recibido, o la p3rdida que se experimentaría en un sistema donde las p3rdidas del alimentador eran cero y las antenas eran radiadores isotr3picos ($G_t=1$, $G_r=1$).

$$\text{Perdida de trayectoria, } L = \frac{P_{ti}}{P_{tr}} = \frac{P_t G_t G_r}{P_r L_r L_t} \quad (4)$$

El objetivo de modelo la propagaci3n es predecir L con la mayor precisi3n posible, lo que permite determinar el alcance de un sistema de radio antes de la instalaci3n, El alcance m3ximo del sistema se produce cuando la potencia recibida desciende por debajo de un nivel que proporciona una calidad de comunicaci3n aceptable esto es conocido como la sensibilidad de recepci3n; El valor de L para el que se recibe este nivel de potencia es la p3rdida de trayecto aceptable m3xima. Es habitual expresar la p3rdida de la trayectoria en decibelios, por lo que:

$$L_{db} = 10 \text{ Log} \left(\frac{P_{ti}}{P_{ri}} \right) \quad (5)$$

3.8 Modelos de propagaci3n.

Los modelos de propagaci3n a menudo se basan en modelos probabilísticos. Entonces estos pueden calcular con una probabilidad si la se3al llegara de un punto a otro, se pueden expresar en conjuntos de expresiones matem3ticas, diagramas y algoritmos para representar las característic3s de radio de un ambiente dado (Alfonso et al. , 2009).

Los cuales permiten obtener una noción estimada de la pérdida de potencia de la señal electromagnética que se propaga en un entorno y que es recibida en algún punto.

No existe un modelo que brinde exactamente la pérdida en diferentes puntos de todos los entornos de programación.

Tipos de modelo de propagación:

- Modelos empíricos: son aquellos basados en medidas realizadas sobre un entorno en particular.
- Modelos semi - empíricos: se toman en cuenta medidas realizadas, pero éstas luego se ajustan a un modelo establecido teóricamente.

El diagrama de radiación de una antena es una trama de la radiación de campo lejano de la antena. Más concretamente, es una trama de la potencia irradiada desde una antena por unidad de ángulo sólido, o su intensidad de radiación U [vatios por unidad de ángulo sólido]. Esto se llega simplemente multiplicando la densidad de potencia a una distancia dada por el cuadrado de la distancia r , donde la densidad de potencia S [vatios por metro cuadrado] viene dada por la magnitud del vector promediado en el tiempo (Saunders et al., 2007).

$$U = r^2 S \quad (6)$$

Esto tiene el efecto de eliminar el efecto de la distancia y de asegurar que el diagrama de radiación es el mismo a todas las distancias de la antena, siempre que r está dentro del campo lejano. El ejemplo más simple es una antena idealizada que irradia por igual en todas las direcciones, una antena isotrópica. Si la potencia total irradiada por la antena es P , entonces la potencia se propaga sobre una esfera de radio r , por lo que la densidad de potencia a esta distancia y en cualquier dirección es:

$$S = \frac{P}{area} = \frac{P}{4\pi r^2} \quad (7)$$

Teorema de reciprocidad: Si se aplica un voltaje a los terminales de una antena A y la corriente medida en los terminales de otra antena B, entonces se obtendrá una corriente igual en los terminales de la antena A si se aplica el mismo voltaje a los terminales de la antena B

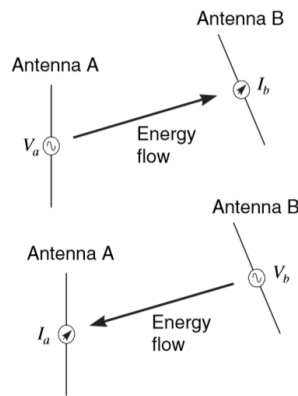


Figura 16 Teorema de reciprocidad

Así en la Figura 16 si $V_a = V_b$, donde el teorema dice que $I_a = I_b$. Entonces $\frac{V_a}{I_a} = \frac{V_b}{I_b}$.

Si una antena se utiliza para recibir una onda con una densidad de potencia $S [W m^2]$, producirá una potencia en su impedancia de terminación (generalmente una impedancia de entrada del receptor) de PR Watts. La constante de proporcionalidad entre PR y S es Ae , la apertura efectiva de la antena en metros cuadrados:

$$Pr = AeS \quad (8)$$

La ganancia de la antena G está relacionada a la apertura efectiva como sigue

$$G = \frac{4\pi}{\lambda^2} Ae \quad (9)$$

Al realizar los enlaces punto a punto es preferible usar la ecuación de transmisión en espacio libre (Alfonso et al. , 2009).

Ahora supongamos que la antena A y la antena B en la Figura 16 están dispuestas de tal manera que sus direcciones de máxima ganancia están alineadas, sus polarizaciones coinciden y están separadas por una distancia r , lo suficientemente grande como para que las antenas estén en las regiones de campo lejano de cada uno. Si la entrada de energía a la antena A es PT , entonces el incidente de la densidad de potencia en la antena B en la ecuación 2 es.

$$S = \frac{PtGa}{4\pi r^2} \quad (10)$$

Donde:

G es la ganancia máxima de la antena

A, aplicando la ecuación 3 la potencia recibida de la antena B será.

$$Pr = \frac{PtGaAeb}{4\pi r^2} \quad (11)$$

Donde:

Aeb es la apertura efectiva de la antena B, si sustituimos Aeb entonces las potencias de recepción y transmisión serán:

$$\frac{Pr}{Pt} = GaGb\left(\frac{\lambda}{4\pi r}\right)^2 \quad (12)$$

Donde:

Ga y Gb son las ganancias de las antenas.

r es la distancia entre las antenas

λ es la onda de transmisión.

la ecuación 12 vista en la forma de la ecuación 4 en orden de expresarla como la pérdida de propagación en el espacio abierto (Free Space Loss):

$$L_f = \frac{P_t G_a G_b}{P_r} = \left(\frac{4\pi r}{\lambda}\right)^2 = \left(\frac{4\pi r f}{c}\right)^2 \quad (13)$$

La ecuación 13 para el modelo de transmisión en espacio libre se basa en la distancia (d) en kilómetros y la frecuencia (Megahertz), su forma en decibeles es:

$$L_{bf} = 32.4 + 20 \log f + 20 \log d \quad (14)$$

Donde:

L_{bf} : es la pérdida de la potencia de la señal basada en la frecuencia.

f : frecuencia en MHz.

d : distancia en Km.

Así la pérdida libre en el espacio incrementa 6 dB siempre que se duplique la frecuencia o la distancia.

3.8.1 Modelo dependiente de las particiones de un sitio.

Este modelo es aplicado generalmente con todas las particiones (obstáculos) que se puedan encontrar entre la onda electromagnética del emisor y el receptor. Este modelo está dado por la ecuación siguiente (Alfonso et al. , 2009):

$$L_{pc} = L_o + 20 \log d + \sum m_{tipo} + w_{tipo} \quad (15)$$

Donde:

*m*_{tipo}: número de partición de un tipo en particular.

*w*_{tipo}: pérdida de potencia del tipo de partición.

*L*_o: pérdida de la potencia de la señal a una distancia de 1 m.

Se requiere desglosar la ecuación 2 para obtener la pérdida de la señal dependiente de particiones (obstáculos).

La pérdida de señal en 1 metro (*L*_o) está dada por la siguiente ecuación:

$$L_o = -10 \log G_t G_r (\lambda/4\pi)^2 \quad (16)$$

Donde:

*G*_t: ganancia de la antena transmisora.

*G*_r: ganancia de la antena receptora.

λ : longitud de onda de la portadora.

Se obtiene el valor de la longitud de onda para poder usarla en la ecuación 16.

λ : Longitud de onda está dada por la siguiente ecuación

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (17)$$

Donde:

c: velocidad de la luz ($c = 3 * 10^8$ m/s)

f: frecuencia en metros ($2.4 * 10^9$ 1/s)

Despejando para obtener la longitud de onda y sustituirla en la ecuación 16

Por lo tanto:

$$\lambda = \frac{3 * 10^8 \text{ m/s}}{2.4 * 10^9 \text{ 1/s}} = 0.125 \text{ m} \quad (18)$$

3.9 Sistemas de control

Estos se hallan en nuestras vidas cotidianamente, que van desde sistemas de calefacción para el hogar o sistemas de seguridad para evitar intrusos. Existen sistemas de control más complejos como los utilizados para la automatización de procesos en la industria textil, alimenticia, farmacéutica, automotriz, entre otras (Fusario et al., 2012).

- Los sistemas tienen diferentes elementos, los cuales pueden conformar pequeños subsistemas entre ellos.
- Un sistema automatizado posee dispositivos que realizan acciones de control, procesamientos, medición de variables, entre otros, los cuales se consideran subsistemas.
- Un sistema debe permanecer en equilibrio a pesar de variaciones en el ambiente, esto hace que los sistemas también puedan ser dinámicos.

3.9.1 Clasificación de los sistemas de control

Sistemas no lineales: Son aquellos en que las ecuaciones que describen su comportamiento no son lineales y no, responden al principio de superposición, como ejemplo de ellos tenemos sistema de clima, la óptica, teoría de la relatividad, entre otros.

Sistemas lineales: En estos las ecuaciones que controlan su comportamiento son lineales y responden al principio de superposición; los sistemas lineales son predecibles y la salida que estos dan se puede obtener de la función de transferencia y la multiplicación de la señal de entrada.

Sistemas de control de lazo abierto: Estos no pueden hacer ajustes en la salida del sistema ya que no tienen realimentación como se puede observar en la Figura 17

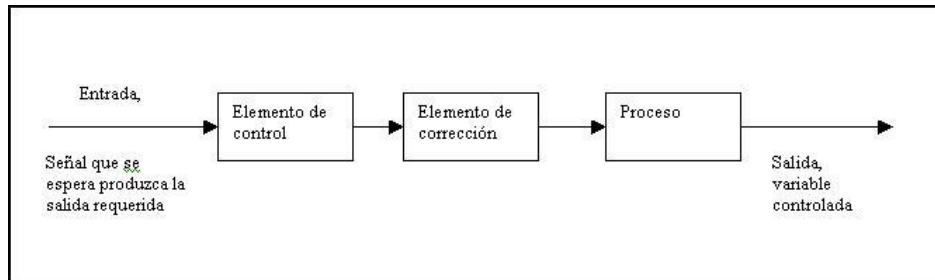


Figura 17 Sistema de lazo abierto

Fuente: (Fusario et al., 2012).

Sistemas de control de lazo cerrado: En estos sistemas, si es posible ajustar la salida del sistema al tener realimentación como se puede observar en la Figura 18 (Fusario et al., 2012).

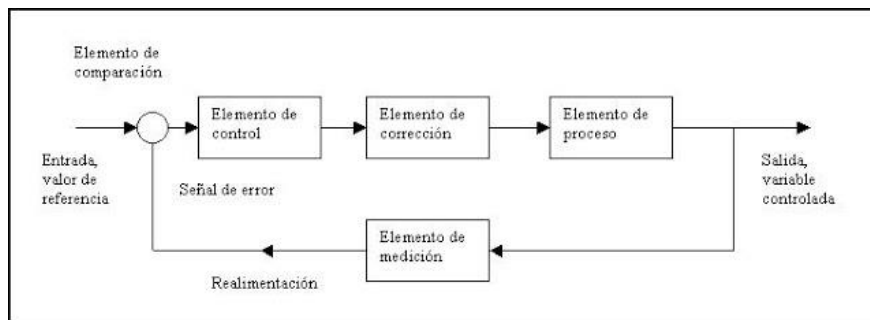


Figura 18 Sistema de lazo cerrado

Fuente (Fusario et al., 2012).

3.10 Función de transferencia

EL modelo matemático de un sistema posibilita relacionar las entradas con las salidas de forma que se constituye en una réplica de estas relaciones. Así las relaciones reales de un sistema se pueden sustituir por expresiones matemáticas que las representen, es decir, la función de transferencia del sistema (Fusario et al., 2012), expresado a continuación:

$$FT = \frac{\text{Salida en estado Estable}}{\text{Entrada en estado Estable}} \quad (19)$$

3.10.1 Modelo matemático para sistemas de lazo cerrado

Se tiene una función de transferencia como sigue

$$FT = \frac{\text{Salida}}{\text{Entrada}} = \frac{Si}{So} \quad (20)$$

Donde:

Si es el valor de referencia (entrada)

So el valor de la salida

En la Figura 19 se puede observar un sistema de lazo cerrado.

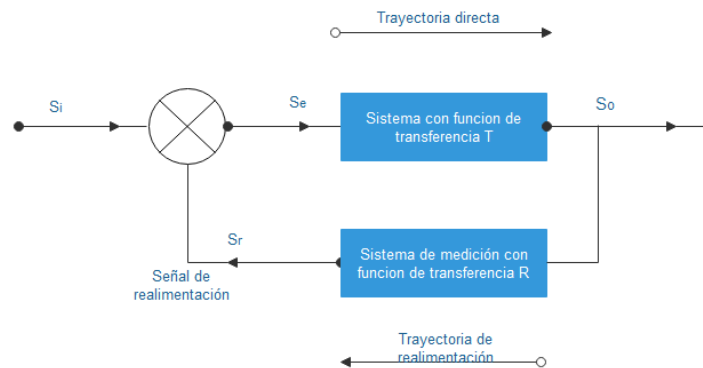


Figura 19 Sistema de lazo Cerrado

Fuente: (Fusario et al., 2012).

Cada subsistema en el sistema global tiene su propia función de transferencia como se observa en la Figura 19 en la trayectoria directa la TF es T y en la de realimentación es R .

Un ejemplo de función de transferencia tomando como referencia la Figura 19 sería:

$$\text{Función de transferencia } \frac{S_o}{S_i} = \frac{T}{1 + TR} \quad (21)$$

3.11 Control PID

PID: acción de control proporcional-integral-derivativa, esta acción combinada reúne las ventajas de cada una de las tres acciones de control individuales. La ecuación de un controlador con esta acción combinada se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$M(s) = K_p E(s) + K_i E(s)/s + K_d s E(s) + \text{BIAS} \quad (22)$$

Donde:

K_p es la ganancia del modo de control proporcional.

$E(s)$ es el error que se obtiene al comparar el punto de ajuste con la variable que se encuentra controlando.

K_i es la ganancia del modo de acción integral.

K_d es la ganancia del modo de acción derivativo

$Bias$ es el valor que el sistema necesita para cuando el sistema se encuentre en el punto óptimo (cuando el error sea cero).

Exista una salida del controlador de tal manera que mantenga en equilibrio al sistema y justamente en el punto que se requiere (set point). En la Figura 20, se muestra el diagrama a bloques general de un sistema con controlador PID:

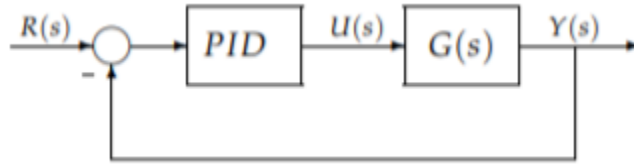


Figura 20 Diagrama a bloques de un PID

3.12 Robustez

La robustez se refiere a “la fuerza o la capacidad de los elementos, sistemas y otras unidades de análisis para soportar un nivel dado de estrés o demanda sin sufrir degradación o pérdida de función” (Havidán et al., 2017).

La robustez es otro concepto a menudo confundido con resiliencia. La robustez está estrechamente relacionada con el riesgo. La robustez denota el grado en que un sistema puede soportar una amenaza o cambio interno o externo inesperado sin degradación en el rendimiento del sistema (Networks, 2018).

La robustez describe la forma en que una aplicación maneja las excepciones y los eventos imprevistos. Tales eventos pueden ocurrir, por ejemplo, cuando el rendimiento del equipo no es suficiente para representar los datos, o cuando una conexión de red es demasiado lenta para transferir los datos a la velocidad requerida (Steinmetz et al., 2004).

Cuando la resiliencia es considerada como tolerancia a fallas aleatorias de los componentes de la red, comúnmente se le llama robustez literatura, los conceptos flexibilidad y confiabilidad están relacionados también.

Así bien en lo referente a esta tesis consideraremos a la robustez como la habilidad de alcanzar un nodo destino incluso con fallas en la red, un sistema es robusto, si la severidad de un falla es inversamente proporcional a la probabilidad de ocurrencia de fallas, es decir, las fallas que pudiesen ocurrir con frecuencia no deberían afectar la calidad del sistema; sin importar el origen de la falla el sistema debe tratar de recuperarse lo más pronto posible para así minimizar el impacto del fallo (Kopetz, 2011) .

Las redes de comunicaciones se han usado para transmitir datos e instrucciones para monitoreo de procesos y control; El diseñador de una red debe evaluar la necesidad de redundancia de la red, componentes y cableado, así como las instalaciones de prueba de errores y corrección de errores, para proporcionar una red que satisfaga las necesidades del sistema para la que se diseñó.

Las tecnologías inalámbricas, como la radio de baja potencia y el microondas, se han utilizado para controlar algunos equipos, pero siempre deben usarse con precaución, ya que los riesgos asociados con la protección de la planta, así como la seguridad de quienes operan siempre debe ser considerada. Normalmente, estas tecnologías se utilizan en áreas relativamente pequeñas y principalmente para transmitir señales de monitoreo (Ratnayaka et al., 2009).

3.13 RSSI.

Existen diferentes formas de medir la potencia de una señal de radiofrecuencia recibida por un dispositivo.

La potencia puede medirse en:

- Watts (W).
- mili Watts (mW).
- Valores logarítmicos en decibeles.

Para medir la potencia recibida de un dispositivo la medida en valores logarítmicos es la elegida, debido al amplio rango de valores que la potencia puede tomar.

En las comunicaciones inalámbricas la potencia recibida presenta valores muy bajos, por ejemplo, los valores típicos para estas potencias comprenden entre -90 decibeles y 20 decibeles.

3.14 Indicador del enlace de la señal

El indicador del enlace la señal LQI (Link Quality Indicator) sirve para medir la calidad de los paquetes recibidos por el receptor. Se puede utilizar el RSS para medir la calidad del enlace. La relación de la energía de señal deseada a la energía de ruido total (la relación señal a ruido, o SNR) es otra forma de medir la calidad de la señal. Como regla general, una SNR más alta se traduce en una menor probabilidad de error en el paquete. Por lo tanto, una señal con SNR alta se considera una señal de alta calidad. La calidad del enlace también se puede calcular utilizando tanto la energía de la señal como la relación señal / ruido (Farahani, 2008).

La medición de LQI se realiza para cada paquete recibido. El LQI debe tener al menos ocho niveles únicos. El LQI se reporta a la capa MAC y está disponible para las capas NWK y APL para cualquier tipo de análisis (Farahani, 2008).

CAPITULO 4

4 PROPUESTA GENERAL DEL PROYECTO

El presente proyecto tiene como finalidad la obtención de datos ya sea de prototipos, invernaderos, casas inteligentes, ya que los datos son la parte fundamental de un sistema ciber-físico. Una conceptualización de lo que se refiere con el ciclo de los datos se observa en la Figura 21.

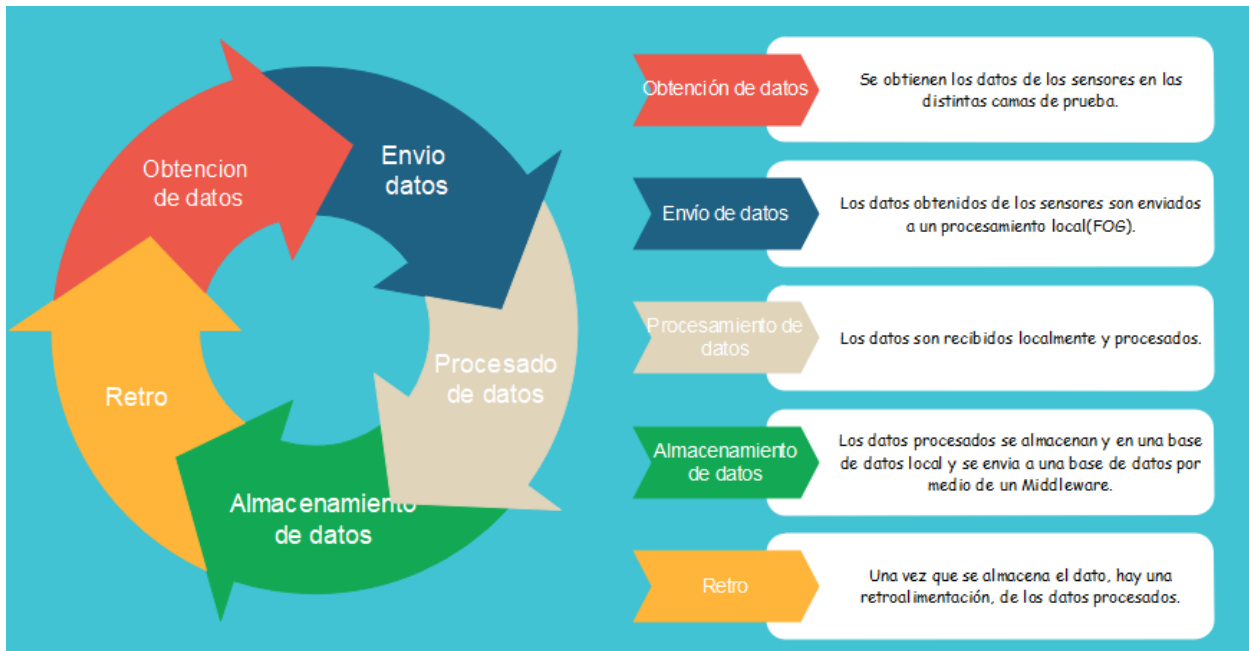


Figura 21 Ciclo de los datos

Para que este ciclo de los datos de cumpla debe haber una o varias capas contenidas en una arquitectura que sean capaces de proporcionar la suficiente robustez en las comunicaciones, como se verá a partir del siguiente subtema.

4.1 Arquitectura de la propuesta

Basados en la arquitectura de cinco niveles propuesta por (Bahga et al., 2014) en la cual tiene como base el tener dispositivos coordinadores y routers para llevar la información hasta la nube visto en el capítulo 3.3, se propone esta arquitectura de 5 niveles donde se reforzará el uso de la capa fog que se puede observar en la Figura 22, donde esta tendrá también el control de los protocolos de comunicación y la formación de las redes

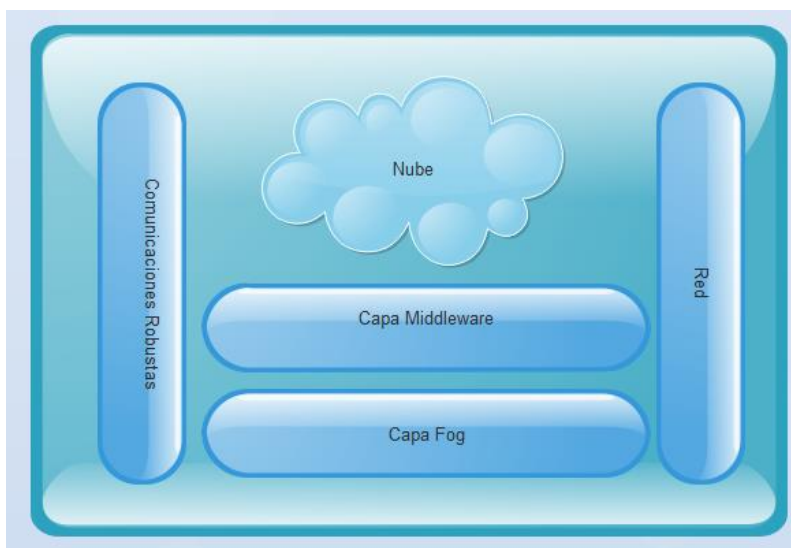


Figura 22 Arquitectura propuesta

A continuación, se explicará cada una de las capas de la arquitectura propuesta.

Capa fog, su importancia recae en que será la parte física y local. En el sistema, en esta capa se tendrán las comunicaciones entre los diversos sistemas para la obtención de los datos de los sensores, estableciendo en esta capa los protocolos que se usarán para la comunicación como:

- ZigBee
- UART
- I2C

Estos protocolos han sido elegidos y que se comunican entre ellos de maneras similares, donde ZigBee tiene un coordinador, I2C tiene un maestro y, donde se tienen routers o

dispositivos finales en I2C se consideran esclavos, ambos protocolos interactúan con un coordinador por medio de UART.

Capa Middleware, esta capa es de suma importancia ya que tiene en su funcionamiento el poder interactuar entre la capa fog y la capa nube, esta se encargará de recibir y enviar los datos que entre las dos capas requieran.

Capa de red y comunicaciones robustas, se proponen como capas transversales en toda la arquitectura, esto con el fin de que siempre se tenga presente que se necesita tener comunicaciones robustas para la red que se quiera diseñar, siempre considerando las tres capas que intervienen en todo el proceso.

Se debe mencionar que la capa fog es la capa donde se realizan las pruebas, esto dado a que se delimita el proyecto a trabajar de forma local, si no sería muy extenso y se valida la robustez a partir de esa capa, a partir de este punto se centrará en la capa fog de la arquitectura propuesta.

La interacción entre las capas se puede observar en la Figura 23, donde la capa fog, tendrá de manera local la formación de la red, y estará almacenando datos en un servidor local (FS), pasando después a un servidor Middleware y, gestionar los datos entre la capa fog y Nube.

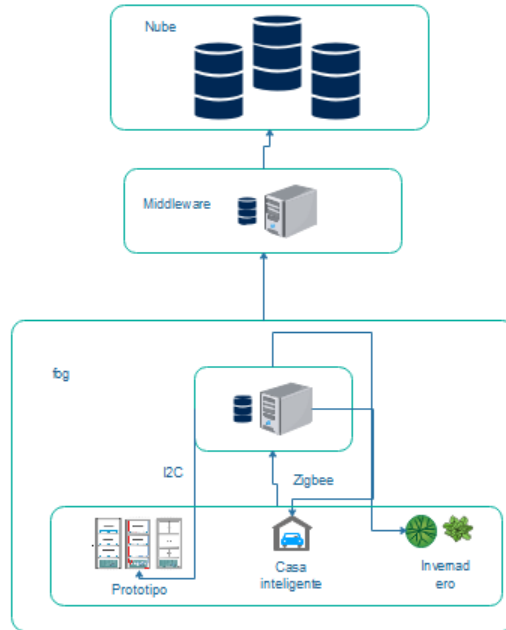


Figura 23 Interacción entre capas de la arquitectura propuesta

4.1.1 Capa fog

En la capa fog tenemos los tipos de sistemas en red que manejará, se tiene el protocolo ZigBee y, el protocolo I2C, donde ambos interactúan con un controlador central comunicándose vía UART como se observa en la Figura 24. Cada lado del sistema es en sí un subsistema los cuales interactúan entre ellos, pero son independientes entre sí.



Figura 24 Capa fog

Se optó por un sistema con esta estructura puesto que la capa fog se representará como un sistema de sistemas, es decir, tanto en comunicaciones ZigBee como en comunicaciones I2C,

que a su vez utilizan UART para entregar los datos en un esquema Maestro-Esclavo. En la Figura 25 se observa la integración de los protocolos como parte de la solución.

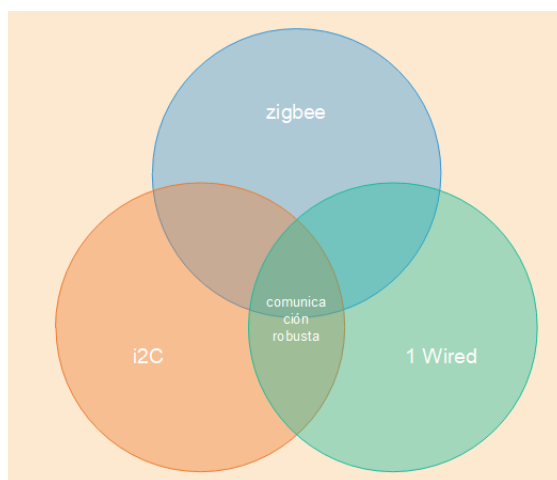


Figura 25 Punto de unión entre protocolos

Se define entonces el funcionamiento de los elementos de la capa fog observado en la Figura 26.

- *Servidor local o fog systems (FS)*.: este será el encargado de recibir toda la data que sea generada de los sistemas, esta capa interactúa directamente con el coordinador, para recibir los datos a través de una red WIFI (no necesita internet).
- *Sistema de control proporcional integrado derivativo (PID)*: al igual que la capa FS en PID para este proyecto se atiende la problemática de control de lazo cerrado, este interactúa con el coordinador a través de protocolos I2C y UART.
- *Coordinador*: en este llegara los datos de los sistemas, con la finalidad de decidir qué hacer con ellos, interactuando con la capa COML o COMF según sea el caso
- *COM (Protocolo ZigBee, UART e I2C)*: esta capa es de importancia relevante en la capa fog, ya que es donde se crean las comunicaciones entre los sistemas integrados al sistema general y, es cuando decidirán llevarlo al coordinador y de ahí a su propósito final.
- *COML (UART, I2C)*: son los protocolos con los que interactúan Coordinador y PID.

- *COMF*: protocolos con los que interactúa el coordinador con FS.

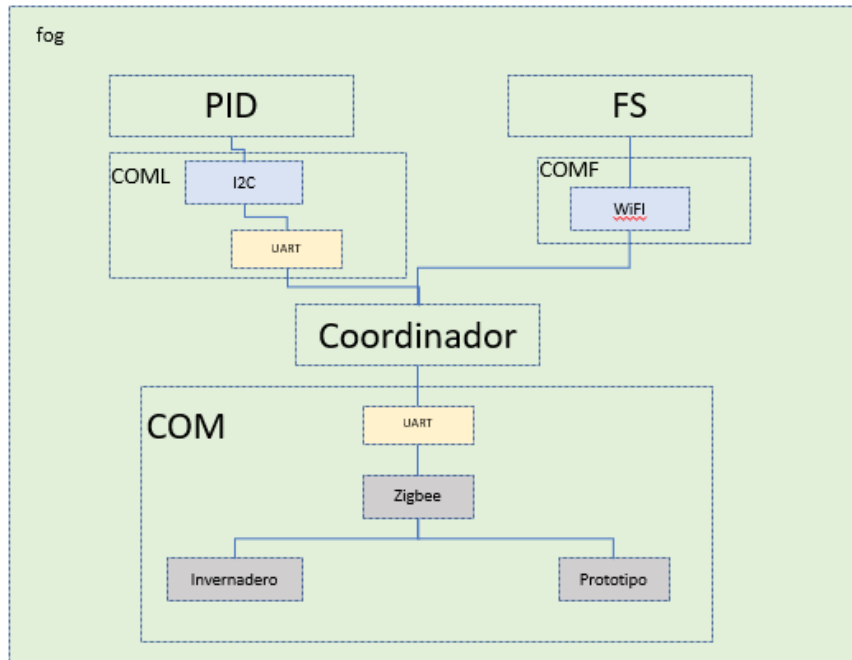


Figura 26 Elementos de la capa fog

4.2 Metodología propuesta

Hasta el momento se ha dicho el funcionamiento de las capas y cómo interactúan entre ellas, se hizo un acercamiento a la capa fog que es la capa que se quiere analizar, para ello se ha propuesto también una metodología con la cual se puede rescatar datos que nos lleven a obtener métricas para garantizar las comunicaciones robustas.

Basados en la arquitectura propuesta y en el ciclo de los datos, es imprescindible el que se tenga una buena comunicación, para ellos se proponen los pasos observados en la imagen 27.



Figura 27 Metodología propuesta.

Se espera que al seguir la metodología se pueda garantizar la comunicación en la red de una manera eficiente. En el capítulo 5 se explicará y se hará uso de cada una de las partes de la metodología.

CAPITULO 5

5 PRUEBAS Y VALIDACION DE ROBUSTEZ EN LAS COMUNICACIONES

Se diseñaron escenarios reales y simulados para implementar en las instalaciones del Instituto Tecnológico de Cd. Guzmán y se siguió la metodología propuesta para dar validez a la robustez en las comunicaciones.

5.1 Escenarios propuestos

Las pruebas de comunicación en las redes inalámbricas de sensores que se proponen tienen como objetivo el realizar un diseño de la red que sea robusta, siguiendo una metodología que podría reducir costos en tiempo y dinero.

Se presentan dos escenarios para la realización de pruebas físicas y un escenario simulado que es más extenso en terreno del Instituto Tecnológico de Cd. Guzmán que se puede observar en la Figura 31, estos escenarios se proponen para así de encontrar los valores y datos necesarios que nos acerquen a una o varias métricas para establecer rangos que nos garanticen que haya comunicación robusta, los escenarios propuestos se observan en la Figura 28:

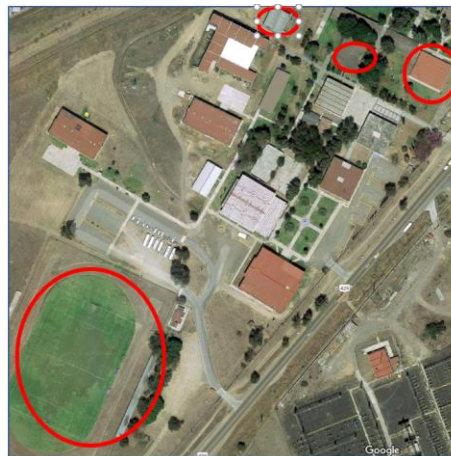


Figura 28 Escenarios prueba

5.2 Seguimiento de la metodología

A continuación, se ira paso a paso con la metodología propuesta que se observa en la Figura 27, de tal modo que se pueda validar o no que se tengan comunicaciones robustas.

5.2.1 Elegir modelo matemático

De los modelos matemáticos que se tienen para el diseño de redes inalámbricas en esta tesis se presentador dos los cuales están representados en las ecuaciones 14 y 15.

Para los tres escenarios propuestos se elige el modelo matemático de acuerdo con la prueba que es posible/factible realizar. Como se muestra en el procedimiento siguiente.

5.2.2 Diseño de la red a partir del modelo matemático.

Escenario 1

Escenario 1: representado en la Figura 29, para este escenario se opta por la cancha de futbol del Instituto Tecnológico de Cd Guzmán, en el cual se tiene línea de vista, es decir, no hay obstáculos que representen alguna atenuación en la potencia de la señal. Las distancias por evaluar serán desde 5 metros de distancia entre dispositivos hasta 120 metros, esto solo para observar el comportamiento de la señal.



Figura 29 Escenario uno.

Dadas las condiciones del escenario 1, como los nodos se encontrarán en LOS, para realizar los cálculos se considera los valores de 2.4 GHz de los dispositivos Xbee y 10 metros que es la distancia que hay entre dispositivos, en la ecuación 14 se sustituyen en *f expresada MHz quedando el valor en 2400 MHz* y *d expresada en Km quedando en .01* obtener los valores de la potencia sobre el modelo matemático aplicado al escenario 1 observado en la Figura 29, dando como resultado.

$$L_{bf} = 60$$

La pérdida de la potencia es de 60dBm, para obtener la potencia se debe restar a la potencia de transmisión, como se observa en la Tabla 4, es de 3 dBm.

$$P = -57\text{dBm}$$

Hasta este punto se realiza para obtener la potencia en a una distancia entre dos nodos, en este caso a 10 metros de separación entre ellos. Se repetirá el procedimiento cada 5 metros de distancia entre los nodos del escenario 1.

Escenario 2

El cual está representado en la Figura 30: para este escenario se requiere observar el comportamiento de la señal respecto a los obstáculos que se encuentren, se consideraron para esta prueba los edificios P y el invernadero del Instituto Tecnológico de Cd Guzmán. Ya que estos se encuentran a una distancia de más de 120 metros, además que tienen obstáculos entre ellos.



Figura 30 Escenario dos

De los datos del escenario 2 los nodos se encuentran en NLOS, los cálculos para este ejemplo serán para una distancia de 25 metros entre los dispositivos, esta distancia se incrementará punto a punto como se observa en la Figura 30, considerando d expresada en Km, es decir, .25 Km, de la ecuación 17 la longitud de onda λ es .125 metros y las ganancias en la ecuación 16 al ser antenas isotrópicas es de 1, dando como resultado:

$$L_{pc} = 80$$

Potencia de transmisión, 3dBm acorde a la tabla 4, se resta y se obtiene la pérdida de la potencia.

$$P = -77 \text{ dBm.}$$

Se realiza el mismo procedimiento para obtener los valores de la potencia de los demás nodos del escenario 2 correspondientes a las distancias, en la sección de resultados se observan los resultados.

Simulación

Se propone un tercer escenario, en el cual por medio de una simulación y una mayor distribución de nodos se realizarán pruebas para determinar las mejores ubicaciones para los nodos, en esta simulación serán 17 nodos a lo largo del Instituto Tecnológico de Cd. Guzmán como se observa en la Figura 31.

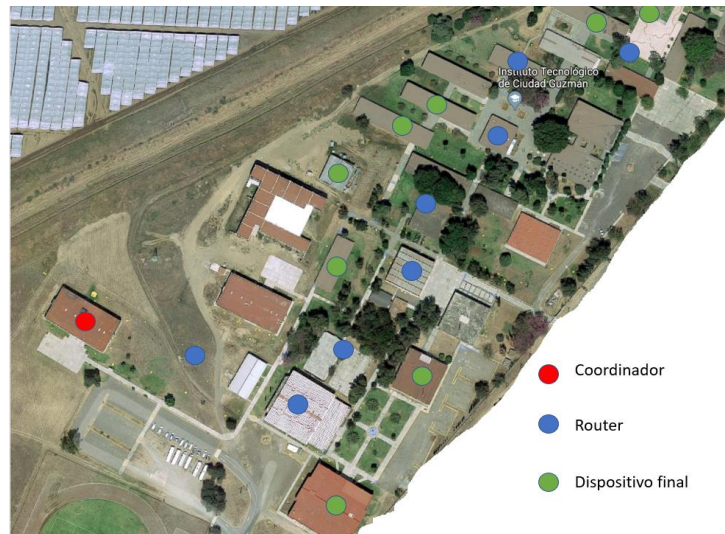


Figura 31 Escenario tres

Este escenario se simuló en un programa llamado Opnet simulator de riverbed, se eligió este simulador ya que permite medir las métricas para el análisis que se requiere hacer. Basados en las distancias entre los nodos y su frecuencia se realiza el siguiente análisis:

Dadas las condiciones del escenario 3, como los nodos se encontrarán en LOS, para realizar los cálculos se considera los valores de 2.4 GHz de los dispositivos Xbee y 33 metros que es la distancia que hay entre dispositivos, en la ecuación 14 se sustituyen en f expresada MHz quedando el valor en 2400 MHz y d expresada en Km quedando en .033 obtener los valores de la potencia sobre el modelo matemático aplicado al escenario 3 observado en la Figura 31, dando como resultado.

$$L_{bf} = 70.4$$

La pérdida de la potencia es de 70.4dBm, para obtener la potencia se debe restar la pérdida a la potencia de transmisión, como se observa en la Tabla 4, es de 3 dBm, por lo tanto:

$$P = -67.4\text{dBm}$$

Para obtener los valores de los demás nodos del escenario 3 se hacen los cálculos uno por uno, como en el procedimiento mostrado arriba usando el modelo matemático elegido.

5.2.3 Validar que haya comunicación

Se utilizó el software XCTU para obtener las imágenes que en tiempo real presenta la formación de la red ya sea en forma de nodos o en Tablas.

Formación de red inalámbrica acorde a las pruebas realizadas y según el modelo utilizado para el escenario 2 se debe resaltar que la ubicación de los nodos fue basada en los valores obtenidos en procedimiento en elegir el modelo matemático.

Las Figuras 32-35 representan la formación de la red a diferentes distancias ente los nodos y así obtener los valores de LQI y observar de manera gráfica su comportamiento en la red. A continuación, se describen las figuras.

En la Figura 32 se da una representación gráfica de cómo se forma la red inalámbrica en escenarios donde se utiliza el modelo matemático para el diseño de esta.

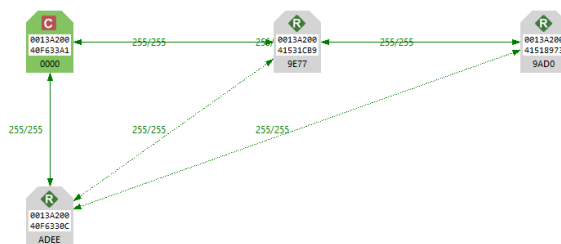


Figura 32 Los nodos están a menos de cinco metros de distancia

Cuando el nodo sensor se aleja del coordinador la calidad de la señal se ve afectada, como se muestra en la Figura 33.

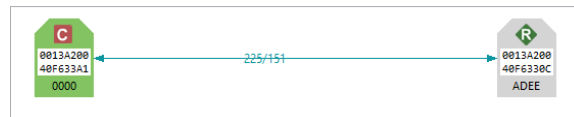


Figura 33 Nodo sensor a diez metros

A una distancia de 20 metros se requiere utilizar un tercer nodo, como se muestra en la Figura 34, para garantizar la conexión del nodo sensor con el coordinador de la red.

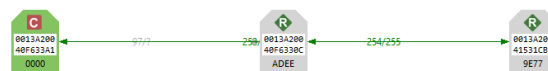


Figura 34 Tercer nodo (router), incrementa la señal

Finalmente, al tener un buen diseño de una red inalámbrica se puede tener una buena recepción de los datos y garantizar que los mismos no se pierdan, en la Figura 35 se observa una red en malla formada con 4 dispositivos ZigBee a una distancia de 149 metros del escenario 2 siendo el nodo sensor el que solo se conecta con un nodo y de ahí se tiende la red hasta el coordinador como se puede observar en la Figura 35.



Figura 35 Red formada por cuatro nodos ya a una distancia de 149 metros

El escenario 3 mostrado en la Figura 31 se representa en la Figura 36 en forma de nodos en el simulador Opnet.

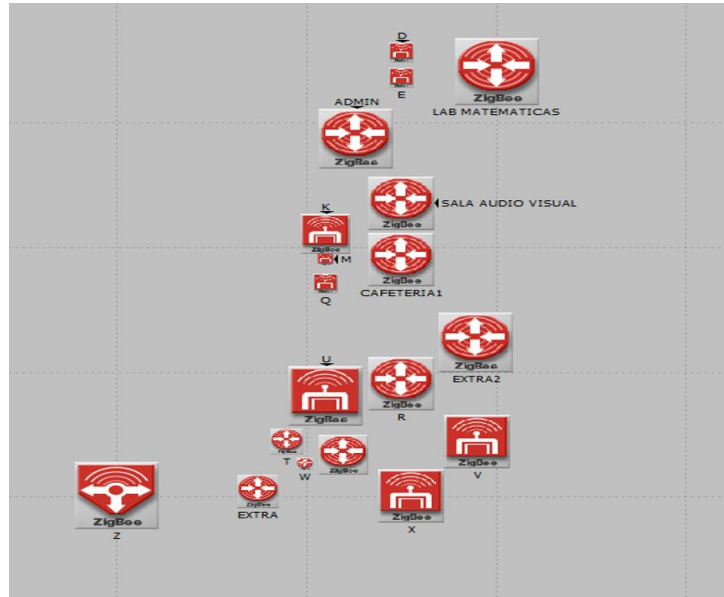


Figura 36 Distribución de nodos para simulación en Opnet

El comportamiento de la red del escenario 3 Figura 36 se observa en la Tabla 5 donde muestra las rutas y saltos que dio cada nodo para poder conectarse con el coordinador.

Coordinator	Depth 1	Depth 2	Depth 3	Depth 4	Depth 5
1	Campus Network.Z (0)				
2	Campus Network.EXTRA (1)				
3		Campus Network.AUDITORIO (2)			
4		Campus Network.R (220)			
5			Campus Network.CAFETERIA1 (221)		
6				Campus Network.SALA AUDIO VISUAL...	
7					Campus Network.LAB MATEMATICAS (223)
8					Campus Network.E (228)
9				Campus Network.ADMIN (230)	
10					Campus Network.D (236)
11				Campus Network.K (262)	
12			Campus Network.EXTRA2 (264)		
13			Campus Network.Q (436)		
14			Campus Network.M (437)		
15		Campus Network.U (1092)			
16	Campus Network.W (1094)				
17		Campus Network.V (2185)			
18	Campus Network.T (2187)				
19		Campus Network.X (3278)			

Tabla 5 Representación de la red en forma de Tabla escenario tres

Se realizaron pruebas en la simulación, donde se hacía fallar nodos para ver el comportamiento de la comunicación. En la Figura 37 se observa el fallo del nodo W.



Figura 37 Estado de dalla del nodo W

5.2.4 Definir funcionamiento de los nodos

Una vez que se establece que, si hay conexión entre los nodos y con el coordinador, se asigna el funcionamiento de cada nodo en la red acorde a los tipos de dispositivos ZigBee visto en las secciones 3.6.5 a la 3.6.5.3.

5.2.5 Enviar y Recibir datos

Una vez que se tiene definido el funcionamiento de los nodos, se deben enviar y recibir los datos ya sea de sensores en los dispositivos finales, o como instrucciones del coordinador a los actuadores, con lo cual se puede prueba la capacidad de la red. Con esto estaríamos validando que se tiene comunicación, donde se pueden enviar datos a un coordinador y a su vez este podrá dar instrucciones en caso de ser necesario.

La forma de interactuar entre sensores y actuadores dentro del sistema IoT, siendo de suma importancia el que se tengan comunicaciones robustas como se verá en el siguiente punto.

5.2.5.1 Ejercicio realizado para comprobar la comunicación en el sistema

Del prototipo que se diseñó para la realización de las pruebas Figura 38, se realiza un ejercicio de para comprobar la comunicación en el sistema.

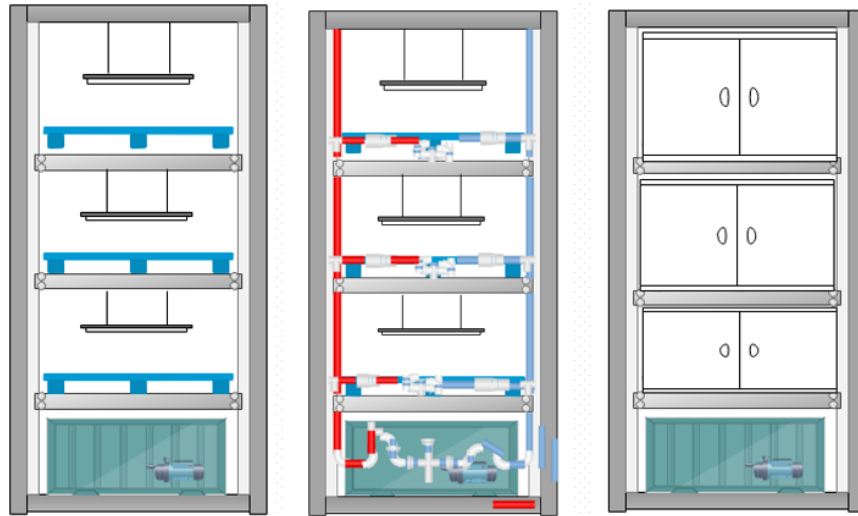


Figura 38 Diseño prototipo

En este caso el prototipo se utiliza como semillero, donde un factor importante el control de las siguientes variables:

- Temperatura
- Humedad
- Ph

Y se tienen diversos tipos de actuadores como:

- Luces led (RGB, UV)
- Ventiladores
- Focos 60 watts

La importancia de tener comunicaciones robustas recae en el control de las variables, donde si no se tiene una buena comunicación, podría resultar en la perdida de las semillas que ahí estén sembradas.

Para este ejercicio se control de la temperatura en los 3 niveles del prototipo según lo que se esté produciendo en ellos. Para el desarrollo de esta prueba se realizó lo siguiente.

Se debe obtener la identificación de la planta, es decir, obtener los valores en un tiempo determinado donde se estabiliza en un valor que se está buscando. En la Figura 39 a través de Matlab por medio del comando `ident`, para ello necesitaremos darle una entrada escalón al sistema y muestrear datos del sensor a un cierto periodo de muestreo, el cual debe ser mayor que la frecuencia de la planta, una vez que tenemos los datos de entrada y salida se introducen a `ident` y nos generará una función de transferencia en este caso sera una de primer orden como se muestra en la Figura 40.

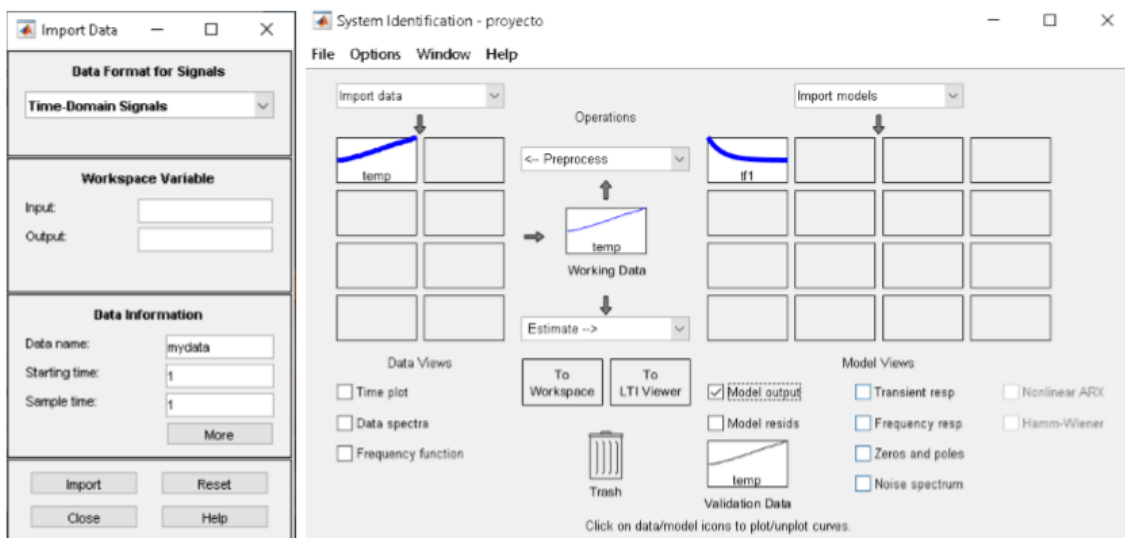


Figura 39 IDENT

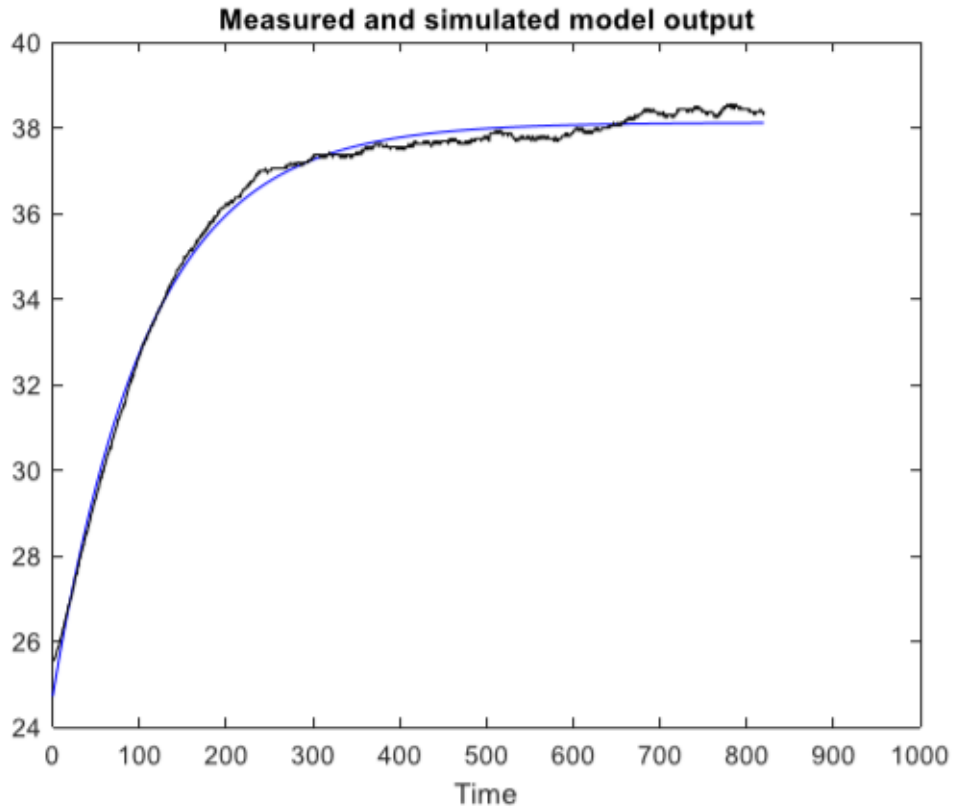


Figura 40 Función de transferencia

En la parte de input y output se crea una matriz en Workspace y se colocan los datos, además del tiempo de muestreo en este caso fue de 0.5seg, obteniendo la siguiente función de transferencia.

$$\frac{P(s)}{Pi(s)} = \frac{1.052}{109.5*s+1} \quad (23)$$

Tomamos a $Ti(s)$ como una entrada tipo escalón.

$$T(s) = \frac{1.052}{109.5 * s + 1} * \frac{Ti}{s} \quad (24)$$

Usando la anti transformada de Laplace en la ecuación 24 y despejando el tiempo t :

$$to(t) = L^{-1} \frac{1.052}{109.5 * s + 1} * \frac{Ti}{s} \quad (25)$$

$$to(t) = 1.052 * Ti(1 - e^{-0.00913t}) \quad (26)$$

Despejando t de la ecuación 26

$$t = \frac{\ln(-\frac{to}{Ti * 1.052}) + 1}{-0.00913} \quad (27)$$

Donde:

t es el tiempo de estabilización

to es la temperatura de muestreo (temperatura que se quiere conocer en el tiempo)

Ti es la temperatura final

De la ecuación 27 se sustituyen los valores $to=37.93$ y $Ti=38.4$, dando como resultado:

$$t = 482 \text{ segundos}$$

De estos datos se puede obtener mediante el software Simulink una optimización del tiempo de estabilidad utilizando una herramienta llamada Autotune de Matlab a la cual se le alimenta con la función de transferencia ecuación 23 obteniendo la siguiente ecuación:

$$\frac{T(s)}{S.P(s)} = \frac{a + a(Kp + \frac{Ki}{s} + Kds)}{(bs + 1) + a(\frac{Ki}{s} + Ks)} \quad (28)$$

Al sustituir en la ecuación 28 los valores arrojados por el Autotune de Matlab observados en la Figura 41 se espera un rendimiento óptimo de los recursos en la planta. Dichos valores son: $a= 1.052$, $b= 109.5$, $Kp=16.3$, $Ki= .729$ y $Kp= .8$

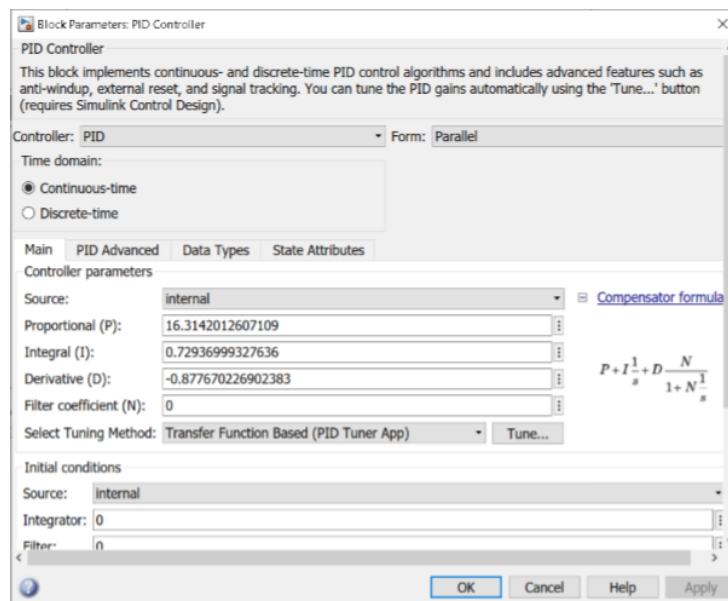


Figura 41 Valores PID

En la Figura 42 se observa un diagrama con los datos insertados y una temperatura objetivo de 30 grados.

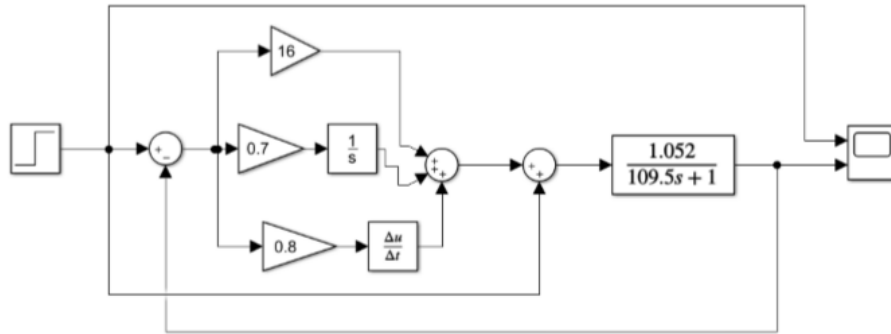


Figura 42 Diagrama con valores del PID

Con el uso de la ecuación 28 tenemos el resultado de la Figura 43, donde se observa cómo llega el foco a una temperatura de más de 40 grados y se ira estabilizando hasta la temperatura objetivo de 30 grados

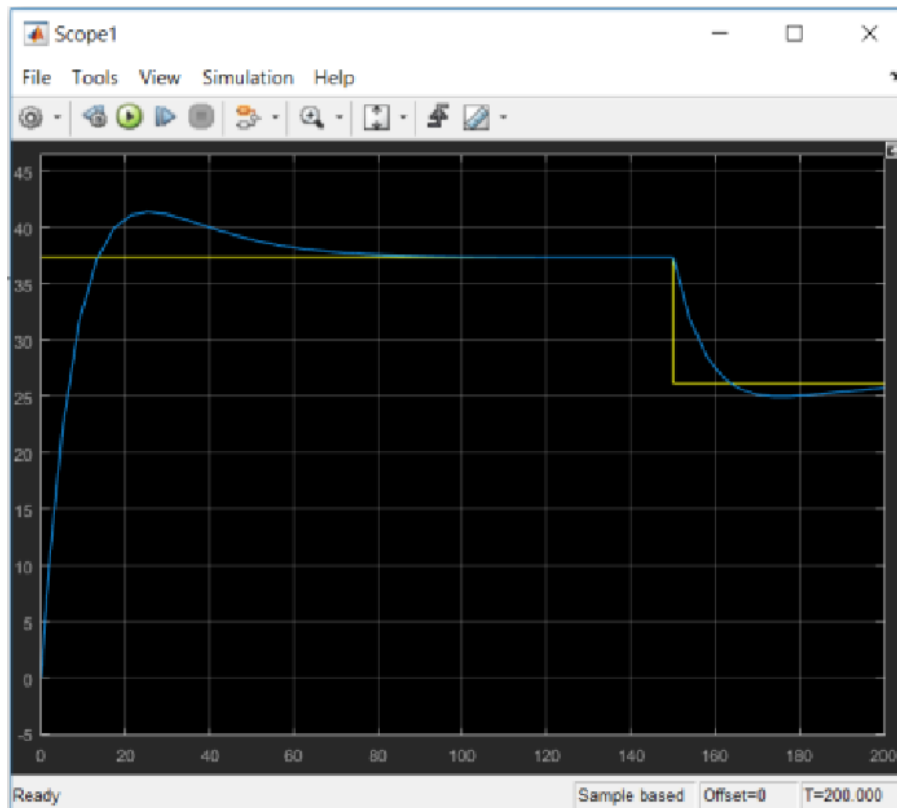


Figura 43 Resultado con temperatura objetivo a 30 grados

Los datos de los sensores de temperatura utilizados para la prueba se enviaron a través de la red ZigBee que previamente se diseñó, así como la respuesta del coordinador y él envió a la base de datos.

5.2.6 Presentación de los datos

La presentación de los datos es la forma como se visualizarán los datos y ahí poder tomar decisiones ya sea de forma manual o aplicando un control al sistema.

En la Figura 44 se observa la presentación de datos obtenidos del servidor en forma de tabla, donde pueden observar los datos, de los sensores, la fecha, el tipo de granja urbana de donde viene el dato, el tipo de sensor y, el nivel del que se están obteniendo los datos.

Urban Farm	Sub Urban Farm	Fecha	Nivel	Sensor	Tipo de dato	Dato
ITCG	Fog System	2019-03-25 11:33:40.136846	Nivel 1	DS18B20	Temperatura charola 1	129
ITCG	Fog System	2019-03-25 11:33:40.136846	Nivel 1	DS18B20	Temperatura charola 2	129
ITCG	Fog System	2019-03-25 11:33:40.136846	Nivel 1	DTH11	Temperatura	27
ITCG	Fog System	2019-03-25 11:33:40.136846	Nivel 1	DTH11	Humedad	36
ITCG	Fog System	2019-03-25 11:33:40.136846	Nivel 2	DS18B20	Temperatura charola 3	129
ITCG	Fog System	2019-03-25 11:33:40.136846	Nivel 2	DS18B20	Temperatura charola 4	129
ITCG	Fog System	2019-03-25 11:33:40.136846	Nivel 2	DTH11	Temperatura	25
ITCG	Fog System	2019-03-25 11:33:40.136846	Nivel 2	DTH11	Humedad	34
ITCG	Fog System	2019-03-25 11:33:40.136846	Nivel 3	DS18B20	Temperatura charola 5	129
ITCG	Fog System	2019-03-25 11:33:40.136846	Nivel 3	DS18B20	Temperatura charola 6	129
ITCG	Fog System	2019-03-25 11:33:40.136846	Nivel 3	DTH11	Temperatura	25
ITCG	Fog System	2019-03-25 11:33:40.136846	Nivel 3	DTH11	Humedad	32
ITCG	Fog System	2019-03-25 11:33:40.136846	Suministro	DS18B20	Temperatura	129

Figura 44 Presentación de datos

En la Figura 45 se observa la presentación de los datos en forma de gráfica, Esto puede ayudarnos a tomar decisiones ya que se puede observar rápidamente las relaciones entre las variables del sistema.

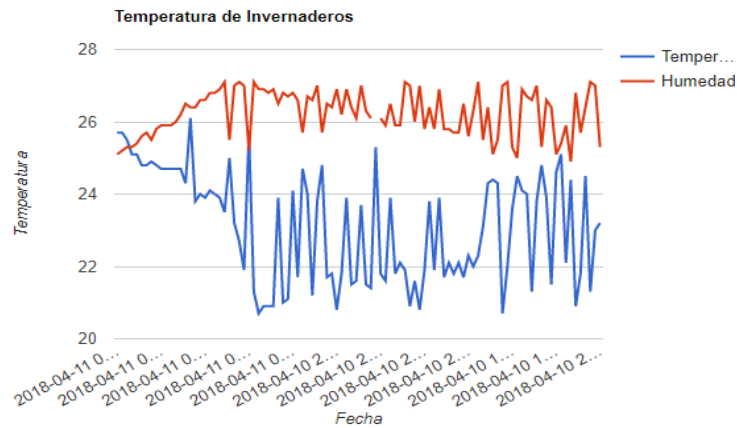


Figura 45 Presentación datos

En la Figura 46 se muestra el monitoreo de la planta otra vez de un software en cual se puede cargar el punto al que queremos llegar de temperatura, y está monitoreando remotamente como va, incluso subir la intensidad del actuador para llegar a la temperatura objetivo. Para llevar el monitoreo de esto se hizo uso del programa LabVIEW.

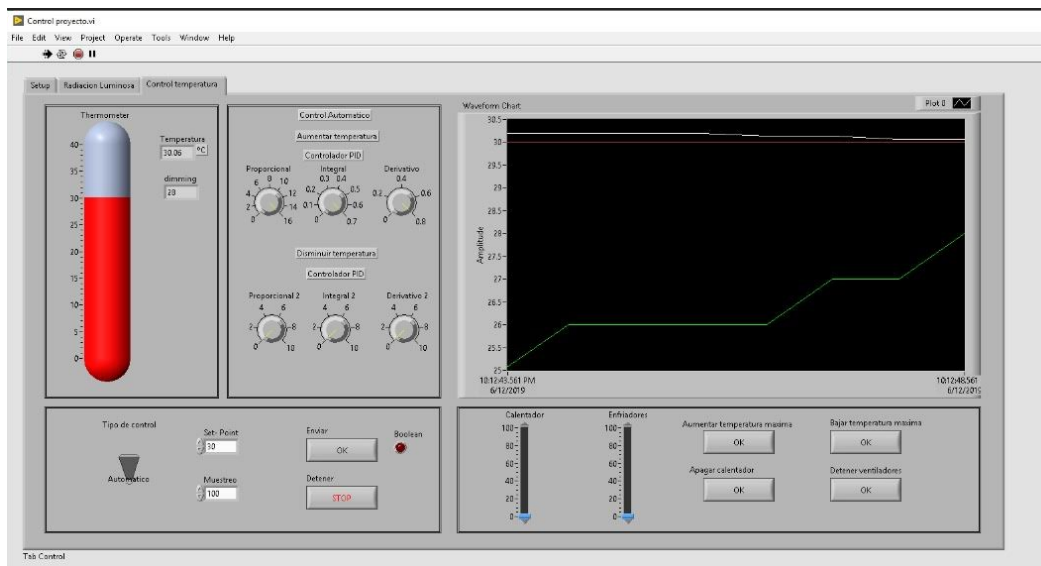


Figura 46 Ventana de control de la temperatura

En la Figura 47 se observa el control de las luces led en el prototipo, se puede aumentar o bajar la intensidad de las mismas acorde a las necesidades lo que requiera lo que se va a sembrar o ya está sembrado.

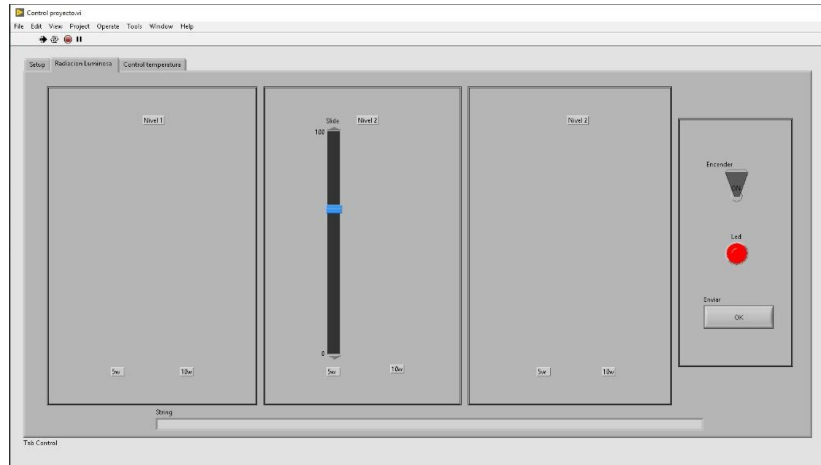


Figura 47 Control de la intensidad de las luces en el prototipo

CAPITULO 6

6 RESULTADOS

Para la realizacion de las pruebas se utilizo el prototipo basado en la Figura 38 observado en Prot 1.



Prot 1 Prototipo

De las pruebas realizadas en los diferentes escenarios, se compararon los datos obtenidos con los arrojados del modelo matemático y se obtienen los valores y rangos en los que debe mantenerse las métricas para considerar una comunicación robusta, en la Tabla 6 se observan los valores de estas métricas, los cuales serán evaluados una vez que la red este formada y se pueda evaluar.

La implementación de esta metodología proporcionara validez a las comunicaciones robustas considerando métricas como:

- RSSI.
- LQI.
- SP.
- RP.
- THR.

En la Tabla 6 se observan los valores esperados a estas métricas:

Métricas	Valores
RSSI	-90 < L > -25
LQI	255 < LQI > 200
SP/SR	100%
THR	100%

Tabla 6 Métricas para comunicaciones robustas

Escenario 1

La Tabla 7 presenta los datos obtenidos del modelo matemático (RSSI ECUA) y los valores reales de RSSI en cada uno de los metros entre los dispositivos.

Distancia	RSSI	Modelo	LQI
5	-65	-51	255
10	-64	-57	254
15	-64	-61	255
20	-73	-63	253
25	-75	-65	255
30	-73	-67	254
35	-79	-68	254
40	-82	-69	252
45	-87	-70	249
50	-90	-71	250
55	-83	-72	253
60	-89	-73	254
65	-83	-73	253

Tabla 7 Valores de prueba en línea de vista

En la Figura 48 se observan los resultados de la Tabla 7 que muestra una comparativa de los resultados obtenidos del modelo matemático en forma gráfica.

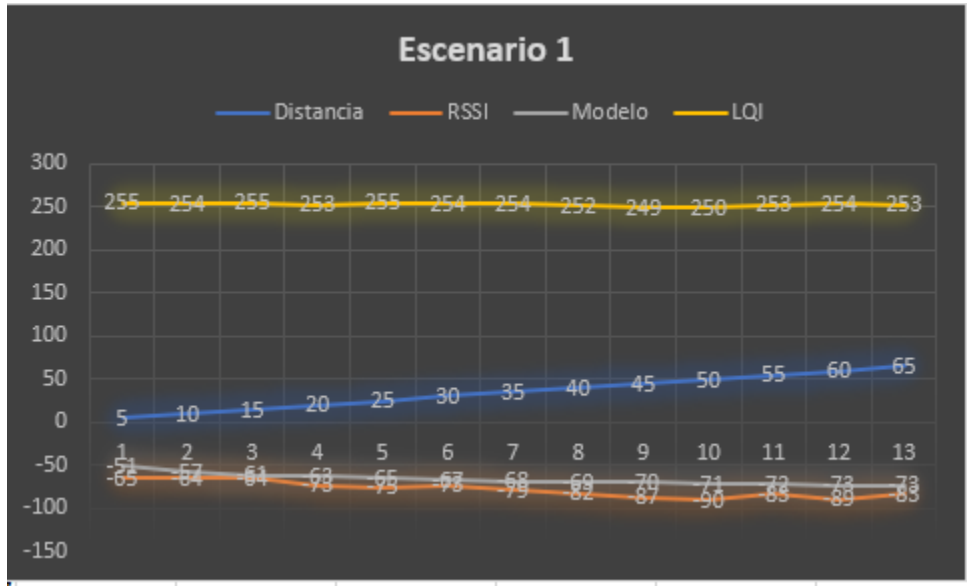


Figura 48 Comportamiento RSSI y el Modelo matemático con respecto a la distancia del escenario uno

Escenario 2

De los resultados de la prueba del escenario 2 se obtiene los datos presentados en la Tabla 8 con el objetivo de ver el comportamiento de los valores obtenidos de RSSI comparados con los del modelo matemático (RSSI ECUA).

Distancia	RSSI	Modelo	LQI
25	-73	-77	252
85	-81	-87	253
149	-88	-88	252

Tabla 8 Valores prueba del edificio P al invernadero

Los valores observados en la Tabla 8, nos dan una idea en cuanto a la predicción de la potencia de la señal, se puede observar el comportamiento de ésta en la Figura 49.

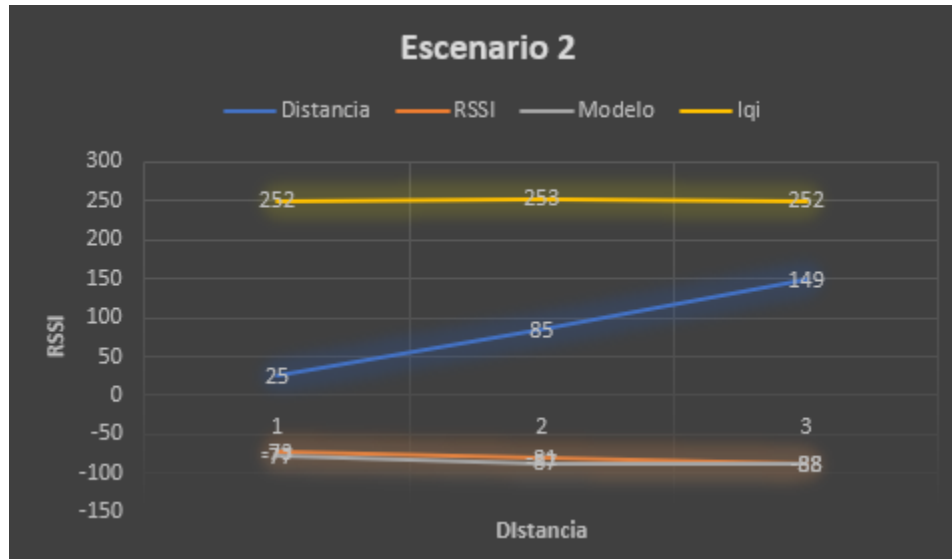


Figura 49 Comportamiento RSSI y el Modelo matemático con respecto a la distancia del escenario dos

Escenario 3

Para las pruebas de este escenario se hicieron fallar nodos para observar el comportamiento de la comunicación en la red como se observa en la Figura 50.

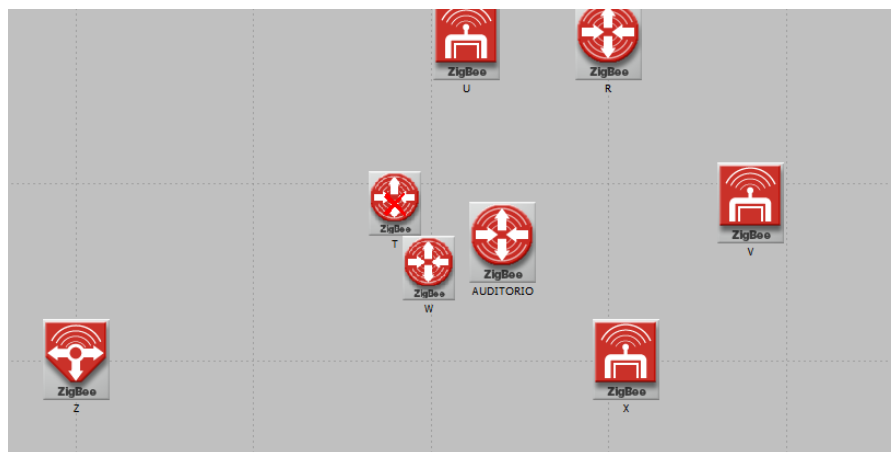


Figura 50 Distribución de nodos escenario tres con un nodo en fallo

Al fallar los nodos se obtiene que el coordinador al tener un nodo cercano por el cual puede recibir datos forma la red como se muestra en la Tabla siguiente.

Coordinator	Depth 1	Depth 2	Depth 3	Depth 4	Depth 5
1	Campus Network Z (5)				
2	Campus Network W (1)				
3		Campus Network AUDITORIO (2)			
4			Campus Network U (218)		
5		Campus Network R (220)			
6			Campus Network CAFETERIA1 (221)		
7				Campus Network SALA AUDIO VISUAL	
8					Campus Network LAB MATEMATICAS (223)
9					Campus Network E (228)
10					Campus Network D (229)
11				Campus Network K (262)	
12				Campus Network CUBICULOS (263)	
13			Campus Network M (436)		
14			Campus Network Q (437)		
15		Campus Network X (1092)			
16		Campus Network V (1093)			

Tabla 9 Formación de la red sin un nodo

En la Tabla 9 se observa como a pesar de que un nodo está en fallo, al tener redundancia, el coordinador es capaz de formar la red, recuperando la comunicación con los demás nodos en la red. El envío y pérdida de paquetes se observan en la Figura 51.

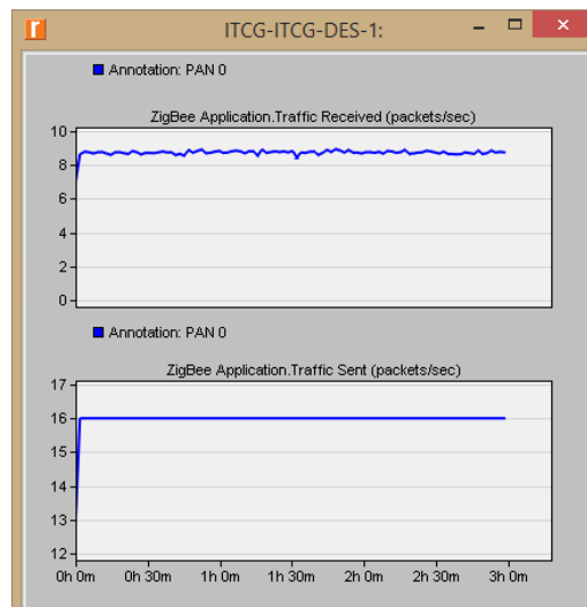


Figura 51 Envío y recepción de paquetes

El escenario 3 se diseñó en base a los valores obtenidos del modelo matemático, con el propósito de observar el comportamiento de la red en una simulación, los valores obtenidos de la implementación del modelo matemático en este escenario se observan en la Tabla 10.

Distancia	RSSI	RSSI2	LQI
22	-64	-75	250
33	-67	-75	247
37	-68	-73	240
42	-69	-59	226
42	-69	-80	248
43	-70	-59	239
43	-70	-57	236
45	-70	-65	230
53	-71	-82	220
60	-73	-59	227
62	-73	-85	223
62	-73	-63	226
64	-73	-77	224
69	-74	-59	233
69	-74	-73	243
70	-74	-67	240
78	-75	-74	243
87	-76	-75	235
105	-77	-75	229

Tabla 10 Comportamiento modelo matemático escenario tres

La representación gráfica de los valores en la Tabla 10 se observan la Figura 52, donde observa la relación entre el modelo matemático y el RSSI entre los nodos considerando las distancias elegidas por los cálculos realizados.



Figura 52 Comportamiento RSSI y el Modelo matemático con respecto a la distancia del escenario tres

En la Tabla 11 se observa los valores de las métricas que se están midiendo para comprobar que haya una comunicación robusta, los valores son promedios de los valores de RSSI ECUA de los escenarios propuestos para realizar las pruebas:

Métricas	V	metricas	A	B	C	D
RSSI	$-90 < L \leq -25$	RSSI	-25	-66	-85	-71
LQI	$255 \leq LQI > 150$	LQI	255	250	220	240
SP/SR	100%	SP/SR	100%	100%	100%	100%
THR	100%	THR	100%	100%	100%	100%

Tabla 11 Valores de métricas de los diferentes escenarios

Los resultados de los valores obtenidos de los escenarios propuestos son los observados en la Tabla 11, estos valores están representados gráficamente en la Figura 53.

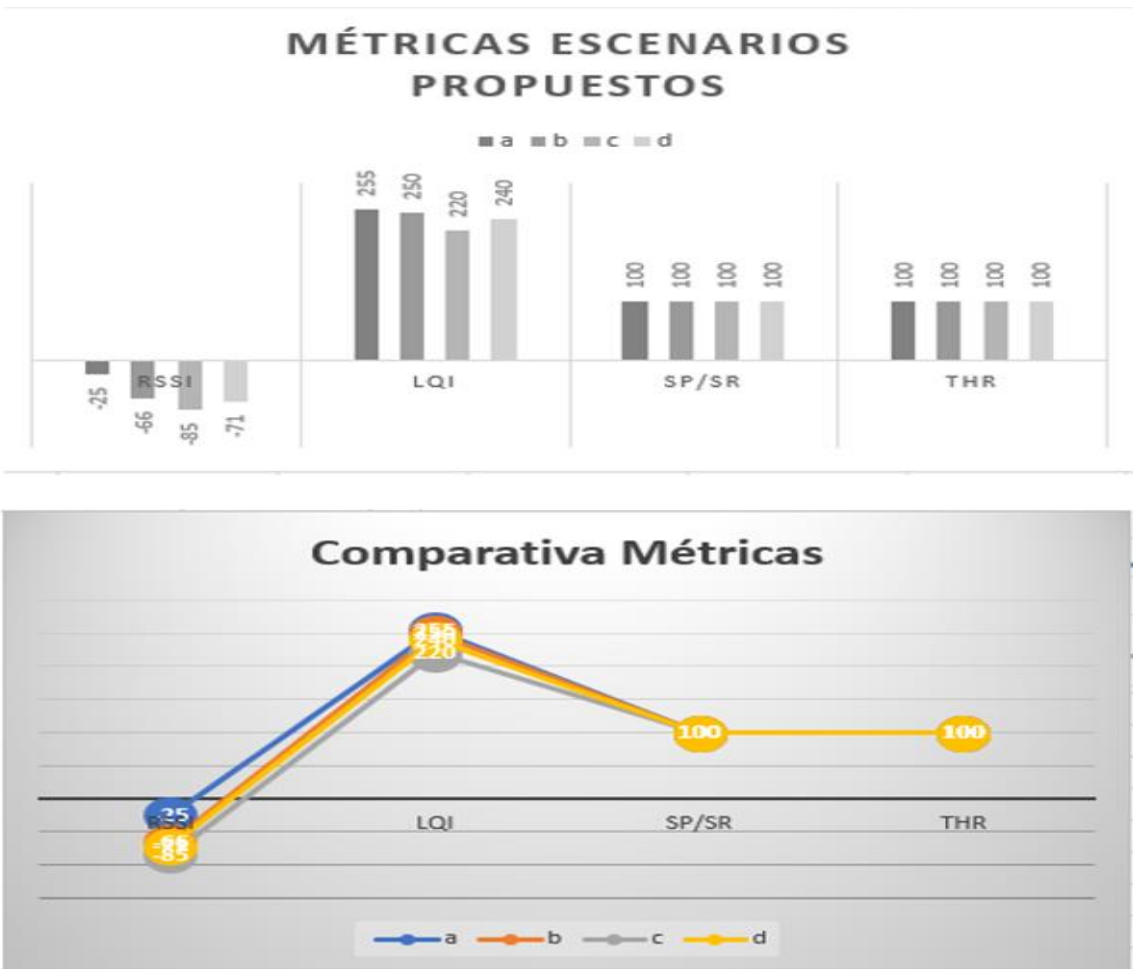


Figura 53 Comparativo métricas esperadas en los escenarios.

El escenario A es el que de acuerdo con las métricas utilizadas para medir que haya comunicación robusta.

Los escenarios B y C son los escenarios reales que se plantearon para las pruebas y, se puede observar que el comportamiento de la pérdida de paquetes y el rendimiento de la red son iguales al esperado en A y el comportamiento de RSSI y LQI dependen uno del otro, es decir, entre mayor sea el valor RSSI así, lo será el LQI.

El escenario D con valores esperados en la simulación, esto ya que la simulación al ser un ambiente controlado se pueden esperar mejores resultados, dando una aproximación del comportamiento real como en los casos de A y B.

CAPITULO 7

7 CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

En el presente trabajo se propuso una metodología para validar las comunicaciones robustas en un sistema IoT en agricultura de precisión, la que se probaría en la capa fog de una arquitectura también propuesta, con la cual se pueden obtener datos de manera local, y si es requerido enviar información a la nube.

A continuación, se describirán las conclusiones del presente trabajo y algunos de los posibles trabajos futuros que pueden continuar desarrollándose como resultado de la investigación.

7.1 Conclusiones

Cuando se diseña una red inalámbrica de sensores sin tener una metodología clara, aumenta el coste de diseño en dinero y tiempo, complicando el objetivo de tener comunicaciones robustas, ya que diseñar la red basados en las especificaciones de los dispositivos no garantiza el que se tenga la robustez en las comunicaciones.

En un sistema IoT, se habla de un sistema ciber-físico, es decir, es un sistema de eventos físicos que se pueden computarizar, siendo capaz de informar cuando todo marcha en orden, así como también cuando algo no lo está.

Para la realización de este proyecto de tesis se diseñó e implementó una granja urbana que cuenta con sensores y actuadores que se encuentran conectados en red, de tal manera que se obtiene información de los eventos que ahí ocurren convirtiéndolo en un sistema IoT.

La metodología propuesta ayuda a que se validen las comunicaciones y que estas sean robustas haciendo uso de los protocolos I2C, UART y ZigBee.

En lo referente a las comunicaciones, donde estas deben ser robustas, se concluye que en efecto se tienen comunicaciones robustas gracias a las métricas con las que se comparan, al aplicar el modelo matemático que es necesario y, diseñar la red en base a ello, se tienen comunicaciones, que cumplen dando así la robustez necesaria para la red que se requiere formar según sea el caso.

La combinación de los protocolos de comunicaciones fue necesaria para poder realizar las comunicaciones en el prototipo, donde se tienen comunicaciones con sensores I2C, que se comunican por UART y la forma de enviar los datos al servidor local es por medio de ZigBee, por ello se concluye que el uso de los diferentes protocolos aumenta la robustez en las comunicaciones.

Se realizó un ejercicio para el control de temperatura del sistema mediante PID en el prototipo, donde se requiere obtener datos desde la planta para tener datos variables y el dato final para la obtención de una TF en la que se requiere implementar el control; ya que es importante que se tengan comunicaciones robustas para mantener un sistema en óptimo funcionamiento.

7.2 Trabajo futuro

Como continuación de este trabajo de tesis y como en cualquier otro proyecto de investigación, existen diversas líneas de investigación que quedan abiertas y en las que es posible continuar trabajando. Durante el desarrollo de esta tesis han surgido algunas líneas futuras que se han dejado abiertas y que se esperan atacar en un futuro; algunas de ellas, están más directamente relacionadas con este trabajo de tesis y son el resultado de cuestiones que han ido surgiendo durante la realización de esta.

Algunos trabajos futuros que se pueden realizar son:

- Ubicación de los nodos de la red por medio de triangulación.
- Verificar a través de imágenes la salud de las plantas que se están sembrando.
- Toma de decisiones a partir de los datos obtenidos de los sensores en la red.
- Mejoras en los ambientes gráficos para que se más amigable con los usuarios.

8 REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Alfonso, J. M. (2009). Modelo de propagación empírico para predicción de pérdidas de potencia en señales inalámbricas bajo el estándar IEEE 802.11B/G. *Revista GTI*, 8(20), 35-45.

Alliance, Z. (2004). Zigbee specification: Zigbee document 053474r06 version 1.0. December 14th.

Ashton, K. (2009). That internet of things thing. *RFID journal*, 22(7), 97-114.

Bahga, A., & Madiseti, V. (2014). Internet of Things: A hands-on approach. Vpt.

Blessington, T. P., Murthy, B. B., Ganesh, G. V., & Prasad, T. S. R. (2012, March). Optimal implementation of UART-SPI Interface in SoC. In 2012 International Conference on Devices, Circuits and Systems (ICDCS) (pp. 673-677). IEEE.

Bonfill, A., Espuna, A., & Puigjaner, L. (2008). Proactive approach to address the uncertainty in short-term scheduling. *Computers & chemical engineering*, 32(8), 1689-1706.

Chen, J. H., Sung, W. T., & Lin, G. Y. (2015, October). Automated monitoring system for the fish farm aquaculture environment. In 2015 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (pp. 1161-1166). IEEE.

Cuifen, L., Jiwei, M., Hua, F., Ce, L., Lei, S., & Jingjing, Y. (2010, June). Wireless monitoring system for granary based on 1-wire. In 2010 International Conference On Computer Design and Applications (Vol. 4, pp. V4-496). IEEE.

Digi. (2015). Xbee ZigBee Mesh: Digi document 90001942-13.

Evans, D. (2011). The internet of things: How the next evolution of the internet is changing everything. *CISCO. Int. J. Internet*, 3(2), 123-132.

Farahani, S. (2008). ZigBee wireless networks and transceivers. Newnes.

Ferreira, H. G. C., Canedo, E. D., & de Sousa, R. T. (2013, October). IoT architecture to enable intercommunication through REST API and UPnP using IP, ZigBee and arduino. In 2013 IEEE 9th international conference on wireless and mobile computing, networking and communications (WiMob) (pp. 53-60). IEEE.

Fitriawan, H., Susanto, M., Arifin, A. S., Mausa, D., & Trisanto, A. (2017, July). ZigBee based wireless sensor networks and performance analysis in various environments. In 2017 15th International Conference on Quality in Research (QiR): International Symposium on Electrical and Computer Engineering (pp. 272-275). IEEE.

Fusario, R. J., Crotti, P. S., Bursztyń, A. P., & Civale, O. O. (2012). Teoría de control para informáticos. Alfaomega Grupo Editor.

Harun, A. N., Kassim, M. R. M., Mat, I., & Ramli, S. S. (2015, May). Precision irrigation using wireless sensor network. In 2015 International Conference on Smart Sensors and Application (ICSSA) (pp. 71-75). IEEE.

Hashmi, S. (2014). Comprehensive materials processing. Newnes.

Havidán Rodríguez, W. D. (2017). Handbook of Disaster Research . Springer International Publishing.

Hu, Z. W. (2010, October). I2C protocol design for reusability. In 2010 Third International Symposium on Information Processing (pp. 83-86). IEEE.

Jen, E. (Ed.). (2005). Robust design: a repertoire of biological, ecological, and engineering case studies. Oxford University Press.

Kant, K. (2013). Microprocessor-Based Agri Instrumentation. PHI Learning Pvt. Ltd.

Kopetz, H. (2011). Real-time systems: design principles for distributed embedded applications. Springer Science & Business Media.

Kumari, R. S. S., & Gayathri, C. (2017, March). Interfacing of MEMS motion sensor with FPGA using I2C protocol. In 2017 International Conference on Innovations in Information, Embedded and Communication Systems (ICIIECS) (pp. 1-5). IEEE.

López, J. E. G., Chavez, J. C., & Sánchez, A. K. J. (2017, March). Modelado de una red de sensores y actuadores inalámbrica para aplicaciones en agricultura de precisión. In 2017 IEEE Mexican Humanitarian Technology Conference (MHTC) (pp. 109-116). IEEE.

Moran Alonso, N. (2010). Agricultura urbana: un aporte a la rehabilitación integral. *Papeles de relaciones eco sociales y cambio global*, (111), 99-111.

Moreno Flores, O. (2007). *Agricultura Urbana: Nuevas Estrategias de Integración Social y Recuperación Ambiental en la Ciudad*.

Mougeot, L. J. (2006). *Cultivando mejores ciudades: agricultura urbana para el desarrollo sostenible*. IDRC.

Nalwade, R., & Mote, T. (2017, May). Hydroponics farming. In 2017 International Conference on Trends in Electronics and Informatics (ICEI) (pp. 645-650). IEEE.

Nasrudin, N., Che Abdullah, I., & Sapeciay, Z. (2010). Evaluating the Suitability of Urban Farming Programme (Case Study: Ipoh). *UniversitiTeknologi MARA, Shah Alam*.

National Research Council. (2010). *Toward sustainable agricultural systems in the 21st century*. National Academies Press.

Ortega, R., Flores, L., INIA, C. Q., de Recursos Naturales, D., & Ambiente, M. (1999). *Agricultura de Precisión: Introducción al manejo sitio-específico*. Ministerio de Agricultura, Instituto de investigaciones agropecuarias. CRI Quilamapu.(Chile), 13-46.

Qiu, T., Xiao, H., & Zhou, P. (2013, August). Framework and case studies of intelligence monitoring platform in facility agriculture ecosystem. In 2013 Second International Conference on Agro-Geoinformatics (Agro-Geoinformatics) (pp. 522-525). IEEE.

Ramachandran, I., Das, A. K., & Roy, S. (2006). Analysis of the contention access period of IEEE 802.15.4 MAC. *ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN)*, 3(1), 4.

Ratnayaka, D. D., Brandt, M. J., & Johnson, M. (2009). *Water supply*. Butterworth-Heinemann.

Russell, B., & Van Duren, D. (2018). *Practical Internet of Things Security: Design a security framework for an-Internet connected ecosystem*. Packt Publishing Ltd.

Saunders, S. R., & Aragón-Zavala, A. (2007). *Antennas and propagation for wireless communication systems*. John Wiley & Sons.

Sharma, M., Agarwal, N., & Reddy, S. R. N. (2015, May). Design and development of daughter board for USB-UART communication between Raspberry Pi and PC. In *International Conference on Computing, Communication & Automation* (pp. 944-948). IEEE.

Simelane, P. T., Kogeda, O. P., & Lall, M. (2015, May). A cloud computing augmenting agricultural activities in marginalized rural areas: A preliminary study. In *2015 International Conference on Emerging Trends in Networks and Computer Communications (ETNCC)* (pp. 119-124). IEEE.

Srivastava, A. K. (Ed.). (2012). *Advances in citrus nutrition*. Springer Science & Business Media.

Steinmetz, R., & Nahrstedt, K. (2004). *Multimedia applications*. In *Multimedia Applications* (pp. 197-214). Springer, Berlin, Heidelberg.

Tanenbaum, A. S. (2003). *Redes de computadoras*. Pearson educación.

Wang, J., Reddy, G. R. M., Prasad, V. K., & Reddy, V. S. (2018). *Soft Computing and Signal Processing*. *Proceedings of ICSCSP*, 1.

Wheeler, A. (2007). Commercial applications of wireless sensor networks using ZigBee. *IEEE Communications Magazine*, 45(4), 70-77.

9 GLOSARIO

802.15.4	Conjunto de protocolos de comunicaciones inalámbricas.
AD-HOC	Tipo de Red descentralizada.
APS	Subcapa de aplicación del estándar Zigbee.
CAPA	La programación por capas es un modelo de desarrollo software en el que el objetivo primordial es la separación (desacoplamiento) de las partes que componen un sistema software.
DH	Dirección alta de destino de un dispositivo Xbee.
DL	Dirección baja de destino de un dispositivo Xbee.
FFD	Dispositivo de funcionalidad completa.
FHSS	Espectro ensanchado por salto de frecuencia (Frequency Hopping Spread Spectrum).
IEEE	Instituto de ingenieros en eléctrica y electrónica (Institute of Electricals and Electronics Engineers).
IOT	Internet de las cosas.
LOS	Línea de vista.
MAC	Capa de control de acceso al medio del estándar Zigbee.
NLOS	Sin línea de vista.
NWK	Capa de Red del estándar Zigbee.
PAN	Red de área personal.
PERIURBAN	Son espacios que se sitúan en los alrededores de una ciudad y que,
O	aunque no se emplean para el desarrollo urbano, tampoco se usan para actividades rurales.
PHY	Capa física del estándar Zigbee.
PIANTA	Una planta puede ser una parte de un equipo, tal vez un conjunto de los elementos de una máquina que funcionan juntos.
RF	Radio frecuencia (Radio Frequency).
RFD	Dispositivo de funcionalidad reducida.
RFID.	Es un sistema de almacenamiento y recuperación de datos remotos que usa dispositivos denominados etiquetas, tarjetas o transpondedores que utilizan identificación por radiofrecuencia.
RSSI	Indicador de potencia de señal recibida (Recive Strength Signal Indicator).
RX	Es la abreviación de recepción en telecomunicaciones.
SH	Número de serie alto de un dispositivo Xbee.
SL	Número de serie bajo de un dispositivo Xbee.
TX	Es la abreviación de transmisión en telecomunicaciones
UART	Son las siglas en inglés de Universal Asynchronous Receiver-Transmitter, en español: Transmisor-Receptor Asíncrono Universal, es el dispositivo que controla los puertos y dispositivos serie
WSN	Redes de sensores (Wireless sensor network)
XBEE	Dispositivo inalámbrico para la interconexión y comunicación entre dispositivos.

XCTU	Software para configuración de los dispositivos Xbee.
ZDO	Objetos de dispositivo Zigbee (Zigbee Device Objects).
ZED	Dispositivo final Zigbee (Zigbee end Device).
ZIGBEE	Estándar específico para redes de sensores inalámbricas de bajo consumo.

ANEXO

En este anexo se encuentran las participaciones en congresos, estancias académicas y artículos publicados.





MODELO MATEMÁTICO EN COMUNICACIÓN ZIGBEE

ISC. Ernesto Ruiz Ángeles¹, M.C. Felipe Alfonso Ordoñez García³, MTI Luis Joaquín Alberto Mota Pino², Dra. María Guadalupe Sánchez Cervantes¹, Carlos Ángel Patricio Martínez¹, Jorge Alberto Gutiérrez Padilla¹,

Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Cd. Guzmán, Ciudad Guzmán, Jalisco, México

Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Mérida Yucatán

Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico de Cd. Guzmán, Jalisco, México/ CINVESTAV unidad Guadalajara
alfonso777@hotmail.com

RESUMEN

En el presente trabajo se presenta el uso de un modelo matemático para validar y diseñar una red inalámbrica de sensores y, de esta manera garantizar que las comunicaciones se establezcan en forma robusta siguiendo el modelo Maestro – esclavo para la obtención de datos del sistema que serán manipulados para después enviarlos a ser almacenado en forma local o remota, los resultados obtenidos demuestran una clara ventaja al utilizar el modelo matemático de Friss, el cual permite diseñar de manera más acertada la red.

Palabras clave: Matemático / Modelo / Niebla / ZigBee.

ABSTRACT

The present work presents the use of a mathematical model to validate and design a wireless network of sensors and, in this way, ensure that communications are established in a robust manner following the Master-slave model for obtaining system data. which will be manipulated and then sent to be stored locally or remotely, the results obtained show a clear advantage when using the mathematical model of Friss, which allows a more accurate design of the network.

Keywords: Mathematical / Model / Fog / ZigBee.



CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DE ESTUDIOS AVANZADOS DEL
IPN

*"Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución
Política de los Estados Unidos Mexicanos "*

Zapopan, Jalisco a 27 de Abril de 2018
CARTA DE ACEPTACIÓN

A QUIEN CORRESPONDA:

Por este medio le informo que el alumno **Ernesto Ruiz Angeles**, estudiante de la **Maestría en Ciencias de la computación** en el Instituto Tecnológico de Cd. Guzmán Jalisco con número de control **M17290013**, ha sido **ACEPTADO** para realizar una estancia de investigación en el **Cinvestav (Centro de investigación y de estudios avanzados) Guadalajara**, bajo mi supervisión en el periodo comprendido del **2 de julio del 2018 al 31 de Agosto del 2018**.

Sin otro particular, reciba un cordial saludo.

Atentamente

Dr. Mario Angel Siller Gonzalez Pico

ESCUELA DE OTOÑO EN SISTEMAS DISTRIBUIDOS

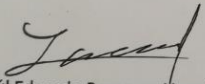
Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica

Se le otorga la presente
CONSTANCIA

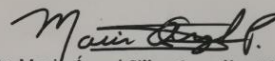
a

Ernesto Ruiz Angeles

Por su participación en la **Escuela de Otoño en Sistemas Distribuidos**
de la Red Temática en Sistemas y Redes de Próxima Generación
Santa María Tonantzintla, San Andrés Cholula, Puebla.
5 al 7 de Noviembre



Dr. Saúl Eduardo Pomares Hernández
Responsable Técnico
Red Temática en Sistemas y Redes de Próxima Generación



Dr. Marib Ángel Siller González-Pico
Instructor
Red Temática en Sistemas y Redes de Próxima Generación





Tecnológico Nacional de México
 Instituto Tecnológico de Cd. Guzmán.
 Maestría en Ciencias de la Computación

“Automatización inteligente de un sistema IoT en agricultura de precisión”

Ernesto Ruiz Ángeles
 Asesor: MC. Felipe Alfonso Ordoñez García
 Co asesor: Dr. Mario Angel Siller González Pico

Resumen

Las comunicaciones en los sistemas IoT tienen una importancia significativa, para así tener un manejo y análisis de datos mas eficiente y coherente. Así las herramientas utilizadas para la obtención de los datos deben ser lo suficientemente robustas.

El proyecto de investigación en el que se esta trabajando hace referencia a sistemas de comunicación del tipo Maestro-Escavo, es decir, los esclavos estarán proporcionando los datos y los maestros serán los encargados de procesar y/o enviar los resultados a sistema principal. Esta investigación volcara los resultados obtenidos en una urban farm.



Figura: Arquitectura propuesta basada en la arquitectura de nivel 5 para un sistema IoT.

Metodología

Identificar los tipos de datos (sensores) de los que se requiere obtener información, con la finalidad de tener solo datos que realmente necesitamos. Posterior a ello se analizaran los tipos de redes de sensores que funcionen en un sistema de comunicación Maestro - Esclavo, siendo I2C y ZigBee los que mejores características el primero es cableado y el segundo inalámbrico.



Figura: sistema I2C y zigBee.



Figura: Arquitectura IoT nivel 5 Bahga.

Prototipo

El prototipo donde se realizan las pruebas de comunicación así como la obtención de los datos es como se ve en la siguientes figuras.



Propuesta

Se propone establecer comunicaciones tanto alámbricas como inalámbricas, donde ambos tipos de comunicación trabajan en un sistema Maestro - Esclavo, es decir, el maestro solicita datos a los esclavos y estos se los regresan a través de sus protocolos, en este proyecto se investiga la viabilidad de tener comunicaciones por el protocolo ZigBee e I2C



Figura: Protocolo zigBee e I2C en un sistema.

Se propone una arquitectura basado en la arquitectura de un sistema IoT de nivel 5 de Bahga. Como se muestra en la siguiente figura.

Resultados



Figura: Grafico del sistema que recibe los datos de sensores



Figura: Escenario propuesto



Figura: Red formada zigBee



Figura: Gráfico resultados RSSI



Figura: Gráfico resultados RSSI usando ecuación

Referencias bibliográficas

1. Bahga, A; Madisetti, V (2014). "Internet of Things: A Hands-On Approach". Libro distribuido por los autores. United States of America. (19 - 77)
2. "A. S. Tannenbaum, REDES DE COMPUTADORES, PEARSON, 2014.
3. Z. ALLIANCE, «ZigBee specification, Document 053474r06,» 2006. [En línea]. Available: HTTP://www.zigbee.org.
4. Z.-w. HU, «I2C Protocol Design for Reusability,» IEEE, p. 4, 2010.
5. C. Dr.R.Shantha Selva Kumari, «INTERFACING OF MEMS MOTION SENSOR WITH FPGA USING I2C PROTOCOL,» IEEE, p. 5, 2017.