



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

SISTEMA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

TEMA:

**Análisis Técnico y Regulatorio de Nuevas Redes de Transmisión para
Dispositivos IoT (Internet of Things) en la ciudad de Guayaquil,
Ecuador**

AUTOR:

Ing. Milton Iván Alfonso Guzmán

Trabajo de Titulación previo a la obtención del Grado Académico de
MAGÍSTER EN TELECOMUNICACIONES

TUTOR:

MSc. María Luzmila Ruilova Aguirre

Guayaquil, 24 de noviembre de 2020



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

SISTEMA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo fue realizado en su totalidad por el Magíster **Alfonzo Guzmán, Milton Iván** como requerimiento parcial para la obtención del Grado Académico de **MAGÍSTER EN TELECOMUNICACIONES**.

TUTOR

MSc. María Luzmila Ruilova Aguirre

DIRECTOR DEL PROGRAMA

MSc. Manuel Romero Paz

Guayaquil, 24 de noviembre de 2020



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

SISTEMA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES
DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, Alfonso Guzmán, Milton Iván

DECLARO QUE:

El trabajo de titulación “**Análisis Técnico y Regulatorio de Nuevas Redes de Transmisión para Dispositivos IoT (Internet of Things) en la ciudad de Guayaquil, Ecuador**”, previa a la obtención del grado Académico de Magíster, ha sido desarrollado en base a una investigación exhaustiva, respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan al pie de las páginas correspondientes. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance científico del trabajo de titulación del Grado Académico en mención.

Guayaquil, 24 de noviembre de 2020

EL AUTOR

Ing. Milton Iván Alfonso Guzmán



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

SISTEMA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

AUTORIZACIÓN

Yo, **Alfonzo Guzmán, Milton Iván**

Autorizo a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, la publicación, en la biblioteca de la institución del trabajo de titulación de Maestría titulado: **“Análisis Técnico y Regulatorio de Nuevas Redes de Transmisión para Dispositivos IoT (Internet of Things) en la ciudad de Guayaquil, Ecuador”**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, 24 de noviembre de 2020

EL AUTOR

Ing. Milton Iván Alfonzo Guzmán

INFORME DE URKUND

The screenshot displays the URKUND interface. On the left, a sidebar shows document details: 'Documento: TT Milton Alfonso Guzman.docx (D82942802)', 'Presentado: 2020-10-27 17:07 (-05:00)', 'Presentado por: Luis Córdova Rivadeneira (lcardovar@yahoo.com)', and 'Recibido: luis.cordova.ucsg@analysis.orkund.com'. A yellow highlight indicates '2%' of the 41 pages consist of text from 5 sources. The main area on the right, titled 'Lista de fuentes', lists the following sources:

- TELECOMUNICACIONES Y SERVICIOS DE TELECOMUNICACIONES
- <https://aprendiendoarduino.wordpress.com/tag/ybee/>
- <https://aprendiendoarduino.wordpress.com/category/ybee/>
- 1598851914_190_Documento_completo.pdf-PDFA.pdf
- DE_SALAZAR_MARTINEZ_QJ0r336_20190904_1403_c033.pdf
- Trabajo de Titulación.pdf

Below the source list, the document content is displayed, including the university name 'UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL SISTEMA DE POSGRADO MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES', the thesis topic 'TEMA: Análisis Técnico y Regulatorio de Nuevas Redes de Transmisión para Dispositivos IoT (Internet of Things) en la ciudad de Guayaquil, Ecuador', the author 'AUTOR: Ing. Milton Iván Alfonso Guzmán', the tutor 'TUTOR: MSc. María Luzmila Rulova Aguirre', and the date 'Guayaquil, 30 de octubre del 2020'. A certification statement at the bottom reads: 'CERTIFICACIÓN Certificamos que el presente trabajo fue realizado en su totalidad por el Magister Alfonso Guzmán, Milton Iván como requerimiento parcial para la obtención del Grado Académico de Magister en Telecomunicaciones.'

Dedicatoria

A nuestro Señor Jesús, por la obra que ha hecho en mi vida, pues empecé la maestría en el mismo año que acepté a Jesús como mi Señor y Salvador y muchas cosas ocurrieron en mi vida desde entonces, hoy estoy aquí solo por su gracia y misericordia, no encuentro regalo más grande que haberme dado la oportunidad de culminar y seguir avanzando en mi carrera profesional.

A mi hijo, con quien compartimos muchas vivencias acerca de este estudio y por mostrarle que todo lo que se comienza lo debemos culminar.

A mis padres por haberme dado la vida y porque siempre han confiado en mí, aun en mis desaciertos.

Agradecimientos

Al único Dios Todopoderoso porque me demuestra que su amor es infinito y sus tiempos perfectos. A cada maestro que aportó con los conocimientos impartidos y a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil por acogerme una vez más para subir un escalón más en mi carrera.

A cada persona e institución que me ha colaborado en el desarrollo de esta tesis con información, material y equipos que he requerido.



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

SISTEMA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

f. 

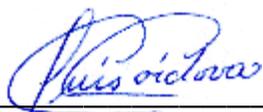
MSc. María Luzmila Ruilova Aguirre

TUTOR

f. 

MSc. Edgar Quezada Calle

REVISOR

f. 

MSc. Luis Córdova Rivadeneira

REVISOR

f. 

MSc. ROMERO PAZ, MANUEL DE JESÚS

DIRECTOR DEL PROGRAMA

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL	IX
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XIII
ÍNDICE DE TABLAS.....	XVI
RESUMEN	XVII
ABSTRACT	XVIII
CAPÍTULO 1. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO DE INTERVENCIÓN ...	19
1.1. Introducción	19
1.2. Antecedentes	21
1.3. Definición del Problema	22
1.4. Objetivos:.....	23
1.4.1. Objetivo General	23
1.4.2. Objetivos Específicos	23
1.5. Hipótesis	24
1.6. Metodología de investigación	24
CAPÍTULO 2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	26
2.1. IoT	26
2.2. Características principales del IoT	26
2.3. Arquitectura IoT	27
2.4. Aplicaciones de IoT.....	29
2.5. Tecnologías IoT	32
2.6. IoT en la industria	34
2.7. Redes de comunicación en IoT.....	34
2.8. Conexión M2M con REST API	35
2.9. Tecnologías inalámbricas para IoT	36
2.9.1. GSM/GPRS.....	36
2.9.2. SIGFOX	37
2.9.3. LoRaWan	38
2.9.4. Narrowband IoT	38
2.9.5. BLE	39

2.9.6. Zigbee	41
2.9.7. WIFI 802.15.4.....	42
2.9.8. ZWave.....	42
2.9.9. Thread.....	43
2.10. Dispositivos y protocolos IoT	45
2.10.1. Dispositivos IoT	45
2.10.2. Sensores	45
2.10.3. Sensores físicos	46
2.10.4. Sensores químicos y bioquímicos	46
2.10.5. Actuadores	46
2.10.6. Motores	46
2.10.7. Servomotores	46
2.10.8. Motores paso a paso	47
2.10.9. Electroválvulas	47
2.10.10. Smartphones	47
2.11. Protocolos IoT	48
2.11.1 MQTT	48
2.11.2. CoAP	48
2.11.3. XMPP	49
2.11.4. AMQP	49
2.12. Arduino	49
2.13. Raspberry PI	50
2.14. XBEE	51
2.15. ESP32.....	52
2.16. Sensores para Arduino y Raspberry PI	53
2.16.1. Sensor de temperatura.....	53
2.16.2. Sensor de humedad	53
2.16.3. Sensor de presión	53
2.16.4. Sensor de velocidad.....	54
2.16.5. Sensor de flujo	54
2.17. Seguridad en redes inalámbricas para dispositivos IoT.....	54
2.18. Normativas y Regulaciones IoT	55
2.18.1. Normativa internacional de protocolos IoT.....	55
2.19. Regulación en otros países acerca de IoT	56

2.20. Regulación en el Ecuador sobre IoT	57
CAPÍTULO 3. DESARROLLO DEL TRABAJO	59
3.1. Módulo de pruebas inalámbrico para dispositivos IoT	59
3.2. Módulo Xbee S2CTH	60
3.3. Series Xbee	62
3.3.1. XBee Series 1	62
3.3.2. XBee Znet 2.5	62
3.3.3. ZB (el actual módulo Series 2)	62
3.3.4. XBee Serie 3	63
3.3.5. 900MHz.....	63
3.3.6. XSC S3B.....	63
3.4. Tipos de Antenas de Xbee	64
3.4.1. Chip Antenna	64
3.4.2. Wire Antenna (Whip Antenna).....	64
3.4.3. u.FL Antenna.....	64
3.4.4. RPSMA Antenna	64
3.4.5. Trace Antenna.....	65
3.5. Xbee Shield	65
3.6. Frecuencias de operación de 802.15.4 y Zigbee.....	66
3.6.1. Control SC dentro del coordinador	68
3.6.2. Evitar el WiFi de oficina / hogar	69
3.7. Configuración de la red punto a punto con Xbee Serie 2	71
3.8. Herramientas de análisis y monitoreo de señal inalámbrica con XCTU de DIGI	82
3.9. Monitorización de señal inalámbrica Zigbee e IEEE 802.15.4 con Analizador de espectros de Agilent y antena Aaronia.	85
3.9.1. Pruebas de enlace inalámbrico IoT con Xbee desde laboratorio, ambiente interno.....	86
3.9.2. Pruebas de enlace inalámbrico IoT con Xbee en campo, ambiente externo.	89
3.10. Monitorización de señal inalámbrica LORAWAN con Analizador de espectros de Agilent y antena Aaronia.....	93
3.11. Marco regulatorio actual para frecuencias libres en el Ecuador.	

3.11.1.Bandas UDBL	104
CONCLUSIONES	106
RECOMENDACIONES	108
GLOSARIO TÉCNICO.....	109
BIBLIOGRAFÍA	113

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Estructura IoT extendida	28
Figura 2.2 Estructura IoT extendida	28
Figura 2.3 Capas IoT	29
Figura 2.4 Aplicaciones IoT en el hogar	30
Figura 2.5 Aplicación IoT para personas con discapacidad.....	30
Figura 2.6 Aplicación IoT para la agricultura.	31
Figura 2.7 Aplicación IoT para calamidades naturales.....	31
Figura 2.8 Aplicación IoT para monitoreo urbano	32
Figura 2.9 Diagrama de tecnología ARM	33
Figura 2.10 Logo de tecnología GSM.....	37
Figura 2.11 Logo de tecnología Sigfox.....	38
Figura 2.12 Logo de tecnología LoraWAN.....	38
Figura 2.13 GATT Server.....	40
Figura 2.14 Logo de tecnología Zigbee	41
Figura 2.15 Stack Zigbee	41
Figura 2.16 Stack IEEE 802.15.4 vs Zigbee	42
Figura 2.17 Aplicaciones con Z-Wave.....	43
Figura 2.18 Stack de Thread.....	44
Figura 2.19 Logo Thread	45
Figura 2.20 Arduino	50
Figura 2.21 Raspberry PI	51
Figura 2.22 Xbee Pro	52
Figura 2.23 ESP32.....	53
Figura 2.24 Sensores para Arduino	54
Figura 3.1 Esquema de pruebas de prototipos IoT	59
Figura 3.2 Esquemático de conexión Xbee	62
Figura 3.3 Series Xbee	64
Figura 3.4 Antenas Xbee.....	65
Figura 3.5 Shield Xbee	65
Figura 3.6 Módulos Xbee para pruebas IoT	71
Figura 3.7 Conexión USB con Arduino y Xbee.....	72
Figura 3.8 Módulo Xbee S2CTH.....	72

Figura 3.9 Conectorización de los módulos Xbee.....	72
Figura 3.10 Esquemático de conexión punto a punto.....	73
Figura 3.11 Versión XCTU.....	73
Figura 3.12 Pantalla principal XCTU.....	73
Figura 3.13 Puertos COM de los módulos Arduino.....	74
Figura 3.14 Configuración USB de los módulos.....	74
Figura 3.15 Módulos Xbee.....	75
Figura 3.16 Actualización de firmware Zigbee TH.....	75
Figura 3.17 Actualización de firmware DigiMesh 2,4 TH.....	76
Figura 3.18 Actualización de firmware 802.15.4 TH.....	76
Figura 3.19 Xbee actualizados.....	76
Figura 3.20 Configuraciones del Xbee del COM7.....	77
Figura 3.21 Configuraciones del Xbee del COM7.....	77
Figura 3.22 Xbee en modo Coordinador.....	79
Figura 3.23 Xbee en modo End Device.....	79
Figura 3.24 Consola de XCTU del Xbee B.....	80
Figura 3.25 Consola de XCTU del Xbee B.....	80
Figura 3.26 Envío de mensaje con el Xbee Coordinador.....	80
Figura 3.27 Recepción de mensaje con el Xbee End Device.....	81
Figura 3.28 Monitoreo de redes WIFI con INSSIDER.....	81
Figura 3.29 Redes WIFI con INSSIDER.....	81
Figura 3.30 Análisis de capa mac con INSSIDER.....	82
Figura 3.31 Herramientas de monitorización con XCTU.....	82
Figura 3.32 Analizador de espectros de WIFI con XCTU.....	83
Figura 3.33 Range Test de IEEE 802.15.4.....	83
Figura 3.34 Throughput de IEEE 802.15.4.....	84
Figura 3.35 Interconexión entre nodos IoT.....	84
Figura 3.36 Transmisión de datos entre los dispositivos Xbee.....	84
Figura 3.37 Analizador de espectros Agilent N1996A.....	85
Figura 3.38 Antena Aaronia Log periódica 380MHz - 18GHz de 5 dbi.....	86
Figura 3.39 Pruebas internas con los Xbee.....	87
Figura 3.40 Pruebas internas con los Xbee y Analizador de espectros AGILENT.....	87

Figura 3.41 Pruebas internas con los Xbee, Analizador de espectros AGILENT y antena de amplio rango.	87
Figura 3.42 Escaneo de frecuencias de WIFI 2,4 Ghz	88
Figura 3.43 Portadoras en el espectro de frecuencia de 2420 Mhz	88
Figura 3.44 Escaneo de frecuencias de WIFI 2,4 Ghz segunda toma.....	89
Figura 3.45 Montaje del módulo de pruebas con Analizador de espectros y antena	89
Figura 3.46 Configuraciones de Analizador de espectros en campo	90
Figura 3.47 Detalles de las pruebas en campo	90
Figura 3.48 Escaneo de frecuencias WIFI en campo abierto.....	90
Figura 3.49 Alineación de antena para el scaneo de frecuencias.....	91
Figura 3.50 Configuración de analizador de espectros	91
Figura 3.51 Escaneo de frecuencias de WIFI 2,4 Ghz en campo abierto..	91
Figura 3.52 Escaneo de frecuencias de WIFI 2,4 Ghz en campo abierto segunda toma	92
Figura 3.53 Escaneo de frecuencias de WIFI 2,4 Ghz en campo abierto tercera toma	92
Figura 3.54 Escaneo de frecuencias en campo abierto de WIFI 2,4 Ghz con WIFI Analyzer	92
Figura 3.55 Escaneo de frecuencias de WIFI 2,4 Ghz cuarta toma	93
Figura 3.56 Escaneo de frecuencias del módulo Xbee con transmisión Zigbee y 802.15.4.....	93
Figura 3.57 Especificaciones de frecuencia con LORAWAN	94
Figura 3.58 Escaneo de frecuencias LoRaWAN (902 Mhz – 928 Mhz)	95
Figura 3.59 Escaneo de frecuencias LoRaWAN segunda toma (902 Mhz – 928 Mhz)	96
Figura 3.60 Frecuencias IMS en el Ecuador	98

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1 Especificaciones técnicas de Xbee Zigbee S2C	60
Tabla 3.2 Frecuencia de operación de Xbee Zigbee S2C	61
Tabla 3.3 Especificaciones de poder de Xbee	61
Tabla 3.4 Especificaciones de red de Xbee.....	61
Tabla 3.5 Regulación de los Xbee en diferentes países	61
Tabla 3.6 Frecuencias de operación de 802.15.4 y Zigbee	66
Tabla 3.7 Canales usados por WIFI.....	70
Tabla 3.8 Configuración Serial / USB	75
Tabla 3.9 Descripción de los parámetros de Xbee.....	78
Tabla 3.10 Parámetros principales a configurar en los módulos Xbee	78
Tabla 3.11 Distribución de frecuencias cercanas a 2,4 Ghz.....	98
Tabla 3.12 Parámetros de radio de protocolos 802.15.4 y Zigbee	100
Tabla 3.13 Límites generales para cualquier transmisor intencional.....	101
Tabla 3.14 Bandas de frecuencia y tipo de utilización	101
Tabla 3.15 Límites específicos para transmisores intencionales	102
Tabla 3.16 Bandas de frecuencias restringidas.....	103
Tabla 3.17 Niveles de radiación máximos permitidos para equipos ICM.....	103
Tabla 3.18 Límites a las transmisiones de espectro ensanchado	104
Tabla 3.19 Límites a las transmisiones de UDBL	104

RESUMEN

Las tecnologías IoT se están desplegando en varios países del mundo junto con las redes de banda ancha como FTTx, LTE Advanced, 5G o SigFox para el control, adquisición de datos, monitorización y toma de decisiones mediante sensores y actuadores que alimentarán un servidor local o en la nube con información o big data que servirá para utilizarla en diferentes campos como la industria 4.0, agricultura, Smart cities, telemedicina, tele-educación, etc. En el Ecuador son pocas las empresas que ofrecen servicios IoT a nivel empresarial o gubernamental, al ser un campo nuevo que recién está implementándose y por ende estandarizándose no hay un despliegue considerable de tecnologías IoT en el país. A nivel educativo y de investigación se han desarrollado diferentes prototipos para la industria como la pesquera, medicina y agricultura, sin embargo, es de considerar que el ente regulador no dispone de marcos regulatorios para la aplicación de diferentes tecnologías WAN de dispositivos IoT como LoraWAN o SigFox, así como también para tecnologías LAN de IoT como Zigbee, BLE, IEEE 802.15.4. Este trabajo de investigación propone abarcar el estudio de algunas tecnologías inalámbricas LAN de IoT utilizando sistemas embebidos como Arduino y Xbee, que mediante analizadores de espectros se puede observar el ancho de banda, saturación de portadoras y uso de espectro de estas tecnologías, con la finalidad de tener las directrices y recomendaciones para una futura regulación en el Ecuador de tecnologías IoT como LoraWAN, Zigbee, o WIFI IoT.

PALABRAS CLAVES: LoraWAN, SigFox, IoT, big data, industria 4.0, Zigbee.

ABSTRACT

IoT technologies are being deployed in several countries around the world along with broadband networks such as FTTx, LTE Advanced, 5G or SigFox for control, data acquisition, monitoring and decision-making using sensors and actuators that will power an on-premises or cloud server with information or big data that will be used for use in different fields such as Industry 4.0 , agriculture, Smart cities, telemedicine, tele-education, etc. In Ecuador, few companies offer IoT services at the enterprise or government level, as it is a new field that is just being implemented and therefore standardized there is no significant deployment of IoT technologies in the country. At the educational and research level, different prototypes have been developed for the industry such as fisheries, medicine and agriculture, however, it is to be considered that the regulatory body does not have regulatory frameworks for the application of different WAN technologies of IoT devices such as LoraWAN or SigFox, as well as for IoT LAN technologies such as Zigbee, BLE, IEEE 802.15.4. This research work proposes to cover the study of some Wireless LAN Technologies of IoT using embedded systems such as Arduino and Xbee, which through spectrum analyzers we can observe the bandwidth, saturation of carriers and spectrum use of these technologies, in order to have the guidelines and recommendations for future regulation in Ecuador of IoT technologies such as LoraWAN , Zigbee, or WIFI IoT.

KEYWORDS: LoraWAN, SigFox, IoT, big data, industria 4.0, Zigbee.

Capítulo 1. Descripción del proyecto de intervención

En este capítulo se detallan las generalidades del trabajo de investigación a realizar.

1.1. Introducción

La recopilación de información para reaccionar, tomar decisiones o simplemente para tener un registro cronológico de cualquier actividad o proyecto siempre ha sido una necesidad y de una manera u otra esta se ha realizado utilizando una diversidad de mecanismos que van desde los manuales, semiautomáticos, automáticos y hasta completamente desatendidos, sin embargo, nunca se ha estado tan cerca como en la actualidad de que esta actividad se realice sin la intervención del ser humano, tanto en la recolección, almacenamiento y análisis como en la entrega de información.

Los tiempos actuales están inundados de una gama de dispositivos microelectrónicos que realizan operaciones que antes necesitaban de un humano para ser realizadas, no debe confundirse con la era industrial en la cual los robots o máquinas automatizadas tomaron los puestos de trabajo en la manufactura dado que podían realizar tareas con mayor fuerza, rapidez y precisión que uno o más seres humanos. En la actualidad la era microelectrónica digital ha dotado de cierta capacidad a los dispositivos electrónicos para que controlen las máquinas robóticas de una forma eficiente, las dotan de inteligencia artificial porque pueden conocer el entorno en el que se encuentran, pueden tratar la información y sobre todo pueden comunicarse con otros equipos para enviar alertas o simplemente para almacenar datos sea a corta o gran distancia.

Aquí cabe la inquietud, ¿a qué tanta distancia podría ser?, se imaginan tener que recorrer muchos caminos para conocer la humedad del suelo de todo un sembrío, conocer la temperatura del agua en cada una de las piscinas de una camaronera grande, cuánto ha estado recorriendo un

paquete en tránsito, en fin, una variedad de eventos que al ocurrir o ser capturados generan datos útiles para toma de decisiones, el primer problema sería que varios de estos ejemplos ocurren en campo abierto, en lugares que muchas veces carecen de cobertura de energía eléctrica, de redes de transmisión para enviar la información recogida o ambas cosas.

La industria tecnológica ha creado las redes de baja potencia para suplir esta necesidad de transmitir, éstas son capaces de operar con poca energía a bajas frecuencias y así recorrer más distancia, esta característica reduce su capacidad de transmisión, sin embargo, son lo suficientemente capaces de transportar datos de una forma eficaz y confiable ya que a la vez se fabrican dispositivos compatibles con estas redes que no demandan demasiada energía y la consumen eficientemente cerrando así el ciclo de generación, recolección, transmisión, almacenamiento, procesamiento y presentación de la información.

Dada la importancia que está cobrando el uso de dispositivos para toma de información en el agro, en las ciudades inteligentes, entre otros, se hace necesario tener medios o redes de transmisión que sean capaces de recibir y transmitir la información de los dispositivos a bajos costos financieros y energéticos, ya que estos dispositivos para su operación necesitan ahorrar al máximo su energía, pero a la vez comunicar constantemente la información recolectada.

En el Ecuador poco a poco se están haciendo despliegues de redes WAN como LPWAN tales como LoRa, LoRaWan y SigFox, y redes LAN como Zigbee, IEEE 802.15.4, algunas abiertas y otras bajo esquemas de suscripción. El presente trabajo pretende hacer un análisis de estas redes desde el punto de vista técnico y regulatorio para su adecuada y legal operación enmarcada en los estándares internacionales desde el punto de vista técnico, frecuencias de operación, alcances, potencias, ancho de banda, análisis de canal ocupado y marcos regulatorios en el Ecuador desde el punto de vista legal, uso de frecuencias licenciadas o abiertas.

Luego del análisis se podría sugerir hacer ajustes en estas redes y por qué no decirlo hacer sugerencias al organismo de control y regulación del espectro radioeléctrico en el Ecuador para el adecuado despliegue y buen uso sin interferencias de estas redes con otros servicios autorizados.

1.2. Antecedentes

El Ecuador es un país en vías de desarrollo que en los últimos años ha realizado muchos esfuerzos por alcanzar niveles que lo conviertan en un destino de inversión y el uso de la tecnología en las empresas o la industria es una de las variables que contribuye tremendamente a elevar este nivel, según (González & Romero, 2018) “Adaptarse a las necesidades del consumidor y las mejoras de servicios, ya no es una alternativa, más bien se ha vuelto en algo esencial para mantenerse al margen en el mercado que es cada vez más digital que físico.” Como se puede ver el comportamiento del consumidor actual apunta más a negocios digitales que físicos, aquellos que tienen información toman mejores decisiones, por lo tanto, tener información es tan importante como transportarla, pero qué sucede cuando la información se obtiene de lugares poco tradicionales como en un cultivo, en las instalaciones de un edificio, entre otros.

Los servicios de transporte de información en el Ecuador han estado de varias formas restringidos o mantenidos de forma “tradicional”, redes privadas de alcance limitado, enlaces contratados con carriers o transportistas de información a costos relativamente altos o en muchos casos terminar utilizando las operadoras de telefonía móvil que ya han realizado despliegues de sus redes en una gran parte del territorio nacional pero encareciendo el costo de un proyecto al ser un rubro muy alto el tener que usar la telefonía móvil avanzada en el Ecuador, SMA (Servicio Móvil Avanzado).

Por todo lo expuesto se hace necesario conocer qué alternativas de redes de transmisión existen en la actualidad desde el punto de vista técnico y práctico para el diseño e implementación de sistemas de Información en los que se requiera transportar datos obtenidos con dispositivos del Internet de las cosas o IoT.

1.3. Definición del Problema

Este análisis será de aporte científico para la sociedad tecnológica y por traspaso para el beneficiado al usar la tecnología debido a que será muy valioso conocer las alternativas en redes de transmisión que cumplan los estándares internacionales y la normativa técnica en el Ecuador para los proyectos de IoT.

Se pueden detectar necesidades regulatorias respecto del uso de estas redes y se conocerá si no afectan otros servicios de telecomunicaciones dispuestos en el aire por el ente técnico-regulador del estado ecuatoriano. Este análisis puede generar recomendaciones técnicas acerca del uso de las diferentes redes de transmisión que se encuentran operando en la ciudad de Guayaquil para los proyectos del Internet de las Cosas, IoT.

El usuario y el diseñador o implementador de la solución IoT tendrá en sus manos un criterio técnico que le permita elegir la red de transmisión de datos que mejor se ajuste a su diseño. El presente trabajo se puede utilizar como fuente de información para futuros estudios de las tecnologías de las redes de transmisión desplegadas en la ciudad de Guayaquil para los proyectos de Internet de las Cosas.

Debido al despliegue de dispositivos IoT en el Ecuador tanto para convertir a las ciudades principales en ciudades inteligentes como en el agro para obtener datos se hace necesario conocer cuáles son los medios o redes de transmisión de tipo LPWAN que se ofertan en el mercado y que

estén disponibles para realización de redes privadas desde el punto de vista técnico y regulatorio.

Dada la importancia que está cobrando el uso de dispositivos para toma de información en el agro, en las ciudades inteligentes, entre otros, se hace necesario tener medios o redes de transmisión que sean capaces de receptar y transmitir la información de los dispositivos a bajos costos financieros y energéticos, ya que estos dispositivos para su operación necesitan ahorrar al máximo su energía, pero a la vez comunicar constantemente la información recolectada.

En el Ecuador poco a poco se están haciendo despliegues de redes LPWAN tales como LoRa, LoRaWan y SigFox, algunas abiertas y otras bajo esquemas de suscripción.

1.4. Objetivos:

1.4.1. Objetivo General

Realizar un análisis técnico y regulatorio de nuevas redes de transmisión para dispositivos IoT (Internet of Things) en la ciudad de Guayaquil, Ecuador, desde el punto de vista técnico legal enmarcado en estándares internacionales.

1.4.2. Objetivos Específicos

Evaluar el funcionamiento, configuración y operación de redes LAN Zigbee y 802.15.4 utilizando dispositivos IoT mediante Xbee y Arduino.

Realizar mediciones mediante analizador de espectros y software de redes inalámbricas XCTU para el análisis en aspectos de frecuencias, ancho de banda, potencia de señal, ocupación de canal en redes Zigbee y 802.15.4.

Realizar recomendaciones en el aspecto legal con respecto al uso de redes LAN aplicadas para IoT tales como Zigbee y 802.15.4.

Realizar recomendaciones en el aspecto legal con respecto al uso de redes WAN aplicadas para IoT tales como LoraWAN.

1.5. Hipótesis

Existen varios tipos de redes WAN IoT o también llamadas LPWAN (Low Power Wide Area Network), redes de baja potencia y de largo alcance traducido al español, que se ofrecen en el medio para transmisión de los datos que han sido obtenidos por sensores IoT, entre esas redes está LoraWAN y SigFox, así también hay varios tipos de redes LAN como Zigbee e IEEE 802.15.4 que se utilizan en dispositivos IoT para la obtención de información.

Esto plantea la hipótesis, cuál será el entorno regulatorio para el uso de este tipo de tecnologías inalámbricas, cuáles son las recomendaciones y utilización de estas tecnologías y como se deben enmarcar en la ley frente al ente regulador en la ciudad de Guayaquil Ecuador.

1.6. Metodología de investigación

Para la propuesta planteada se realizará una metodología referente a una investigación descriptiva y explicativa, cuyo enfoque es cuantitativo y su diseño de investigación es explicativo y descriptivo. La investigación se aborda desde un enfoque descriptivo y explicativo al involucrar la investigación del comportamiento de las redes inalámbricas LoRaWAN, Zigbee, e IEEE 802.15.4 para dispositivos IoT.

Se describen las variables enfocadas a datos que se obtienen basadas en pruebas de laboratorio y de campo donde se especificarán la

variable dependiente la cual es la calidad de la señal inalámbrica del dispositivo IoT. Esta calidad se desglosa en la potencia de la señal inalámbrica, el nivel de SNR de la señal, las interferencias del canal de comunicaciones inalámbrico de la tecnología IoT (Internet of Things) a ser evaluada.

Capítulo 2. Fundamentos teóricos

A continuación, el desarrollo del marco teórico de esta investigación.

2.1. IoT

El internet de las cosas es un concepto que trata sobre una interconexión digital de objetos utilizados comúnmente con internet. En el mundo de IoT cada objeto tiene una identidad virtual propia y tiene una capacidad potencial para integrarse e interactuar de manera independiente con la red de internet a través de cualquier otro individuo, ya sea una maquina M2M o un ser humano.

IoT constituye un cambio en la calidad de vida de las personas y de la sociedad en general, ya que ofrece nuevas oportunidades de acceso a datos e información y servicios específicos como por ejemplo para la educación, seguridad, agricultura, medicina, asistencia sanitaria, transporte, entre otros campos de acción.

2.2. Características principales del IoT

Existen una serie de características fundamentales que identifican al internet de las cosas y se describen a continuación:

- **Interconectividad:** Permite la compatibilidad y el acceso a la infraestructura de la información y la comunicación.
- **Servicios relacionados con objetos:** IoT proporciona servicios relacionados con objetos dentro de las restricciones de esos objetos.
- **Heterogeneidad:** Dispositivos basados en diferentes plataformas de hardware y redes que pueden comunicarse e interactuar entre sí.
- **Cambios dinámicos:** Tanto el estado de los dispositivos (reposo, activo, conectado, desconectado) como el contexto (ubicación,

velocidad) o el número de dispositivos pueden variar de una manera dinámica de acuerdo con el uso.

- **Escalabilidad:** El número de dispositivos IoT interconectados va a incrementarse durante los próximos años.

Por otra parte, el requisito mínimo que debe cumplir cualquier dispositivo IoT es que disponga de capacidades de comunicación.

- **Conectividad basada en la identificación:** Para interconectar distintos objetos estos deben estar plenamente identificados.
- **Compatibilidad:** como los sistemas pueden ser heterogéneos, es necesario garantizar la compatibilidad en muchos casos para el uso de diferentes servicios.
- **Capacidades basadas en la ubicación:** en algunos casos las comunicaciones y servicios relacionados con los objetos dependerá de la información sobre la ubicación de estos y/o de los usuarios.
- **Seguridad:** todo objeto conectado presenta amenazas de seguridad. Es esencial mantener requisitos de seguridad a la hora de integrar varios dispositivos y redes de dispositivos de forma que se mantenga la integridad, la confidencialidad y la autenticidad de los datos.
- **Protección de la privacidad:** Algunos objetos recaban información de la salud del usuario, por lo que es esencial que se dé soporte a la protección de los datos, ya sea durante la transmisión, el almacenamiento o el procesamiento de estos.
- **Autoconfiguración (plug and play):** Los dispositivos IoT deben soportar su autoconfiguración.

2.3. Arquitectura IoT

La arquitectura del sistema IoT tiene una estructura de siete capas, de abajo hacia arriba, la parte inferior son dispositivos de hardware IoT y

se dividen en dos capas, capa de dispositivo de detección y acción, y capa de dispositivo inteligente. La capa anterior está relacionada con la información de las cosas, son la capa de información física y la capa de información lógica. Entonces lo anterior es la capa de servicio, que se divide en la capa de servicio básica de IoT y la capa intermedia de servicio. La parte superior es la capa de aplicación.

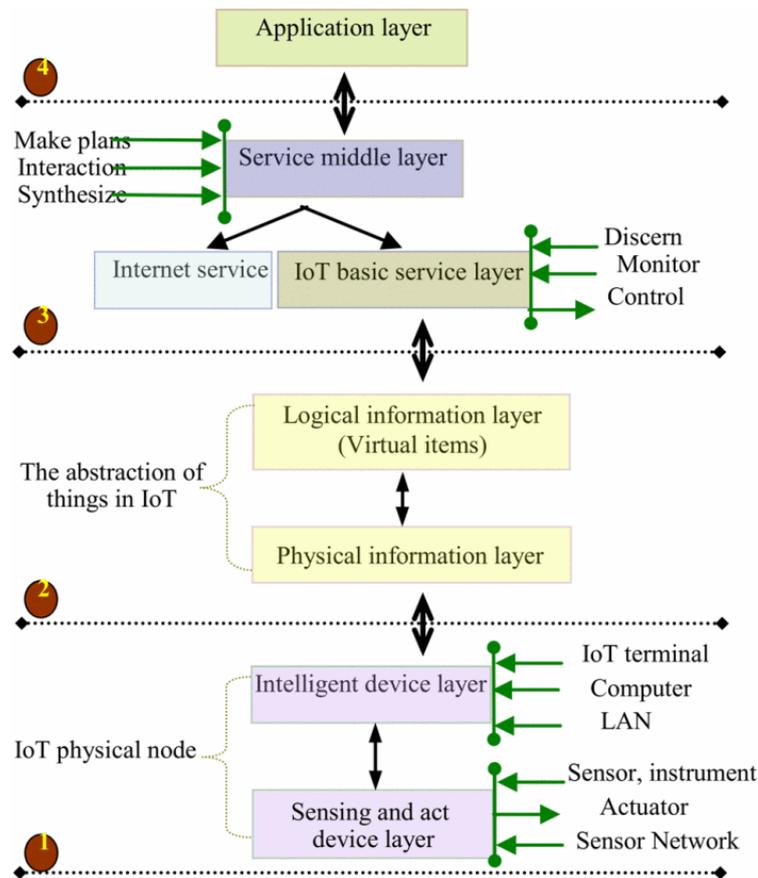


Figura 2.1 Estructura IoT extendida
Fuente: (Lv, y otros, 2017)

La arquitectura básica de IoT, está dividida en tres capas:



Figura 2.2 Estructura IoT extendida
Fuente: (Cobos, 2016)

- **Capa de percepción (Perception Layer):** este nivel es el responsable de recoger las propiedades físicas de los objetos mediante sensores y convertir la información en señales digitales para poder transmitirlos por la red.
- **Capa de red (Network Layer):** esta capa tiene como función principal enviar los datos recogidos por la capa de percepción hacia su destino mediante la red 3G, 4G, WiFi, Bluetooth, ZigBee u otras tecnologías.
- **Capa de aplicación (Application Layer):** la función de la capa de aplicación es el desarrollo de todo tipo de aplicaciones en función del objetivo que tenga y de los datos recogidos por la capa de percepción (Cobos, 2016).

Así, se podría considerar que la arquitectura genérica del IoT consta de 5 capas, añadiendo la capa de Procesamiento y la capa de Negocio al modelo básico de tres capas.



Figura 2.3 Capas IoT
Fuente: (Cobos, 2016)

2.4. Aplicaciones de IoT

Para empezar, la idea principal de Internet de las cosas es interconectar múltiples dispositivos electrónicos de tipo analógico y digital, de naturaleza homogénea y heterogénea, pero con un rango de transmisión superpuesto entre sí, para que puedan comunicar eficientemente la información.

Algunos de los lugares donde IoT encuentra su utilidad y propósito se detallan a continuación:

Si el usuario está en la sala y los sensores instalados en el refrigerador detectan que es necesario rellenar las botellas de agua en el refrigerador entonces el sensor instalado en el refrigerador generaría el mensaje de 'búsqueda' de transmisión a todos los sensores instalados en la casa, ya sea en la sala de estar, el vestíbulo, el salón o el comedor, para 'averiguar' dónde está la persona y poder transmitirle la información, y puede proceder hacia el refrigerador para rellenar la botella de agua.

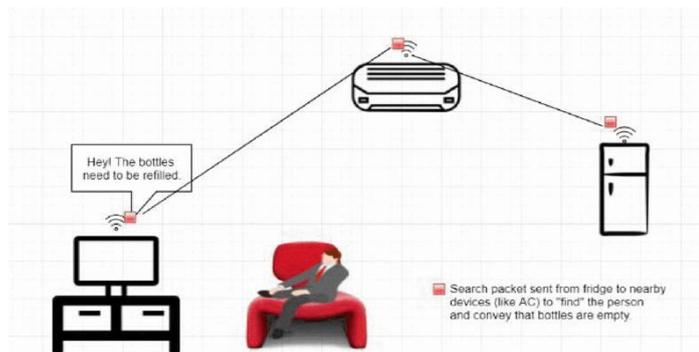


Figura 2.4 Aplicaciones IoT en el hogar

Fuente: (Chaudhary, Johari, Bhatia, Gupta, & Bhatnagar, 2019)

IoT puede ser de gran utilidad para resolver los problemas de las personas con discapacidades físicas o con discapacidades especiales en su vida cotidiana.

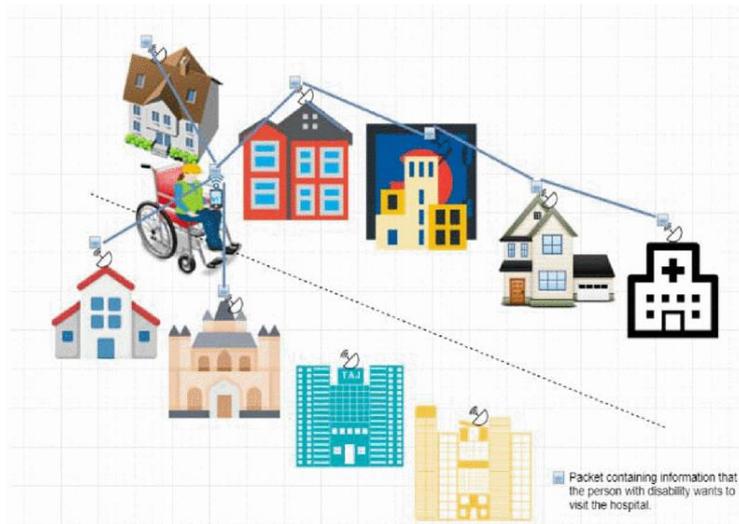


Figura 2.5 Aplicación IoT para personas con discapacidad.

Fuente: (Chaudhary, Johari, Bhatia, Gupta, & Bhatnagar, 2019)

La agricultura es la columna vertebral del país en desarrollo mediante el despliegue de los nodos sensores en el interior del suelo, puede ayudar a los agricultores a planificar el mes y la época del año en que sembrar las semillas, mantener sano el retoño en crecimiento al mantenerlo libre de enfermedades mediante el uso de la calidad y cantidad correcta de insecticidas, la entrega adecuada y oportuna de agua al suelo, ha esto se le denomina riego inteligente, para que el rendimiento del cultivo sea alto y los agricultores puedan obtener una rica recompensa de su producto.

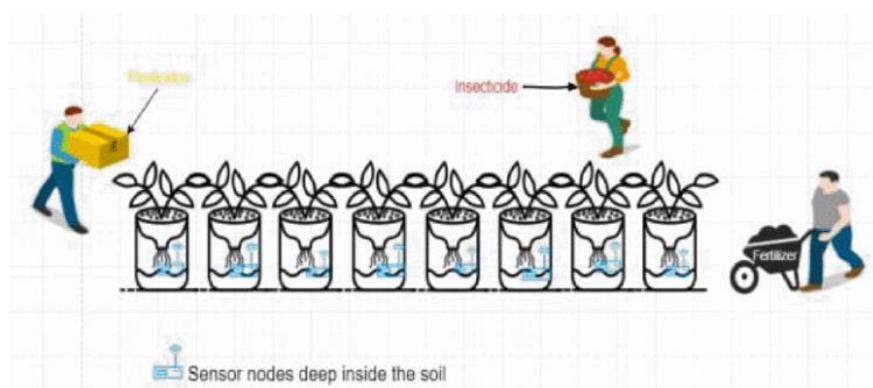


Figura 2.6 Aplicación IoT para la agricultura.

Fuente: (Chaudhary, Johari, Bhatia, Gupta, & Bhatnagar, 2019)

IoT puede desempeñar un papel muy decisivo para predecir la ocurrencia de calamidades naturales como: Terremotos, tsunamis, inundaciones repentinas, tormentas eléctricas, tormentas de granizo, lluvias incesantes, viento / marea de alta velocidad para que la evacuación oportuna de las personas pueda realizarse desde el área(s) afectada(s) donde es probable que ocurran calamidades naturales en el futuro.

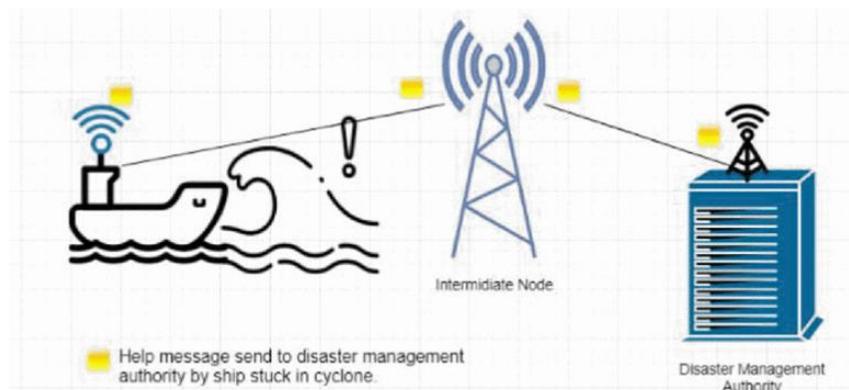


Figura 2.7 Aplicación IoT para calamidades naturales.

Fuente: (Chaudhary, Johari, Bhatia, Gupta, & Bhatnagar, 2019)

Contrario al escenario urbano, proporcionar instalaciones médicas y de atención médica a las personas necesitadas y desfavorecidas en el terreno montañoso es una tarea difícil. El IoT es apto para este tipo de escenarios, ya que en toda el área está cubierta con un nodo de hardware basado en sensor que se puede usar para detectar las condiciones prevalentes en el área afectada y los aldeanos pueden usar estos nodos para enviar la alerta o mensajes SOS a los equipos de socorro y rescate para que el equipo de médicos y personal de paramédicos puedan ser enviados para proporcionar instalaciones médicas a las personas afectadas (Chaudhary, Johari, Bhatia, Gupta, & Bhatnagar, 2019).

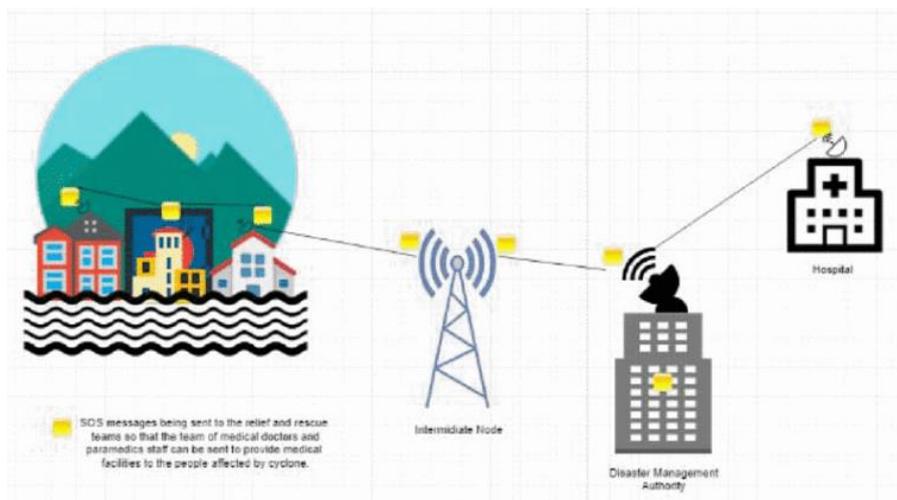


Figura 2.8 Aplicación IoT para monitoreo urbano
Fuente: (Chaudhary, Johari, Bhatia, Gupta, & Bhatnagar, 2019)

2.5. Tecnologías IoT

Las tecnologías adaptadas al IoT se han vuelto una forma más eficiente cómoda de vivir el día a día, en estos tiempos existen varias aplicaciones en el hogar y fuera de este que trabajan con esta tecnología.

El ejemplo más cercano del IoT está en el propio hogar, donde electrodomésticos, servicios o pequeños gadgets como las bombillas ya están conectados a Internet. El otro gran ámbito de acción del IoT es el de las ciudades avanzadas o Smart Cities.

El Internet de las Cosas se aprovecha para medir ciertos parámetros externos (ya sea temperatura, energía, actividad, luz, humedad, errores, etc.), de forma automática y sin la interacción del ser humano. Y que esos datos viajen a un centro de procesamiento para que se tomen las decisiones adecuadas en tiempo real.

Los procesadores de smartphones y su evolución de los últimos años, con el formato SoC ya establecido, han ayudado mucho. Las soluciones de ARM cumplen con las expectativas: son pequeños y, aunque también poco potentes en comparación con otros chips del mercado, cubren con los requisitos planteados.

ARM tiene en el mercado un enorme catálogo de SoCs, en el que el producto más conocido son sus SoC de smartphone. Pero los Cortex-A no son los únicos y junto a ellos los Cortex-R y Cortex-M son ideales para dispositivos IoT. ARM los diseña, pero no los fabrica; son otras terceras compañías las que se encargan de esta fase.

Mientras que los Cortex-R se integran en dispositivos como discos duros o en industrias como la automoción, los Cortex-M son más conocidos debido a su utilidad en aparatos finales más cercanos al usuario. ARM se guarda un as en la manga: proporcionar múltiples gamas de productos para adaptarlas a los diferentes requisitos del mercado:

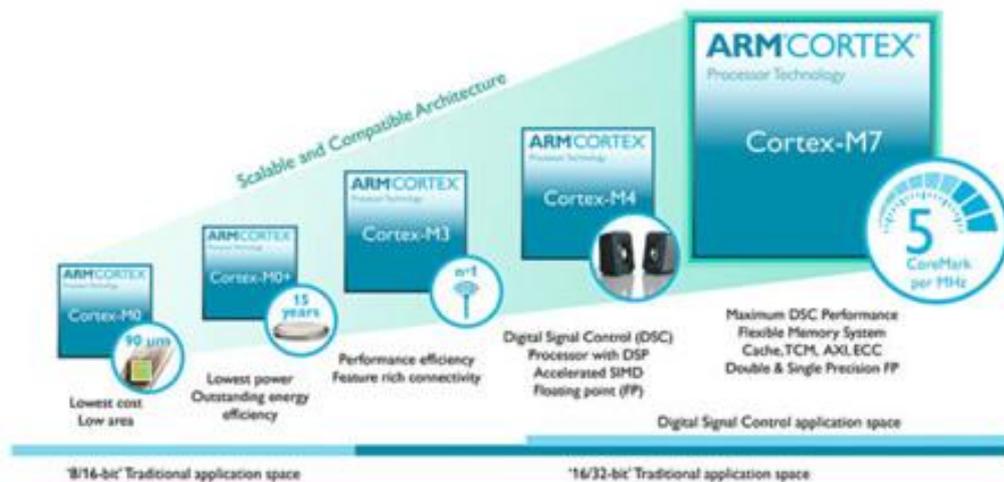


Figura 2.9 Diagrama de tecnología ARM
Fuente: (Chaudhary, Johari, Bhatia, Gupta, & Bhatnagar, 2019)

2.6. IoT en la industria

Las nuevas infraestructuras de las tecnologías de la información, como internet, los smartphones y las redes sociales se han convertido en la base de nuestra vida cotidiana en las últimas décadas, y el IoT se ha convertido en una fuerza en todas las industrias de nuestra sociedad, lo cual está cambiando la vida cotidiana de las personas.

Actualmente, con la aparición de nuevas funcionalidades y dispositivos, la aplicación específica de IoT en las fábricas se ha acelerado. Se espera que la industria de IoT avance la función del producto al nivel de monitoreo y autocontrol.

El IoT presenta actualmente una variedad de riesgos de seguridad en lo que respecta a dispositivos, sistemas operativos y plataformas. Por este motivo, la industria en general está tomando más medidas para garantizar su protección contra ataques cibernéticos.

El despliegue de IoT en ámbitos industriales trae más agilidad a la operación de las fábricas, que disponen rápidamente de más información y análisis de datos. La tecnología digital está fortaleciendo los procesos de automatización, complementando la maquinaria con dispositivos y sensores de bajo costo para ganar en eficiencia gracias a la innovación de los procesos y menor costo de mano de obra.

El volumen de datos que generan y recogen los sensores de IoT necesita de sistemas capaces de procesar toda esa información (Interxion, 2018).

2.7. Redes de comunicación en IoT

IoT está creciendo rápidamente, existen una gran cantidad de dispositivos interconectados a internet, y aumenta exponencialmente.

Estos dispositivos están equipados con baterías, poco almacenamiento y poca capacidad de proceso. Debido a estas restricciones, la comunicación entre estos dispositivos acarrea varios desafíos como los siguientes:

- Direccionamiento e identificación.
- Comunicaciones con bajo consumo de energía.
- Protocolos de enrutamiento eficientes y bajos requerimientos de memoria.
- Alta velocidad y comunicaciones sin pérdida.
- Movilidad.

Los dispositivos IoT, generalmente se conectan a Internet a través del stack TCP/IP, esta pila es muy compleja y necesita gran cantidad de memoria y energía. También pueden conectarse localmente a través de redes no IP, en la que el consumo de energía es menor y conectarse a internet a través de una pasarela (Gateway).

Algunas redes no IP, como Bluetooth, RFID y NFC son muy populares, pero con un alcance reducido, por lo que las aplicaciones están limitadas a redes PAN (Personal Area Network).

2.8. Conexión M2M con REST API

Las API permiten exponer el dispositivo conectado a los usuarios de manera segura. Las API RESTful se utilizan ampliamente en la web moderna. La transferencia de datos generalmente se realiza utilizando JSON o XML sobre HTTP. REST API hace que la información del dispositivo esté fácilmente disponible.

Hoy en día la mayoría de las empresas utilizan API REST para crear servicios. Por ejemplo, los sistemas de identificación de Facebook, la autenticación en los servicios de Google (hojas de cálculo, Google Analytics) están basadas en esta tecnología.

Las restricciones que definen a un sistema RESTful serían:

- **Ciente-servidor:** esta restricción mantiene al cliente y al servidor débilmente acoplados.
- **Sin estado:** aquí se dice que cada petición que recibe el servidor debería ser independiente, no es necesario mantener sesiones.
- **Cacheable:** debe admitir un sistema de almacenamiento en caché. Este almacenamiento evitará repetir varias conexiones entre el servidor y el cliente para recuperar un mismo recurso.
- **Interfaz uniforme:** define una interfaz genérica para administrar cada interacción que se produzca entre el cliente y el servidor de manera uniforme, lo cual simplifica y separa la arquitectura.
- **Sistema de capas:** el servidor puede disponer de varias capas para su implementación (Garg & Dave, 2019).

2.9. Tecnologías inalámbricas para IoT

A continuación, se detallan las tecnologías inalámbricas que operan en IoT.

2.9.1. GSM/GPRS

La industria GSM, con tecnologías 2G, 3G y 4G, son muy importantes en nuestras vidas. Las siglas GPRS vienen del inglés General Packet Radio Service (Servicio General de Paquetes vía Radio). Tuvo un auge en las décadas pasadas hoy están siendo sustituidos por los sistemas 3G y 4G, todavía son utilizadas en zonas en donde la cobertura de tercera y cuarta generación aún no está disponible.

El GPRS se basa en el sistema GSM de transmisión que consiste en permitir comunicarse vía satélite, sin necesidad de cables ni conexión física a dos terminales móviles (Çelik, 2015).

GSM y GPRS se usa en aplicaciones IoT donde se requiera la transmisión de datos en texto con poca información y básicamente el envío de la información es vía modulo celular hacia un servidor receptor para el análisis de la información.



Figura 2.10 Logo de tecnología GSM
Fuente: (GSMA, 2020)

2.9.2. SIGFOX

Sigfox es la red de comunicaciones LPWAN (Low-Power Wide-Area Network) específica para IoT más extendida a nivel mundial, con una cobertura próxima al 98% del territorio Europeo y Americano.

La red de SigFox está construida sobre una modulación Ultra Narrow Band (UNB) y opera en la banda de 868 MHz en Europa y en la banda de 902 MHz en Estados Unidos. Uno de los principales motivos para el uso de SigFox es que los fabricantes de dispositivos IoT se han adaptado a su tecnología y facilitan la subida de datos a la nube de SigFox quedando disponibles en los servidores de la compañía para su acceso a través de cualquier conexión a Internet.

El bajo coste de esta tecnología, su aceptación por los fabricantes de dispositivos, o el que sea una red bidireccional son otros factores a favor (SigFox, 2020).



Figura 2.11 Logo de tecnología Sigfox
Fuente: (SigFox, 2020)

2.9.3. LoRaWan

LoRa es otra red LPWAN con un modelo de negocio muy similar a Sigfox con la diferencia de que utiliza un espectro de comunicaciones un poco más amplio que SigFox. Si se busca una diferencia considerable entre ambas redes, LoRa es una red LPWAN mejor preparada para una comunicación bidireccional en tiempo real con el dispositivo de IoT.

Así mismo, las especificaciones para los fabricantes que quieran comunicar sus equipos a través de LoRa son más abiertas o menos estrictas que con Sigfox. Por otro lado, la cobertura de LoRa es mucho menor que la de Sigfox, ya que actualmente solo se encuentra desplegada en Francia, Bélgica, Suiza, Países Bajos y Sudáfrica, factor sin duda determinante a la hora de plantear un proyecto de IoT (LoraWAN, 2020).



Figura 2.12 Logo de tecnología LoraWAN
Fuente: (LoraWAN, 2020)

2.9.4. Narrowband IoT

NB-IoT es un sistema de red de área amplia de baja potencia (LPWAN) que se desarrolló para permitir que los dispositivos se conecten entre sí a través de una red de señales de teléfonos móviles diseñada por

3GPP, que es responsable de las especificaciones de 3G y 4G / Comunicación LTE.

NB-IoT usa dispositivos de baja velocidad de datos que usan la red celular, pero usan menos energía. El modo de operación de NB-IoT tiene 3 modos:

- **Independiente:** Separando el espectro sin usar LTE. Puede que tenga que encontrar una frecuencia para usar. Este modo es similar a un sensor inalámbrico típico.
- **Banda de protección:** Normalmente, la tecnología como LTE separará el canal de frecuencia entre sí para que cada canal no se agite utilizando el método llamado Banda de protección.
- **En banda:** uso en espectro LTE normal.

Las ventajas de NB-IoT incluyen lo siguiente:

Requiere poca energía para enviar datos de enlace ascendente al tamaño correcto, lo que resulta en una vida útil de la batería del dispositivo IoT de 10 años. Admite un máximo de 100,000 dispositivos IoT por estación base.

El radio de cobertura de red por estación base se puede distribuir más de 10 km con una recepción de señal efectiva, incluso dentro de los edificios (Manatarinat, Poomrittigul, & Tantatsanawong, 2019).

2.9.5. BLE

El BLE (Bluetooth Low Energy) es una tecnología inalámbrica emergente de baja potencia desarrollada y utilizada por diversas aplicaciones, incluidas las definidas por Internet of Things (IoT).

Está claro que uno de los inconvenientes de la tecnología BLE es su rendimiento relativamente bajo en comparación con otras tecnologías

inalámbricas como WiFi, el rendimiento máximo informado varía de 58 Mbps a 236 Mbps para BLE 4.2.

La pila de protocolos BLE se compone de tres capas principales: el controlador, el host y la aplicación. El controlador comprende la capa física y la capa de enlace. El Host incluye funcionalidades de capa superior, incluido el protocolo de control y adaptación de enlace lógico (L2CAP), el protocolo de atributos (ATT), el perfil de atributos genéricos (GATT), el administrador de seguridad (SM) y el perfil de acceso genérico (GAP).

Los datos que deben ser transmitidos por un nodo BLE y recibidos por otro nodo BLE se colocan en una base de datos llamada servidor GATT, sus datos se pueden mover a otra base de datos que reside en otro nodo y se llama cliente GATT. Conceptualmente, los datos siempre se encuentran en el servidor y su cliente puede acceder a ellos o modificarlos mediante la capa ATT. El cliente puede acceder a los datos del servidor enviando solicitudes, que activan mensajes de respuesta del servidor, para una mayor eficiencia, el servidor también puede enviar a sus clientes dos tipos de mensajes no solicitados que son notificaciones e indicaciones.

Las notificaciones no necesitan confirmación, mientras que las identificaciones requieren confirmación. Los datos se estructuran en un servidor GATT basado en una jerarquía estricta, lo que permite el acceso y la recuperación de información entre el servidor y el cliente de manera eficiente. Los atributos son la entidad de datos más pequeña definida por GATT (Dian, Yousefi, & Lim, 2018).

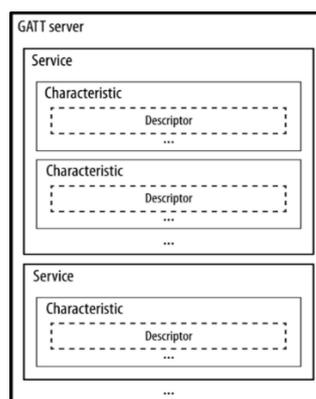


Figura 2.13 GATT Server

Fuente: (Dian, Yousefi, & Lim, 2018)

2.9.6. Zigbee

ZigBee es una tecnología inalámbrica de pocos recursos y robusta, muy utilizada desde hace varios años y centrada en aplicaciones domóticas e industriales para IoT. Está basado en IEEE 802.15.4 usa banda ISM de 2.4 GHz o también 868 MHz en Europa o 908 MHz en las Américas. Utilizado en diversas aplicaciones en hogares, oficinas, edificios y ciudades inteligentes. El consorcio incluye fabricantes como Amazon, Google, NXP y Texas Instruments.

Actualmente los perfiles ZigBee PRO y ZigBee Remote Control (RF4CE) cumplen con las especificaciones de tasas de envío de datos bajas, pero con un alcance de cobertura cercano a los 100 metros por ello se suele descartar las comunicaciones por ZigBee en caso de proyectos donde los dispositivos a comunicar se encuentren muy alejados del concentrador de los datos (Zigbee, 2020).



Figura 2.14 Logo de tecnología Zigbee
Fuente: (Zigbee, 2020)

Zigbee provee un stack desde la capa de red hasta la capa de aplicación.

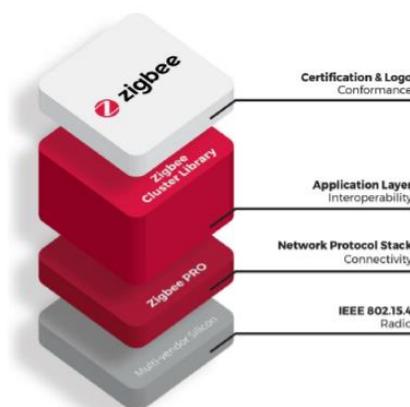


Figura 2.15 Stack Zigbee
Fuente: (Zigbee, 2020)

2.9.7. WIFI 802.15.4

WiFi es una de las redes inalámbricas que está disponible a escala global. Los próximos estándares WiFi son energéticamente eficientes con capacidades de cobertura de largo alcance (por ejemplo, IEEE 802.11ah) y los chips WiFi se están volviendo impresionantemente pequeños y de bajo costo.

802.15.4 es un estándar que define la capa física y de control de acceso al medio de redes inalámbricas de área personal con tasas bien bajas de transmisión de datos. En 2007, la actual revisión del estándar se aprobó en 2006 (IEEE, 2016).

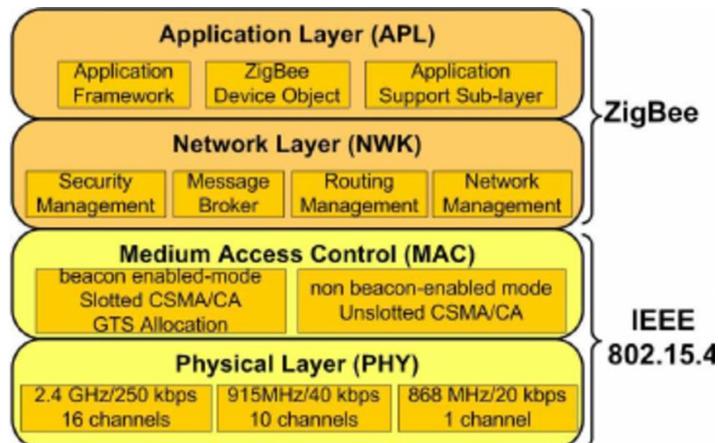


Figura 2.16 Stack IEEE 802.15.4 vs Zigbee
Fuente: (Cunha, Koubaa, Severino, & Alves, 2007)

2.9.8. ZWave

El protocolo Z-Wave es una tecnología de comunicaciones interoperable, inalámbrica, basada en RF diseñada específicamente para aplicaciones de control, monitoreo y lectura de estado en entornos residenciales y comerciales ligeros.

Zwave es una tecnología de comunicaciones RF de baja potencia que admite redes de malla completa sin la necesidad de un nodo coordinador. Opera en la banda sub-1GHz; impermeable a las

Thread permite comunicaciones de dispositivo a dispositivo y de dispositivo a la nube y conecta de manera confiable cientos (o miles) de productos e incluye funciones de seguridad obligatorias. Las redes de subprocesos no tienen un único punto de falla, pueden auto curarse y reconfigurarse cuando se agrega o quita un dispositivo, y son fáciles de configurar y usar.

Thread lleva internet a IoT. Es por eso por lo que Thread fue diseñado con los estándares abiertos y probados de internet para crear una red de malla basada en el protocolo de internet versión 6 (IPv6), con 6LoWPAN como base.

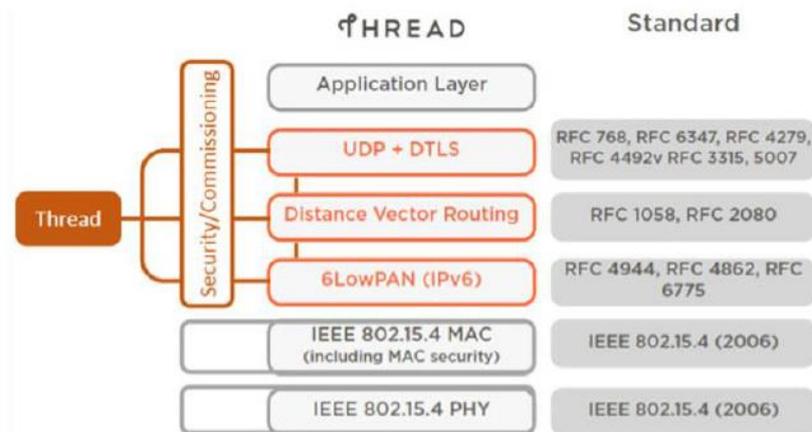


Figura 2.18 Stack de Thread
Fuente: (Thread, 2020)

Las interfaces estandarizadas y los protocolos IP de Thread benefician a los desarrolladores del ecosistema IoT de varias maneras:

Thread es independiente de la capa de aplicación, lo que significa que la capa de aplicación y los servicios en la nube en los dispositivos Thread se pueden cambiar con el tiempo. Los dispositivos de subprocesos pueden crecer y evolucionar con los ecosistemas y la industria, mientras que la base de IP central estará bien respaldada indefinidamente (Thread, 2020).



Figura 2.19 Logo Thread
Fuente: (Thread, 2020)

2.10. Dispositivos y protocolos IoT

Los dispositivos y protocolos IoT se detallan a continuación.

2.10.1. Dispositivos IoT

Sensores y actuadores son piezas fundamentales para IoT, permiten que objetos interactúen entre ellos y los seres humanos a través de internet o redes dedicadas, recopilando información del entorno o interactuando con él.

IoT utiliza dispositivos electrónicos capaces de medir magnitudes físicas o químicas y transformarlas en señales eléctricas (sensores). Por otro lado, también utiliza dispositivos capaces de utilizar señales eléctricas para activar un determinado proceso (actuadores) (González A. , 2017).

2.10.2. Sensores

La información recogida por los sensores es convertida al mundo digital para poder así tratarla, almacenarla y enviarla a otros dispositivos (González A. , 2017).

2.10.3. Sensores físicos

Transforman una magnitud física en información. Dentro de esta clasificación están los sensores de temperatura, presión, acelerómetros, inclinómetros, etc.

2.10.4. Sensores químicos y bioquímicos

Los sensores químicos miden concentraciones de distintos elementos o moléculas, proporcionando lecturas de la concentración medidas respecto del entorno (González A. , 2017).

2.10.5. Actuadores

No están tan implantados como los sensores y a diferencia de estos, los actuadores, a partir de una información digital, actúan en el mundo real.

2.10.6. Motores

Dentro de los actuadores, los de uso más común, son los motores, existen múltiples tipos y forma diferentes de controlarlos. Habitualmente estos se controlan utilizando modulación por ancho de pulso (PWM). Se envían pulsos de ancho variable para que el motor gire de forma proporcional a la anchura del pulso.

2.10.7. Servomotores

Este tipo de actuadores permite controlar la posición dentro de un rango y mantener fija esta posición. El control se realiza igualmente

mediante señales PWM, siendo la duración de los pulsos a la que indica la posición o el Angulo de rotación. Si no se envía señal alguna, el servo queda libre.

2.10.8. Motores paso a paso

Son motores que pueden avanzar un determinado número de grados o pasos respecto de su eje. Se necesita un circuito y generar señales que se envían al motor logrando paso de pocos grados.

2.10.9. Electroválvulas

Válvulas controladas electrónicamente que permiten o impiden el paso de líquidos o gases. Disponen de dos posiciones, abierto o cerrado, por lo que el control es sumamente sencillo (González A. , 2017).

2.10.10. Smartphones

Pueden ser sensores y actuadores además de permitir recibir y realizar llamadas entre otras muchas más funciones disponen de múltiples sensores y actuadores, por ejemplo:

- acelerómetro
- magnetómetro
- giroscopio
- sensores de iluminación
- sensores de temperatura
- sensores acústicos
- barómetro
- sensor táctil
- GPS

2.11. Protocolos IoT

Los protocolos de capa de aplicación IoT existentes que se utilizan son IETF CoAP, IBM MQTT, XMPP y AMQP. UDP y TCP son protocolos de capa de transporte e IPv6, ROLL RPL y 6LoWPAN proporciona red Enrutamiento y encapsulación de instalaciones. BLE, Z-Wave, ZigBee, HomePlug GP y Dash7 son cinco protocolos de enlace de datos estándar para comunicaciones inalámbricas de corto alcance con bajo consumo de energía (Sharma & Gondhi, 2018).

2.11.1 MQTT

Es un protocolo de conexión que explica cómo los bytes de datos son organizados y transmitidos por la red TCP/IP. El comando define el tipo de mensaje (por ejemplo, un mensaje CONNECT). Todas las bibliotecas y herramientas de MQTT ofrecen maneras sencillas de manipular directamente tales mensajes y pueden completar algunos campos necesarios automáticamente, como los IDs del mensaje y del cliente (Sharma & Gondhi, 2018).

2.11.2. CoAP

CoAP (Constrained Application Protocol) está pensado especialmente para sensores de baja potencia, se ha diseñado para trasladar el modelo HTTP, pero incluyendo otros requisitos como multicast, bajo overhead y simplicidad, que son muy importantes para el IoT y Machine-to-Machine (M2M).

CoAP implementa el modelo REST de HTTP, usa cabeceras reducidas, y limita el intercambio de mensajes, añadiendo soporte UDP y otras modificaciones como mecanismos de seguridad específicos (Sharma & Gondhi, 2018).

2.11.3. XMPP

Protocolo extensible de mensajería y comunicación de presencia (Extensible Messaging and Presence Protocol) es un protocolo abierto y extensible basado en XML, originalmente ideado para mensajería instantánea. Con el protocolo XMPP queda establecida una plataforma para el intercambio de datos XML que puede ser usada en aplicaciones de mensajería instantánea (Lu, Lei, & Zhang, 2012).

2.11.4. AMQP

El protocolo se encarga de una transmisión sólida de datos permitiendo almacenar mensajes en una cola. Esto, a su vez, permite una comunicación asíncrona de tal forma que transmisor y receptor no deben actuar al mismo ritmo.

El receptor del mensaje no tiene por qué aceptar, procesar la información directamente y confirmar la recepción al emisor. En su lugar, recuperará el mensaje de la cola cuando tenga capacidad disponible para ello. Esto ofrece al productor, entre otras cosas, la posibilidad de seguir trabajando y se evitan los tiempos de inactividad.

2.12. Arduino

Arduino no es un microcontrolador, sino que se lo considera un "Movimiento de hardware de código abierto", tiene un lenguaje fácil de aprender y bibliotecas basadas en lenguaje C ++ y entorno IDE para una interfaz de programación adecuada.

Arduino se enfoca en acercar y facilitar el uso de la electrónica y programación de sistemas embebidos en proyectos multidisciplinarios (McRoberts, 2010).

Arduino es una plataforma electrónica de código abierto basada en hardware y software fácil de usar. Las placas Arduino pueden leer entradas (luz en un sensor, un dedo en un botón o un mensaje de Twitter) y convertirlo en una salida: activar un motor, encender un LED, publicar algo en línea. Puede decirle a su placa qué hacer enviando un conjunto de instrucciones al microcontrolador de la placa. Para hacerlo, utiliza el lenguaje de programación Arduino (basado en el cableado) y el software Arduino (IDE), basado en el procesamiento.

Arduino nació en el Instituto de Diseño de Interacción Ivrea como una herramienta fácil para la creación rápida de prototipos, dirigida a estudiantes sin experiencia en electrónica y programación. Tan pronto como llegó a una comunidad más amplia, la placa Arduino comenzó a cambiar para adaptarse a las nuevas necesidades y desafíos, diferenciando su oferta de placas simples de 8 bits a productos para aplicaciones IoT, dispositivos portátiles, impresión 3D y entornos integrados (Arduino, 2020).



Figura 2.20 Arduino
Fuente: (Arduino, 2020)

2.13. Raspberry Pi

Es un ordenador de placa reducida, un ordenador de placa simple (SBC) de bajo costo desarrollado en el Reino Unido por la Raspberry Pi

Foundation, con el objetivo de estimular la enseñanza de informática en las escuelas.

Con la computadora Raspberry Pi es posible crear un plan de estudios completo, comenzando con la configuración inicial y la programación progresando hacia entradas y salidas sensoriales, y más tarde construyendo aplicaciones como la robótica.

La línea de computadoras Raspberry Pi está diseñada y fabricada con el objetivo de mejorar la educación informática, especialmente en el nivel preuniversitario. Los SBC han creado una revolución, con aplicaciones que van desde artes y juegos hasta educación y pasatiempos e incluso aplicaciones serias (Yamanoor & Yamanoor, 2017).



Figura 2.21 Raspberry Pi
Fuente: (PI, 2020)

2.14. XBEE

La base de operación de XBee es generalmente un protocolo que se implementa completamente con el propósito de comunicación. Ofrece atributos esenciales que son imprescindibles para las comunicaciones de red prácticas en cualquier red que funcione de forma inalámbrica. Las características importantes como el direccionamiento, los reconocimientos y los reintentos ayudan a la eficiencia y seguridad de los datos que se entregarán en un nodo específico. El XBee también tiene algunas propiedades adicionales más allá de las comunicaciones de datos, para ser utilizadas en el monitoreo y control de dispositivos remotos.

Los XBee son pequeñas radios que pueden comunicarse de forma inalámbrica unas con otras. Una gran ventaja de estas radios es su bajo consumo además de su posibilidad de realizar conexiones punto a punto, punto a multipunto y mesh (Xbee, 2020).



Figura 2.22 Xbee Pro
Fuente: (Xbee, 2020)

2.15. ESP32

ESP32 es un sistema de bajo costo y bajo consumo de energía en una serie de chips (SoC) con capacidades de WIFI y Bluetooth de modo dual. La familia ESP32 incluye los chips ESP32- D0WDQ6 (y ESP32- D0WD), ESP32- D2WD, ESP32- S0WD, y el sistema en paquete (SiP) ESP32-PICO-D4. En esencia, hay un microprocesador Tensilica Xtensa LX6 de doble núcleo o de un solo núcleo con una frecuencia de reloj de hasta 240 MHz. ESP32 está altamente integrado con interruptores de antena integrados, balún RF, amplificador de potencia, amplificador de recepción de bajo ruido, filtros y módulos de administración de energía. Diseñado para dispositivos móviles, dispositivos electrónicos portátiles y aplicaciones IoT, ESP32 logra un consumo de energía ultra bajo a través de funciones de ahorro de energía que incluyen sincronización de reloj de resolución fina, modos de energía múltiples y escalado dinámico de energía (ESP32, 2020).



Figura 2.23 ESP32
Fuente: (ESP32, 2020)

2.16. Sensores para Arduino y Raspberry PI

A continuación, se detallan los sensores de temperatura empleados en estas tecnologías.

2.16.1. Sensor de temperatura

El sensor de temperatura más común usada es el LM35 se usa para medir la temperatura al contacto. Varía de -550 C a 1500 C y funciona con un suministro de $+5\text{ V}$ y proporciona una salida analógica a la placa Arduino.

2.16.2. Sensor de humedad

Sirve para medir la cantidad de agua u humedad que contiene el suelo. La fuente de alimentación de $+5\text{ V}$ es suficiente para dar salida analógica a la placa Arduino (Thakare & Bhagat, 2019).

2.16.3. Sensor de presión

Es un dispositivo capaz de medir la presión de gases o líquidos, El rango para la presión entregada es $0\text{-}1.3\text{ MPa}$. El voltaje de entrada máximo que se puede dar a este sensor es de 5 V CC (Thakare & Bhagat, 2018).

2.16.4. Sensor de velocidad

Un sensor de velocidad es un dispositivo muy utilizado más que nada en el automovilismo. Es un dispositivo capaz de traducir la velocidad a la que se traslada cualquier objeto en una señal eléctrica, con una frecuencia proporcional a la velocidad de giro (Thakare & Bhagat, 2018).

2.16.5. Sensor de flujo

Es un dispositivo que permite determinar cuándo está circulando un líquido o un gas. El voltaje de funcionamiento del sensor de flujo es de 5–18 VCC. Da una salida en forma de pulsos (Thakare & Bhagat, 2018).

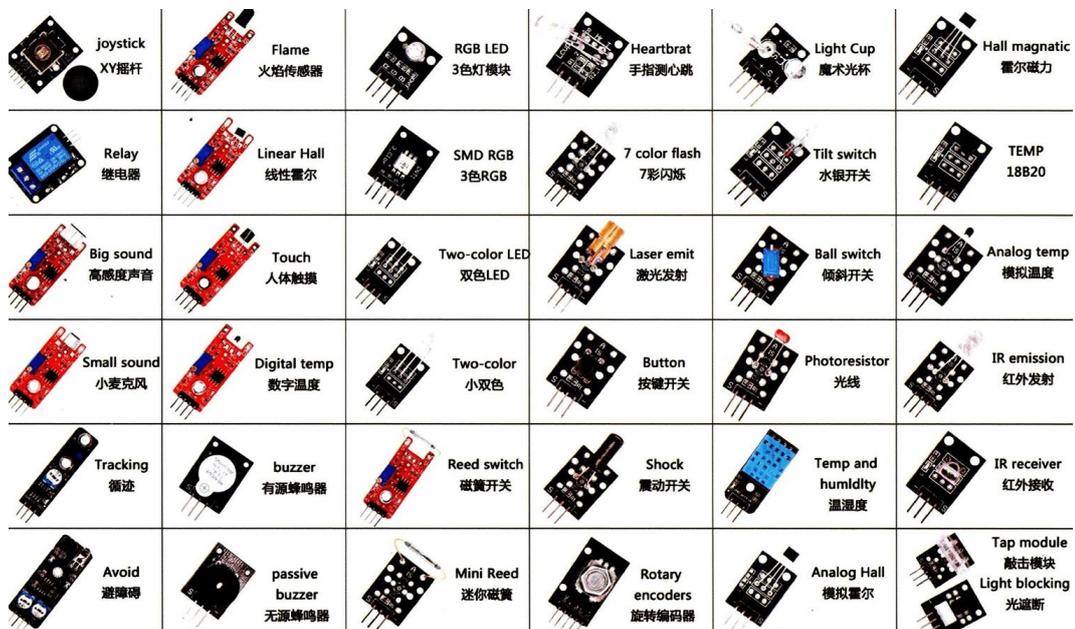


Figura 2.24 Sensores para Arduino

Fuente: (GeekFactory, 2020)

2.17. Seguridad en redes inalámbricas para dispositivos IoT

Existen varios problemas de seguridad que vienen con los dispositivos inalámbricos a través de una red de IoT y por lo tanto requiere encontrar la solución relativa para proporcionar un entorno de trabajo adecuado y más seguro.

La seguridad es el aspecto más importante de cualquier dispositivo o sistema, su privacidad, almacenamiento de datos y accesibilidad deben ser los puntos principales para tener en cuenta.

IoT se está volviendo común en estos días, y los dispositivos inalámbricos están mucho más asociados con tales redes por lo tanto se están convirtiendo en las plataformas objetivos de piratas informáticos y otras amenazas. Por lo general se tiene una ruta siempre abierta para los ataques, ya que las pautas de seguridad de muchos dispositivos se basan en la red en lugar de sus dispositivos asociados.

El método de encriptación de ECC es mucho más seguro y fuerte para lograr avances, y abarcará el nivel de seguridad de IoT en todos los dispositivos y demás dispositivos inalámbricos, ya que son las amenazas más vulnerables para la red y son la Mayoría propenso a las amenazas (Gauniyal & Jain, 2019).

2.18. Normativas y Regulaciones IoT

Las normativas y regulaciones aplicables a IoT se detallan a continuación.

2.18.1. Normativa internacional de protocolos IoT

La Organización Internacional de Normalización (ISO) publica el primer estándar internacional que proporciona una arquitectura de referencia de IoT estandarizada de forma global y que utiliza un vocabulario común, diseños reutilizables y las mejores prácticas del sector.

La norma ISO/IEC 30141 es un estándar que proporciona un vocabulario común en todo el mundo para diseñar y desarrollar aplicaciones de IoT, lo que permite desplegar sistemas fiables, seguros, protegidos, respetuosos con la privacidad y capaces de afrontar ciberataques, según indica el organismo responsable de esta nueva norma.

Las normas son fundamentales para el funcionamiento de las actuales redes de TIC. Sin las normas de la UIT no se podrían efectuar llamadas telefónicas ni navegar por Internet. La norma UIT T H.264, que obtuvo un premio Emmy, es una de las normas de compresión de vídeo más populares. Cada año, la UIT elabora o revisa hasta 150 normas que tratan de todo tipo de temas, desde la funcionalidad central de red a los servicios de la próxima generación como la IPTV.

ISO/IEC 30141 Internet de las Cosas (IoT) Arquitectura de Referencia, proporciona un marco común para los diseñadores y desarrolladores de aplicaciones de IoT, que permite desarrollar sistemas fiables, seguros, protegidos, respetuosos con la privacidad y capaces de afrontar interrupciones debidas a catástrofes naturales o ciberataques.

Este primer estándar internacional de Internet de las cosas es un claro ejemplo de cómo la normalización contribuye eficazmente a garantizar el éxito de la transformación digital. En conjunto, más de 600 normas internacionales están en revisión para garantizar el correcto funcionamiento de la industria 4.0, en aspectos como interoperabilidad, conectividad, ciberseguridad, robótica avanzada o impresión 3D (Juanes, 2018).

2.19. Regulación en otros países acerca de IoT

La Comisión Europea ha adoptado un conjunto de acciones políticas de apoyo para acelerar la adopción de IoT y liberar su potencial en Europa en beneficio de los ciudadanos y las empresas europeas. En marzo de 2015, la Comisión Europea lanzó la alianza para apoyar la creación de un ecosistema de Internet de las Cosas innovador e impulsado por la industria.

Los EEUU están mucho más avanzados en el tema y a primeros de Septiembre de 2017 presentaron una propuesta de ley (S.1961 – Internet of Things (IoT) Cybersecurity Improvement Act. of 2017) para el establecimiento de los estándares mínimos de seguridad que deben

cumplir estos dispositivos para que puedan ser adquiridos por las agencias federales. La propuesta de ley estadounidense define una serie de requisitos que han de cumplir los dispositivos IoT:

- Los dispositivos en sus componentes de hardware, software o firmware no contienen vulnerabilidad de seguridad o defectos que se encuentren identificados en la base de datos por el NIST – Instituto Nacional de Estándares y Tecnología o en cualquier otra base de datos identificada por la OMD – Oficina Presupuestaria Federal.
- Los componentes de software o los firmwares deben ser capaces de recibir y aplicar los parches que reciban de los fabricantes debidamente autenticados y de confianza.

2.20. Regulación en el Ecuador sobre IoT

En el Ecuador hay empresas como Claro, Movistar, Telconet, etc, que están innovando en servicios con soluciones IoT enfocados a análisis de Big Data, Smart cities, transporte, logística, gestión del transporte, educación, manufactura, edificios, punto de venta, etc., los cuales utilizan las redes de banda ancha móvil para el transporte de datos, como redes GSM, LTE, HFC, y FTTx, con énfasis en clientes empresariales.

A nivel de networking Ecuador presenta un mayor despliegue de IPV6 a nivel de Latinoamérica, junto con Bolivia y Perú. El IoT en Latinoamérica:

- el 1% de las redes está listo para IoT.
- IPV6 presenta escaso despliegue mientras IPv4 está agotado.
- El 30% de empresas planean un despliegue mayor de IPV6.
- Ecuador, Bolivia, Brasil y Perú, presentan mayores avances en la implementación del IoT

- Se sugiere un modelo económico para los ISP, y evitar rezago en desarrollo de IoT en la región.

Uno de los retos de IoT en el Ecuador es crear la normativa adecuada, que no impida su desarrollo y crecimiento, pero que sujete los nuevos servicios al marco legal establecido (ARCOTEL, 2020)

ARCOTEL (Agencia de Regulación y Control de Telecomunicaciones) es la responsable de la normativa y control de las telecomunicaciones en el Ecuador, en este trabajo de investigación se plantearán recomendaciones para la normativa de tecnologías de IoT que podría implementarse en el Ecuador, tomando en cuenta la literatura que hay sobre IoT y las normativas aplicadas en otros países.

En este estudio se analizarán las normativas vigentes publicadas por ARCOTEL, así como la normativa vigente internacional que permite generar las pautas y recomendaciones para un nuevo marco regulatorio enfocado al internet de las cosas.

Capítulo 3. Desarrollo del trabajo

En este capítulo se analizan y se evalúan algunos protocolos IoT, para el caso de redes LAN se analiza los protocolos Zigbee, y WIFI 802.15.4, utilizado en dispositivos IoT y validados mediante sistemas embebidos inalámbricos como Arduino y Xbee.

Para el análisis LAN se realizará una maqueta de pruebas con dispositivos Arduino y Xbee los cuales formarán una red punto a punto inalámbrica para el envío y recepción de datos, los mismos que serán analizados mediante un analizador de espectros y software de monitorización y control XCTU de DIGI. Para el caso de redes WAN IoT se analizará LoRaWAN, se realizará revisión de literatura y pruebas en campo con analizador de espectros.

3.1. Módulo de pruebas inalámbrico para dispositivos IoT

Para el estudio de redes inalámbricas para dispositivos IoT se realiza una maqueta de pruebas que se conforma por dos arduino, dos shield de arduino, dos módulos Xbee 2SC, dos laptops donde se ejecuta el software XCTU de DIGI, el cual evaluará y monitorizará el comportamiento del enlace inalámbrico en Zigbee y de 802.15.4, también se utilizará un analizador de espectros marca AGILENT CSA N1996A con rango desde los 100 Khz hasta los 6 Ghz y una antena AARONIA AG con rango de 380 a 18 Ghz.



Figura 3.1 Esquema de pruebas de prototipos IoT
Fuente: Elaborada por el Autor

Se analiza el espectro y las interferencias que pueden producir estos dispositivos IoT en frecuencias como WIFI 802.11 a/b/n/g de 2,4 Ghz, mediante gráficas de espectro se apreciará el nivel de potencia y de SNR en este tipo de señales.

Con estas pruebas se realizará un análisis técnico que servirán de bases para plantear recomendaciones en el margen regulatorio de estas nuevas redes de transmisión inalámbricas para dispositivos IoT (Internet of Things) en el Ecuador. A continuación, se detalla los elementos y configuraciones básicas realizadas en el prototipo de pruebas IoT.

3.2. Módulo Xbee S2CTH

De acuerdo con Digi, los módulos XBee son soluciones integradas que brindan un medio inalámbrico para la interconexión y comunicación entre dispositivos. Estos módulos utilizan el protocolo de red llamado IEEE 802.15.4 para crear redes POINT-TO-MULTIPOINT (punto a multipunto); o para redes PEER-TO-PEER (punto a punto). Fueron diseñados para aplicaciones que requieren de un alto tráfico de datos, baja latencia y una sincronización de comunicación predecible. Por lo que básicamente XBee es una implementación de Digi basada en el protocolo Zigbee (Xbee, 2020).

Tabla 3.1 Especificaciones técnicas de Xbee Zigbee S2C

Specification	XBee Zigbee S2C	XBee-PRO Zigbee S2C
Indoor/urban range	Up to 60 m (200 ft)	Up to 90 m (300 ft)
Outdoor RF line-of-sight range	Up to 1200 m (4000 ft)	Up to 3200 m (2 mi)
Transmit power output (maximum)	6.3 mW (+8 dBm), boost mode 3.1 mW (+5 dBm), normal mode channel 26 max power is +3 dBm	63 mW (+18 dBm)
RF data rate	250,000 b/s	
Receiver sensitivity	-102 dBm, boost mode -100 dBm, normal mode	-101 dBm

Fuente: (Xbee, 2020)

Tabla 3.2 Frecuencia de operación de Xbee Zigbee S2C

Specification	XBee Zigbee S2C	XBee-PRO Zigbee S2C
Operating frequency band	ISM 2.4 - 2.5 GHz	

Fuente: (Xbee, 2020)

Tabla 3.3 Especificaciones de poder de Xbee

Specification	XBee	XBee-PRO
Supply voltage	2.1 - 3.6 V	2.7 - 3.6 V
Transmit current (typical, VCC = 3.3 V)	45 mA (8 dBm, Boost mode) 33 mA (5 dBm, Normal mode)	120 mA (18 dBm)
Idle / receive current (typical, VCC = 3.3 V)	31 mA (Boost mode) 28 mA (Normal mode)	31 mA
Power-down current	<1 uA @ 25C	<1 uA @ 25C

Fuente: (Xbee, 2020)

Tabla 3.4 Especificaciones de red de Xbee

Specification	XBee Zigbee S2C	XBee-PRO Zigbee S2C
Supported network topologies	Point-to-point, point-to-multipoint, peer-to-peer, and DigiMesh	
Number of channels	16 Direct sequence channels	15 Direct sequence channels
Interface immunity	Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS)	
Channels	11 to 26	
Addressing options	PAN ID and addresses, cluster IDs and endpoints (optional)	

Fuente: (Xbee, 2020)

Tabla 3.5 Regulación de los Xbee en diferentes países

Regulatory conformity summary

This table describes the agency approvals for the devices.

Note Legacy XBee-PRO SMT (model: PRO S2C; hardware version 21xx) has different FCC and IC IDs. For more information, see [Regulatory information](#).

Approval	XBee (surface-mount)	XBee-PRO (surface-mount)	XBee (through-hole)	XBee-PRO (through-hole)	XBee S2D (surface-mount)
United States (FCC Part 15.247)	FCC ID: MCQ-XBS2C	FCC ID: MCQ-XBPS2C (revision K and earlier) FCC ID: MCQ-PS2CSM (revision L and later)	FCC ID: MCQ-S2CTH	FCC ID: MCQ-PS2CTH	FCC ID: MCQ-S2DSM
Innovation, Science and Economic Development Canada (ISED)	IC: 1846A-XBS2C	IC: 1846A-XBPS2C (revision K and earlier) IC: 1846A-PS2CSM (revision L and later)	IC: 1846A-S2CTH	IC: 1846A-PS2CTH	IC: 1846A-S2DSM
FCC/IC Test Transmit Power Output range	-26 to +8 dBm	-0.7 to +19.4 dBm	-26 to +8 dBm	+1 to +19 dBm	-10 to +8 dBm
Europe (CE)	Yes		Yes		Yes
Australia	RCM	RCM	RCM	RCM	
Japan	R201WW10215369		R210-105563		
Brazil	ANATEL: 0616-15-1209	ANATEL: 07440-19-01209 (XBP24CZ7PIS-004, XBP24CZ7RIS-004, XBP24CZ7UIS-004)	ANATEL: 4556-15-1209	ANATEL: 4077-15-1209	
Mexico	RCPDIXB19-1821	RCPDIPS19-1817-A1	RCPDIS219-1821-A1	RCPDIPS19-1817	

Fuente: (Xbee, 2020)

Xbee se debe conectar con algún microcontrolador que le entregue las indicaciones de funcionamiento y administración. Para esto se utilizará

un shield de arduino y un arduino para la comunicación con el software XCTU de DIGI vía USB.

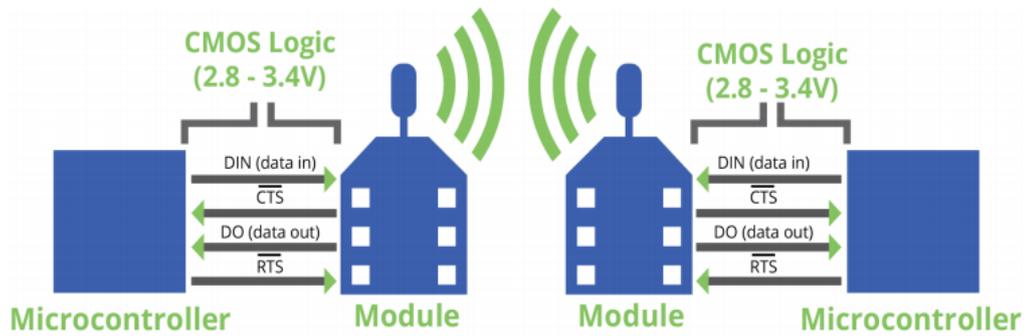


Figura 3.2 Esquemático de conexión Xbee

Fuente: (Xbee, 2020)

3.3. Series Xbee

Las series Xbee se detallan a continuación.

3.3.1. XBee Series 1

Se conoce también como Xbee 802.15.4 son la serie más fácil para trabajar, no necesitan ser configurados, pero incluso así se pueden obtener beneficios. Para comunicaciones Punto-a-Punto, estos módulos trabajan muy bien como los de la Serie 2, pero sin todo el trabajo de preconfiguración previo. El hardware de las series 1 y las series 2/2.5/ZB no son compatibles (Xbee, 2020).

3.3.2. XBee Znet 2.5

Pueden funcionar en modo transparente o por medio de comandos API, pero todo esto depende de cual firmware se configure en los módulos. También pueden funcionar en una red mesh, creando unos módulos totalmente configurables (Xbee, 2020).

3.3.3. ZB (el actual módulo Series 2)

Básicamente es el módulo Znet 2.5, pero con un nuevo firmware. Esto significa que también funcionan en modo transparente o por medio de

comandos API. También funcionan en redes mesh. El firmware entre ambos no es compatible (pero es fácilmente intercambiable) por lo que se debe elegir cuál firmware usar. Estos a menudo son llamados módulos de Serie 2. Estos módulos no funcionarán de ninguna forma o manera con los de la Serie 1 (Xbee, 2020).

3.3.4. XBee Serie 3

El XBee3 es la última versión de los módulos XBee. Trabaja con una frecuencia de 2.4Ghz y permite crear redes de conexión punto a punto, punto a multipunto, broadcast y mesh todo en uno. Con la nueva Serie 3 de XBee se encontrará un solo modulo para todas las comunicaciones, ya que permiten configurar el firmware en función a la conectividad que necesites, BLE, Mesh, Zigbee, 802.15.4.

3.3.5. 900MHz

Técnicamente no es una Serie, pero sí es una familia tal como los otros. Estos módulos pueden funcionar con dos diferentes tipos de firmware, el firmware DigiMesh y el firmware Point-to-Multipoint.

3.3.6. XSC S3B

Son una mejora a la versión XSC con menor consumo de energía que la versión anterior, además de tener la posibilidad de configurar la potencia de transmisión hasta 250mW. Esta Mayor potencia de transmisión permite obtener un rango de 28 millas (45 Km) con la antena correcta. Los módulos S3B además poseen una mayor tasa de transmisión que la generación previa de módulos XSC.



Figura 3.3 Series Xbee
Fuente: (Xbee, 2020)

3.4. Tipos de Antenas de Xbee

A continuación, se detallan los tipos de antenas Xbee.

3.4.1. Chip Antenna

Básicamente es un pequeño chip que actúa como antena. Rápido, sencillo y barato.

3.4.2. Wire Antenna (Whip Antenna)

Es un pequeño cable que sobresale de la placa.

3.4.3. u.FL Antenna

Un conector pequeño para conectar tu propia antena. Esto es perfecto si tienes tu equipo en una caja y deseas la antena afuera de ésta.

3.4.4. RPSMA Antenna

Un conector más grande para conectar tu propia antena. Nuevamente, esto es perfecto si tienes tu equipo en una caja y deseas la antena afuera de ésta.

3.4.5. Trace Antenna

También llamada PCB Antenna, es la que está hecha con pistas en el mismo PCB. Su performance es similar a las Wire Antennas.

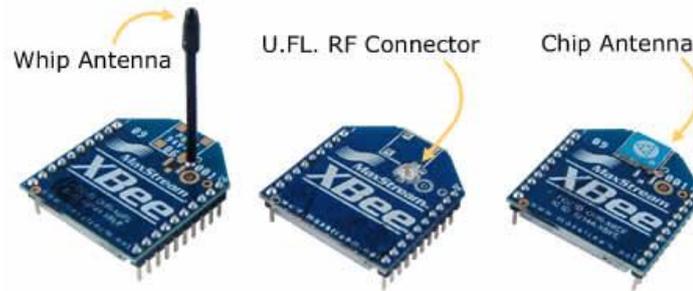


Figura 3.4 Antenas Xbee

Fuente: (Xbee, 2020)

3.5. Xbee Shield

El Xbee Shield simplifica la tarea de conectar un módulo XBee con el Arduino. Esta tarjeta puede ser utilizada directamente con el Arduino Pro o con el Arduino USB y proveyéndola de comunicación inalámbrica utilizando el módulo de comunicaciones XBee (Xbee, 2020).

Esta unidad funciona con los módulos Xbee de la serie 1 y 2.5 en sus versiones estándar y pro. Los pines seriales (DIN y DOUT) del XBee están conectados a un switch SPDT, con lo que se puede seleccionar conectando a la UART (D0, D1) o a los pines digitales 2 y 3 del Arduino. La alimentación de 5V la toma directamente del Arduino, la tarjeta posee un regulador de voltaje de 3.3VDC para poder alimentar el XBee.



Figura 3.5 Shield Xbee

Fuente: (Xbee, 2020)

3.6. Frecuencias de operación de 802.15.4 y Zigbee

Es importante conocer las frecuencias de operación de las tecnologías IoT 802.15.4 y Zigbee dividen la banda de 2.4Ghz en 16 canales.

Tabla 3.6 Frecuencias de operación de 802.15.4 y Zigbee

Decimal	Hex	Frequency	SC mask	WiFi Conflict	Comments
11	0x0B	2.405GHz	0x0001	Overlaps Ch 1	Newer XBee only
12	0x0C	2.410GHz	0x0002	Overlaps Ch 1	
13	0x0D	2.415GHz	0x0004	Overlaps Ch 1	
14	0x0E	2.420GHz	0x0008	Overlaps Ch 1	
15	0x0F	2.425GHz	0x0010	Overlaps Ch 6	
16	0x10	2.430GHz	0x0020	Overlaps Ch 6	
17	0x11	2.435GHz	0x0040	Overlaps Ch 6	
18	0x12	2.440GHz	0x0080	Overlaps Ch 6	
19	0x13	2.445GHz	0x0100	Overlaps Ch 6	
20	0x14	2.450GHz	0x0200	Overlaps Ch 11	
21	0x15	2.455GHz	0x0400	Overlaps Ch 11	
22	0x16	2.460GHz	0x0800	Overlaps Ch 11	
23	0x17	2.465GHz	0x1000	Overlaps Ch 11	

Decimal	Hex	Frequency	SC mask	WiFi Conflict	Comments
24	0x18	2.470GHz	0x2000	Overlaps Ch 11	Newer XBee only
25	0x19	2.475GHz	0x4000	No Conflict	Newer XBee only
26	0x1A	2.480GHz	0x8000	No Conflict	Newer non-PRO XBee only

Fuente: (Digi, 2018)

Las bandas de WiFi varían según el país y la región. Las tres bandas de WiFi anteriores son comunes en todo el mundo, pero, por ejemplo, Japón permite suficientes canales adicionales para permitir una cuarta banda de WiFi a partir del canal 14. Por lo tanto, las declaraciones de "No Conflicto" anteriores no serían ciertas en Japón.

A veces, la documentación de Xbee usa hexadecimal como "17" en lugar de "0x17" para referirse a un canal como 23. Digi Xbee comienza en el primer canal de la máscara SC y se detiene en el primer canal que le otorga la asociación. Dependiendo de la antigüedad del firmware en el módulo Xbee ZB, podría comenzar en los canales 0x0B, 0x0C o 0xD (11, 12 o 13)

Una vez que un coordinador selecciona un canal, no se mueve independientemente de la tasa de error (es decir, no es ágil en frecuencia), por lo que ZigBee no salta automáticamente a un canal despejado; lo hace para evitar confundir los dispositivos potencialmente durmientes. Un usuario o un software externo debe forzar manualmente al coordinador a moverse a través de cambios de configuración, además los enrutadores no seguirán a menos que se hayan habilitado varias configuraciones no predeterminadas.

Más de un coordinador 802.15.4 / Zigbee puede establecerse en un solo canal. Por ejemplo, podría tener 5 WPAN distintas, y las 5 puertas de enlace Digi deciden que quieren usar el canal predeterminado 13 / 0x0D a pesar de que ninguna WPAN usa ninguno de los otros 15 canales.

Entonces, en un entorno 802.15.4 / Zigbee abarrotado, es útil cambiar su SC para forzar su WPAN a canales menos utilizados. No todas las radios Zigbee son compatibles con los 16. Depende de la edad y la potencia nominal.

La versión anterior de Digi XBee solo admitía de 12 a 23, por lo que scan_channel / SC predeterminado es 0x1FFE. Los nuevos Digi XBee non-PRO (S2 / S2B / S2C) admiten todos los canales, por lo que scan_channel / SC puede ser 0xFFFF.

Los canales más nuevos de soporte de Digi XBee PRO (S2) 11 a 24, por lo que scan_channel / SC puede ser 0x3FFF. El nuevo Digi XBee PRO (S2B / S2C) admite los canales 11 a 25, por lo que scan_channel / SC puede ser 0x7FFF.

Un coordinador de hardware nuevo que elija los canales 11, 24, 25 o 26 no será accesible por hardware antiguo, así que considere forzar el SC a 0x1FFE o más estrecho. No tendrá una 'retroalimentación' clara de que esto está ocurriendo (Digi, 2018).

3.6.1. Control SC dentro del coordinador

Para una máxima compatibilidad, es aconsejable restringir el número de canales que el coordinador puede usar y mantener los enrutadores y los nodos finales lo más abiertos posible. El coordinador establece el canal que usará la red, por lo que es mejor asegurarse de que establecerá un canal que todos los demás dispositivos estén configurados para usar. Como algunos chips más antiguos están limitados a los canales que pueden usar,

es importante que el coordinador no seleccione un canal que algunos chips no puedan usar (Digi, 2018).

- Los coordinadores deben configurarse para 0x1ffe.
- Los enrutadores y los nodos finales deben configurarse para un rango lo más amplio posible. El XBee de bajo consumo más nuevo debe configurarse para 0xffff. Todo XBee debe ser al menos 0x1ffe.

3.6.2. Evitar el WiFi de oficina / hogar

En general, los pequeños paquetes infrecuentes de ZigBee no se ven afectados por WiFi, y se podría decir que las 'balas' destructivas de ZigBee en su ancho de banda WiFi se tratan como ruido de fondo común y se solucionan.

Sin embargo, dado que puede controlar con qué canales WiFi puede interferir su ZigBee, y dado que tiene más de una docena de canales para seleccionar, es inteligente configurar su ZigBee para que no interfiera con el WiFi de su hogar u oficina. Debería hacer cumplir esta evasión configurando SC en su puerta de enlace \ coordinadores solamente.

La mayoría de los dispositivos WiFi de consumo utilizan de forma predeterminada el 'canal 6' (es decir, los canales WiFi 6 a 10), por lo tanto, el WiFi de su hogar o pequeña empresa probablemente esté usando el canal 6. Si su PC / computadora portátil / tableta / teléfono inteligente le permite hacer un 'Encuesta del sitio WiFi', escaneando todos los canales WiFi en busca de tráfico sin procesar, luego puede poner inteligentemente su ZigBee en las bandas más claras o en las que usan sus vecinos (Digi, 2018).

Tabla 3.7 Canales usados por WIFI

Resultado deseado	SC para usar
Para evitar WiFi Ch 1	0x7FF0
Para evitar WiFi Ch 6	0x7E0F
Para evitar WiFi Ch 11	0x41FF
Para evitar todo WiFi	0x4000
Para forzar el uso de WiFi Ch 1	0x000F
Para forzar el uso de WiFi Ch 6	0x01F0
Para forzar el uso de WiFi Ch 11	0x3E00
Para forzar el uso de no WiFi	0x4000

Fuente: (Digi, 2018)

El uso exitoso de ZigBee puede requerir evitar con cuidado los dispositivos que no son WIFI de la competencia, incluidos:

- Micrófono / auriculares inalámbricos en un restaurante.
- Sistemas telefónicos inalámbricos
- Auriculares inalámbricos de audio (música)
- Auriculares para teléfonos inalámbricos.

El grave riesgo de estos dispositivos competidores de 2,4 GHz es que muchos utilizan tanto ancho de banda sin procesar como sea posible para maximizar la calidad del audio. Entonces, por ejemplo, una malla ZigBee en un restaurante de comida rápida puede funcionar muy bien cuando se instala a las 6 a.m., pero comienza a ver una tasa de error del 60-70% cuando el sistema de audio de acceso directo está operativo y ocupado.

Idealmente, revise la documentación técnica de la tecnología competidora. Aunque no es WiFi, es probable que defina su uso de frecuencia en términos de WiFi, y es probable que incluya una forma de asignarle rangos de Wifi 1, 6 u 11. Dado que la mayoría de los dispositivos WiFi para consumidores utilizan de forma predeterminada el canal 6, es seguro, suponga que estos dispositivos que no son WiFi probablemente tengan de forma predeterminada el canal WiFi 1 u 11, lo que significa exactamente dónde puede desear colocar su ZigBee (Digi, 2018).

3.7. Configuración de la red punto a punto con Xbee Serie 2

Para la configuración punto a punto de los módulos Xbee se utilizarán los siguientes elementos:

- 2 XBee serie 2
- 2 Arduino UNO
- 2 Shield Xbee
- 2 cables USB
- 1 Laptop con Windows 10
- Software XCTU

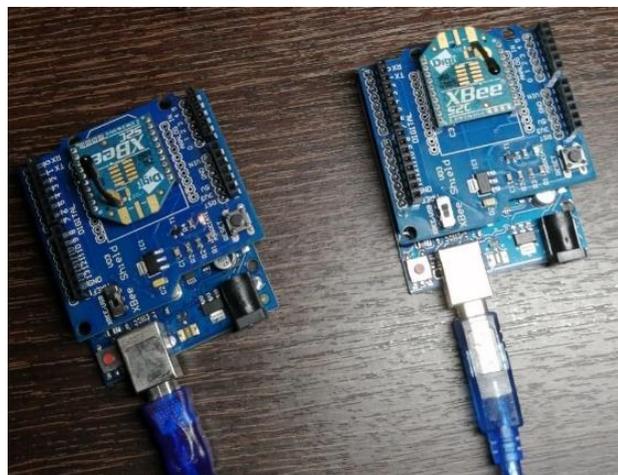


Figura 3.6 Módulos Xbee para pruebas IoT
Foto: Autor

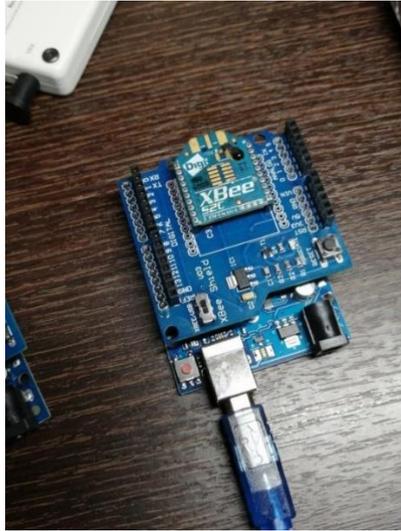


Figura 3.7 Conexión USB con Arduino y Xbee
Foto: Autor



Figura 3.8 Módulo Xbee S2CTH
Foto: Autor



Figura 3.9 Conectorización de los módulos Xbee
Foto: Autor

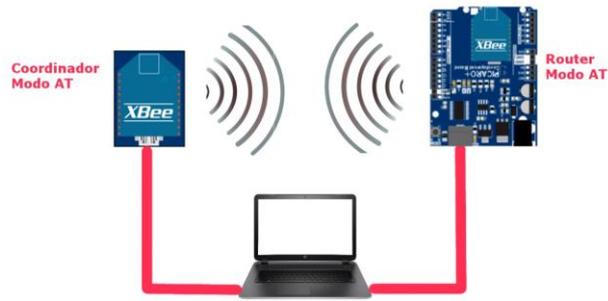


Figura 3.10 Esquemático de conexión punto a punto
Elaborada por el Autor

Para realizar la configuración de los módulos Xbee, se utiliza el software XCTU versión 6.5.2.

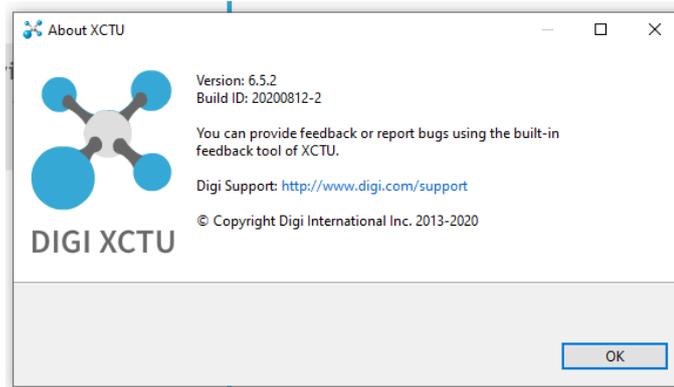


Figura 3.11 Versión XCTU
Fuente: Autor

Pantalla principal del software XCTU de DIGI.

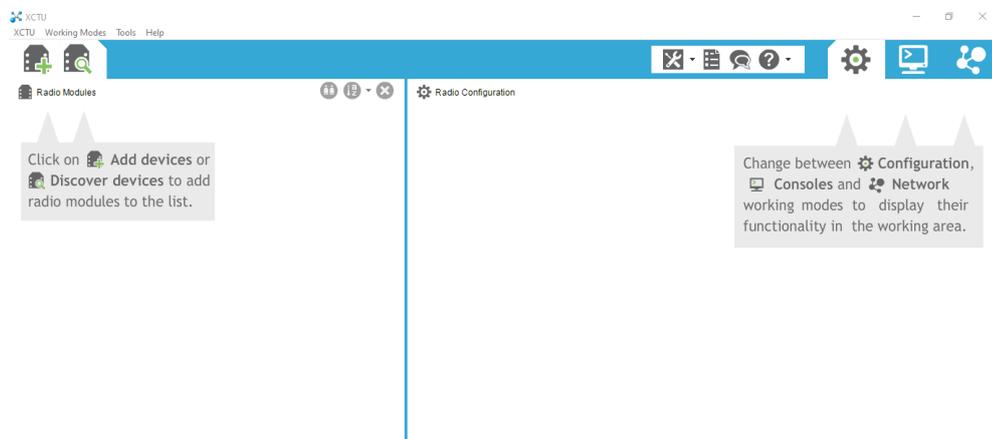


Figura 3.12 Pantalla principal XCTU
Fuente: Autor

Luego de haber conectado vía USB los módulos Xbee se selecciona “discover módulos”, se debe verificar en que puertos COM se reconocen los módulos. Para este caso se reconocen en los puertos COM6 y COM7.

Aparecen como Arduino UNO ya que los Xbee están montados sobre los Arduino.

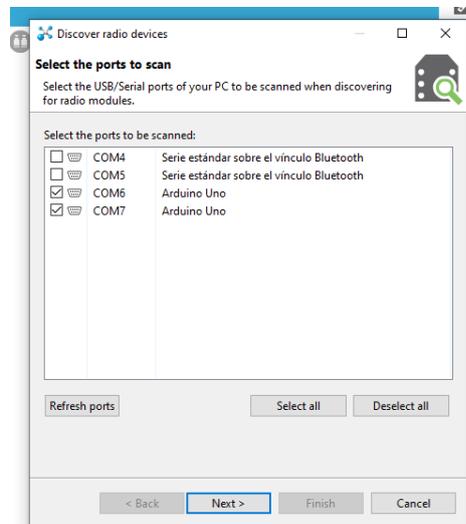


Figura 3.13 Puertos COM de los módulos Arduino
Fuente: Autor

Se selecciona la pestaña Next y se abre una pantalla donde están los parámetros de la configuración serial / USB, se deja seleccionado los que aparecen por defecto.

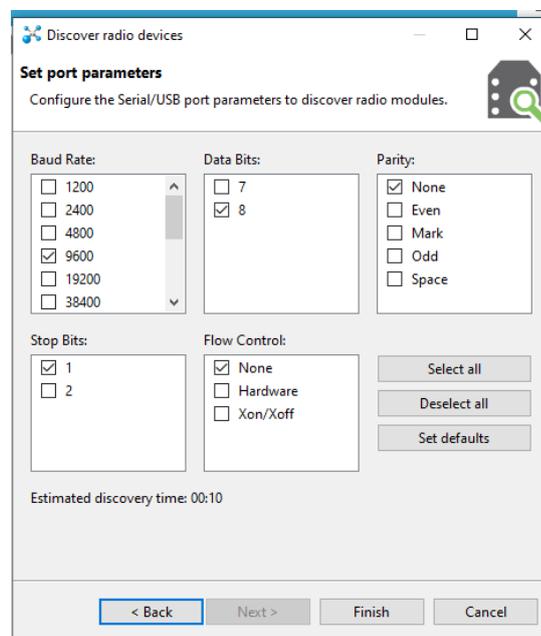


Figura 3.14 Configuración USB de los módulos
Fuente: Autor

Tabla 3.8 Configuración Serial / USB

Baud Rate: 9600

Data Bits: 8

Parity: None

Stop Bits: 1

Flow Control: None

Elaborada por el Autor

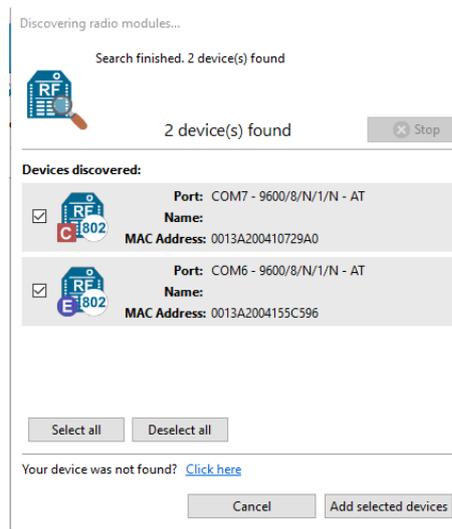


Figura 3.15 Módulos Xbee

Fuente: Autor

Puede darse el caso en que los módulos requieran actualizar el firmware en su última versión.

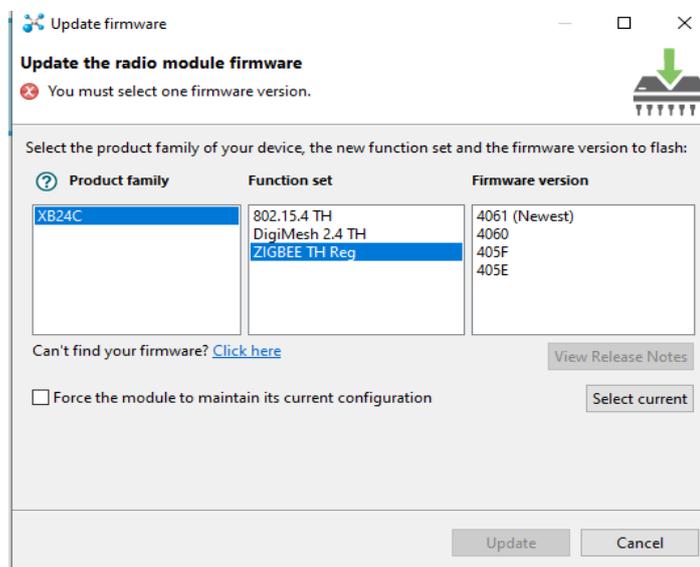


Figura 3.16 Actualización de firmware Zigbee TH

Fuente: Autor

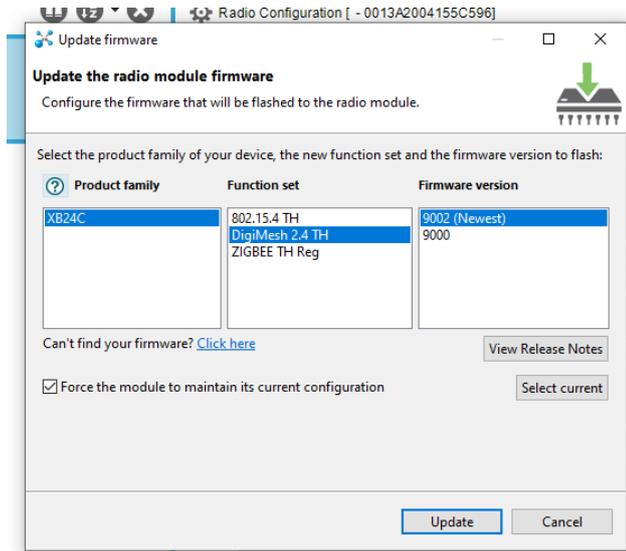


Figura 3.17 Actualización de firmware DigiMesh 2,4 TH
Fuente: Autor

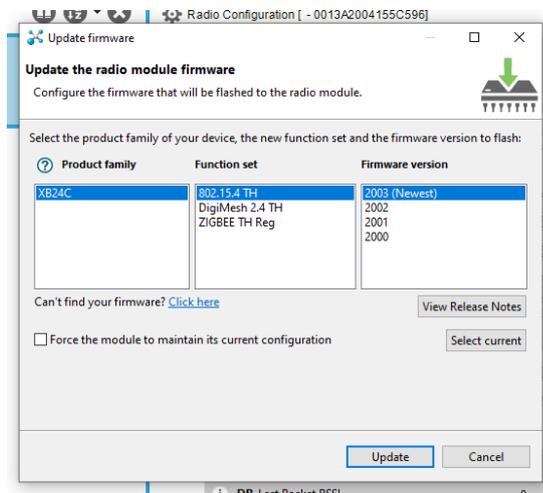


Figura 3.18 Actualización de firmware 802.15.4 TH
Fuente: Autor

Luego de la actualización se aprecia de la siguiente manera los módulos Xbee.

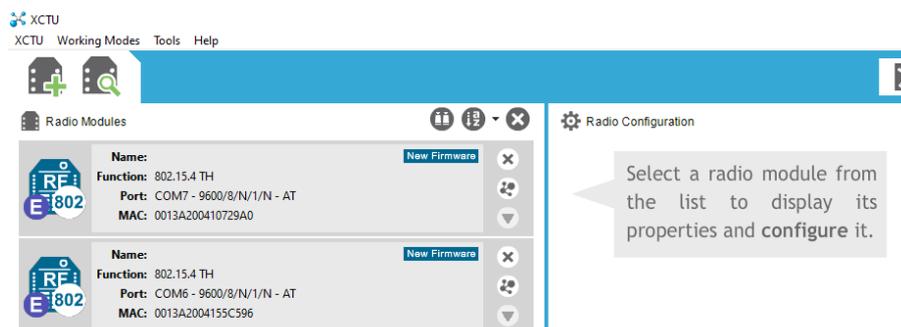


Figura 3.19 Xbee actualizados
Fuente: Autor

En las siguientes imágenes se observa las configuraciones precargadas en los módulos Xbee. Teniendo los dispositivos asignados, se revisa los parámetros de configuración de cada uno presionando sobre el dispositivo que se requiera ver.

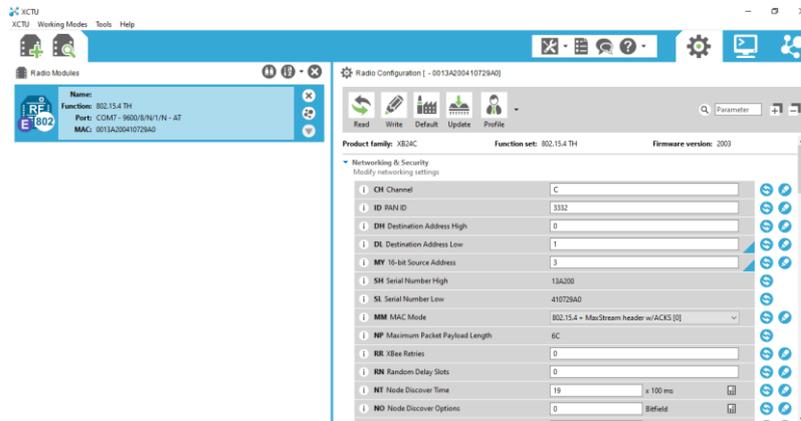


Figura 3.20 Configuraciones del Xbee del COM7
Fuente: Autor

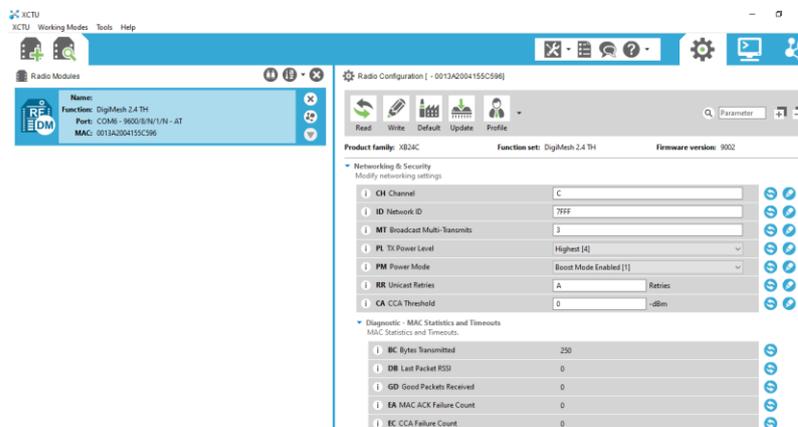


Figura 3.21 Configuraciones del Xbee del COM7
Fuente: Autor

Para la configuración punto a punto se procede a abrir cada módulo en dos ventanas de XCTU para poder observar el envío de datos de un módulo a otro de manera inalámbrica con el tipo de tecnología inalámbrica que se desea.

En las siguientes tablas, se observan la descripción de los campos y los valores que se deben asignar a cada uno de los módulos para configurar los Xbee en “modo transparente” o en una conexión punto a punto.

Tabla 3.9 Descripción de los parámetros de Xbee.

Indicador	Nombre
CH	Channel
DH	Destination Address High
DL	Destination Address Low
MY	16-bit Network Address
SH	Serial Number High
SL	Serial Number Low
PAN ID	Operating PAN ID
CE	Coordinator Enable

Elaborada por el Autor

Tabla 3.10 Parámetros principales a configurar en los módulos Xbee XBee A (COM6) XBee B (COM7)

CH C	CH C
ID PAN 3332	ID PAN 3332
DH 0	DH 0
DL 0	DL 0
MY 3	MY 3
PAN ID 234	PAN ID 234
SH 13A200	SH 13A200
SL 410729A0	SL 4155C596
CE End Device	CE Coordinator

Elaborada por el Autor

El módulo Xbee del COM 7 se configura en modo Coordinador

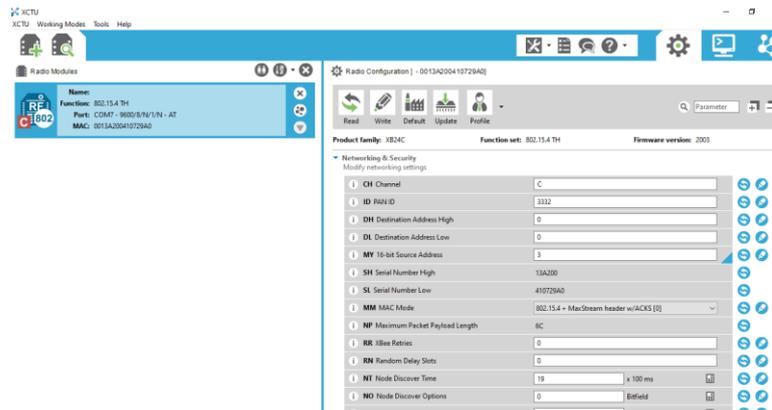


Figura 3.22 Xbee en modo Coordinador
Fuente: Autor

El módulo Xbee del COM 6 se configura en modo End Device.

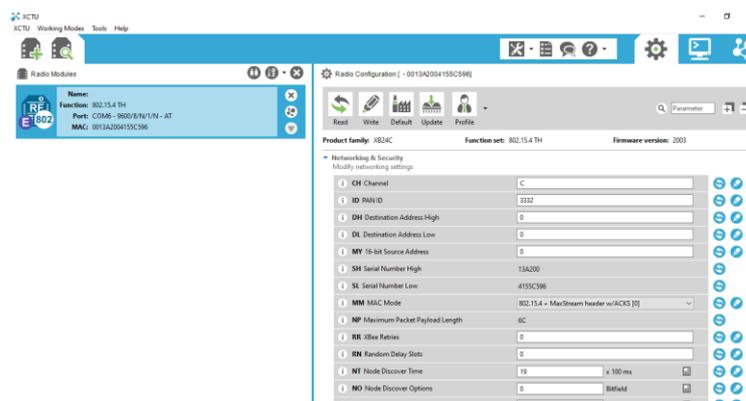


Figura 3.23 Xbee en modo End Device
Fuente: Autor

Una conexión punto a multipunto es óptima cuando se requiere enviar información de manera controlada a uno o varios nodos a la misma vez, lo cual lo diferencia de un broadcast. Es importante tener en cuenta que se debe configurar el módulo Xbee en la misma dirección PAN y el mismo canal de comunicación: se debe recordar que Xbee tiene 16 canales de comunicación.

Una vez configurados los parámetros de ambos Xbee se debe oprimir el botón para cambiar al modo Consola, con lo que se abrirá en el panel derecho una Consola de comandos como se muestra en la siguiente figura.

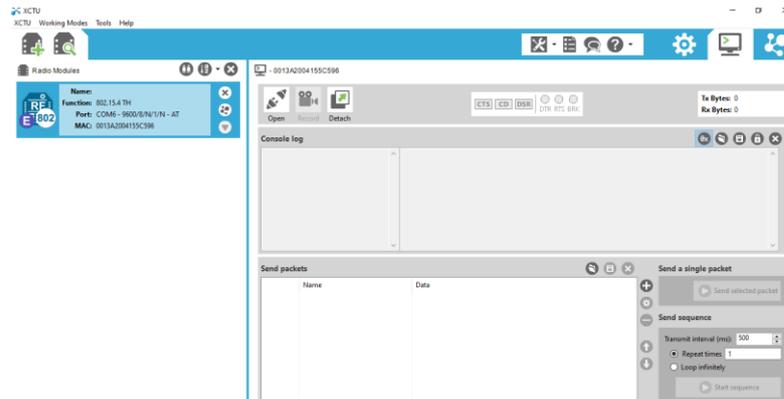


Figura 3.24 Consola de XCTU del Xbee B
Fuente: Autor

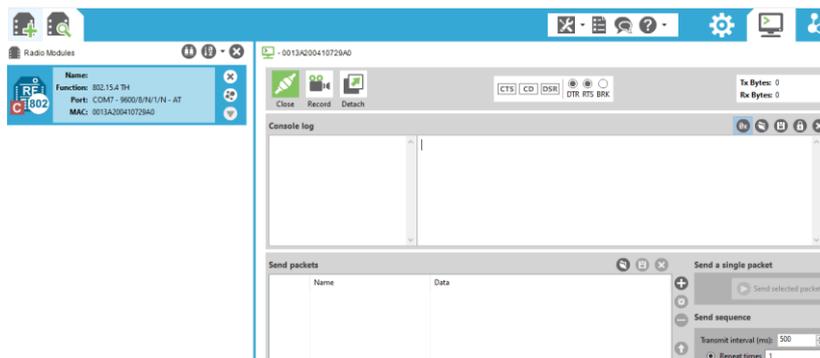


Figura 3.25 Consola de XCTU del Xbee B
Fuente: Autor

Se selecciona el primer Xbee que está en modo coordinador y se abre la sesión de consola con el botón Open. Posteriormente se realiza lo mismo con el Xbee que está en modo End Device. Con esta acción se establece la comunicación inalámbrica de los dos Xbee con protocolo 802.15.4.

Después de oprimir el botón Open, el cuadro de texto Console Log del panel derecho queda habilitado para escribir algo. En el cuadro de texto de la derecha se muestra el valor hexadecimal de cada uno de los caracteres que se escribe. El color rojo significa que el mensaje fue recibido. El color azul del texto significa que el mensaje fue enviado.

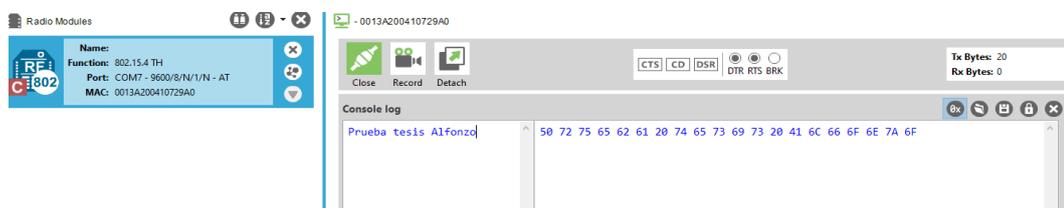


Figura 3.26 Envío de mensaje con el Xbee Coordinador
Fuente: Autor

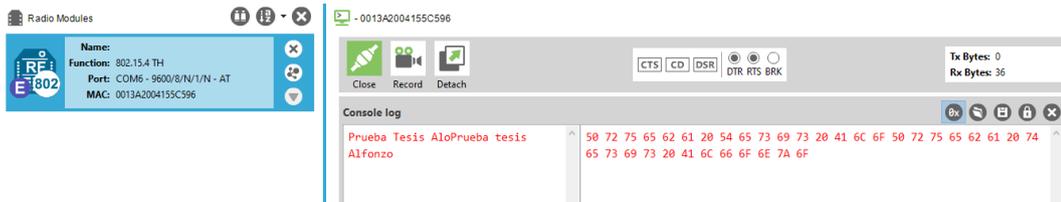


Figura 3.27 Recepción de mensaje con el Xbee End Device
Fuente: Autor

Para observar si la señal transmitida en 2,4 Ghz con protocolo IoT 802.15.4 afecta a las redes WIFI se instala el programa InSSiDer en la laptop de pruebas y se observa que no es detectado con SSID ya que no es una conexión inalámbrica que necesita una autenticación como en WIFI 802.11 a/b/n y por ende no hay afectación ni perturbación con respecto a otras redes en la banda de 2,4 Ghz.

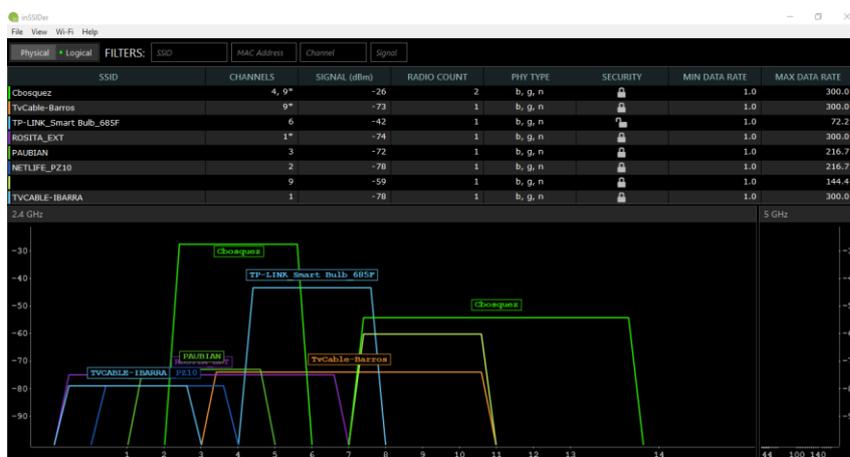


Figura 3.28 Monitoreo de redes WIFI con INSSIDER
Fuente: Autor

Para comprobar el espectro utilizado por cada canal de la radio Xbee se debe utilizar un analizador de espectros externo o las herramientas de análisis de XCTU.

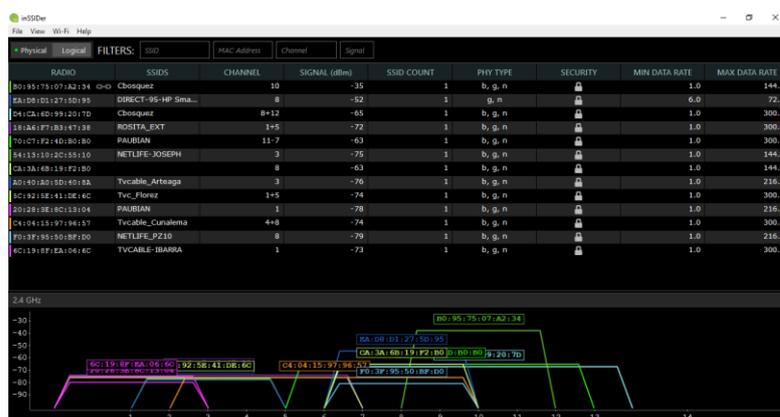


Figura 3.29 Redes WIFI con INSSIDER
Fuente: Autor



Figura 3.30 Análisis de capa mac con INSSIDER

Fuente: Autor

3.8. Herramientas de análisis y monitoreo de señal inalámbrica con XCTU de DIGI

XCTU tiene herramientas de análisis y monitoreo de las señales transmitidas, para esta investigación se utilizó las opciones “Range Test”, “Spectrum Analyzer”, y “Throughput”.

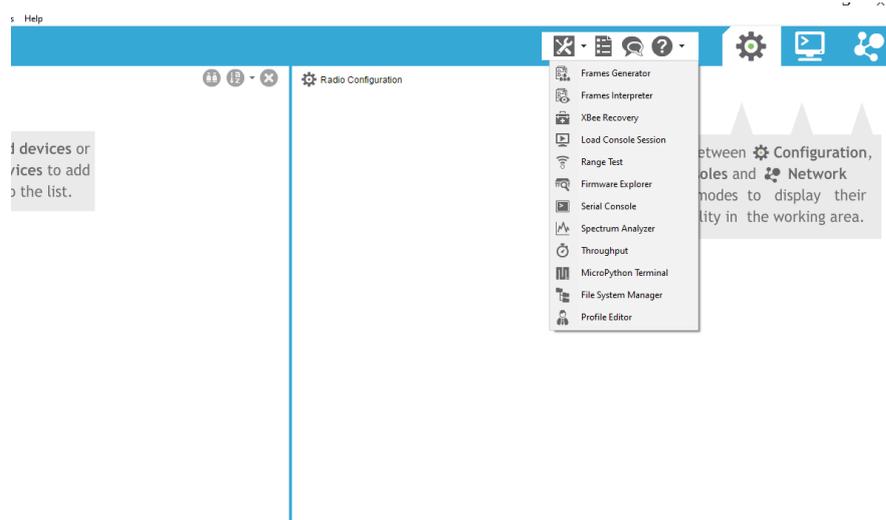


Figura 3.31 Herramientas de monitorización con XCTU

Fuente: Autor

Para poder visualizar los canales WIFI y cuales están más libres para la transmisión del Xbee se inicia el Spectrum Analyzer de XCTU, hay que considerar que se debe tener configurada y detectada la Xbee antes de iniciar el analizador de espectros, luego de esto se da inicio al scaneo en “Start Spectrum Analyzer”.

Se puede observar en la gráfica que los canales más saturados en la banda WIFI son canal 1, 6 y 11, los cuales son los canales preconfigurados en diferentes routers WIFI. Con esta herramienta se puede determinar que canales son los menos saturados en los cuales se puede configurar el dispositivo IoT.

El fabricante DIGI de dispositivos inalámbricos Xbee muy utilizados para dispositivos IoT, sugiere configurar sus dispositivos en canales libres WIFI para no hacer interferencias con estos, por tal motivo en su software XCTU hay herramientas que ayudan a determinar la ocupación del canal menos saturado.



Figura 3.32 Analizador de espectros de WIFI con XCTU.

Fuente: Autor

En la siguiente gráfica se observa la herramienta de “Radio Range Test” la cual se usa para determinar la distancia entre los dispositivos Xbee, se puede observar una línea de tiempo con la tasa de transferencia enviada, la calidad de señal determinada con la potencia en dbm. También se puede observar la cantidad de paquetes enviados y recibidos en el radioenlace. Hay que considerar que estas pruebas iniciales se las realizó en laboratorio en un entorno interno con interferencias.

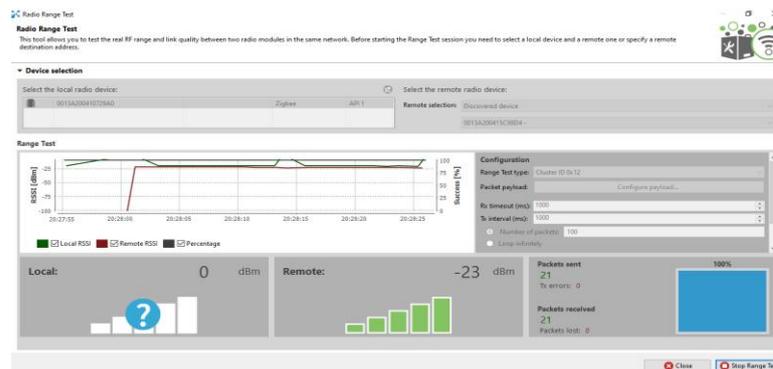


Figura 3.33 Range Test de IEEE 802.15.4.

Fuente: Autor

La herramienta de Throughput muestra la tasa de transferencia enviada y recibida en kbps, hay que tomar en cuenta que los dispositivos IoT son de bajo consumo de tráfico por tal motivo la tasa de transferencia es baja y por ende el consumo energético es bajo también.



Figura 3.34 Throughput de IEEE 802.15.4.
Fuente: Autor

En la siguiente gráfica se puede observar la interconexión entre los dos nodos IoT Xbee y el envío de datos mediante la señal inalámbrica.

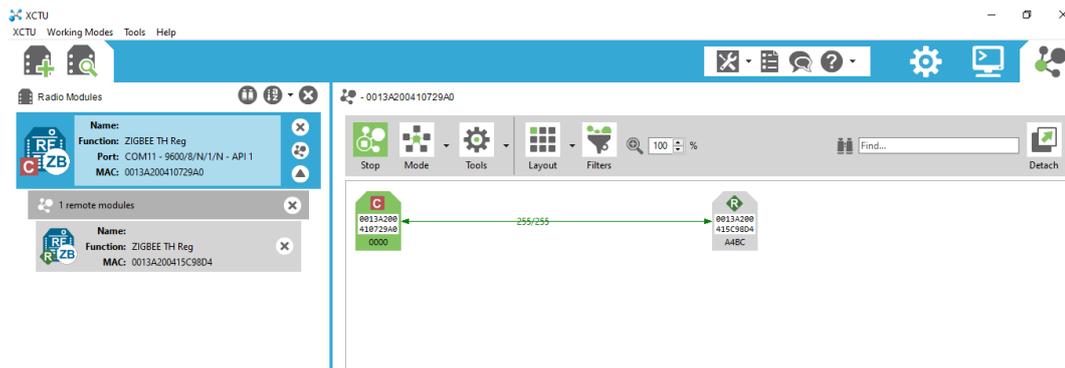


Figura 3.35 Interconexión entre nodos IoT.
Fuente: Autor

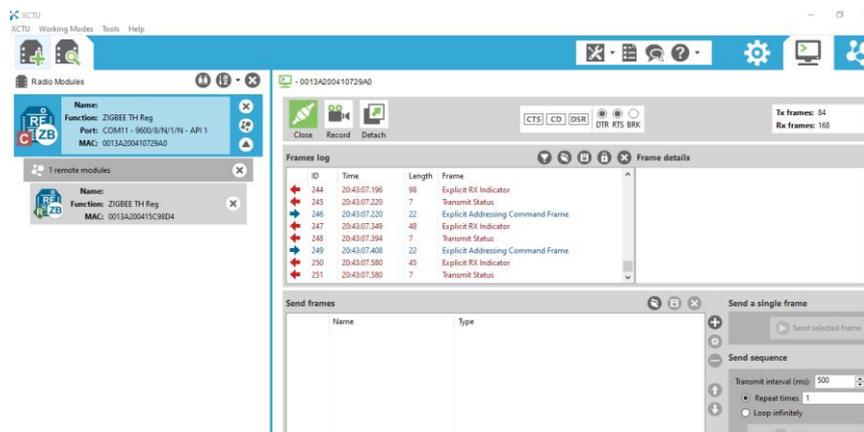


Figura 3.36 Transmisión de datos entre los dispositivos Xbee.
Fuente: Autor

3.9. Monitorización de señal inalámbrica Zigbee e IEEE 802.15.4 con Analizador de espectros de Agilent y antena Aaronia.

Las pruebas de monitorización de espectro de los dispositivos IoT con Xbee se los realizó con el analizador de espectros AGILENT CSA N1996A y antena log periódica Aaronia. A continuación, se describe lo más importante a destacar de este analizador de espectros:

- Rango de frecuencia: 100 kHz a 3 o 6 GHz
- Conjunto de estímulo / respuesta: 10 MHz a 3 GHz o 6 GHz
- Preamplificador a 3 GHz o 6 GHz
- -156 dBm / Hz nivel de ruido promedio mostrado (DANL)
- +18 dBm de intercepción de tercer orden (TOI)
- Precisión de amplitud total de 0,5 dB
- Peso 7,5 kilogramos
- 2+ horas de duración de la batería
- Medidas de potencia del canal
- Análisis de modulación AM / FM opcional
- Pasos de RBW ajustables al 10% de 10 Hz a 200 kHz, 250 kHz, 300 kHz, 1 MHz, 3 MHz y 5 MHz, VBW, 1 Hz a 8 MHz

El N1996A es un analizador de espectro portátil de bajo costo con una personalidad de análisis de red escalar para mediciones de potencia de frecuencia general, análisis de respuesta de estímulo y monitoreo de espectro. El N1996A le ayuda a equilibrar fácilmente sus múltiples necesidades de prueba, independientemente de si lo utiliza en una línea de producción, en un laboratorio de desarrollo o en un sitio al aire libre (Keysight, 2020).



Figura 3.37 Analizador de espectros Agilent N1996A
Fuente: (Keysight, 2020)

Junto con el analizador de espectros se utilizó la antena Log Periódica HyperLog 30180 de AARONIA AG, que tiene un rango de operación de 380 Mhz a 18 Ghz y una potencia de 5 dbi. Con las antenas log-periódicas de la línea HyperLOG 30180, Aaronia ofrece una alternativa muy económica que cumple con los requerimientos más exigentes.

Combinado con las antenas de CEM HyperLOG, cualquier analizador de espectro se convierte en unos pocos pasos en un dispositivo de medición de AF (RF) profesional con características direccionales. Ambos forman un equipo de ensueño para mediciones de compatibilidad electromagnética en laboratorios y al aire libre. Las antenas log-periódicas para pruebas EMC de la línea HyperLOG 30180, hechas con TEFLON tienen un rango de medición extendido hasta 380MHz para cubrir las frecuencias bajas de la banda TETRA (Aaronia, 2020).



Figura 3.38 Antena Aaronia Log periódica 380MHz - 18GHz de 5 dbi
Fuente: (Aaronia, 2020)

3.9.1. Pruebas de enlace inalámbrico IoT con Xbee desde laboratorio, ambiente interno.

A continuación, se evidencian las pruebas en laboratorio en un ambiente interno de laboratorio. Para estas pruebas se conecta los dos Xbee en la misma computadora ya que uno va a hacer la función de estación y otro de controlador.

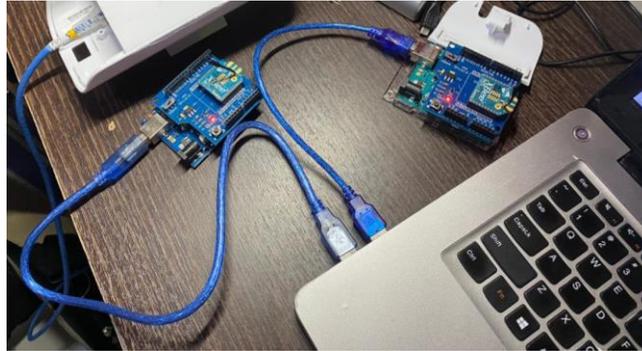


Figura 3.39 Pruebas internas con los Xbee.
Fuente: Autor



Figura 3.40 Pruebas internas con los Xbee y Analizador de espectros AGILENT.
Fuente: Autor



Figura 3.41 Pruebas internas con los Xbee, Analizador de espectros AGILENT y antena de amplio rango.
Fuente: Autor

Como primera prueba se hace un scaneo de la red WIFI que se sitúa desde canal 1 (2412 Mhz) hasta canal 11 (2462 Mhz), se observa que en los canales altos se sitúa la mayor concentración de dispositivos

inalámbricos WIFI conectados, estos corresponden a canales entre el 6 y 11.

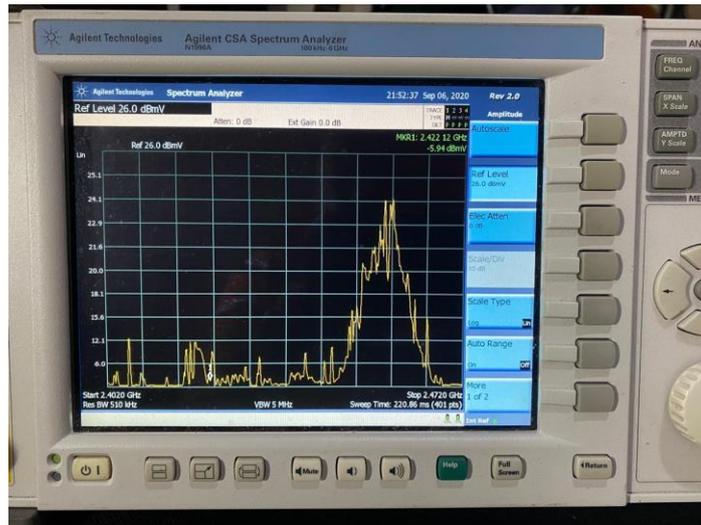


Figura 3.42 Escaneo de frecuencias de WIFI 2,4 Ghz
Fuente: Autor

Luego de testear el espectro en general, se programa el Xbee para que transmita en la frecuencia 2420 Mhz, ya que es una frecuencia que no tiene saturación o uso en el espectro, esta configuración solo se la realiza en el Xbee que funciona como controlador. Se sitúa la frecuencia central de 2420 Mhz para escanear las portadoras que envían los dispositivos IoT Xbee. El resultado es una gráfica con portadoras dentro de la banda, cabe indicar que el ancho de banda de la señal es de 5 Mhz.

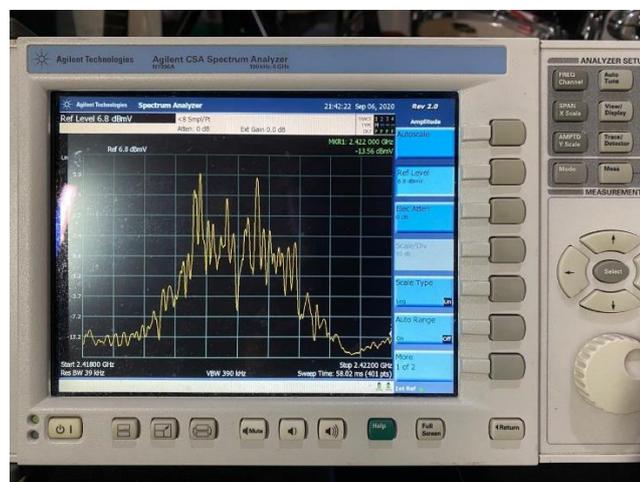


Figura 3.43 Portadoras en el espectro de frecuencia de 2420 Mhz
Fuente: Autor

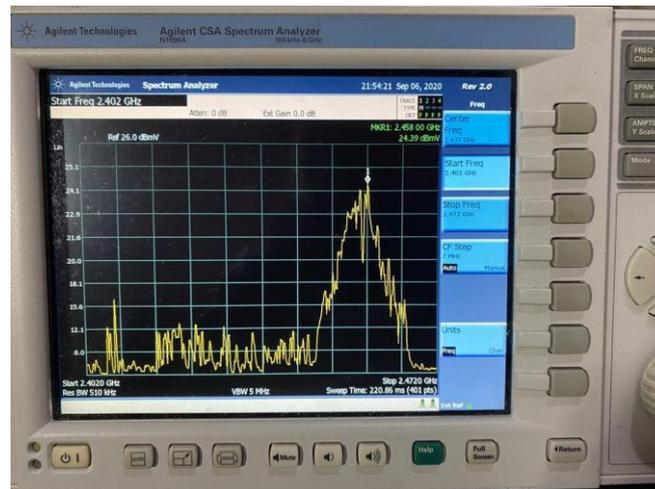


Figura 3.44 Escaneo de frecuencias de WIFI 2,4 Ghz segunda toma
Fuente: Autor

3.9.2. Pruebas de enlace inalámbrico IoT con Xbee en campo, ambiente externo.

Se realizan pruebas en campo abierto, específicamente en la urbanización Villaclub del cantón Daule Ecuador. A continuación, se detallan las evidencias de las pruebas tomadas en campo y del análisis de las señales tomadas con el analizador de espectros.



Figura 3.45 Montaje del módulo de pruebas con Analizador de espectros y antena
Fuente: Autor



Figura 3.46 Configuraciones de Analizador de espectros en campo
Fuente: Autor



Figura 3.47 Detalles de las pruebas en campo
Fuente: Autor



Figura 3.48 Escaneo de frecuencias WIFI en campo abierto.
Fuente: Autor



Figura 3.49 Alineación de antena para el scaneo de frecuencias.
Fuente: Autor



Figura 3.50 Configuración de analizador de espectros
Fuente: Autor



Figura 3.51 Escaneo de frecuencias de WIFI 2,4 Ghz en campo abierto
Fuente: Autor



Figura 3.52 Escaneo de frecuencias de WIFI 2,4 Ghz en campo abierto segunda toma
Fuente: Autor



Figura 3.53 Escaneo de frecuencias de WIFI 2,4 Ghz en campo abierto tercera toma
Fuente: Autor

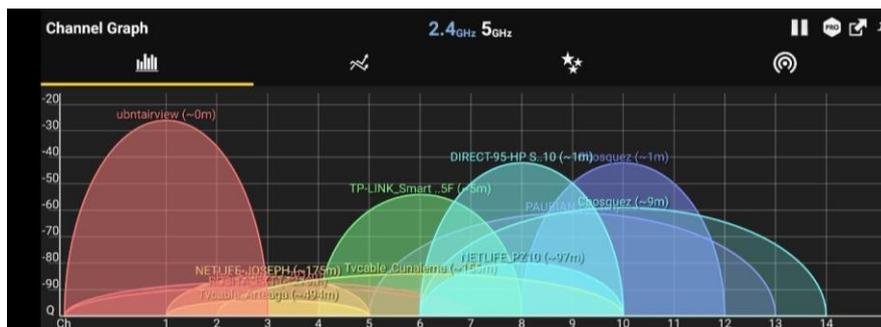


Figura 3.54 Escaneo de frecuencias en campo abierto de WIFI 2,4 Ghz con WIFI Analyzer
Fuente: Autor

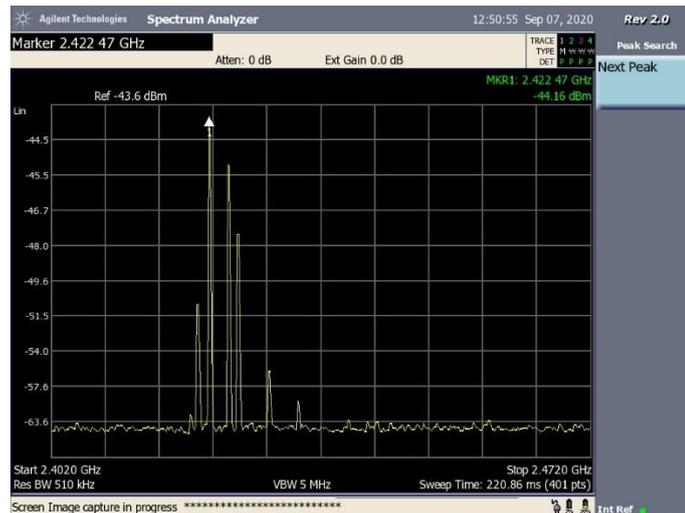


Figura 3.55 Escaneo de frecuencias de WIFI 2,4 Ghz cuarta toma
Fuente: Autor

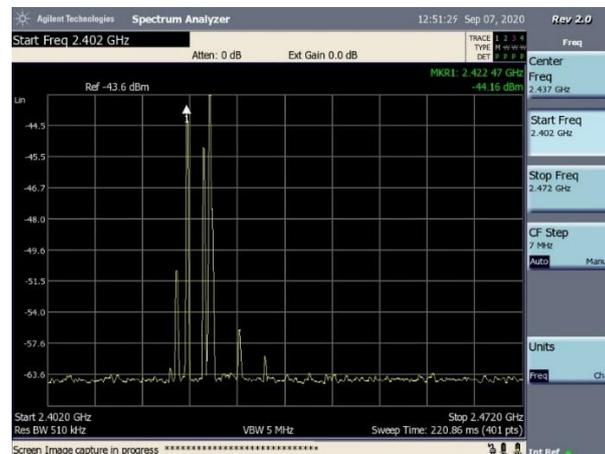


Figura 3.56 Escaneo de frecuencias del módulo Xbee con transmisión Zigbee y 802.15.4
Fuente: Autor

3.10. Monitorización de señal inalámbrica LORAWAN con Analizador de espectros de Agilent y antena Aaronia.

LoRaWAN opera en las bandas de frecuencia de subgigahercios y su especificación varía de una región a otra debido a requisitos regulatorios. Por el momento no hay especificaciones técnicas regulatorias en Ecuador con respecto al uso de frecuencias LoRaWAN en Ecuador, sin embargo, en este estudio se analiza el rango de frecuencias utilizadas en USA.

LoRaWAN define diez canales para Europa. De los cuales 8 canales son de velocidad de datos múltiples de 250 bps a 5,5 kbps. Un canal puede operar a una velocidad de datos más alta con una velocidad de 11 kbps. Y un canal FSK a 50 kbps. La potencia máxima permitida es + 14dBm.

LoRaWAN define canales de 64, 125 kHz con incrementos de 902,3 a 914,9 MHz. Hay ocho canales de enlace ascendente de 500 KHz adicionales en incrementos de 1,6 MHz de 903 MHz a 914 MHz. Los ocho canales de enlace descendente tienen una anchura de 500 kHz a partir de 923,3 MHz a 927,5 MHz. La potencia de salida máxima para Norteamérica es de +30 dbm.

	Europe	North America	China	Korea	Japan	India
Frequency band	867-869MHz	902-928MHz	470-510MHz	920-925MHz	920-925MHz	865-867MHz
Channels	10	64 + 8 + 8	In definition by Technical Committee			
Channel BW Up	125/250kHz	125/500kHz				
Channel BW Dn	125kHz	500kHz				
TX Power Up	+14dBm	+20dBm typ (+30dBm allowed)				
TX Power Dn	+14dBm	+27dBm				
SF Up	7-12	7-10				
Data rate	250bps- 50kbps	980bps-21.9kbps				
Link Budget Up	155dB	154dB				
Link Budget Dn	155dB	157dB				

Figura 3.57 Especificaciones de frecuencia con LORAWAN
Fuente: (LoraWAN, 2020)

LoRa trabaja a un rango de frecuencias distintas dependiendo de la región en la que se encuentre. Existen otros estudios donde se utilizan las frecuencias de Australia para análisis de estas señales en Quito, Ecuador (Fernández & Uquillas, 2020).

Para ese estudio se utilizó las frecuencias 915-928 MHz, US 902-928MHz y AS 923Mhz, de acuerdo con lo establecido por LoRa Alliance (2018). AU 915-928 MHz, fue utilizada debido a que la resolución del Plan Nacional de Frecuencia aprobado por la Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones (ARCOTEL) el 13 de diciembre del 2017, establece:

“En las bandas 915 – 928 MHz, 2 400 – 2 483,5 MHz, 5 150 – 5 350 MHz, 5 470 – 5 725 MHz y 5 725 – 5 850 MHz y 24,05 – 24,25 GHz operan, a título secundario, sistemas que ocupan espectro radioeléctrico para Uso Determinado en Bandas Libres (UDBL), para los servicios fijo y móvil” (ARCOTEL, 2020)

En esta investigación no se pudo validar el monitoreo y análisis de una red LoraWAN en la ciudad de Guayaquil debido a que la única radiobase LoraWAN situada en Guayaquil se encuentra en la ESPOL y esta al momento de la investigación se encontraba apagada.



Figura 3.58 Escaneo de frecuencias LoRaWAN (902 Mhz – 928 Mhz)
Fuente: Autor



Figura 3.59 Escaneo de frecuencias LoRaWAN segunda toma (902 Mhz – 928 Mhz)
Fuente: Autor

3.11. Marco regulatorio actual para frecuencias libres en el Ecuador.

De acuerdo con la normativa vigente en el Ecuador se destaca lo siguiente con respecto al uso de las frecuencias libres en el Ecuador. La Constitución de la República, en el numeral 3 del artículo 16, garantiza el derecho a todas las personas, entre otras cosas, a acceder en igualdad de condiciones al uso de frecuencias del espectro radioeléctrico para la gestión de bandas libres para la explotación de redes inalámbricas.

El numeral 1 del artículo 17 de la misma Carta Magna, ordena que el Estado en su tarea de fomentar la pluralidad y diversidad en la comunicación garantizará el acceso a bandas libres para la explotación de redes inalámbricas, observando para ello el interés colectivo. El número 5.138 del Reglamento de Radiocomunicaciones de la UIT, determina las bandas que están destinadas para aplicaciones industriales, científicas y médicas (ICM), señalando además que: “La utilización de estas bandas para las aplicaciones ICM está sujeta a una autorización especial concedida por la administración interesada de acuerdo con las otras administraciones cuyos servicios de radiocomunicación puedan resultar afectados (...).”

El número 5.150 del Reglamento de Radiocomunicaciones de la UIT, respecto a las bandas que están designadas para aplicaciones industriales, científicas y médicas (ICM), señala también que: “Los servicios de radiocomunicación que funcionan en estas bandas deben aceptar la interferencia perjudicial resultante de estas aplicaciones. Los equipos ICM que funcionen en estas bandas estarán sujetos a las disposiciones del número 15.13.”

El numeral 11 del artículo 3 de la LOT, dispone como parte de los objetivos de la Ley el garantizar la asignación a través de métodos transparentes y en igualdad de condiciones de las frecuencias del espectro radioeléctrico que se atribuyan para la gestión de estaciones de radio y televisión, públicas, privadas y comunitarias así como el acceso a bandas libres para la explotación de redes inalámbricas, precautelando que en su utilización prevalezca el interés colectivo y bajo los principios y normas que rigen la distribución equitativa del espectro radioeléctrico.

El numeral 1 del artículo 96 de la LOT determina que el espectro de uso libre “Son aquellas bandas de frecuencias que pueden ser utilizadas por el público en general, con sujeción a lo que establezca el ordenamiento jurídico vigente y sin necesidad de título habilitante, ni registro”.

El numeral 2 del artículo 96 de la LOT determina que el espectro para uso determinado en bandas libres “Son aquellas bandas de frecuencias denominadas libres que pueden ser utilizadas para los servicios atribuidos por la Agencia de Regulación y Control y tan sólo requieren de un registro”.

De acuerdo con la regulación actual de asignación de frecuencias por parte de ARCOTEL se tiene la siguiente distribución de frecuencias de en la banda cercana a 2,4 Ghz:

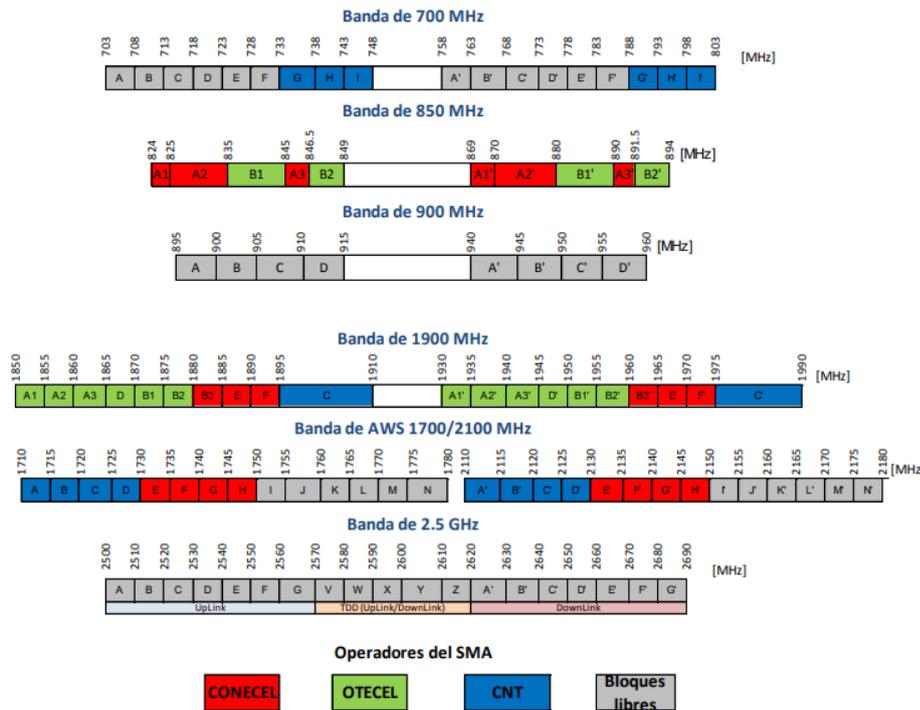


Figura 3.60 Frecuencias IMS en el Ecuador
Fuente: (ARCOTEL, 2020)

Tabla 3.11 Distribución de frecuencias cercanas a 2,4 Ghz

REGIÓN 2		ECUADOR		
Banda	Atribución	Banda	Atribución	Normativa Técnica Relacionada
2290-2300	FIJO MÓVIL salvo móvil aeronáutico INVESTIGACIÓN ESPACIAL (espacio lejano) (espacio-Tierra)	2290-2300	FIJO MÓVIL salvo móvil aeronáutico INVESTIGACIÓN ESPACIAL (espacio lejano) (espacio-Tierra)	Res. SNT-2014-0283
2300-2450	FIJO MÓVIL 5.384A RADIOLOCALIZACIÓN Aficionados 5.150 5.282 5.393 5.394 5.396	2300-2450	FIJO MÓVIL 5.384A RADIOLOCALIZACIÓN Aficionados 5.150 5.282 5.396 EQA.25 EQA.45	Res. TEL-560-18-CONATEL-2010
2450-2483,5	FIJO MÓVIL RADIOLOCALIZACIÓN 5.150	2450-2483,5	FIJO MÓVIL RADIOLOCALIZACIÓN 5.150 EQA.45	Res. TEL-560-18-CONATEL-2010
2483,5-2500	FIJO MÓVIL POR SATÉLITE (espacio-Tierra) 5.351A RADIOLOCALIZACIÓN RADIODETERMINACIÓN POR SATÉLITE (espacio-Tierra) 5.398 5.150 5.402	2483,5-2500	FIJO MÓVIL POR SATÉLITE (espacio-Tierra) 5.351A RADIOLOCALIZACIÓN RADIODETERMINACIÓN POR SATÉLITE (espacio-Tierra) 5.398 5.150 5.402	
2500-2520	FIJO 5.410 FIJO POR SATÉLITE (espacio-Tierra) 5.415 MÓVIL salvo móvil aeronáutico 5.384A	2500-2520	FIJO 5.410 MÓVIL salvo móvil aeronáutico 5.384A EQA.40	
Banda	Atribución	Banda	Atribución	Normativa Técnica Relacionada
2520-2655	FIJO 5.410 FIJO POR SATÉLITE (espacio-Tierra) 5.415 MÓVIL salvo móvil aeronáutico 5.384A RADIODIFUSIÓN POR SATÉLITE 5.413 5.416 5.339 5.418B 5.418C	2520-2655	FIJO 5.410 MÓVIL salvo móvil aeronáutico 5.384A 5.339 5.418B 5.418C EQA.40	

Fuente: (ARCOTEL, 2020)

Se puede observar que la banda de frecuencia utilizada en el rango de 2300 a 2450 Mhz está asignada a servicios fijos, móviles, radiolocalización, móvil por satélite, aficionados y radiodeterminación por satélite.

En base a la investigación realizada con información de Arcotel se pudo determinar que no hay una legislación actual con respecto al uso de

frecuencias libres para dispositivos IoT de manera explícita, sin embargo, hay documentación que hace referencia al uso de frecuencias libres para dispositivos ICM (Aplicaciones industriales, científicas y médicas).

ICM hace referencias a aplicaciones de equipos o de instalaciones destinados a producir y utilizar en un espacio reducido energía radioeléctrica con fines industriales, científicos, médicos, domésticos o similares, con exclusión de todas las aplicaciones de telecomunicación (ARCOTEL, 2020).

La resolución con respecto al uso de frecuencias libres para dispositivos con aplicativos industriales, científicas y médicas que usen la banda libre de frecuencia según el registro oficial de ARCOTEL-2018-0661 hace referencia a la normativa técnica de espectro de uso libre y de espectro para uso determinado en bandas libres, se conceptualiza como bandas para aplicaciones ICM a aquellas que serán utilizadas para aplicaciones industriales, científicas y médicas y que serán sujetas a autorización especial concedida por la administración interesada de acuerdo con las otras administraciones cuyos servicios de radiocomunicación puedan resultar afectados (Registro Oficial, 2018).

Los equipos que se usen en banda libre requieren homologación según el artículo 109 del reglamento.

En el Plan de frecuencias aprobado mediante resolución 12-09-ARCOTEL-2017 del 13 de diciembre de 2017, establece que “En las bandas 915 – 928 Mhz, 2400 – 2483,5 Mhz, 5150 – 5340 Mhz, 5470 – 5725 Mhz y 5725 – 5850 Mhz y 24,05 – 24,25 Ghz operan a título secundario sistemas que ocupan espectro radioeléctrico para uso determinado en bandas libres (UDBL), para los servicios fijo y móvil”

A continuación, se enuncia lo más destacado de la resolución ARCOTEL-2018-0661-UL-UDBL:

- El empleo de uso libre no requiere la obtención de ningún título habilitante.
- Todo equipo señalado en el ámbito de aplicación como ICM no requiere ser homologado.
- Un equipo salvo los equipos ICM que utiliza espectro de uso libre no puede ocasionar interferencia perjudicial a ninguna estación de radiocomunicaciones que pertenezca a un servicio concesionado, autorizado o registro, aún si dicho equipo cumple con las características técnicas establecidas en la presente norma técnica.
- La operación de estos equipos no debe superar los límites de exposición a las radiaciones no ionizantes establecidas por la ARCOTEL.

Considerando la tecnología IoT estudiada en las pruebas de campo se tiene los siguientes datos más relevantes con respecto a 802.15.4 y Zigbee.

Tabla 3.12 Parámetros de radio de protocolos 802.15.4 y Zigbee

Propiedad	Rango
Rango de transmisión de datos	868 MHz: 20kb/s; 915 MHz: 40kb/s; 2.4 GHz: 250 kb/s.
Alcance	10 – 20 m.
Latency	Abajo de los 15 ms.
Canales	868/915 MHz: 11 canales. 2.4 GHz: 16 canales.
Bandas de frecuencia	Dos PHY: 868/915 MHz y 2.4 GHz.
Direccionamiento	Cortos de 8 bits o 64 bits IEEE
Canal de acceso	CSMA-CA y rasurado CSMA-CA
Temperatura	El rango de temperatura industrial: -40° a +85° C

Fuente: (Digi, 2018)

Con estos datos se puede determinar que parámetros cumplir de acuerdo con la normativa vigente de ARCOTEL con respecto a datos de

potencia, uso de canales, etc. De acuerdo con la reglamentación actual ningún transmisor intencional deberá sobrepasar los límites de intensidad de campo indicados en la siguiente tabla.

Tabla 3.13 Límites generales para cualquier transmisor intencional

Frecuencia (Mhz)	Intensidad de Campo ($\mu\text{V}/\text{m}$)	Distancia de medición (m)
0,009 – 0,490	2400/f (Khz)	300
0,490 – 1,705	2400/f (Khz)	30
1,705-30	30	30
30-88	100	3
88-216	150	3
216-960	200	3
Por encima de 960	500	3

Fuente: (ARCOTEL, 2020)

La siguiente tabla muestra las bandas de frecuencia entre 902 y 928, su uso en la R2 y en Ecuador, sin embargo, en la actualidad mediante normativa de la Arcotel se estableció que las frecuencias 915 a 928 MHz, junto a otras más, operan a título secundario los sistemas UDBL tanto para servicios fijo y móvil.

Tabla 3.14 Bandas de frecuencia y tipo de utilización

REGION 2		ECUADOR
Banda MHz	Banda MHz	Rango MHz Nota EQA (resumen): Servicio (Sistema/Uso)
902 - 928	902 - 928	902-928
FIJO	FIJO	EQA.50: FIJO
Aficionados	5.150	
Móvil salvo móvil aeronáutico 5.325A		902-928 EQA.90: (MDBA y

Radiolocalización 5.150 5.325 5.326		Enlaces radioeléctricos de radiodifusión sonora que utilizan técnicas MDBA)
		915-928 A título secundario sistemas UDBL fijo y móvil

Fuente: (Registro Oficial, 2018)

En la siguiente tabla de las bandas de frecuencias, los límites establecidos reemplazan a los generales.

Tabla 3.15 Límites específicos para transmisores intencionales

Banda de frecuencias	Tipo de utilización	Límite de emisión
2,39 – 2,4 Ghz	Señales intermitentes de control Transmisiones periódicas	12500 $\mu\text{V/m}$ a 3m 5000 $\mu\text{V/m}$ a 3m
2,4-2,435 Ghz	RLAN con salto de frecuencias y modulación digital. Teléfonos inalámbricos con atenuación de las emisiones no esenciales.	Potencia de salida de cresta de 1000 mW; Rec UIT-R M1450-5. 50000 $\mu\text{V/m}$ a 3m.
2,435 – 2,465 Ghz	RLAN con salto de frecuencias y modulación digital. Teléfonos inalámbricos con atenuación de las emisiones no esenciales. Sensores de perturbación de campo. Cualquiera la sección 15,249 de la FCC.	Potencia de salida de cresta de 1000 mW; Rec UIT-R M1450-5. 50000 $\mu\text{V/m}$ a 3m. 500 $\mu\text{V/m}$ a 3m. 50 $\mu\text{V/m}$ a 3m.

2,464 – 2,4835 Ghz	RLAN con salto de frecuencias y modulación digital Teléfonos inalámbricos con atenuación de las emisiones no esenciales	Potencia de salida de cresta de 1000 mW; Rec UIT-R M1450-5 50000 µV/m a 3m
---------------------------	--	--

Fuente: (ARCOTEL, 2020)

A continuación, se detalla las bandas de frecuencias restringidas cercanas a las frecuencias utilizadas en el estudio de este proyecto, 900 Mhz y 2,4 Ghz. Ningún equipo o estación objeto de la norma técnica, podrá operar en las bandas de frecuencias descritas a continuación para emisiones intencionales:

Tabla 3.16 Bandas de frecuencias restringidas

N	MHZ
36	960-1240
43	2310 -22390
44	2483,5 – 2500

Fuente: (ARCOTEL, 2020)

Restricciones para equipos ICM, los equipos que funcionen en las bandas para aplicaciones ICM en el país deberán acoger los límites de radiación descritos para la región 2 por la UIT y por el comité internacional especial de perturbaciones radioeléctricas (CISPR). En la tabla siguiente se muestran los niveles de radiación máximos permitidos para equipos ICM:

Tabla 3.17 Niveles de radiación máximos permitidos para equipos ICM

Banda de frecuencia	Frecuencia central	Intensidad de campo eléctrico (dBuV/m)
902 – 928 Mhz	915 Mhz	60-120
2400 – 2500 Mhz	2450 Mhz	30-120

Fuente: (ARCOTEL, 2020)

3.11.1. Bandas UDBL

Espectro de uso libre o bandas libres, son aquellas bandas de frecuencias que pueden ser utilizadas por el público en general sin necesidad de la obtención de un título habilitante, con sujeción a las condiciones establecidas en la presente norma técnica.

Espectro para uso determinado en bandas libres, en adelante “UDBL”, son aquellas bandas de frecuencias denominadas bandas libres que, para poder ser utilizadas para la prestación de servicios del régimen general de telecomunicaciones, o como parte de redes privadas, requieren del registro como título habilitante (ARCOTEL, 2020).

Tabla 3.18 Límites a las transmisiones de espectro ensanchado

Banda UDBL	Tipo de Enlace / Sistema		
	PUNTO A PUNTO	PUNTO A MULTIPUNTO	MÓVIL
915 – 928 MHz	X	X	X
2400 – 2483.5 MHz	X	X	X
5150 – 5250 MHz	X	X	X
5250 – 5350 MHz	X	X	X
5470 – 5725 MHz	X	X	X
5725-5850 MHz	X	X	X
24.05 – 24.25 GHz	X	No permitido	No permitido
57 – 64 GHz	X	No permitido	No permitido

Fuente: (ARCOTEL, 2020)

A continuación, se detallan las características técnicas y los límites de emisión aplicables a las bandas destinadas a espectro UDBL:

Tabla 3.19 Límites a las transmisiones de UDBL

Bandas de Operación	Potencia Pico Máxima del Transmisor (mW)	P.I.R.E. (mW)	Densidad de P.I.R.E. (mW/MHz)
915 – 928 MHz*	500	----	----
2400 – 2483.5 MHz*	1000	----	----
5150 – 5250 MHz*	50	200	10
5250 – 5350 MHz*	250	1000	50
5470 – 5725 MHz*	250	1000	50
5725-5850 MHz*	1000	---	----
57 – 64 GHz	500	20000	

Fuente: (ARCOTEL, 2020)

En la banda de 915 a 928 MHz, los sistemas de espectro ensanchado tendrán frecuencias portadoras por canal de salto separadas como mínimo, por el mayor valor entre 25 kHz y el ancho de banda del

canal a 20 dB. El sistema saltará a los canales de frecuencias que sean seleccionados de una lista pseudo aleatoria, a la velocidad de salto provisto por el sistema.

Si la ganancia de la antena empleada en la banda 2400 – 2483.5 MHz es superior a 6 dBi, deberá reducirse la potencia máxima de salida del transmisor, esto es 1 Watt, en 1dB por cada 3 dB de ganancia de la antena que exceda los 6 dBi.

CONCLUSIONES

- Actualmente la UIT y la ISO continúan en la normalización de las tecnologías para el desarrollo de IoT, específicamente en el desarrollo de estándares adecuados para la industria, la seguridad, el stack de protocolos, entre otros, por tal motivo es un constante cambio y aumento de normativas que podría verse en el transcurso de los siguientes años y que Ecuador debería implementar según los acuerdos con la UIT.
- Las frecuencias de las tecnologías inalámbricas LAN y WAN para IoT como Zigbee, IEEE 802.15.4 y LoraWAN están enmarcadas dentro de las bandas UDBL, del cual hay reglamentación actual emitida por ARCOTEL para su uso e implementación, bandas de uso libre que solo necesitan registro ante el ente regulador. Aunque en esta normativa vigente de ARCOTEL para las bandas UDBL, no se hace referencia explícitamente a las tecnologías de IoT como Zigbee o IEEE 802.15.4, sin embargo, se especifican los elementos ICM en los cuales ya hay estudios y se los presenta en la normativa de uso de espectros de banda libre.
- De las pruebas realizadas en laboratorio y en campo se puede concluir que las tecnologías inalámbricas como IEEE 802.15.4, Zigbee y LoraWAN no presentan interferencias a los canales de WIFI ya que los canales que usan estas tecnologías están sobrepuestos o hacen overlap con los canales 1, 6, y 11 de WIFI. Los niveles de potencia de tecnologías como Zigbee, IEEE 802.15.4 no superan los 100 mW, lo cual hace cumplir la actual reglamentación de ARCOTEL con respecto a los niveles de potencia permitida para enlaces radioeléctricos. En el mismo sentido en términos de potencia de señal, uso de espectro de frecuencia, ancho de canal y modulación, por lo tanto, su uso no representa ninguna perturbación para las actuales redes WIFI.

- Las pruebas técnicas realizadas en esta investigación pueden servir como guía y base para futuras recomendaciones en la normativa para las transmisiones y recepciones de tecnología inalámbrica IoT en el Ecuador, debido a que dentro de la normativa vigente de ARCOTEL para uso de frecuencias UDBL no se hace referencia a dispositivos electrónicos IoT, mismos que se están comercializando bajo protocolos y estándares Zigbee e IEEE 802.15.4, se considera que se debería agregar dentro de este registro previo análisis técnico experimental.
- Tecnologías como LoRaWAN en el Ecuador aún no están desplegadas ni enmarcadas en la normativa de la ARCOTEL, se sugiere reformar el actual esquema del espectro radioeléctrico para incluir las frecuencias de operación de estas redes ya que actualmente están ocupadas con otros servicios de telecomunicaciones y considerar además que las tecnologías IoT están dando grandes pasos para las conexiones WAN mediante el uso de las redes 5G, próxima a implementarse en nuestro país.

RECOMENDACIONES

- Las tecnologías inalámbricas para IoT están dando un giro hacia redes de banda ancha como 5G, sin embargo hasta que existan redes de este tipo en el Ecuador y se desplieguen de una manera rápida y efectiva se tendrá que usar las bandas UDBL para IoT, y dentro de estas bandas implementaciones tecnológicas como Zigbee e IEEE 802.11, que son tecnologías especializadas para transmisiones de baja potencia y bajo consumo energético.
- Para futuros trabajos de investigación se recomienda realizar pruebas con tecnologías WAN como LoRaWan, y Sigfox aunque son tecnologías que no están implementadas totalmente en el Ecuador, se pueden implementar maquetas de laboratorio y de esta manera hacer una relativa comparación técnica financiera con respecto a las nuevas redes 5G.

GLOSARIO TÉCNICO

2G: Redes móviles de segunda generación.

3G: Redes móviles de tercera generación.

4G: Redes móviles de cuarta generación.

5G: Redes de quinta generación.

AES128: Encriptación y cifrado.

AGILENT CSA N1996A: Analizador de espectros de la marca agilent.

AMQP: Protocolo que se encarga de una transmisión sólida de datos permitiendo almacenar mensajes en una cola.

API: Conjunto de funciones y procedimientos que cumplen una o muchas funciones con el fin de ser utilizadas por otro software.

API REST: Conjunto de restricciones con las que podemos crear un estilo de arquitectura de software.

ARCOTEL: Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones del Ecuador.

ARDUINO: Hardware libre de bajo costo con micro controlador de código abierto.

BIG DATA: información a gran escala.

BLE: Tecnología inalámbrica emergente de baja potencia desarrollada y utilizada por diversas aplicaciones, incluidas las definidas por Internet of Things.

CoAP: Constrained Application Protocol.

ESP32: Sistema de bajo costo y bajo consumo de energía en una serie de chips (SoC) con capacidades de WIFI y Bluetooth de modo dual.

FTTX: Fiber to the X.

GATEWAY: Puerta de enlace de datos.

GPRS: Servicio General de Paquetes vía Radio.

GPS: Sistema de posicionamiento global.

GSM: Sistema global de comunicaciones móviles.

HFC: Redes híbridas fibra óptica coaxial.

HTTP: Protocolo de transferencia de hipertexto.

ICM: Aplicaciones industriales, médicas y científicas.

IDE: Interfaz de programación.

IEEE: Instituto de ingenieros eléctricos electrónicos.

IEEE 802.15.4: Tecnología inalámbrica de baja potencia.

INDUSTRIA 4.0: La nueva revolución industrial.

IoT: Internet de las cosas.

IP: Protocolo de internet.

IPv6: Protocolo IP versión 6.

ISO: Organización internacional de normalización.

ISO/IEC 30141: Estándar que proporciona un vocabulario común en todo el mundo para diseñar y desarrollar aplicaciones de IoT.

LAN: Red de amplitud corta.

LM35: Sensor de temperatura.

LORAWAN: Redes WAN Lora.

LPWAN: Low Power Wide Area Network.

LTE: Long Terminal evolution.

M2M: Máquina a máquina.

MAC: Capa de MAC o de enlace de datos.

MQTT: Protocolo de conexión que explica cómo los bytes de datos son organizados y transmitidos por la red TCP/IP.

NARROWBAND IOT: Sistema de red de área amplia de baja potencia (LPWAN) que se desarrolló para permitir que los dispositivos se conecten entre sí a través de una red de señales de teléfonos móviles diseñada por 3GPP.

NIST: Instituto Nacional de Estándares y Tecnología de USA.

OMD: Oficina Presupuestaria Federal de USA.

PAN: Redes de área personal.

PHY: Capa física.

Plug and Play: Tecnología de conectividad de fácil aplicación sin necesidad de configuración.

RASPBERRY PI: Hardware libre de bajo costo.

RFID: Identificación por radiofrecuencia.

SIGFOX: Operador de red global y creador de la red 0G fundado en 2009 que implementa redes inalámbricas para conectar dispositivos de bajo consumo.

SMA: Servicio móvil avanzado.

SMARTPHONE: Dispositivo móvil inteligente.

TCP/IP: Stack de protocolos del internet.

THREAD: Protocolo de red de malla inalámbrica de baja potencia, basado en el protocolo de internet (IP) universalmente compatible, y construido con estándares abiertos y probados.

THROUGHPUT: La tasa de transferencia efectiva es el volumen de trabajo o de información neto que fluye a través de un sistema.

UIT: Unión Internacional de Telecomunicaciones.

WAN: redes de amplitud extensa.

WIFI: Redes inalámbricas.

XBEE: Módulos de conectividad inalámbrica compatibles con factor de forma de Digi International.

XCTU: Software de gestión y control de Xbee.

XMPP: Protocolo extensible de mensajería y comunicación de presencia.

Zigbee: Tecnología inalámbrica de bajo consumo de energía.

ZWAVE: Tecnología de comunicaciones interoperable, inalámbrica, basada en RF diseñada específicamente para aplicaciones de control, monitoreo y lectura de estado en entornos residenciales y comerciales ligeros.

BIBLIOGRAFÍA

- Aaronia. (2020). *HyperLOG 30180*. Obtenido de <https://aaronia-shop.com/productos/breitbandantennen-hyperlog30180>
- ARCOTEL. (2020). *IoT Agencia de Regulación de las Telecomunicaciones Ecuador*. Obtenido de <https://www.arcotel.gob.ec>
- Arduino. (2020). *Arduino*. Obtenido de Arduino - Home: <https://www.arduino.cc/>
- Çelik, E. (2015). *Investigation of the underground structure elements of GSM towers with GPR and GSM signal effects in GPR data*. Obtenido de 2015 8th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar (IWAGPR): <https://doi.org/10.1109/IWAGPR.2015.7292675>
- Chaudhary, S., Johari, R., Bhatia, R., Gupta, K., & Bhatnagar, A. (2019). *CRAIoT: Concept, Review and Application(s) of IoT*. Obtenido de 2019 4th International Conference on Internet of Things: Smart Innovation and Usages (IoT-SIU): <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8777467>
- Cobos, A. (2016). *Diseño e implementación de una arquitectura IoT basada en tecnologías Open Source*. Obtenido de Universidad de Sevilla: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/70884/fichero/TFM-Antonio+Cobos+Dominguez.pdf>
- Cunha, A., Koubaa, A., Severino, R., & Alves, M. (2007). *Open-ZB: an open-source implementation of the IEEE 802.15.4/ZigBee protocol stack on TinyOS*. Obtenido de 2007 IEEE International Conference on Mobile Adhoc and Sensor Systems: <https://doi.org/10.1109/MOBHOC.2007.4428602>
- Dian, F. J., Yousefi, A., & Lim, S. (2018). *A practical study on Bluetooth Low Energy (BLE) throughput*. Obtenido de 2018 IEEE 9th Annual Information Technology, Electronics and Mobile Communication Conference (IEMCON): <https://doi.org/10.1109/IEMCON.2018.8614763>
- Digi. (2018). *Channels, Zigbee*. Obtenido de Digi Resources: https://www.digi.com/resources/documentation/digidocs/90001537/references/r_channels_zigbee.htm

- ESP32. (2020). *The Internet of Things with ESP32*. Obtenido de <http://esp32.net/>
- Fernández, M., & Uquillas, J. (2020). *Análisis de desempeño del estándar Lorawan para soluciones de Smart Campus, implementando un sistema de monitoreo IOT en la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE*. Obtenido de Repositorio Institucional de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE: <http://repositorio.espe.edu.ec/jspui/handle/21000/21742>
- Garg, H., & Dave, M. (2019). *Securing IoT Devices and Securely Connecting the Dots Using REST API and Middleware*. Obtenido de 2019 4th International Conference on Internet of Things: Smart Innovation and Usages (IoT-SIU): <https://doi.org/10.1109/IoT-SIU.2019.8777334>
- Gauniyal, R., & Jain, S. (2019). *IoT Security in Wireless Devices*. Obtenido de 2019 3rd International conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA): <https://doi.org/10.1109/ICECA.2019.8822124>
- GeekFactory. (2020). *Kit de sensores 37 en 1 para arduino y microcontroladores*. Obtenido de Geek Factory: <https://www.geekfactory.mx/tienda/sensores/kit-de-sensores-para-arduino/>
- González, A. (2017). *IoT: Dispositivos, tecnologías de transporte y aplicaciones*. Obtenido de Universitat Oberta de Catalunya: http://openaccess.uoc.edu/webapps/o2/bitstream/10609/64286/3/a_gonzalezgarcia0TFM0617memoria.pdf
- González, J., & Romero, Y. (2018). *La innovación tecnológica en las empresas y su impacto positivo dentro del Ecuador*. Obtenido de Eumed.net: <https://www.eumed.net/rev/oel/2018/03/innovacion-empresas-ecuador.html>
- GSMA. (2020). www.gsma.com/. Obtenido de <https://www.gsma.com/>
- IEEE. (2016). *802.15.4-2015 - IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks*. Obtenido de IEEE Std 802.15.4-2011 (Revision of IEEE Std 802.15.4-2006): <https://ieeexplore.ieee.org/document/7460875>
- Interxion. (2018). *IoT para la industria: las fábricas aceleran su transformación digital*. Obtenido de www.interxion.com/es:

<https://www.interxion.com/es/blogs/2018/08/iot-para-la-industria--las-fabricas-aceleran-su-transformacion-digita>

- Juanes, G. (2018). *Primera Norma internacional ISO para Internet de las cosas*. Obtenido de Cuadernos de seguridad: <https://cuadernosdeseguridad.com/2018/11/primera-norma-internacional-iso-para-internet-de-las-cosas/>
- Keysight. (2020). *N1996A Agilent CSA Spectrum Analyzer*. Obtenido de Keysight Technologies: <https://www.keysight.com/en/pd-1812204-pn-N1996A/agilent-csa-spectrum-analyzer?pm=PL&nid=-32400.927043&cc=EC&lc=eng>
- LoraWAN. (2020). *About LoRaWAN® | LoRa Alliance®*. Obtenido de <https://lora-alliance.org/about-lorawan>
- Lu, X., Lei, W., & Zhang, W. (2012). *The Design and Implementation of XMPP-Based SMS Gateway*. Obtenido de 2012 Fourth International Conference on Computational Intelligence, Communication Systems and Networks: <https://doi.org/10.1109/CICSyN.2012.35>
- Lv, W., Meng, F., Zhang, C., Lv, Y., Cao, N., & Jiang, J. (2017). *Research on Unified Architecture of IoT System*. Obtenido de 2017 IEEE International Conference on Computational Science and Engineering (CSE) and IEEE International Conference on Embedded and Ubiquitous Computing (EUC): <https://ieeexplore.ieee.org/document/8006026>
- Manatarinat, W., Poomrittigul, S., & Tantatsanawong, P. (2019). *Narrowband-Internet of Things (NB-IoT) System for Elderly Healthcare Services*. Obtenido de 2019 5th International Conference on Engineering, Applied Sciences and Technology (ICEAST): <https://doi.org/10.1109/ICEAST.2019.8802604>
- McRoberts, M. (2010). *Beginning Arduino*. Obtenido de SpringerLink: https://doi.org/10.1007/978-1-4302-3241-4_1
- Registro Oficial. (2018). *Resoluciones ARCOTEL 2018-0661 y ARCOTEL 2018-0716*. Obtenido de Registro Oficial Año II No. 545: https://www.arcotel.gob.ec/wp-content/uploads/2019/05/R.O.-545_-Res_ARCOTEL-2018-0661-UL-UDBL.pdf

- Sharma, C., & Gondhi, N. K. (2018). *Communication Protocol Stack for Constrained IoT Systems*. Obtenido de 2018 3rd International Conference On Internet of Things: Smart Innovation and Usages (IoT-SIU): <https://doi.org/10.1109/IoT-SIU.2018.8519904>
- SigFox. (2020). *The Global Communications Service Provider for the Internet of Things (IoT)*. Obtenido de <https://www.sigfox.com/en>
- Thakare, S., & Bhagat, P. (2018). *Arduino-Based Smart Irrigation Using Sensors and ESP8266 WiFi Module*. Obtenido de 2018 Second International Conference on Intelligent Computing and Control Systems (ICICCS): <https://doi.org/10.1109/ICCONS.2018.8663041>
- Thread. (2020). *Thread Certified Products*. Obtenido de <https://www.threadgroup.org/What-is-Thread>
- Xbee. (2020). *¿Qué es XBee?* . Obtenido de XBee.cl - Comunicación Inalámbrica para Tus Proyectos: <https://xbee.cl/que-es-xbee/>
- Yamanoor, N. S., & Yamanoor, S. (2017). *High quality, low cost education with the Raspberry Pi*. Obtenido de 2017 IEEE Global Humanitarian Technology Conference (GHTC): <https://doi.org/10.1109/GHTC.2017.8239274>
- Zigbee. (2020). *Casa - Zigbee Alianza*. Obtenido de <https://zigbeealliance.org/es/>
- Z-Wave. (2020). *About Z-Wave Technology - Z-Wave Alliance*. Obtenido de https://z-wavealliance.org/about_z-wave_technology/

DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, **Milton Iván Alfonso Guzmán**, con C.C: # **0914836242** autor/a del trabajo de titulación: **Análisis Técnico y Regulatorio de Nuevas Redes de Transmisión para Dispositivos IoT (Internet of Things) en la ciudad de Guayaquil, Ecuador**, previo a la obtención del título de **Magíster en Telecomunicaciones** en la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

1.- Declaro tener pleno conocimiento de la obligación que tienen las instituciones de educación superior, de conformidad con el Artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, de entregar a la SENESCYT en formato digital una copia del referido trabajo de titulación para que sea integrado al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.

2.- Autorizo a la SENESCYT a tener una copia del referido trabajo de titulación, con el propósito de generar un repositorio que democratice la información, respetando las políticas de propiedad intelectual vigentes.

Guayaquil, 24 de noviembre de 2020



Milton Iván Alfonso Guzmán

C.C: 0914836242



REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA

FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN

TÍTULO Y SUBTÍTULO:	Análisis Técnico y Regulatorio de Nuevas Redes de Transmisión para Dispositivos IoT (Internet of Things) en la ciudad de Guayaquil, Ecuador	
AUTOR(ES)	Milton Iván Alfonzo Guzmán	
REVISOR(ES)/TUTOR	MSc. Edgar Quezada Calle; MSc. Luis Córdova Rivadeneira / MSc. Manuel Romero Paz	
INSTITUCIÓN:	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil	
FACULTAD:	Sistema de Posgrado	
PROGRAMA:	Maestría en Telecomunicaciones	
TÍTULO OBTENIDO:	Magister en Telecomunicaciones	
FECHA DE PUBLICACIÓN:	Guayaquil, 24 de noviembre de 2020	No. DE PÁGINAS: 116
ÁREAS TEMÁTICAS:	Características de IoT, Tecnologías inalámbricas para IoT, Dispositivos y protocolos IoT, Protocolos IoT, Seguridad en IoT	
PALABRAS CLAVES	LoraWAN, SigFox, IoT, big data, industria 4.0, Zigbee	
RESUMEN/ABSTRACT:	<p>Las tecnologías IoT se están desplegando en varios países del mundo junto con las redes de banda ancha como FTTx, LTE Advanced, 5G o SigFox para el control, adquisición de datos, monitorización y toma de decisiones mediante sensores y actuadores que alimentarán un servidor local o en la nube con información o big data que servirá para utilizarla en diferentes campos como la industria 4.0, agricultura, Smart cities, telemedicina, tele-educación, etc. En el Ecuador son pocas las empresas que ofrecen servicios IoT a nivel empresarial o gubernamental, al ser un campo nuevo que recién está implementándose y por ende estandarizándose no hay un despliegue considerable de tecnologías IoT en el país. A nivel educativo y de investigación se han desarrollado diferentes prototipos para la industria como la pesquera, medicina y agricultura, sin embargo, es de considerar que el ente regulador no dispone de marcos regulatorios para la aplicación de diferentes tecnologías WAN de dispositivos IoT como LoraWAN o SigFox, así como también para tecnologías LAN de IoT como Zigbee, BLE, IEEE 802.1.4. Este trabajo de investigación propone abarcar el estudio de algunas tecnologías inalámbricas LAN de IoT utilizando sistemas embebidos como Arduino y Xbee, que mediante analizadores de espectros se puede observar el ancho de banda, saturación de portadoras y uso de espectro de estas tecnologías, con la finalidad de tener las directrices y recomendaciones para una futura regulación en el Ecuador de tecnologías IoT como LoraWAN, Zigbee, o WIFI IoT.</p>	
ADJUNTO PDF:	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO
CONTACTO AUTOR/ES:	Teléfono: +593-984933353	E-mail: ma.belen.garcia1@gmail.com
CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN (COORDINADOR DEL PROCESO UTE):	Nombre: Romero Paz Manuel de Jesús	
	Teléfono: +593-994606932	
	E-mail: manuel.romero@cu.ucsg.edu.ec	
SECCIÓN PARA USO DE BIBLIOTECA		
Nº. DE REGISTRO (en base a datos):		
Nº. DE CLASIFICACIÓN:		
DIRECCIÓN URL (tesis en la web):		