

**ANÁLISIS DE TECNOLOGÍAS DE COMUNICACIONES INALÁMBRICAS PARA
DETERMINAR LA MEJOR OPCIÓN A IMPLEMENTAR PARA LOS SERVICIOS
QUE PRESTA LA DITG-EAAB**

HÉCTOR ALEJANDRO TORO BERNAL

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS DE AQUINO
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIONES
BOGOTÁ D.C.**

2020

**ANÁLISIS DE TECNOLOGÍAS DE COMUNICACIONES INALÁMBRICAS PARA
DETERMINAR LA MEJOR OPCIÓN A IMPLEMENTAR PARA LOS SERVICIOS
QUE PRESTA LA DITG-EAAB**

Presentado por:

**HÉCTOR ALEJANDRO TORO BERNAL
CÓDIGO: 2164488**

**Trabajo opción de grado Pasantías en la empresa Acueducto y Alcantarillado
de Bogotá en la dirección de Información Técnica y Geográfica (DITG-EAAB)**

**Director: Víctor Manuel Castro
Ingeniero Electrónico**

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS DE AQUINO
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIONES
BOGOTÁ D.C.
2020**

RECTOR GENERAL
Padre José Gabriel Mesa Angulo, O.P.

VICERRECTOR ADMINISTRATIVO Y FINANCIERO GENERAL
Padre, Wilson Mendoza Rivera, O.P.

VICERRECTOR ACADÉMICO GENERAL
P. Eduardo Gonzáles Gil, O.P

SECRETARIA GENERAL
Ingrid Lorena Campos Vargas

SECRETARIA DE DIVISIÓN
E. C. Luz Patricia Rocha Caicedo

DECANO FACULTAD DE INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIONES
Ingeniero Germán Macías Muñoz

Nota de Aceptación.

Firma Ingeniero. Víctor Manuel Castro
Tutor Asignado

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Fecha

Contenido

ÍNDICE DE TABLAS	7
ÍNDICE DE FIGURAS	8
INTRODUCCIÓN	10
1. CAPÍTULO I	12
1.1 PLANTAMIENTO DEL PROBLEMA	12
1.2 JUSTIFICACIÓN	13
1.3 OBJETIVOS	14
1.3.1 Objetivo General	14
1.3.2 Objetivos Específicos	14
2. CAPÍTULO II	15
2.1.0 MARCO TEÓRICO	15
2.1.1 Espectro Electromagnético	15
2.1.2 Espectro Radioeléctrico	15
2.1.3 ITU	15
2.1.4 ANE	16
2.1.5 MINTIC	16
2.1.6 Bandas Licenciadas y no Licenciadas	16
2.2 Modelos y Protocolos de comunicación	17
2.2.1 Protocolo TCP/IP	18
2.3 IOT	19
2.3.1 LoRa	19
2.3.1.1 LoRaWAN	20
2.3.1.2 Clases en LoRaWAN	21
2.3.1.3 Seguridad en LoRaWAN	22
2.3.1.4 Data Rate de las redes LoRaWAN en la banda 902-928 MHz	22
2.3.1.5 Distancias del Protocolo LoRaWAN	23
2.3.2 Sigfox	23
2.3.2.1 UNB (Banda Ultra-Estrecha)	24
2.3.2.2 Diversidad Espacial para la recepción en la comunicación	24
2.3.2.3 Tamaño de mensajes en una comunicación Sigfox	25
2.3.2.4 Arquitectura de la red Sigfox	26
2.3.2.5 Alcance de la red Sigfox	27

2.4 Telefonía Móvil	27
2.4.1 GPRS (General Packet Radio Service)	29
2.4.2 UMTS (Sistema Universal de Telecomunicaciones móviles)	31
2.4.3 Cobertura de la señal según el tipo de celda	32
2.4.4 GPRS vs UMTS	32
2.5 SDR (Radio Definido por Software)	33
2.5.1 Red de Telefonía móvil GSM por medio de SDR	34
2.6 Red NTRIP	35
2.7 Rede actual de estaciones permanentes GNSS de la DITG	37
3. CAPÍTULO III	39
3.1 Requerimientos de red	39
3.1.1 Diseño de red en las sedes del EAAB	40
3.2 Análisis para implementar una red LoRaWAN.....	49
3.2.1 Equipos LoRa/LoRaWAN	49
3.2.2 Personal requerido para implementar la red LoRaWAN	52
3.2.3 Costos de equipos para la red LoRaWAN	52
3.3 Análisis para adquirir una red Sigfox privada	53
3.4 Análisis para implementar una red GSM con SDR	55
4. CAPÍTULO IV	59
4.1 Comparación por distancias o cobertura de transmisión de las tecnologías analizadas	59
4.2 Comparación por ancho de banda	60
4.3 Comparación por velocidad de transmisión de las tres tecnologías	61
4.4 Comparación de costos de las tres tecnologías a nivel de red	62
5. CAPÍTULO V	65
5.1 Conclusiones	65

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Data Rate 902-928 MHz_	22
Tabla 2. Potencia de transmisión en 902-928 MHz_	23
Tabla 3. Distancias posibles en una red LoRaWAN	23
Tabla 4. Distancia de cobertura según el tipo de celda	32
Tabla 5. GPRS vs UMTS	33
Tabla 6. Costos de equipo Gateway	49
Tabla 7. Costos de Antena	50
Tabla 8. Costos de módulos	51
Tabla 9. Personal requerido y sueldos	52
Tabla 10. Costos de Puerta de enlace	53
Tabla 11. Costos equipo GPS para Sigfox	54
Tabla 12. Costo suscripción por un año, 5 años y 10 años para 349 equipos.	55
Tabla 13. Valor equipo USRP.....	56
Tabla 14. Valor de algunos portátiles	56
Tabla 15. Valor de algunas Antenas para dispositivos USRP	57
Tabla 16. Costos de equipos USRP para dar cobertura a nivel Bogotá	57
Tabla 17. Costos de computadores para las estaciones GSM/GPRS por SDR	57
Tabla 18. Costos de las Antenas para los equipos USRP	58
Tabla 19. Comparación de distancias de cobertura de las tres tecnologías con obstáculos	59
Tabla 20. Comparación de distancias de las tres tecnologías sin obstáculos	60
Tabla 21. Ancho de banda de las tres tecnologías	61
Tabla 22. Data Rate máximo de las tres tecnologías	61
Tabla 23. Comparación de precios para implementar una red alternativa	62
Tabla 24. Cada cuanto tiempo puede enviar mensajes cada tecnología	64
Tabla 25. Comparación de las tecnologías en cantidad de envíos de mensajes en un intervalo de tiempo	64

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Cuadro Nacional de Atribución de Bandas de Frecuencia (CNABF)]	17
Figura 2. Modelo OSI	18
Figura 3. Modelo TCP/IP	18
Figura 4. Interconexión general de las redes IoT	19
Figura 5. Red LoRaWAN	21
Figura 6. Uso del espectro en Sigfox	24
Figura 7. Recepción de las redes Sigfox	25
Figura 8. Payload para algunas aplicaciones de Sigfox	25
Figura 9. Arquitectura de la red Sigfox.....	26
Figura 10. Arquitectura plana de Sigfox.....	27
Figura 11. Sectorización móvil a través de celdas	28
Figura 12. Sistemas de comunicaciones móviles	29
Figura 13. Arquitectura GPRS	29
Figura 14. Arquitectura móvil UMTS	31
Figura 15. Estructura de Radio Definido por Software	34
Figura 16. Arquitectura GSM con SDR	35
Figura 17. Red NTRIP	36
Figura 18. Correcciones Diferenciales	37
Figura 19. Red actual de las estaciones GNSS.....	38
Figura 20. Diseño de red inalámbrica entre terminal y Gateway.....	40
Figura 21. Diseño de red en la sede central.....	42
Figura 22. Diseño de red en la sede Chingaza.....	43
Figura 23. Diseño de red en la sede Dorado.....	44
Figura 24. Diseño de red en sede Suba.....	45
Figura 25. Diseño de red en sede Tibitoc	46
Figura 26. Diseño de red en sede Vitelma.....	47
Figura 27. Diseño de red en sede Wiesner.....	48
Figura 28. Mapa de cobertura de Sigfox Colombia.....	53
Figura 29. Gráfico Anillo de comparación de cobertura de las tecnologías con obstáculos	59
Figura 30. Gráfico Anillo de comparación de cobertura de las tecnologías sin obstáculos	60
Figura 31. Ancho de Banda de las tres tecnologías	61
Figura 32. Gráfico de barras de comparación de Data Rate máximo de las tres tecnologías	62
Figura 33. Precio de las tres tecnologías para las siete sedes.....	63
Figura 34. Comparación de cantidad de enviado de mensajes entre las tres tecnologías en un rango de tiempo establecido.....	64

INTRODUCCIÓN

La empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB-ESP) presta servicios domiciliarios de agua potable y alcantarillado a la población bogotana y más de 11 municipios cercanos a la capital desde hace más de 130 años. Es una Empresa Comercial e Industrial del Estado que cuenta con personal administrativo, jurídico y patrimonio independiente, llevando a EAAB a brindar oportunidades de negocios a nivel Nacional e Internacional.

La organización administrativa de la empresa es bastante amplia ya que debe garantizar el debido cumplimiento de los servicios y de la administración de la empresa en bien de su personal, usuarios y clientes, desde un núcleo central que es la junta directiva hasta diferentes gerencias administrativas como la Jurídica, Planeamiento y Control, Financiera, Gestión Humana, Servicio al Cliente, de Tecnología, Ambiental, etc.

La Dirección de Información Técnica y Geográfica (DITG) es una dirección de la Gerencia de Tecnología de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, que se divide en tres áreas las cuales son: SIGUE, CITE y, Topografía y Geodesia, que tienen como finalidad almacenar y actualizar toda la información técnica, y geográfica de la empresa, a la vez de los levantamientos topográficos de los proyectos de obras civiles de empresas o de la EAAB, para el debido cumplimiento de las normativas.

Para los estudios topográficos de las obras civiles, la empresa cuenta con cuatro estaciones permanentes GNSS (Sistema Global de Navegación por Satélite), siendo los puntos de referencia para los proyectos de obras civiles, que deben tener puntos de coordenadas de poco margen de error (mm) según las normas establecidas por la empresa. Actualmente se quiere adquirir otras estaciones permanentes con servicio NTRIP para el envío de coordenadas en tiempo real, que permitirá optimizar tiempos en los levantamientos topográficos y tener una mayor precisión.

Las estaciones NTRIP “red de transporte de RTCM (Comisión para Servicios Marítimos de Técnicas Radiales) vía Internet” son considerablemente costosas, es

por esta razón que se analizó en este proyecto tecnologías de comunicaciones inalámbricas que nos permitan implementar una red alternativa para envíos de coordenadas GPS en tiempo real, que todos estos datos recolectados puedan llegar a un punto central y que tengan salida al Internet, para que los clientes de la red puedan realizar los levantamientos topográficos.

Se analizaron dos tecnologías para el IoT (Internet de las Cosas), de las cuales se escogieron LoRaWAN y Sigfox porque ambas tecnologías están diseñadas para comunicaciones de largo alcance y poco consumo de batería, con el fin de enviar datos de poco consumo de ancho de banda y velocidad de transmisión.

También se analizó una tecnología más conocida como la telefonía móvil GSM, pero ésta como solución de red es muy costosa, y aprovechando el auge del radio definido por Software que permite implementar una estación móvil de bajo presupuesto, se decidió también estudiar y analizar esta tecnología con radio definido por Software.

1. CAPÍTULO I

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La Dirección de Información Técnica y Geográfica “DITG” de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, presta diferentes servicios para las redes de agua y alcantarillado como: levantamientos topográficos, aprobación de proyectos (obras civiles) tanto de la EAAB como de otras empresas y mantener la red actualizada.

La DITG se divide en 3 áreas que son: SIGUE, CITE, Topografía y Geodesia. El área de Topografía y Geodesia se encarga de hacer los levantamientos topográficos y de comprobarlos en campo, ya realizados por los topógrafos de los proyectos de obras civiles que llegan a la DITG, con la finalidad de comprobar que cumplan con las normativas de la empresa; posteriormente pasan el reporte de los levantamientos realizados a las otras áreas de la DITG que determinarán si cumplen con dichas normativas.

La dirección tiene a su disposición equipos GPS (Sistema de Posicionamiento Global) avanzados que le permite tener un margen de error mínimo, ya que estos levantamientos y georreferenciación deben cumplir con la normativa de la empresa. Las comisiones en algunos casos estarán en zonas de difícil acceso, es decir, en donde los proveedores de servicios de telecomunicaciones como Telefonía móvil, Internet, etc., no tienen presencia ya sea por la lejanía del sitio, el perfil del terreno o porque la población es escasa lo que da poca rentabilidad en estas zonas.

Actualmente se quiere implementar una red NTRIP (Red de Transporte RTCM vía protocolo de Internet) para mejorar el rendimiento de tiempo de levantamiento, transporte de los datos de GNSS (Sistema Global de Navegación por Satélite). La gran ventaja de la red NTRIP es que nos permite tener los datos en tiempo real RTK (REAL TIME KINEMATIC) pero hasta el momento esta red solo se podría implementar en zonas con acceso a Internet y datos móviles.

La adquisición de los equipos NTRIP y la compra de datos de internet móvil hace que esta implementación sea costosa, obligando a la empresa a trabajar en zonas con cobertura móvil de los operadores.

Es por esta razón que se plantea, ¿Qué tecnologías alternas podrían implementarse en una red de telecomunicaciones de bajo presupuesto que preste servicios en las sedes de la empresa y zonas cercanas, del envío de coordenadas GPS sin depender de operadores móviles o Internet?

1.2 JUSTIFICACIÓN

La dirección de Información Técnica y Geográfica de la Empresa de Acueducto tiene que hacer levantamientos topográficos a nivel Bogotá y zonas cercanas a la ciudad. Actualmente se plantea montar una red NTRIP para obtener coordenadas geográficas de poco margen de error por debajo de los cm o incluso los mm; ésta red permite recoger dichos datos en tiempo real, enviándolos vía Internet por medio de la red GSM/GPRS, pero además de comprar los equipos de gran costo para la implementación de la red, deberán también adquirir servicios como Internet y telefonía móvil aumentando aún más el costo de la red NTRIP.

El auge máximo del uso de Internet ya sea fijo o por medio de operadores móviles ya no es un privilegio sino una necesidad tanto para las personas como para las empresas; y es por esta razón que hoy en día cualquier dispositivo tecnológico tiene que interactuar con la red global, llevando en muchos casos a las empresas a limitar su uso ya sea por el costo de los equipos, los planes de Internet fijo o móvil, el consumo de energía, el mantenimiento de los equipos y muchos factores más.

La infraestructura móvil en Bogotá aun tiene brechas de cobertura dentro de la ciudad y sus alrededores, ya sea por el costo de implementarla o por la poca demanda en estas zonas.

Es por esto que se quiere realizar un análisis en este proyecto de las tecnologías inalámbricas y comparar cuál es óptima para la implementación de una red

alternativa en las sedes de la empresa y sus alrededores, de costo bajo, que no dependa de Internet fijo o móvil, donde permita conectar celulares o dispositivos GPS para el envío de coordenadas geográficas en tiempo real.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo General

Analizar tecnologías para la implementación de una red de comunicaciones inalámbrica que se adapte a los servicios requeridos por la DITG.

1.3.2 Objetivos Específicos

1. Estudiar y analizar tecnologías de comunicación inalámbricas existentes de alto alcance e implementación económica.
2. Realizar un presupuesto de la implementación de la red de las tecnologías analizadas.
3. Analizar cuál tecnología es la más viable costo-beneficio.
4. Analizar cuál tecnología se adapta más a los servicios requeridos.
5. Determinar qué tecnología cumple con una distancia optima de comunicación, envío de coordenadas en tiempo real e interactuar con dispositivos móviles (celulares).
6. Determinar la mejor opción para una implementación de red alternativa en la empresa EAAB teniendo en cuenta ancho de banda, velocidad de transmisión, costo de infraestructura y escalabilidad de la red para los demás servicios que presta la Empresa.

2. CAPÍTULO II

2.1.0 MARCO TEÓRICO

2.1.1 Espectro Electromagnético

Es el rango de frecuencias posibles en donde se puede producir radiación electromagnética, además, es un recurso natural limitado que debe ser usado con responsabilidad para el cuidado de éste; por esto por lo que existen entidades regulatorias que desarrollan estándares para el mejor uso del espectro electromagnético.

2.1.2 Espectro Radioeléctrico

El espectro radioeléctrico es una porción del espectro electromagnético usado para la transmisión de información por medios no guiados como el aire o el vacío, que son usados por los servicios de telecomunicaciones como radio, televisión, internet, telefonía móvil, etc. El tratamiento de las ondas electromagnéticas se le denomina modulación y siendo tratada de forma adecuada como la variación de sus parámetros (fase, amplitud o frecuencia) permite la transmisión de información por medios no guiados haciendo uso del espectro radioeléctrico.

La administración y la regulación del espectro radioeléctrico está a cargo de los gobiernos de cada país que miran las recomendaciones de la ITU para una mejor administración.

2.1.3 ITU

En el caso de las telecomunicaciones, la ITU (Unión Internacional de Telecomunicaciones) es una organización encargada de la repartición del espectro de frecuencias radioeléctricas para su mejor uso y aprovechamiento, además de realizar estándares para una implementación más rápida y fácil en infraestructuras de comunicaciones.

2.1.4 ANE

En Colombia el ente regulador y administrativo encargado por parte del gobierno en la distribución, planeación y vigilancia del uso del espectro radioeléctrico en todo el territorio nacional es la ANE (Agencia Nacional del Espectro).

2.1.5 MINTIC

El MINTIC (Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones) es el ente encargado de otorgar las frecuencias del espectro radioeléctrico para los servicios de telecomunicaciones junto a la ANTV (Autoridad Nacional de Televisión).

2.1.6 Bandas Licenciadas y no Licenciadas

Las bandas licenciadas son todas aquellas bandas que para su uso deben ser aceptadas y otorgadas por el MINTIC, el cual cobrará un valor a su criterio por un periodo de 10 años con opción de renovación de otros 10 años.

Las bandas no licenciadas o bandas libres son todas aquellas bandas distribuidas por la ANE para uso libre de los ciudadanos para servicios Wifi, Bluetooth, bandas ISM, etc.

En este proyecto se contemplarán las bandas libres distribuidas por la ANE, donde se tendrá en cuenta el Cuadro Nacional de Atribución de Bandas de Frecuencias para escoger la mejor frecuencia según la tecnología analizada en este proyecto.

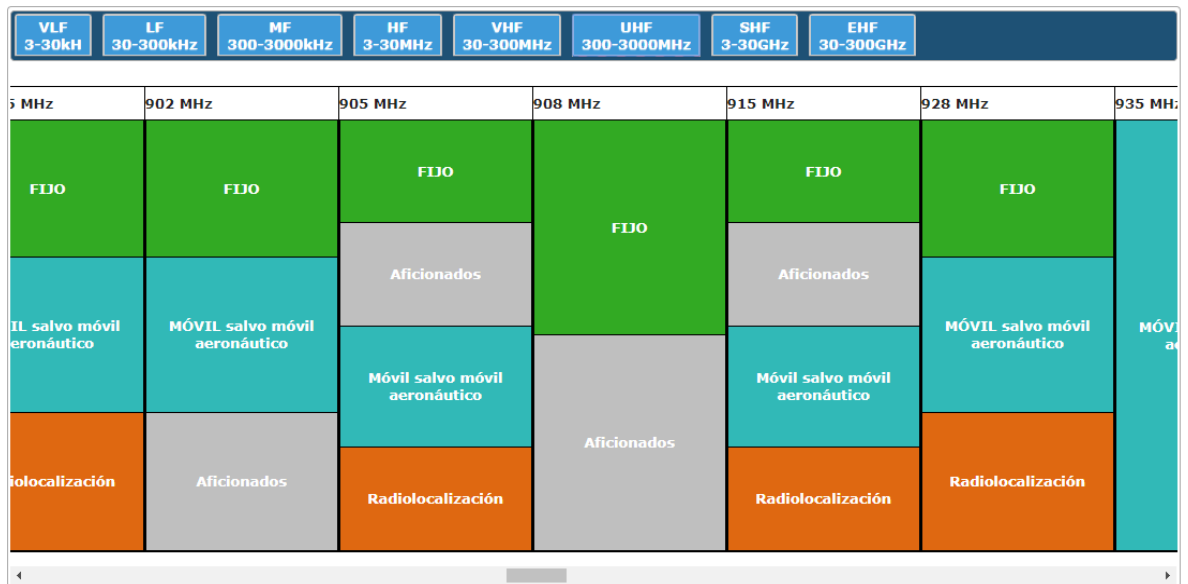


Figura 1. Cuadro Nacional de Atribución de Bandas de Frecuencia (CNABF). Fuente: CNABF Gráfico http://cnabf.ane.gov.co/cnabf/index.php?option=com_k2&view=item&layout=item&id=6&Itemid=140

2.2 Modelo y Protocolos de comunicaciones

El éxito de una red de comunicaciones se da gracias a los estándares, modelos y protocolos de comunicación que garantizan el debido funcionamiento de la misma.

El modelo de referencia es OSI (Modelo de referencia de Interconexión de Sistemas Abiertos), creado en el año 1984 por ISO (Organización Internacional para la Estandarización). Este modelo permitió que los diseñadores de redes, fabricantes de equipos de telecomunicaciones, celulares, computadores o entidades encargadas de los estándares y protocolos de telecomunicaciones, puedan comunicarse y trabajar de forma conjunta.

El modelo OSI consiste en 7 capas que permiten dividir las funciones y los procesos por los que debe pasar la información desde la fuente (dispositivo) hasta el destinatario (dispositivo) y contempla desde el software, hardware y el medio de transmisión, además, cada capa del modelo depende una de la otra para garantizar las comunicaciones entre los dispositivos.



Figura 2. Modelo OSI. Fuente: El modelo OSI <http://www.exa.unicen.edu.ar/catedras/comdat1/material/ElmodeloOSI.pdf>

2.2.1 Protocolo TCP/IP

El protocolo TCP/IP (Protocolo de Control de Transferencia de Internet) es actualmente el más usado en comunicaciones en redes, ya que fue diseñado e implementado para la red global Internet y su fin único es conectar millones de redes a una sola red global, permitiendo identificar una red completa o un dispositivo a través de un ID que en este caso es la IP del dispositivo o de la red.

TCP/IP consiste en enrutar paquetes de información y está compuesta también de capas como el modelo de referencia OSI, pero en este caso el modelo TCP/IP consta de 4 capas y su funcionalidad es la misma que el modelo de referencia.

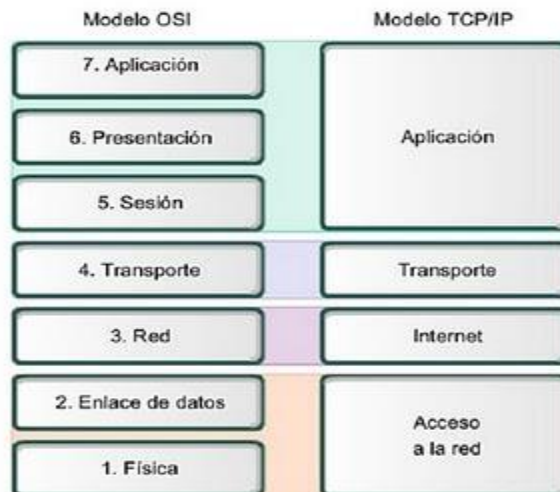


Figura 3. Modelo TCP. Fuente: Modelo OSI vs TCP/IP, http://espedatacomm.blogspot.com/2011/09/modelo-osi-vs-tcpip_26.html

2.3 IoT

El Internet de las Cosas es un concepto que nos permite la conectividad de las redes y cómputos con sensores u objetos de uso diario que no se consideran computadores o aparatos tecnológicos, para el envío de información masiva donde los humanos no intervienen en gran medida en estos dispositivos, uno de sus principios en la comunicación M2M (Machine to Machine).

Como podemos observar en la siguiente imagen tomada del estándar ITU-T Y.41115.

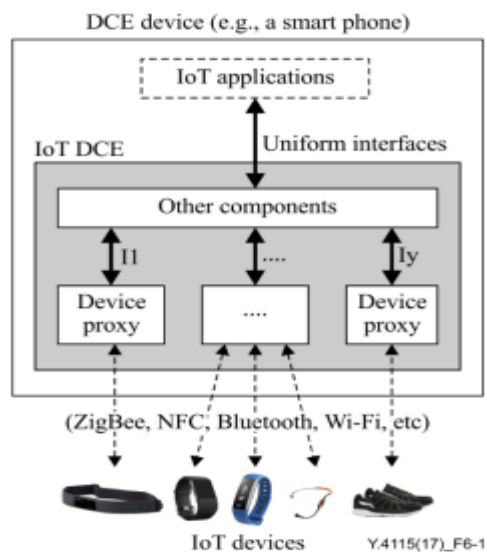


Figura 4. Interconexión general de las redes IoT. Fuente: https://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=s&id=T-REC-Y.4115-201704-!!!PDF-E&type=items

2.3.1 LoRa

Es una tecnología inalámbrica emergente de largo alcance y de poca potencia de transmisión, utilizada para la transmisión de datos de sensores para IoT de poco ancho de banda para aplicaciones como agricultura, ganadería, localización y muchas funcionalidades más, para ciudades inteligentes o zonas de difícil acceso.

LoRa es una modulación que usa métodos de espectro ensanchado y Chirp Spread Spectrum (CSS) donde modula en canales y velocidades diferentes, además usa

Corrección de Errores (FEC), su gran ventaja es que usa toda la anchura del canal proporcionado, evitando menor ruido en la transmisión.

Hace uso de las siguientes frecuencias:

- Europa en la banda ISM de 863-870 MHz.
- Canadá, USA, países de la región 2 y países que no usen esta frecuencia para servicios GSM900. La banda ISM de 902-928 MHz

La red LoRa solo puede funcionar en modo P2P (Peer to Peer), es decir, una comunicación entre pares, cada nodo de la red LoRa se puede comportar como cliente-servidor ya que no dependen de un servidor central, permitiendo así tener una red secundaria [1].

LoRa debe cumplir una reglamentación de envío de mensajes basándose en la regla de 1%, es decir, de 900 ms segundos, solo podemos enviar un mensaje por nodo en 100 ms y estar 800 ms en espera. Para cumplir la documentación se debe enviar un mensaje cada 3 minutos.

2.3.1.1 LoRaWAN

LPWAN (Low Power Wide Area Network) es el protocolo de red de uso libre que hace uso de la tecnología LoRa.

LoRa Alliance es la organización encargada de la estandarización de las redes LPWAN. podemos encontrar en su página la siguiente definición: es un protocolo de red de área amplia de baja potencia diseñado para conectar de forma inalámbrica “cosas” que funcionan con baterías a Internet en redes regionales, nacionales o globales [LoRa Alliance].

Es un protocolo de comunicaciones de direccionamiento físico (MAC) usando una topología en estrella con buena cobertura y capacidad. LPWAN es estandarizado por LoRa Alliance que se encarga de realizar el protocolo MAC y la infraestructura de la red para su debido funcionamiento garantizando así la capacidad, seguridad, disponibilidad, confidencialidad, entre otros factores más de la red.

Este protocolo está diseñado para garantizar la seguridad y la comunicación en la red, además permite una comunicación bidireccional y optimización de la batería de los sensores para garantizar su vida útil. Esta tecnología nos permite localizar los dispositivos de la red fácilmente y además nos permite conectar con el Internet a través de protocolo IP.

La red LoRaWAN consiste en una comunicación entre nodos a gateways y viceversa usando protocolo MAC y de los gateways se conectan a una nube de LoRaWAN a través de protocolo IP, es decir, envía la información a través del Internet para poder utilizar los aplicativos diseñados para la red a través de HTTPS.



Figura 5. Red LoRaWAN. Fuente: Waspote LoRaWAN, <http://www.libelium.com/downloads/documentation/waspote-lorawan-networking-guide.pdf>

2.3.1.2 Clases en LoRaWAN

Los dispositivos de LoRaWAN se dividen en tres categorías que se diferencian según su comunicación, si es unidireccional o bidireccional, la demanda de los servicios, etc.

1. **Clase A:** Todos los dispositivos deben poder realizar la clase A que consiste en una comunicación bidireccional, aunque limitada en el (downlink) ya que solo puede recibir datos si anteriormente había enviado datos (uplink), enviándolos a través de un ACK (Acuse de Recibo). Esta clase se usa para cuando la red no requiere enviar información constantemente, permitiendo que los dispositivos puedan estar en reposo cuando no haya una comunicación requerida.
2. **Clase B:** En esta clase los dispositivos pueden recibir datos sin necesidad de enviar datos, gracias a que hace uso de beacons sincronizados con los Gateway donde negocian tiempos de recepción de paquetes entre nodos y Gateway. Aunque esta clase gasta más energía de la batería que la clase A.
3. **Clase C:** En esta clase el canal de recepción siempre está activo en la red cuando el dispositivo no está transmitiendo, permitiendo recibir datos

constantemente proporcionando buenos tiempos de respuesta y envío de paquetes, aunque esta clase es la que mayor batería del dispositivo usa.

2.3.1.3 Seguridad en LoRaWAN

La seguridad de la información en cualquier sistema o red de información es importante y primordial cuando se maneja mucho tráfico de información y más aún cuando trata datos de una ciudad que deben ser protegidos; por eso el estándar de las redes LoRaWAN poseen capas de cifrado con sus claves y usan el algoritmo AES128 (Estándar de Encriptación Avanzado) permitiendo la protección de los datos en la comunicación.

- Clave de sesión de red: Es una clave de 128 bits garantizando su seguridad a nivel de la red.
- Clave de sesión de aplicación: Es una clave de 128 bits garantizando la seguridad de extremo a extremo en las aplicaciones.
- Clave de aplicación: Es una clave de 128 bits garantizando la seguridad de extremo a extremo en la aplicación, haciendo uso de OTAA (Over the Air Activation).

2.3.1.4 Data Rate de las redes LoRaWAN en la banda 902-928 MHz

En su regulación se permite un tiempo de permanencia de máximo 400 ms de subida. En esta frecuencia no debe ir un mensaje de tipo MAC, en la tabla veremos la velocidad de datos en transmisión y la potencia del dispositivo final.

DataRate	Configuration	Indicative physical bit rate [bit/sec]
0	LoRa: SF10 / 125 kHz	980
1	LoRa: SF9 / 125 kHz	1760
2	LoRa: SF8 / 125 kHz	3125
3	LoRa: SF7 / 125 kHz	5470
4	LoRa: SF8 / 500 kHz	12500
5:7	RFU	
8	LoRa: SF12 / 500 kHz	980
9	LoRa: SF11 / 500 kHz	1760
10	LoRa: SF10 / 500 kHz	3900
11	LoRa: SF9 / 500 kHz	7000
12	LoRa: SF8 / 500 kHz	12500
13	LoRa: SF7 / 500 kHz	21900
14	RFU	
15	Defined in LoRaWAN ¹	

Tabla 1. Data Rate 902-928 MHz. Fuente: [6]

TXPower	Configuration (conducted power)
0	30 dBm – 2*TXpower
1	28 dBm
2	26 dBm
3 : 13
14	2 dBm
15	Defined in LoRaWAN

Tabla 2. Potencia de transmisión en 902-928 MHz. Fuente: LoRaWAN Regional Parameters, https://loralliance.org/sites/default/files/2018-04/lorawanm_regional_parameters_v1.1rb_-_final.pdf

2.3.1.5 Distancias del Protocolo LoRaWAN

Se puede lograr una distancia máxima de hasta 20 km, pero depende de muchos factores como los obstáculos o la visibilidad de los nodos con los Gateways.

Distancias	Visibilidad
1-5 km	Con obstáculos
5-10 km	Con pocos obstáculos
10-20 km	Con línea de vista libre

Tabla 3. Distancias posibles en una red LoRaWAN. Fuente: Autor y Tecnología LoRa y LoRaWAN, <https://www.catsensors.com/es/lorawan/tecnologia-lora-y-lorawan>

2.3.2 Sigfox

Es una tecnología inalámbrica emergente para transmisión de datos de baja potencia y largo alcance, Sigfox surgió en el año 2009 gracias a una empresa francesa y presta servicios de una red privada para IoT. Actualmente tiene una infraestructura completa en países de Europa como Francia, España y Portugal, entre otros países europeos. En Colombia está empezando a surgir la implementación de la infraestructura de Sigfox.

Su finalidad es tener una red para IoT basada en conexiones Machine to Machine con el fin de optimizar la potencia de transmisión y a la vez llegar a una mayor distancia de cobertura, optimizando la batería de los dispositivos y llevando información de poca demanda de capacidad a la nube y posteriormente ser procesado para su uso en el Internet. Sigfox es un operador privado para Internet de las Cosas con una infraestructura propia ya establecida y funcional.

Consiste en una infraestructura móvil a través de antenas y estaciones independientes de las redes móviles actuales. Aunque también se asocia con operadores de telefonía móvil pero su finalidad no es aumentar el ancho de banda ni la capacidad de servicios como los operados, sino la de proveer conexión a cualquier dispositivo, objeto o máquina para conectarse a Internet.

2.3.2.1 UNB (Banda Ultra-Estrecha)

Sigfox usa una porción de frecuencia de 120KHz en donde envía mensajes en un ancho de banda de 100 Hz cada uno, además la velocidad de transmisión de esta tecnología va desde los 100 hasta 600 bits/s.

Dependiendo de la región de implementación usa las siguientes frecuencias de uso libre como la de 868-868.2 MHz en Europa y en el resto del mundo uso la frecuencia de 902-928 MHz. En el caso de Colombia la última frecuencia es de uso libre y se podría implementar una red Sigfox.

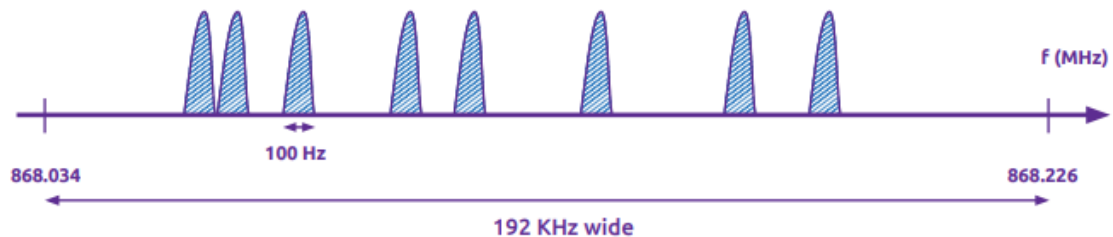


Figura 6. Uso del espectro en Sigfox. Fuente: Sigfox Technical Overview, <https://www.disk91.com/wp-content/uploads/2017/05/4967675830228422064.pdf>

2.3.2.2 Diversidad Espacial para la recepción en la comunicación

Independientemente de que sea una infraestructura aparte de la infraestructura móvil, su principio de infraestructura es igual o semejante a una red móvil. Los dispositivos van a utilizar una baja potencia de transmisión para optimizar la batería del dispositivo; esto lleva un gran desafío en el uplink (subida), es decir, en toda comunicación en una red de telefonía móvil la mayor problemática está en la transmisión del dispositivo hacia los nodos (antenas móviles), es por eso que se hace uso de la diversidad espacial, que consiste en que se establece una conexión con una antena, pero si ésta no recibe un mayor umbral de referencia para la comunicación, hace la conmutación a otra o más antenas para mejorar la calidad de umbral de la señal, siendo éste un principio de las redes móviles.

Las redes Sigfox están compuestas por múltiples antenas y estaciones base igual que la telefonía móvil. La siguiente imagen nos da una idea de cómo llega la recepción de la señal y cómo es la infraestructura de las redes Sigfox.

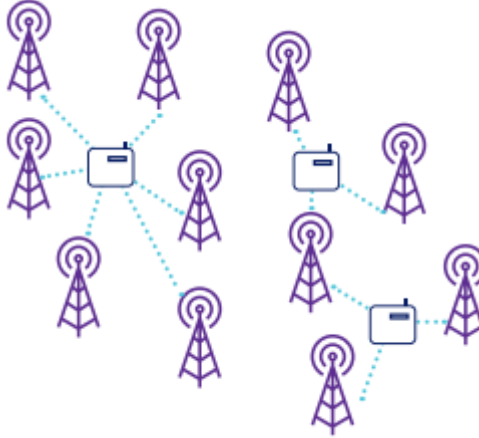


Figura 7. Recepción de las redes SigFox. Fuente: Sigfox Technical Overview, <https://www.disk91.com/wp-content/uploads/2017/05/4967675830228422064.pdf>

2.3.2.3 Tamaño de mensajes en una comunicación Sigfox

Para la comunicación de datos en una red Sigfox se diseñó un protocolo de envío de cortos mensajes que puede ir desde 0-12 bytes según el requerimiento o servicio del dispositivo o sensor. Tienen 12 byte para la carga (Payload) es suficiente para enviar datos de estado de los servicios para la red.

Pero permite enviar 140 mensajes al día según la regulación para el uso de este protocolo.

GPS coordinates>	6 bytes
Temperature>	2 bytes
Speed reporting>	1 byte
Object status>	1 byte
«Keep alive» payload>	0 byte

Figura 8. Payload para algunas aplicaciones de Sigfox. Fuente: Sigfox Technical Overview, <https://www.disk91.com/wp-content/uploads/2017/05/4967675830228422064.pdf>

2.3.2.4 Arquitectura de la red Sigfox

La arquitectura esta compuesta de dos capas que son:

- **Capa de equipos de red:** consiste en todos los equipos físicos de la red de entrada, como las estaciones base, las antenas, etc.
- **Sistema de soporte Sigfox:** Esta capa está compuesta del core donde se procesan los mensajes de la red y se encarga de la administración de la red y del debido funcionamiento de esta.

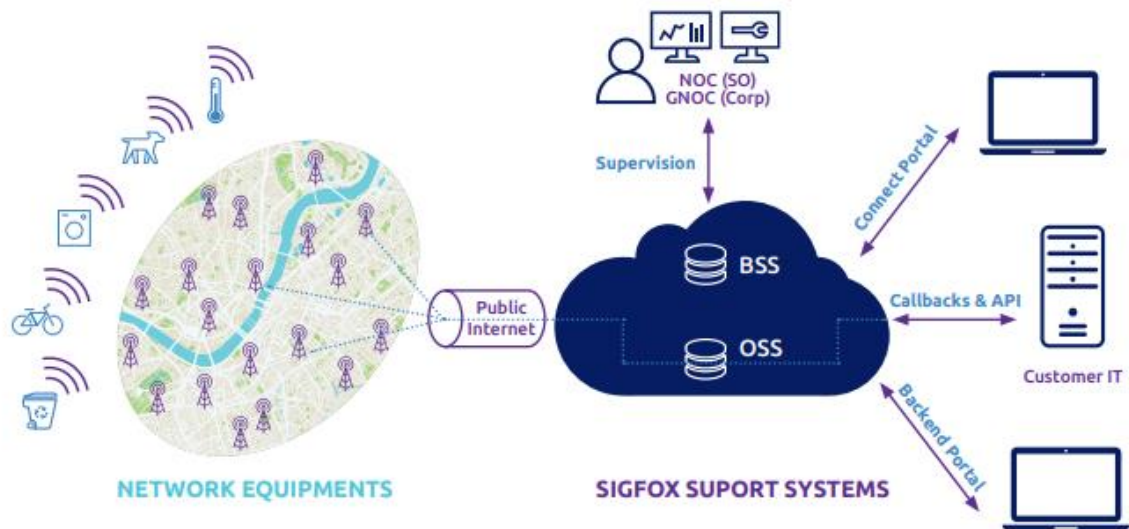


Figura 9. Arquitectura de la red Sigfox. Fuente: Sigfox Technical Overview, <https://www.disk91.com/wp-content/uploads/2017/05/4967675830228422064.pdf>

La arquitectura plana que usa Sigfox permite la optimización de los costos tanto de capital (CAPEX) como de los operativos (OPEX) ya que usa una nueva tecnología que ha cogido gran auge para la implementación de redes móviles emergentes. La red Sigfox hace uso de radio definido por software (SDR) permitiendo así la optimización de gastos operativos y la utilización de menos equipos de cómputo ya que con una máquina se podría tener toda una infraestructura móvil.

La ventaja de la infraestructura de Sigfox es que nos permite a través de los Back-End procesar los mensajes que llegan de la estación base, además, si la conexión de la red es inestable permite recibir estos mensajes haciendo uso de tecnologías ya existentes como 2G, 3G e incluso comunicaciones satelitales si no puede realizarlo a través de su propia infraestructura.

Posteriormente los mensajes ya procesados pasan a los metadatos, donde se almacenan la información de los mensajes para el servicio de cada dispositivo de la red, donde los usuarios podrán observar esta información a través de la Web-interfaz y de aplicación a través de protocolos HTTPS (Protocolo Seguro de Transferencia de Hipertexto), esto último se conoce como Front-End de servicios.

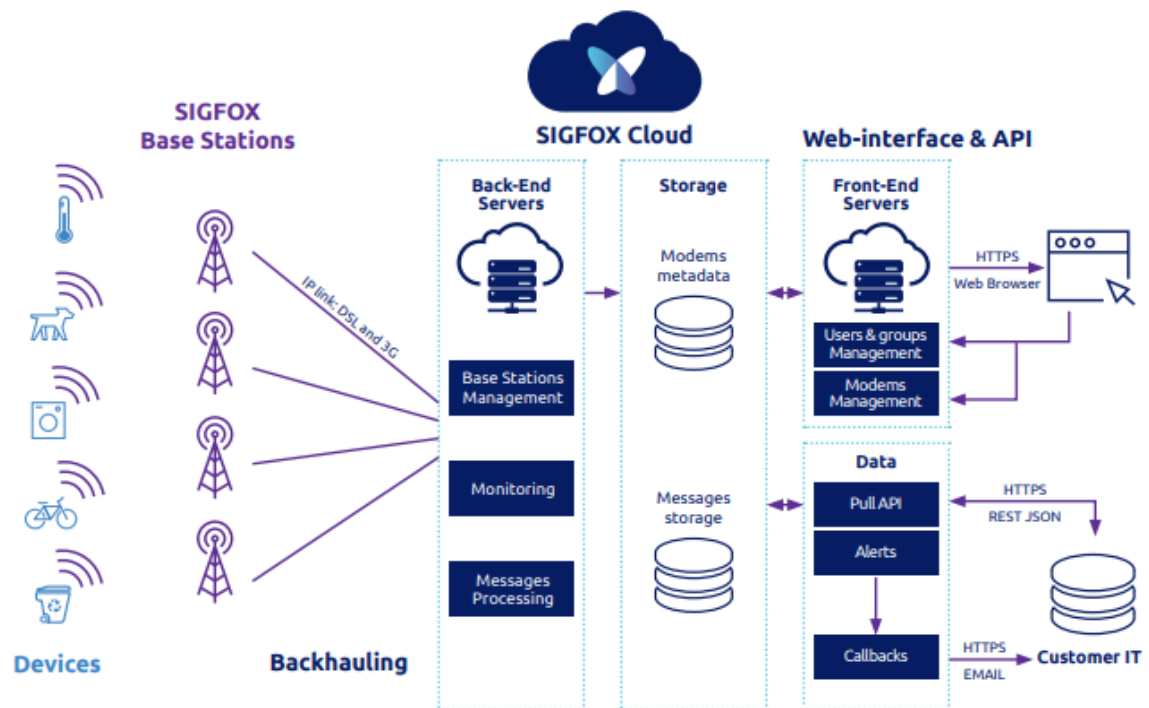


Figura 10. Arquitectura plana de Sigfox. Fuente: Sigfox Technical Overview, <https://www.disk91.com/wp-content/uploads/2017/05/4967675830228422064.pdf>

2.3.2.5 Alcance de la red Sigfox

El alcance de la red es bastante amplio en comparación de las otras tecnologías IoT. Sigfox puede alcanzar distancias entre 30-50 Km en ámbito rural y de 3-10 Km en ambientes urbanos.

2.4 Telefonía Móvil

La comunicación móvil son sistemas de comunicación que nos permiten una comunicación en movimiento desde un dispositivo con las estaciones móviles. La comunicación móvil consiste en divisiones geográficas o sectorizaciones de un espacio determinado, esta sectorización se le conoce como celdas o células.

Gracias a este concepto de celdas podemos establecer una llamada con la estación base e incluso al momento de cambiar de celda o espacio geográfico la llamada seguirá establecida gracias al proceso denominado Handover.

El Handover consiste en el cambio de celdas durante una llamada o servicio establecido sin que los servicios que se presta al usuario caigan durante el proceso de conexión.

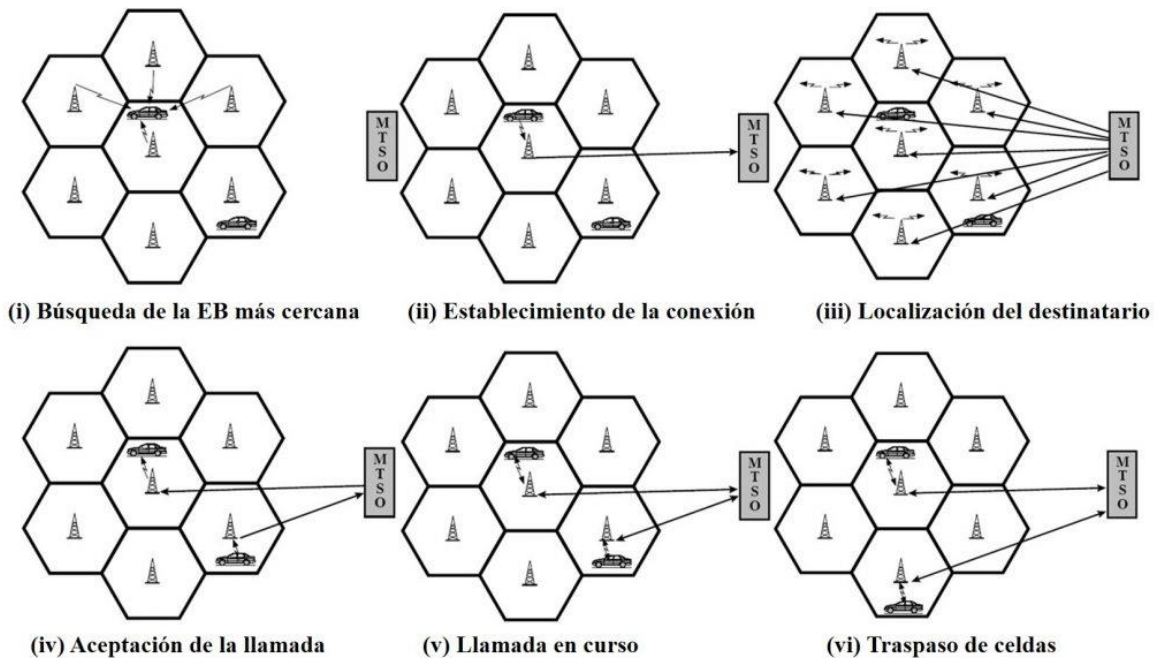


Figura 11. Sectorización móvil a través de celdas. Fuente: ¿Cómo funcionan las redes inalámbricas de telefonía móvil, <https://blogs.publico.es/ignacio-martil/2017/02/24/como-funcionan-las-redes-inalambricas-de-telefonía-movil/>

Durante la historia de los sistemas de comunicaciones móviles se ha logrado diferenciar un gran cambio significativo en la capacidad de transmisión de datos, la cobertura, la calidad, la disponibilidad y la confiabilidad de la red.

La primera generación móvil prestaba servicios de voz analógica durante los 80' y usaba un acceso a su red de tipo FDMA (Acceso Múltiple por División de Frecuencia), posteriormente surgió en los 90' la segunda generación móvil (GPRS, EDGE), la gran diferencia es que pasó de ser analógica a ser una tecnología digital pero a través de conmutación de circuitos; aquí ya podíamos contar con servicios de voz y datos, su acceso a la red se puede realizar ya sea por FDMA o TDMA (Acceso Múltiple por División de Tiempo). Después en el año 2000 surgió la tercera generación móvil (UMTS) que es una mejora de la segunda generación, pero ya su

acceso a la red es a través de W-CDMA (Acceso Múltiple por División de Código de banda ancha) y se pudo lograr una conmutación de paquetes, dando así servicios de voz sobre IP.

Después de estos grandes avances en los sistemas de comunicación móvil, se logró llegar a la cuarta generación (LTE) que mejoró los servicios prestados por la tercera generación gracias a un acceso a la red de OFDMA (Acceso Múltiple por División de Frecuencia Ortogonal) donde se aumentó la capacidad de la red.



Figura 12. Sistemas de comunicación móvil. Fuente: Generaciones de las Tecnologías Móviles, <https://www.androidestudio.com/2014/10/generaciones-de-las-tecnologias-moviles.html>

2.4.1 GPRS (General Packet Radio Service)

GPRS es una evolución de la segunda generación móvil (GSM) que permitió que los servicios de datos aumentaran su capacidad y rendimiento para las redes móviles. La diferencia más significativa entre GSM y GPRS es que éste último podía enrutar datos y no dependía de una conmutación por circuitos, para poder realizar este proceso se hizo un cambio en la infraestructura de la red móvil.

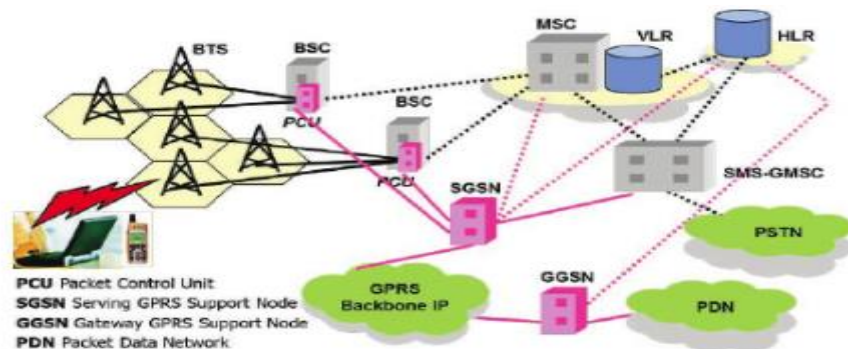


Figura 13. Arquitectura GPRS. Fuente: <http://jpadilla.docentes.upbbga.edu.co/moviles/10%20SISTEMAS%20MOVILES%20CELULARES.pdf>

Como se puede observar en la figura 13, los componentes de color rosado junto con esas conexiones fue lo que se agregó a la arquitectura GSM para poder prestar servicios de datos en las redes móviles.

Estas son los componentes de red GSM:

- MS (Estación móvil) = Es el dispositivo móvil que se conecta con la red móvil a la BTS a través de una interfaz denominada Um.
- BTS (Estación base) = La estación base son las antenas de telecomunicaciones móviles que hacen la sectorización mencionada anteriormente y permite la transmisión o recepción de los dispositivos móviles a través de la interfaz Um y estas estaciones se conectan al otro componente de la red denominado BSC a través de la interfaz A-bis.
- BSC (Controlador de Estaciones Base) = Es el controlador de las estaciones bases de la red a través de la interfaz A-bis y se conectan a la MSC por la interfaz A.
- MSC (Centro de Conmutación de Servicios Móviles) = Este componente se encarga de la conmutación de circuitos de la red, la MSC se conecta con varios componentes de la red como el HLR por la interfaz C, al GMSC por la interfaz E o al VLR por la interfaz B.
- HLR (Registro de localización) = Es la base de datos de la red que contiene la información de todos los abonados de la red.
- VLR (Registro de Localización de Visitantes) = Es otra base de datos que registra la información de abonados que se encuentren en otro LA (Área de Localización).
- GMSC (Centro de Conmutación de Servicios Móviles) = Es el encargado de hacer la conmutación de los servicios de la red móvil con la red de telefonía fija (PSTN).
- EIR (Registro de Identificación) = otra base de datos que guarda información sobre los equipos de los abonados.
- AUC (Centro de Autenticación) = Otra base de datos que realiza cálculos para la aceptación de los abonados en la red.

Los componentes mencionados anteriormente son los componentes de la red móvil de segunda generación GSM, después con la mejora de la arquitectura GSM apareció GPRS conocido como 2.5G añadiendo los siguientes componentes como se puede ver en la Figura 11.

- PCU (Control de Unidad de Paquetes) = Es el encargado de la señalización y control de los paquetes de datos, en pocas palabras este extrae las tramas para el debido funcionamiento de la red.
- SGSN= Es el encargado de gestionar las sesiones de datos para su movilidad y autorización de los abonados, este se conecta con HLR, VLR y MSC para encaminar los datos hacia la GGSN.
- GGSN: Es el nodo de la red que asigna las direcciones IP por sí mismo o con un servidor DHCP para los dispositivos móviles. Además, hace el proceso de la conexión de los abonados de la red con las redes externas, en pocas palabras es el router de la red GPRS.

2.4.2 UMTS (Sistema Universal de Telecomunicaciones móviles)

Después de la arquitectura GPRS surgió la tercera generación de comunicaciones móviles conocida como UMTS, ya que los abonados cada día requieren una mayor demanda de servicios y precios de servicios más económicos. Gracias a que la tecnología va evolucionando constantemente desde el terminal móvil, como la arquitectura móvil permite que ambos evolucionen de forma paralela.

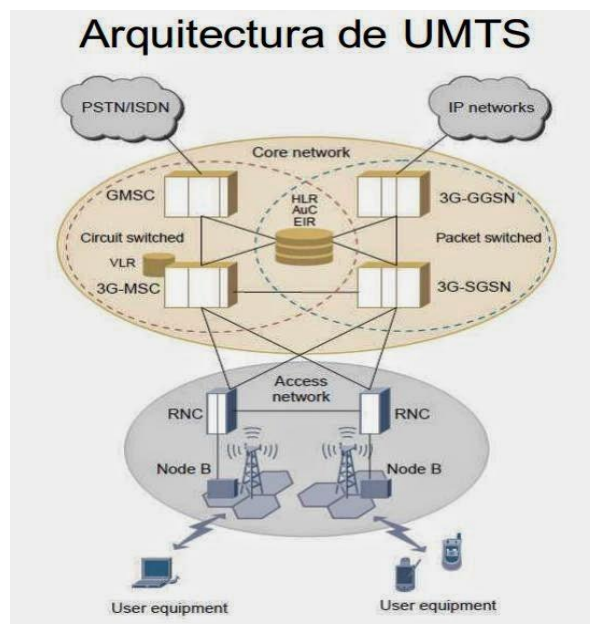


Figura 14. Arquitectura móvil UMTS. Fuente: Centro de Control de la red, <http://ccrmas3g.blogspot.com/p/arquitectura-de-red.html>

Como podemos observar en la Figura 14 la arquitectura de la red UMTS mejoró considerablemente en el acceso a la red gracias a la mejora en los nodos de las estaciones ya que tiene una mayor recepción en las señales colocándolas en fase y sumándolas, esto permitió un mejor desempeño en el uplink.

A partir de las redes de tercera generación surgió el termino de macro diversidad o diversidad espacial mencionado anteriormente en este documento.

Posteriormente de la red 3G surgió la cuarto generación 4G LTE que es una mejora considerable de los servicios que presta la tercera generación, mejoró la capacidad de transmisión y mayores servicios implementando MIMO (Múltiples Entradas-Múltiples Salidas).

2.4.3 Cobertura de la señal según el tipo de celda

La cobertura en los sistemas de comunicaciones móviles depende más del espacio geográfico, es decir, de la zona a la que se quiere prestar el servicio de telefonía móvil, la gran ventaja de las redes móviles a comparación de las IoT mencionadas anteriormente, es que las antenas pueden trabajar con una mayor potencia llevando una señal estable a una gran distancia. Aunque la problemática siempre estará en el uplink ya que la potencia de transmisión de los dispositivos móviles es mucho menor que la de las antenas de la red móvil.

Tipo de Celda	Distancia de TX	Cobertura
Picoceldas	30m-200 m	Para Interiores como aeropuertos, empresas, centros comerciales, etc..
Microceldas	0.3Km-0.7Km	Para sectores urbanos de gran demanda de tráfico.
Miniceldas	0.7Km-1.5Km	Para sectores urbanos
Macrocelas	1.5Km-20Km	Para sectores rurales como carreteras o poblados cercanos

Tabla 4. Distancias de cobertura según el tipo de celda. Fuente: Sistemas móviles celulares, <http://jpadilla.docentes.upbbga.edu.co/moviles/10%20SISTEMAS%20MOVILES%20CELULARES.pdf>

2.4.4 GPRS vs UMTS

Las diferencias entre la segunda y tercera generación móvil son considerables a pesar de que una es la mejora de la otra ya sea por su método de acceso a la red, la frecuencia que usan y el ancho de banda que tienen cada una de las dos generaciones de sistemas móviles como veremos en la siguiente tabla.

GPRS	UMTS
Velocidades de hasta 171,2 Kb/s	Velocidades hasta 2 Mb/s
Ancho de banda de 200 KHz	Ancho de banda de 5 MHz
Acceso TDMA/FDMA	Acceso W-CDMA
Voz y datos	Voz y datos
Aplicaciones limitadas	Múltiples Aplicaciones
No tiene Diversidad espacial	Diversidad Espacial

Tabla 5. GPRS vs UMTS. Fuente: [Autor] y *Sistemas de comunicaciones móviles*, Juan Pascual García, Jose María Molina García-Pardo and Leandro Juan Llácer.

2.5 SDR (Radio Definido por Software)

Con el auge máximo de las comunicaciones y con la mayor demanda de servicios por parte de los abanados se requiere cada día más avances tecnológicos mejores y que optimicen el uso de los recursos limitados como el espectro radioeléctrico.

Por la necesidad de optimizar los recursos y mejorar las tecnologías de comunicación surgió un concepto que actualmente se está haciendo realidad conocido como SDR o radio definido por software. Este busca optimizar la parte física (hardware) tanto de los dispositivos móviles como de las estaciones de las redes móviles a través de software, por ejemplo, “sin incluir la electrónica de cada estándar de comunicación y que se logre que el teléfono celular sea automáticamente reconfigurable ante la detención de condiciones cambiantes de formato de señal celular de forma instantánea, todo lo necesario para la parte digital de comunicación” [14].

Una de las grandes ventajas de la implementación de radio definido por software es que permite implementar gran parte del hardware de los radios, refiriéndose a los radios como todo componente eléctrico que permite enviar información a través del campo radioeléctrico como (AM, FM, celulares, tarjetas de red inalámbrica, etc.) y convertir todo ese hardware eléctrico en componentes de software para una mayor optimización y diversidad de protocolos de comunicación. Ya que la parte de hardware puede entender un idioma (protocolo de comunicación) y descartar demás protocolos y con el uso de radio definido por software el dispositivo podrá interactuar con cualquier otro protocolo y escoger el mejor a su conveniencia.

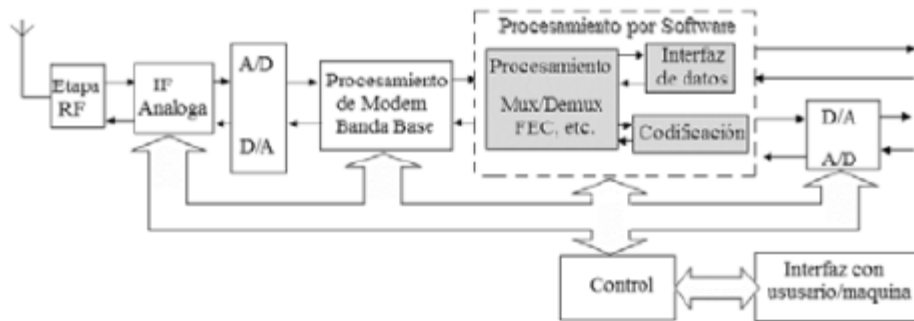


Figura 15. Estructura de Radio Definido por Software. Fuente: Introducción a Software Radio Carlos D. Domínguez Contreras, Liliana Díaz Olavarrieta, David Baéz López

- **Partes de RF:** Todos las partes o componentes eléctricos como capacitores, resistencias, transistores, etc.
- **IF Análogo:** Se encarga del muestro de la señal a mayor velocidad que el ancho de banda de la señal.
- **Procesamiento Digital de señal:** Se encarga de recibir la señal ya digitalizada para su debido procesamiento para la corrección de errores y decodificación de la información.

2.5.1 Red de telefonía móvil GSM por medio de SDR

El despliegue de la infraestructura de una red móvil GSM (2G), UMTS(3G), LTE-Advanced (4G) es considerablemente costosa, por lo cuál este servicio móvil es exclusivo en zonas de gran demanda de servicios ya sea en ciudades, carreteras

principales, pueblos y lugares donde los operadores de telefonía móvil ven rentabilidad económica para implementar su infraestructura.

Radio definido por software nos permite montar una estación móvil de bajos recursos, donde en pocas horas puede proveer servicios móviles GSM en zonas de difícil acceso o poca rentabilidad e incluso como una red de emergencias en caso de catástrofes naturales.

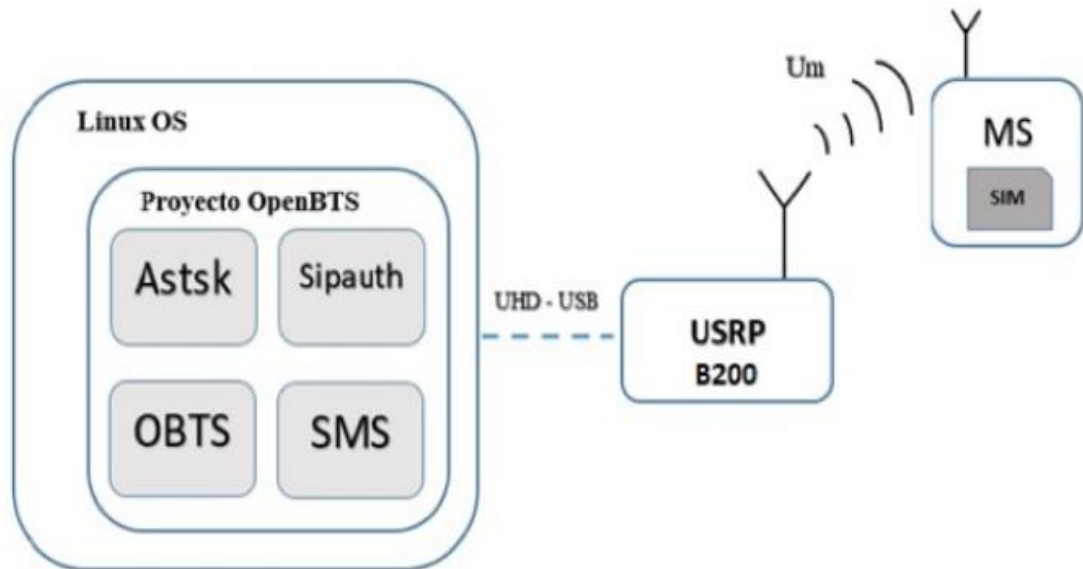


Figura 16. Arquitectura GSM con SDR. Fuente: Red de comunicaciones móviles mediante radio definida por software y USRP, <https://pdfs.semanticscholar.org/e843/ddab1c2dafaaff2d992262427c0ac28016ed.pdf>

La estación móvil se implementa a través del sistema operativo Linux y haciendo uso de la librería libre de OpenBTS donde se instalan los siguientes componentes, para simular e implementar una red móvil GSM.

- **Astsk:** Es de uso gratuito diseñado para proveer servicios de comunicación a través de código abierto.
- **Sip Auth:** Proporciona una autenticación para los servicios que se implementaran en la red GSM.
- **USRP B200:** Es un periférico de software de radio que permite voz y mensajes de texto.

2.6 Red NTRIP

Es una red de transporte RTCM a través de Internet que hace uso del protocolo de transferencia de Hipertexto (HTTP). Se encarga de enviar datos GNSS tanto receptores permanentes como estáticos por medio de Internet.

RTCM es el formato como se envían los datos a través de la red, donde en estos formatos se encuentra la información de las coordenadas, fase, los puntos fijos L1 y L2, y a su vez envían las correcciones diferenciales de los puntos.

La red NTRIP se divide en diferentes componentes o dispositivos de red para garantizar la recepción y transmisión de los datos en tiempo real, los cuales son:

1. Antenas GPS/GNSS= Son las encargadas de recoger los datos de posicionamiento proveniente de los satélites del punto donde se encuentra.
2. Servidor NTRIP= Son los equipos que se conectan directamente con las antenas para tomar los datos recogidos, convertirlos en formato RTCM y posteriormente enviarlos al Caster de la red a través de Internet usando el protocolo (TCP/IP).
3. Caster NTRIP= Es el servidor central que se encuentra en la Internet y se encarga de recibir los datos de las estaciones permanentes y de los usuarios de la red, haciendo uso del protocolo RTCM.
4. Clientes (usuarios)= Se encargan de recibir los datos GNSS provenientes del caster para ubicar su punto de una forma más exacta usando correcciones diferenciales. Estos usuarios son solamente aceptados si están registrados en el Caster.

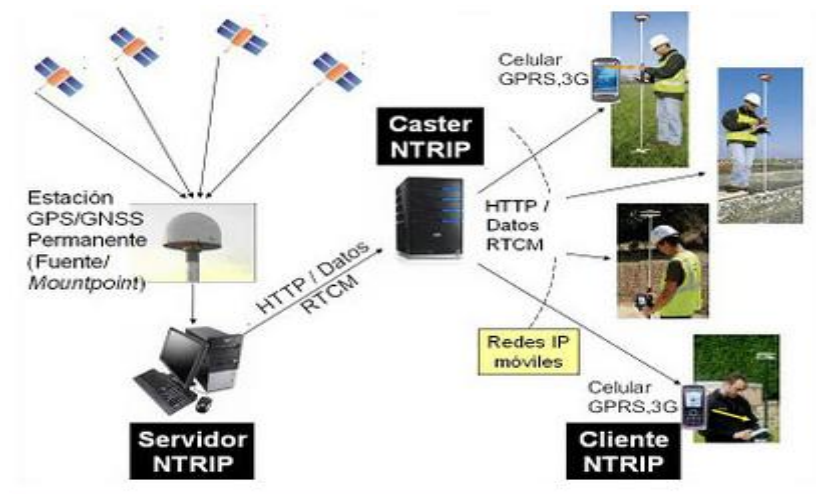


Figura 17. Red NTRIP. Fuente: Café Geodésico, <http://cafegeodesico.blogspot.com/2011/10/sobre-ntrip.html>

Lo fundamental de la red NTRIP es hacer correcciones diferenciales, que consisten en eliminar errores provenientes de los satélites para que los datos (coordenadas) del punto donde se encuentren las estaciones sean más exactas, haciendo uso de varios satélites junto con las estaciones móviles como puntos de referencia para aplicar una mejor precisión de los puntos.

Estas correcciones diferenciales se logran realizando triangulación entre las estaciones permanentes, los satélites y el punto que se quiere analizar (móvil).

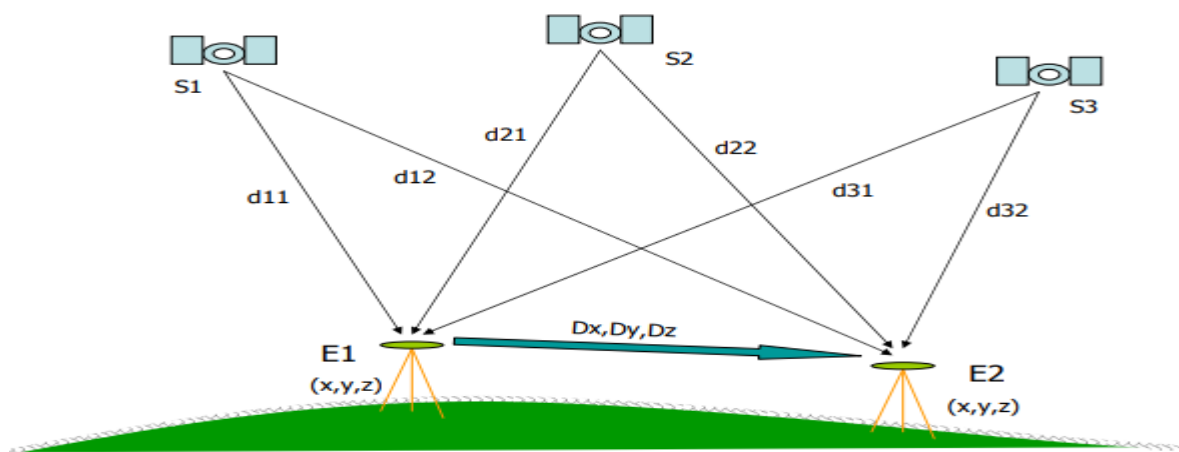


Figura 18. Correcciones diferenciales. Fuente: GPS en tiempo real, <https://www.fceia.unr.edu.ar/gps/extension/GPSenTiempoReal.pdf>

2.7 Red actual de estaciones permanentes GNSS de la DITG

La dirección de información técnica y geográfica cuenta actualmente con cuatro estaciones permanentes GNSS las cuáles dan servicio tanto a los topógrafos de la DITG como a los topógrafos de obras civiles independientes de la Empresa permitiendo tener el punto de referencia más exacto y que cumplan con las normativas ya implementadas por la empresa EAAB.

Las cuatro estaciones se encuentran ubicadas en algunas sedes de la Empresa. Las estaciones están compuestas de una antena y receptor GNSS, tres de las estaciones envían la información al servidor central de la red ubicado en la sede central a través de intranet usando una VPN a través del Internet y la cuarta estación se encuentra en una zona de difícil acceso, ésta primero llega a una sede cercana al punto a través de enlaces microondas y posteriormente es enviada por intranet.

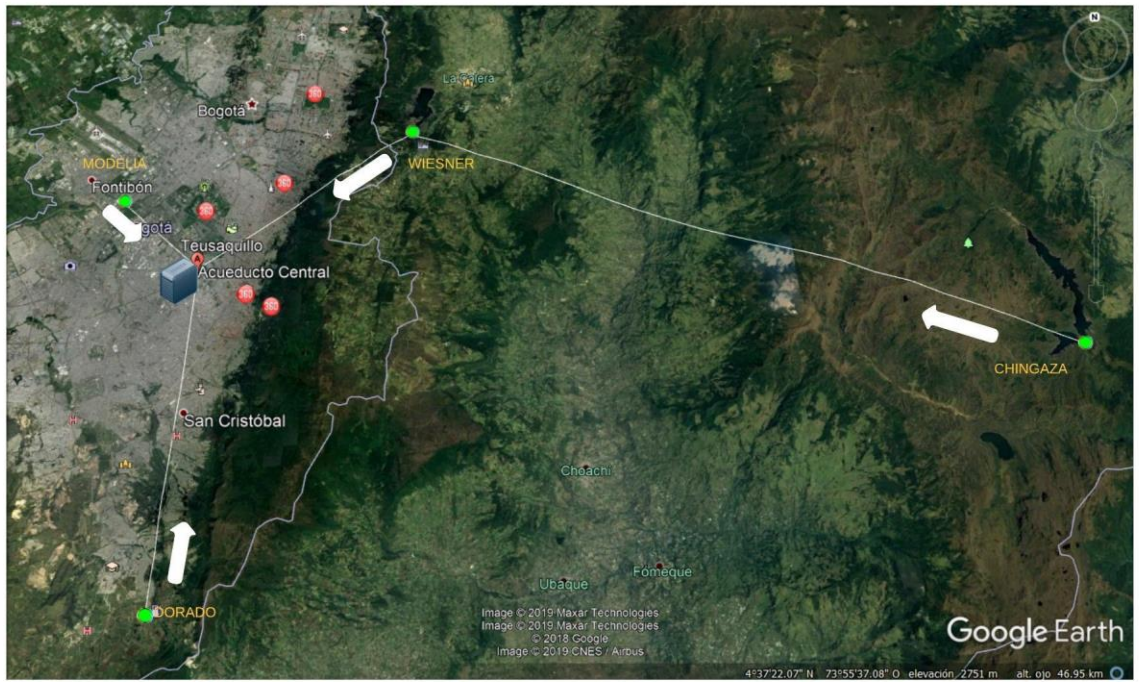


Figura 19. Red actual de las estaciones GNSS. Fuente: [Autor]

3. CAPÍTULO III

3.1 Requerimientos de red

La dirección de información técnica y geográfica de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá debe tener coordenadas en tiempo real de alta precisión para los levantamientos topográficos y la comprobación de trabajos de topografía, tanto de la empresa como de obras civiles que llegan a la empresa.

Estos equipos de precisión de coordenadas geográficas son costosos como la red NTRIP, que puede costar alrededor de \$60.000.000 por cada estación y consiste en una antena GNSS que recibe las coordenadas provenientes de satélites como Galileo, GPS, GLONASS y otros satélites que permiten enviar dichas coordenadas a las antenas, enviarlas a un receptor y posteriormente almacenar este servicio en tiempo real en un servidor NTRIP, que hace las correcciones diferenciales y su servicio está en Internet para que dispositivos móviles puedan realizar las correcciones diferenciales de su punto en tiempo real, basado en la posición exacta de las estaciones permanentes NTRIP.

Por lo anterior, este proyecto busca un análisis de tecnologías emergentes que permita implementar una red independiente de operadores móviles o de Internet diferente a la red NTRIP, ya que dicha red requiere internet desde el receptor, el servidor y los dispositivos finales aumentado su costo.

Para cumplir las necesidades de la red se debe tener en consideración el ancho de banda de las tecnologías, su velocidad de transmisión, la capacidad de envío de coordenadas GPS, uso de frecuencias libres y desarrollo de software (recomendación) para la creación de la aplicación que realice las correcciones diferenciales.

Los requerimientos fundamentales para la red son:

- Data Rate para envío de coordenadas DGPS= 0.5 kbps.
- Data Rate para envío de correcciones RTK= 5 kbps.
- Ancho de banda pequeño de 10kHz.
- Diseño de red en las sedes escogidas de la Empresa.
- Posibilidad de ingresar a la Internet.
- Frecuencias de transmisión de uso libre (No licenciadas).
- En las sedes debe haber servicios de Internet o cobertura móvil.

- Bajo consumo de potencia de los terminales.
- Tiempo de vida útil de 5 a 10 años de las baterías de los sensores o terminales.
- Calidad de servicio (QoS).
- Seguridad.
- Escalabilidad de red.

3.1.1 Diseño de red en las sedes del EAAB

Se diseñó una red que no dependa de internet o de operadores móviles desde la terminal y la puerta de enlace, pero que posteriormente permita que los datos se puedan procesar e interactuar con el Internet a nivel de salida y servicio a los demandantes.

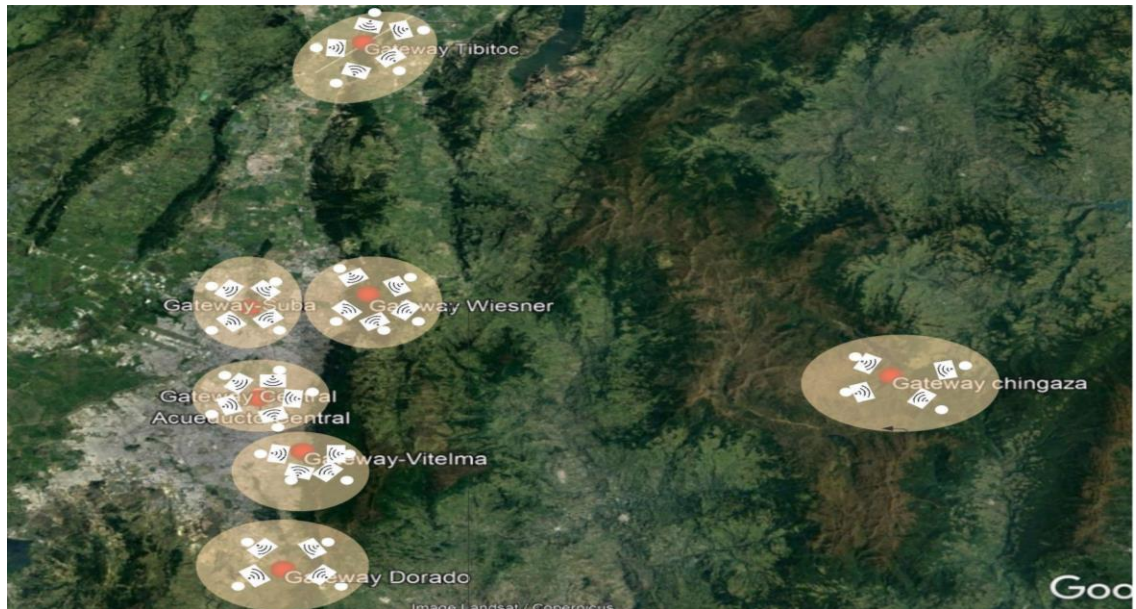


Figura 20. Diseño de red inalámbrica entre terminal y Gateway. Fuente: [Autor]

- Gateway-Tibitoc = AEEB-T
- Gateway-Wiesner = AEEB-W
- Gateway-Central = AEEB-CO
- Gateway-Suba = AEEB-S
- Gateway-Vitelma = AEEB-V
- Gateway-Dorado = AEEB-D
- Gateway-Chingaza = AEEB-C

Se escogió una topología estrella porque nos permite múltiples conexiones a un solo Gateway o a varios de estos. Además, no demanda mucho tráfico de transmisión siendo ideal para los servicios que se requieren en el análisis de las tecnologías escogidas.

Por último, los Gateway o puertas de enlace deberán permitir enviar la información que llega de los nodos a un servidor central a través de Internet, para poder procesar y utilizar los datos en un software para el servicio de correcciones diferenciales.

El diseño de red está en lugares que nos permiten disminuir gastos como los de arrendamiento de terrenos e internet, por lo que se escogieron siete sedes de la Empresa que cuentan ya con servicio de Internet.

Diseño de red en la sede central:

La red central contará con una estación base (Gateway) o puerta de enlace entre los sensores o terminales de la red, haciendo una comunicación inalámbrica entre nodos y puerta de enlace. Posteriormente la puerta de enlace deberá enrutar los datos hacia Internet para interactuar con la información recolectada.

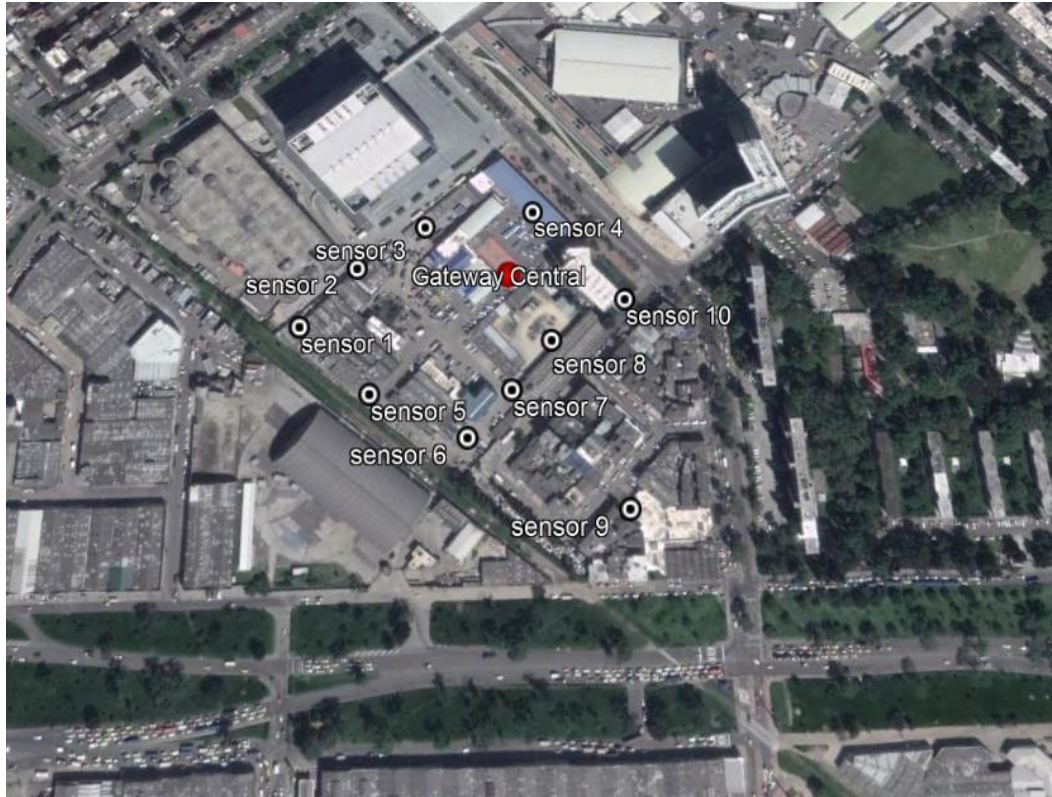


Figura 21. Diseño de red en la sede central. Fuente: [Autor]

Ubicación sede Central

- 4°37'11" N
- 74°05'57" W

Diseño de red en la sede Chingaza:

En Chingaza la Empresa cuenta con una sede en una zona de difícil acceso, pero a través de enlaces microondas logran proveer de servicios de Internet a esta sede. Por lo cual se escogió esta sede para añadirla dentro del análisis de implementación en la red alternativa NTRIP, además sería un punto de comparación con la red actual de GNSS de la Empresa.

La comunicación de la red inalámbrica en Chingaza se puede ver afectada por el clima ya que la mayoría del tiempo es lluvioso, presenta mucha nubosidad y es muy boscosa, generando así pérdidas de señales en la comunicación.

Los sensores (nodos o terminales) deberán comunicarse con el Gateway (puerta de enlace) a través de la tecnología inalámbrica y posteriormente el Gateway deberá poder tener conexión a Internet a través de cable UTP en la sede de la empresa.

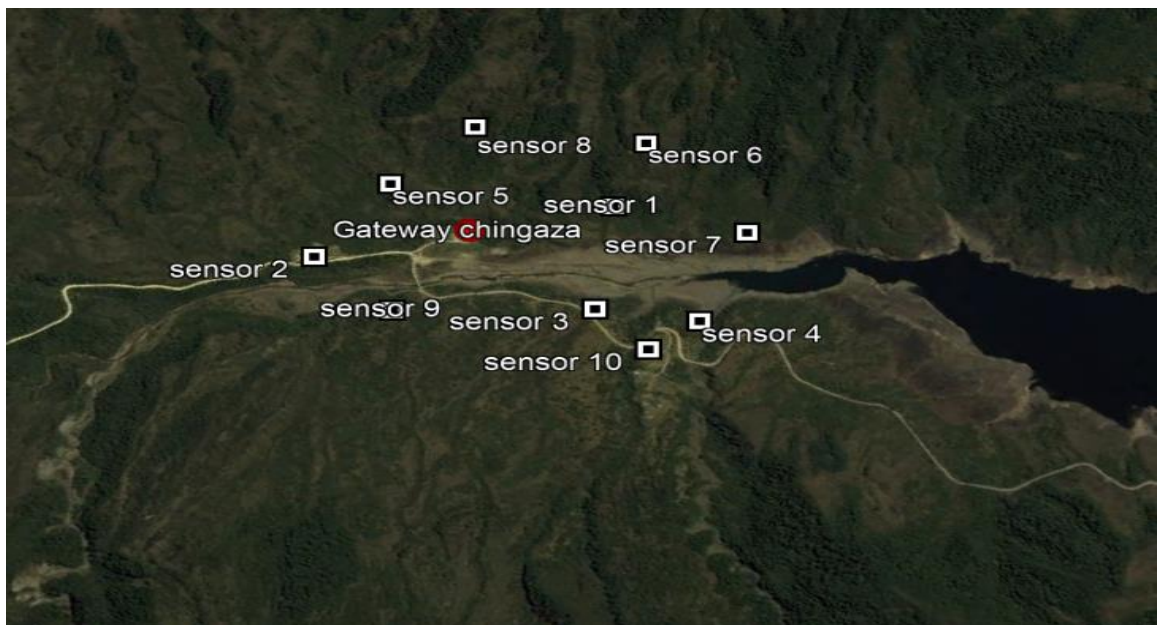


Figura 22. Diseño de red en la sede Chingaza. Fuente: [Autor]

Ubicación sede Chingaza

- 4°37'56" N
- 73°43'38" W

Diseño de red en la sede Dorado:

Esta sede también cuenta con servicio a Internet por lo cual se escogió como posible candidato para implementar una red alternativa NTRIP, además sería un punto de comparación con la red actual de GNSS de la empresa.

Los sensores (nodos o terminales) deberán comunicarse con el Gateway (puerta de enlace) a través de la tecnología inalámbrica y posteriormente el Gateway deberá poder tener conexión a Internet a través de cable UTP en la sede de la Empresa.



Figura 23. Diseño de red en la sede Dorado. Fuente: [Autor]

Ubicación sede Dorado

- 4°28'36" N
- 74°05'57" W

Diseño de red en la sede Suba:

Cuenta con servicio de Internet siendo ideal para implementar la red alternativa NTRIP.

Los sensores (nodos o terminales) deberán comunicarse con el Gateway (puerta de enlace) a través de la tecnología inalámbrica y posteriormente el Gateway deberá poder tener conexión a Internet a través de cable UTP en la sede de la Empresa.



Figura 24. Diseño de red sede Suba. Fuente: [Autor]

Ubicación sede Suba

- 4°42'53" N
- 74°05'05" W

Diseño de red en la sede Tibitoc:

Cuenta con servicio de Internet siendo ideal para implementar la red alternativa NTRIP, presenta arboles alrededor, pero es factible montar una red.

Los sensores (nodos o terminales) deberán comunicarse con el Gateway (puerta de enlace) a través de la tecnología inalámbrica y posteriormente el Gateway deberá poder tener conexión a Internet a través de cable UTP en la sede de la Empresa.



Figura 25. Diseño de red en Tibitoc. Fuente: [Autor]

Ubicación sede Tibitoc

- 4°58'38" N
- 73°58'14" W

Diseño de red en la sede Vitelma:

Cuenta con servicio de Internet siendo ideal para implementar la red alternativa NTRIP y a pesar de que la zona cuenta con muchos árboles es factible la red.

Los sensores (nodos o terminales) deberán comunicarse con el Gateway (puerta de enlace) a través de la tecnología inalámbrica y posteriormente el Gateway deberá poder tener conexión a Internet a través de cable UTP en la sede de la Empresa.



Figura 26. Diseño de red sede Vitelma. Fuente: [Autor]

Ubicación Sede Vitelma

- 4°34'29" N
- 74°04'14" W

Diseño de red en la sede Wiesner:

Se ubicará la red en la sede de Wiesner que tiene acceso a Internet siendo ideal para implementar la red y compararla con la estación permanente GNSS.

Los sensores (nodos o terminales) deberán comunicarse con el Gateway (puerta de enlace) a través de la tecnología inalámbrica y posteriormente el Gateway deberá poder tener conexión a Internet a través de cable UTP en la sede de la Empresa.



Figura 27. Diseño de red sede Wiesner. Fuente: [Autor]

Ubicación sede Wiesner

- 4°41'44" N
- 73°59'40" W

3.2 Análisis para implementar una red LoRaWAN

Se realizará un análisis de los equipos requeridos para montar una red LoRaWAN para las siete sedes de la Empresa y el costo aproximado para la implementación de infraestructura de esta.

Se hará un estudio económico de los equipos de comunicación requeridos para dar cobertura en toda la ciudad y los profesionales requeridos para su implementación.

3.2.1 Equipos LoRa/LoRaWAN

Los equipos de la red LoRaWAN se consiguen por partes ya sea desde los enrutadores (Gateway) como los nodos de la red, siendo esta última la más complicada porque se debe comprar por componentes para montar el nodo, ya sea desde los módulos (que se encargan de la modulación de la señal), los sensores, las antenas, etc. A continuación, veremos por tabla algunos equipos para la red LoRaWAN.

Gateway (puertas de enlace):

EQUIPO	VELOCIDAD DE DATOS	FRECUENCIA	PRECIO
RG191-ND	65 Mbps	902MHz-928MHz	\$854.485 unidad
591-1326-ND	10 Mbps	915MHz	\$1.545.729 unidad
591-1328-ND	100Mbps	915MHz	\$2.058.454 unidad
450-0191-ND	65Mbps	902MHz-928MHz	\$2.432.547 unidad
881-MTCAP-915-041 ^a -ND	10Mbps	915MHz	\$1.098.560 unidad

Tabla 6. Costos de equipo Gateway. Fuente: [Autor] y Digi-Key, <https://www.digikey.com/products/es/networking-solutions/gateways-routers/928?k=lora&k=&pkeyword=lora&FV=ffe003a0>

Antenas:

EQUIPO	FRECUENCIA CENTRAL	FRECUENCIA	PRECIO
931-1296-2-ND	700MHz, 850MHz, 900MHz, 1.8GHz, 1.9GHz, 2.1GHz, 2.6GHz	698MHz-960MHz	\$28.129 unidad
931-1040-ND	850MHz, 900MHz, 1.8GHz, 1.9GHz, 2.1GHz, 2.6GHz	824MHz-960MHz 1.71GHz-2.17GHz	\$28.232 unidad
931-1225-6-ND	700MHz, 850MHz, 900MHz, 1.8GHz, 1.9GHz, 2.1GHz, 2.6GHz	698MHz-960MHz	\$55.233 unidad

Tabla 7. Costos de las Antenas. Fuente: [Autor] y Digi-Key, <https://www.digikey.com/products/en/rf-if-and-rfid/rf-antennas/875/page/5?nstock=1>

Módulos:

EQUIPO	FRECUENCIA	PRECIO
RFM69	915MHz	\$29.000 unidad
RN2903A-I/RM105-ND	902MHz- 928MHz	\$43.749 unidad
150-RN2903A-I/RMSA103-ND	902MHz-928MHz	\$43.749 unidad
RN2903A-I/RM098-ND	902MHz-928MHz	\$43.749 unidad
Rak831 GPS Incluye varios módulos	433MHz, 470MHz, 868MHz, 915MHz	\$920.389

Tabla 8. Costos de los Módulos. Fuente: [Autor] y Digi-Key, <https://www.digikey.com/products/es/rf-if-and-rfid/rf-transceiver-modules/872?k=lora&k=&pkeyword=lora&v=150&FV=ffe00368>

Los equipos relacionados en las tablas nos permiten realizar una red LoRa/LoRaWAN, que prestará servicios de envío de coordenadas GPS, logrando así solucionar los requerimientos de la red alternativa que se quiere implementar. Para lograr esto se va a requerir profesionales a futuro que permitan un desarrollo de aplicaciones para LoRa/LoRaWAN.

3.2.2 Personal requerido para implementar la red LoRaWAN

Además de comprar los equipos para la implementación de una red LoRaWAN se deberá contar con profesionales en diferentes áreas para la implementación, funcionamiento y el debido cumplimiento de los servicios que se quieren dar para la DITG de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá.

PROFESIONAL	CANTIDAD	AÑOS DE EXPERIENCIA	Escalafón (ACEM)	SUELDO Mensual
Ingenieros de Telecomunicaciones	1	3 años en redes IoT	Escalafón 6	7 SMMLV
Ingenieros Electrónicos	1	4 años	Escalafón 6	7 SMMLV
Desarrolladores de software	3	5 años	Escalafón 5	9 SMMLV

Tabla 9. Personal requerido y sueldos. Fuente: [Autor] y ACIEM, <https://aciem.org/manual-de-referencia/>

3.2.3 Costos de equipos para una red LoRaWAN

Teniendo en cuenta las sedes donde se implementará la red se hizo una estimación de los equipos que son necesarios para dar cobertura y junto con las tablas de costos de equipos se realizará un cálculo aproximado del costo total para implementar la red.

EQUIPO	CANTIDAD	COSTO	VALOR TOTAL
RG191-ND Gateway	7	\$854.485 unidad	\$5.981.395
931-1040-ND Antena	14	\$28.232 unidad	\$395.248
Rak831 GPS	70	\$920.389	\$64.427.230
TOTAL			\$70.803.873

Tabla 10. Costo total en infraestructura de red LoRaWAN para las siete sedes de la empresa. Fuente: [Autor].

3.3 Análisis para adquirir una red Sigfox privada

Se realizará un análisis del costo para adquirir una red privada Sigfox para la Empresa y estimar el costo de los dispositivos que nos permiten interactuar con la red privada Sigfox, ya que a diferencia de la red LoRaWAN que es de uso y de implementación libre (sin licencia), la red Sigfox si es un operador móvil o de telecomunicaciones que brinda conectividad para IoT.

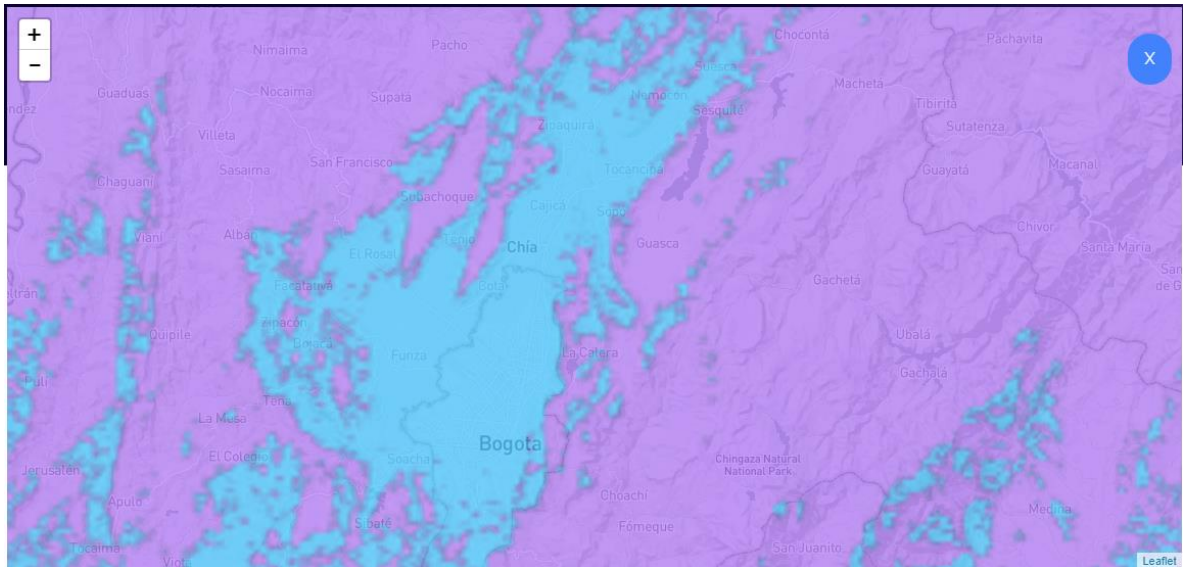


Figura 28. Mapa de cobertura de Sigfox en Colombia. Fuente: Coverage Sigfox, <https://www.sigfox.com/en/coverage>

La gran ventaja de adquirir el servicio de Sigfox es el ahorro en costos de implementación de infraestructura de la red, aunque condiciona a la Empresa EAAB de depender de un tercero (Operador Sigfox) y pagar por adquirir el servicio de conectividad.

En Colombia como podemos observar en la figura 19 ya hay algunas zonas, incluido en su totalidad Bogotá, con cobertura de redes Sigfox. Se visitó la página oficial de WND Colombia que es la empresa exclusiva de la red Sigfox en Colombia, en donde por privacidad y políticas de la empresa su modelo de negocio y precios es restringido, por lo cual se envió un correo a WND solicitando una aproximación del costo para adquirir una suscripción del servicio, permitiendo así analizar cuánto podría costar adquirir una conectividad en esta red privada por suscripción de equipo.

Para adquirir el servicio de la red se debe tener las terminales (nodos) y comprar una suscripción de un año por cada dispositivo.

EQUIPO	CANTIDAD	PRECIO	VALOR TOTAL
0004-DIG-OYW-4	70	\$290.513	\$20.335.910

Tabla 11. Costo equipo GPS para Sigfox. Fuente: [Autor] y <https://www.digikey.com/product-detail/es/thinxtra-solutions-limited/0004-DIG-OYW-4/1894-1005-ND/7929398>

Los precios para suscripción por un dispositivo aproximados son de 9 dólares por equipo donde en pesos colombianos es de \$30.366.

La desventaja de Sigfox es que su ancho de banda es limitado llevando a que la transmisión de mensajes sea muy limitada, como pudimos observar en el marco teórico el máximo de mensajes que puede transmitir es de 140 mensajes donde cuentan con los siguientes tipos de planes:

- Plan Ultra: de 140 mensajes al día por dispositivo.
- Plan Plus: de 70 mensajes al día por dispositivo.
- Plan básico: 2 mensajes al día por dispositivo.

La demanda de las suscripciones depende de la totalidad de dispositivos que requiere la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, así que inicialmente se realizará el análisis para 70 dispositivos y comparar con la red LoRaWAN.

EQUIPOS	VALOR SUSCRIPCIÓN ANUAL POR DISPOSITIVO	VALOR TOTAL POR UN AÑO	VALOR TOTAL POR 5 AÑOS (Con precio del año 2019)	VALOR TOTAL POR 10 AÑOS (con precio del año 2019)
70	\$30.366	\$2.125.620	\$10.628.100	\$21.256.200

Tabla 12. Costo suscripción por un año, 5 años y 10 años para 349 equipos. Fuente: [Autor] y Sigfox buy, <https://buy.sigfox.com/buy/offers/ES>

3.4 Análisis para implementar una red GSM con SDR

Las redes móviles actualmente son indispensables para las telecomunicaciones ya que son las más usadas y nos permiten tener múltiples servicios, desde enviar mensajes de texto (SMS), realizar llamadas nacionales e internacionales, navegar por el internet, jugar en línea o interactuar con millones de personas en todo el mundo.

Las ventajas de las redes móviles son múltiples pero la realidad es que montar una red móvil es de gran inversión, tiempo y esfuerzo.

La implementación a través de radio definido por software es más económica a nivel de infraestructura, pero a nivel de cobertura aún no sería rentable si se quiere implementar en la Empresa ya que actualmente se puede lograr una distancia no mayor a 20 metros de cobertura que es menor que las pico celdas móviles y esto lleva a aumentar su costo.

USRP: Dispositivos que nos permiten crear, diseñar o implementar sistemas de comunicaciones inalámbricas de una forma sencilla y rápida, como sistemas de comunicaciones móviles 2G, 3G, comunicaciones de radar y muchas funcionalidades más.

Modelo	Ancho de Banda	Rango de Frecuencia	Precio
USRP-2900	56MHz	70MHz-6GHz	\$3.846.000
USRP-2922	20MHz	400MHz-4.4GHz	\$11.534.000
USRP-2940	120MHz	50MHz-2.2GHz	\$27.510.000
USRP-2944	160MHz	10MHz-6GHz	\$31.100.000
USRP-2950	40MHz	50MHz-2.2GHz	\$32.770.000
USRP-2952	120MHz	400MHz-4.4GHz	\$32.770.000
USRP-2955	80MHz	10MHz-6GHz	\$47.700.000
USRP-B200 Inicial	56MHz	70MHz-6GHz	\$2.701.000

Tabla 13. Valor equipo USRP. Fuente: [Autor] y National Instruments, <https://www.ni.com/es-co/shop/select/usrp-software-defined-radio-device>

Computadores portátiles: La ventaja de implementar una red móvil GSM es que reduce la infraestructura física y nos permite a través de un solo equipo como un portátil o un computador de escritorio tener servicios de voz, SMS e Internet para la red GSM/GPRS o UMTS que se desea implementar.

MODELO	MARCA	MEMORIA RAM	ALMACENAMIENTO	PRECIO
MQS32E/A	MAC	8GB	128GB disco estado solido	\$3.699.000
15-DA0011IA	HP	8GB	1TB disco duro	\$2.149.000
S540	LENOVO	12GB	512GB disco duro	\$2.799.000
CK0029IA	HP	4GB	1TB disco duro	\$1.599.000

Tabla 14. Valor de algunos portátiles. Fuente: [Autor].

Se puede adquirir cualquier computadora portátil o de escritorio que tenga más de 4GB de RAM y por lo menos 512GB de almacenamiento ya que es posible cambiar el sistema operativo de cualquier computador.

Antenas para USRP: Para la transmisión y recepción de las señales de las estaciones GSM/GPRS o UMTS y de los dispositivos móviles se requiere el uso de antenas que sean compatibles con USRP.

MODELO	RANGO DE FRECUENCIAS	PRECIO
VERT900	900MHz-928MHz	\$148.000
LP0965	850MHz-6.5GHz	\$186.000
LP0410	400MHz-1GHz	\$186.000

Tabla 15. Valor de algunas Antenas para dispositivos USRP. Fuente: [Autor] y Ettus Research, <https://www.ettus.com/product-categories/antennas/>

SDR va en desarrollo considerable ya que nos permite cambiar el hardware del radio a software, pero aún su distancia de transmisión es muy limitada, a continuación, veremos una aproximación de cuánto costaría una red GPRS con radio definido por software con una cobertura de 330 metros sin tener en cuenta obstrucción de obstáculos ya que puede disminuir la cobertura de 30 a 50 metros.

EQUIPO	CANTIDAD	PRECIO UNIDAD	PRECIO TOTAL DE EQUIPOS
USRP-B200 Inicial	7	\$2.701.000	\$18.907.000

Tabla 16. Costos de Equipos USRP para dar cobertura en las siete sedes de la empresa. Fuente: [Autor].

COMPUTADOR	CANTIDAD	PRECIO UNIDAD	PRECIO TOTAL DE EQUIPOS
CK0029IA	7	\$1.599.000	\$11.193.000

Tabla 17. Costos de computadores para las estaciones GSM/GPRS por SDR. Fuente: [Autor].

ANTENA	CANTIDAD	PRECIO UNIDAD	PRECIO TOTAL DE EQUIPOS
VERT900	14 7 Uplink - 7 Downlink	\$148.000	\$2.072.000

Tabla 18. Costos de las antenas para el equipo USRP. Fuente: [Autor].

4. CAPÍTULO IV

4.1 Comparación por distancias o cobertura de transmisión de las tecnologías analizadas

Se analizó según la información encontrada en documentos, páginas oficiales de las redes LoRa, Sigfox y proyectos ya realizados subidos al Internet tanto teórico como práctico, la distancia de cobertura de transmisión de las redes LoRa; se realizó una tabla comparativa de las dos redes IoT estudiadas y radio definido por software.

Con obstáculos	
TECNOLOGÍA	DISTANCIAS (m)
LoRa	5000
Sigfox	10000
SDR-GSM/GPRS	50

Tabla 19. Comparación de distancia de cobertura de las tres tecnologías con obstáculos. Fuente: [Autor].

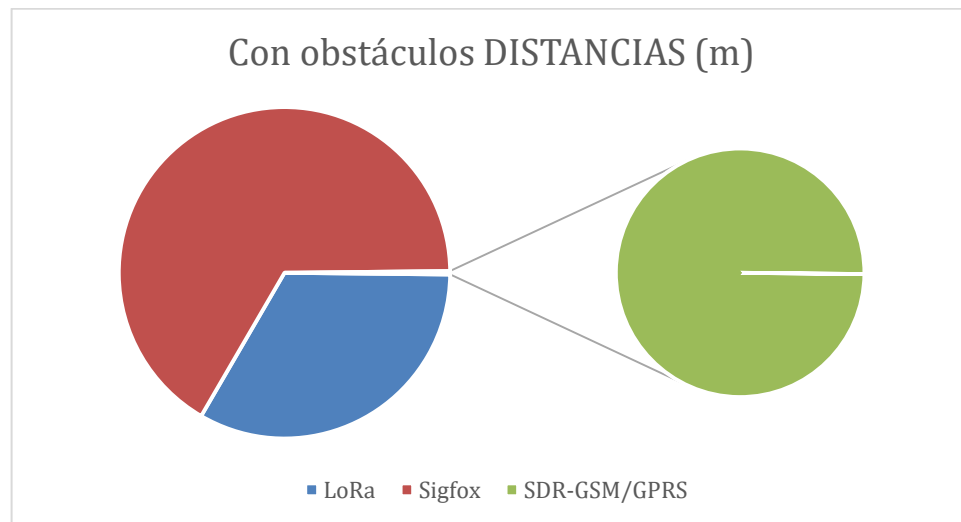


Figura 29. Gráfico anillo de comparación de cobertura de las tecnologías con obstáculos. Fuente: [Autor]

Sin obstáculos	
TECNOLOGÍA	DISTANCIAS (m)
LoRa	20000
Sigfox	50000
SDR-GSM/GPRS	330

Tabla 20. Comparación de distancia de cobertura de las tres tecnologías sin obstáculos. Fuente: [Autor].

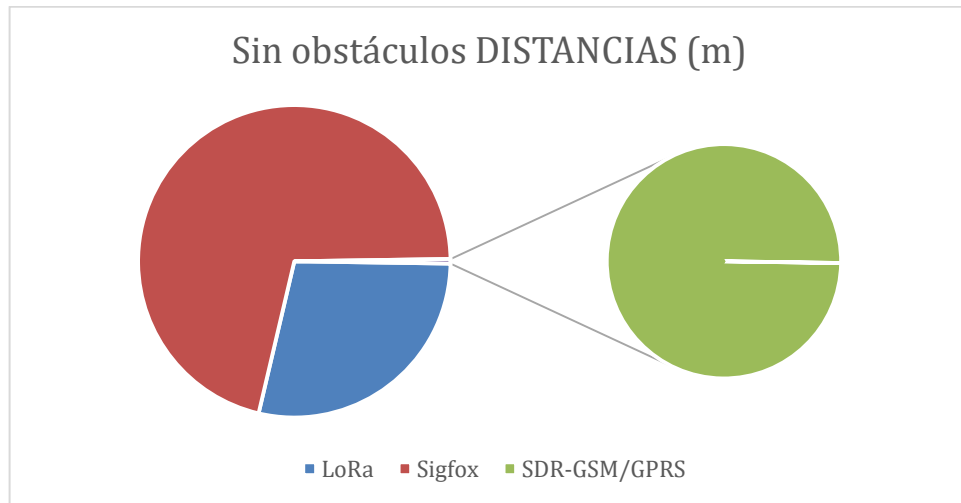


Figura 30. Gráfico anillo de comparación de cobertura de las tecnologías sin obstáculos. Fuente: [Autor]

Como podemos observar en la comparación de las tres tecnologías según su distancia de transmisión con obstáculos y sin obstáculos, el que mejor presta cobertura es la tecnología Sigfox ya que esta supera el doble de la cobertura de LoRa con obstáculos siendo más tentativo para implementar, ya que uno de los factores que involucran la pérdida de la señal o la desconexión de la misma es el limitante de la potencia llevando a que las ondas de la señal no puedan atravesar obstáculos como edificios de concreto, metales, etc.

4.2 Comparación por ancho de banda

Con la información encontrada se analizó el ancho de banda de las tecnologías a comparar el cual nos arroja el siguiente resultado.

LoRa puede usar tres tipos de ancho de banda los cuales son 125KHz, 250KHz y 500KHz. En este caso se mencionará el de 250KHz.

TECNOLOGÍA	Ancho de Banda (KHz)
LoRa	250
Sigfox	0,1
SDR-GSM/GPRS	200

Tabla 21. Ancho de banda de las tres tecnologías. Fuente: [Autor].

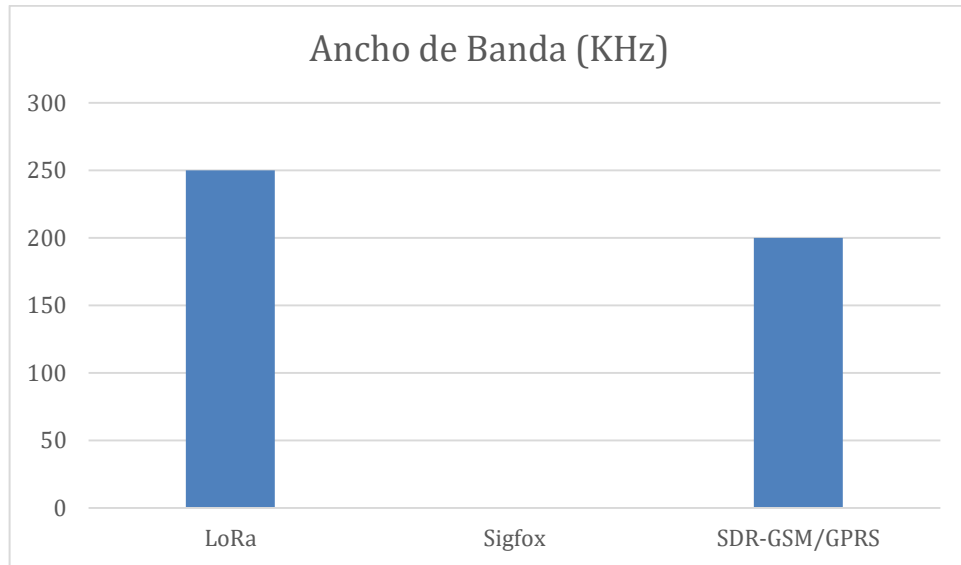


Figura 31. Ancho de Banda de las tres tecnologías. Fuente: [Autor]

Como podemos observar en los resultados la tecnología LoRa junto con la red GSM/GPRS móvil haciendo uso de SDR tienen un ancho de banda mayor con respecto a la tecnología Sigfox, permitiendo transmitir más cantidad de información a mayor velocidad y suplir una mayor demanda de servicios, limitando así a la tecnología Sigfox.

4.3 Comparación por velocidad de Transmisión de las tres tecnologías

TECNOLOGÍA	Data Rate (Kb/s) máximo
LoRa	21,9
Sigfox	0,6
SDR-GSM/GPRS	171,2

Tabla 22. Data Rate máximo de las tres tecnologías. Fuente: [Autor].

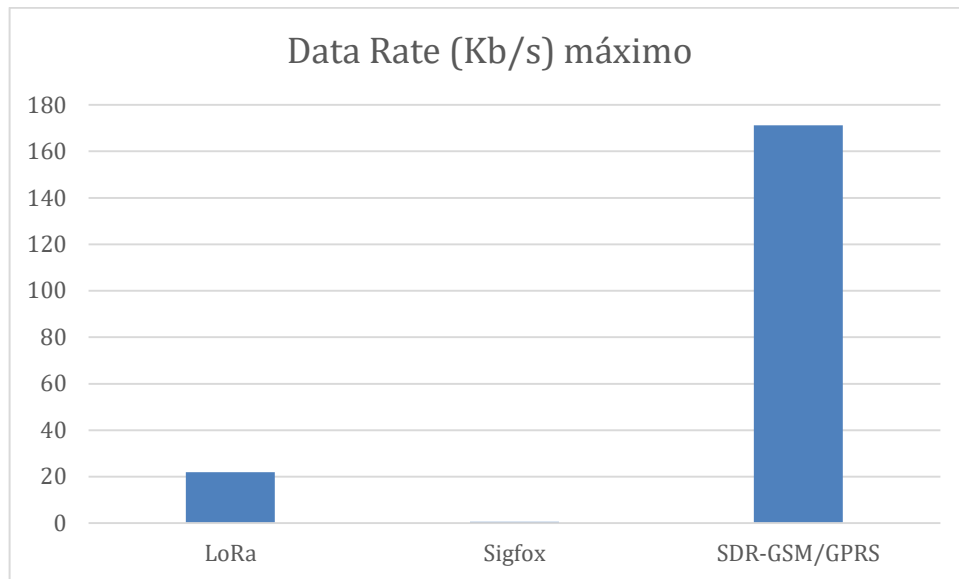


Figura 32. Gráfico de barras de comparación del Data Rate máximo de las tecnologías. Fuente: [Autor]

Como podemos observar el de mayor velocidad de transmisión es SDR-GSM/GPRS, pero a la vez la red LoRa al ser una tecnología de baja potencia y larga cobertura logra un Data Rate bastante interesante y suficiente para los servicios que se requieren.

Sigfox es limitada en su velocidad de transmisión ya que como observamos su ancho de banda es de 100Hz.

4.4 Comparación de costos de las tres tecnologías a nivel de red

Se realizó el cálculo de costo total de infraestructura de red de las tres tecnologías analizadas para las siete sedes de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá.

Precio de las tres tecnologías para el diseño de red	
TECNOLOGÍA	COSTOS
LoRaWAN	\$ 70.803.873
Sigfox Sensores + suscripción	\$ 22.461.530
SDR GSM/GPRS	\$ 32.172.000
Una estación permanente NTRIP	Mayor a \$60.000.000

Tabla 23. Comparación de precios para implementar una red alternativa. Fuente: [Autor].

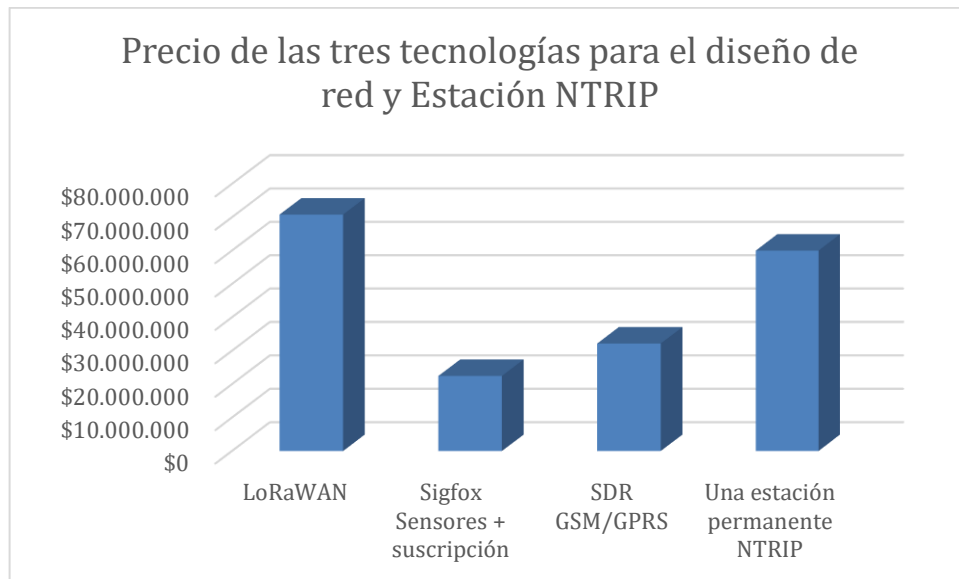


Figura 33. Precio de las tres tecnologías para las siete sedes. Fuente: [Autor]

4.5 Comparación de envío de mensajes entre LoRaWAN y Sigfox

Se realizó un cálculo de cada cuántos minutos las tecnologías podían enviar un mensaje por nodo para realizar una comparación detallada entre LoRa/LoRaWAN y Sigfox. En el caso de Sigfox al ser una red privada su plan ULTRA es de 140 mensajes al día, en este caso se halló el tiempo que dura en enviar un mensaje y a diferencia de LoRa la información encontrada recomienda enviar un mensaje cada 3 minutos como se menciona durante el desarrollo del proyecto, en este caso se hizo el proceso inverso, se calculó cuántos mensajes podía enviar en 24 horas, es decir, en 1.440 minutos. Se hizo una regla de tres. Donde un mensaje equivale a 3 minutos, cuántos mensajes se pueden enviar en 1.440 minutos que tiene 24 horas (un día).

Se usó la siguiente fórmula:

$$1 \text{ mensaje} = 3 \text{ minutos}$$

$$¿ \text{ Cuantos mensajes equivale a? } = 1440 \text{ minutos}$$

$$\text{mensajes en 1440 m (1 día)} = \frac{1 * 1440 \text{ minutos}}{3 \text{ minutos}} = 480 \text{ mensajes}$$

TECNOLOGÍA	CANTIDAD DE MENSAJES AL DÍA	24 HORAS TIENE 1440 MINUTOS	UN MENSAJE (minutos)
Sigfox	140	1440 (minutos) / 140	10,285714285714
LoRa/LoRaWAN	480	1440 (minutos) / 480	3

Tabla 24. Cada cuanto tiempo puede enviar mensajes cada tecnología. Fuente: [Autor].

TECNOLOGÍA	UN MENSAJE (minutos)	MENSAJES QUE PUEDEN ENVIAR (11 MINUTOS)
Sigfox	10,285714285714	1,069444444
LoRa/LoRaWAN	3	3,66

Tabla 25. Comparación en las tecnologías de cantidad de envío de mensajes en un intervalo de tiempo.

Fuente: [Autor].

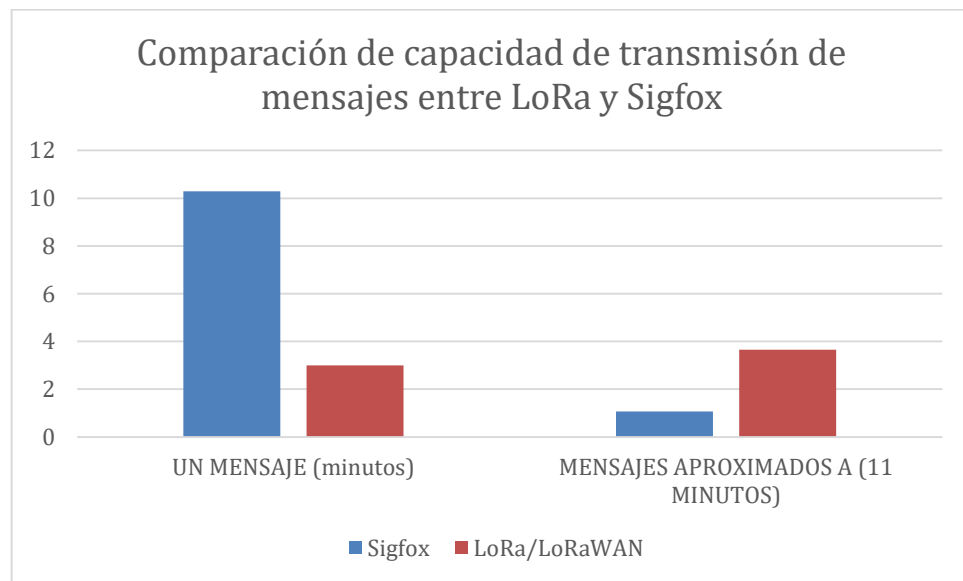


Figura 34. Comparación de cantidad de enviado de mensajes entre las tres tecnologías en un rango de tiempo establecido. Fuente: [Autor]

5. CAPÍTULO V

5.1 Conclusiones

Sigfox se descartó por su limitante en los planes de suscripción, pues uno de los requerimientos de la red por lo que se realizó este análisis, es el envío de coordenadas GPS en tiempo real y no cumple este requerimiento por el máximo de mensajes que puede enviar esta tecnología por día, que es de 140 mensajes.

Implementar una red alternativa GSM por medio de radio definido por software permitiría tener más servicios aparte del envío de coordenadas GPS, pero su mayor limitante es: la pequeña cobertura que logra y que no se puede implementar más de una celda por dispositivo USRP.

LoRaWAN es escalable y se puede usar en múltiples servicios ya que es de uso, implementación y desarrollo libre, siendo ideal para la transmisión de coordenadas GPS. Además, la Empresa podría sacar mayor provecho haciendo uso de sensores aplicados en el análisis y observación de las plantas de tratamiento de agua, temperatura de las plantas, etc.

La cobertura que presta Sigfox en Bogotá no cumple con los requerimientos de la red en dos sedes de la Empresa y además se debe pagar por cada dispositivo que se quiera añadir a la red.

Las tecnologías IoT tienen un impacto considerable en el tráfico de datos que no demandan un ancho de banda grande y altas velocidades de transmisión, siendo ideal para comunicación de sensores que recolectan datos GPS, temperatura, agricultura, etc.

Las tres tecnologías pueden trabajar en frecuencias no licenciadas, es decir de uso libre, permitiendo así ahorrar gastos en alquiler de frecuencias y cumpliendo con uno de los requerimientos del proyecto.

Las tres tecnologías estudiadas prestan un excelente servicio para los requerimientos del proyecto, pero Sigfox es la más limitada a comparación de LoRaWAN y GSM con SDR.

BIBLIOGRAFÍA

Pascual García, José María Molina García-Pardo and Leandro Juan Llácer. SISTEMAS DE COMUNICACIONES MÓVILES

Carlos D. Domínguez Contreras, Liliana Díaz Olavarrieta, David López. Introducción a Software Radio.

Waspote LoRaWAN, disponible en: Introducción a Software Radio. Disponible en: <http://www.libelium.com/downloads/documentation/waspote-lorawan-networking-guide.pdf>

LoRaWAN 1.1 Regional Parameters, Disponible en: https://lora-alliance.org/sites/default/files/2018-04/lorawantm_regional_parameters_v1.1rb_-_final.pdf

Sigfox Technical Overview (mayo 2017), Disponible en: <https://www.disk91.com/wp/uploads/2017/05/4967675830228422064.pdf>

Jhon Jairo Padilla Aguilar, SISTEMAS MOVILES CELULARES, disponible en: <http://jpadilla.docentes.upbbga.edu.co/moviles/10%20SISTEMAS%20MOVILES%20CELULARES.pdf>

Wilmar Yesid Campo Muñoz, Héctor Fabio Bermúdez Orozco, Jhonny Atehortua Ramos, Luis Miguel Casteñada Herrera, Red de comunicaciones móviles mediante radio definida por software y USRP, (marzo 2018), disponible en: <https://pdfs.semanticscholar.org/e843/ddab1c2d992262427c0ac28016ed.pdf>

Melvin Hoyer, conceptos básicos del posicionamiento GNSS en tiempo real. Ntrip y tópicos relacionados con el tema. ftp://ftp.sirgas.org/pub/gps/SIRGAS-RT/03_Hoyer_GNSS_en_Tiempo_Real.pdf

WEBGRAFÍA

LoRa Alliance. Página oficial de la tecnología LoRaWAN donde se encuentra información sobre la tecnología y especificaciones del protocolo LoRaWAN. Disponible en Internet:
<https://lora-alliance.org/>

CNABF Gráfico, Cuando Nacional de Atribución de Bandas de Frecuencia, Disponible en:
http://cnabf.ane.gov.co/cnabf/index.php?option=com_k2&view=item&layout=item&id=6&Itemid=140

El modelo OSI, Disponible en:
<http://www.exa.unicen.edu.ar/catedras/comdat1/material/ElmodeloOSI.pdf>

Fabricio, Modelo OSI vs TCP/IP, Disponible en:
http://espedatacomm.blogspot.com/2011/09/modelo-osi-vs-tcpip_26.html

TECNOLOGÍA LORA Y LORAWAN, Disponible en:
<https://www.catsensors.com/es/lorawan/tecnologia-lora-y-lorawan>

Generaciones de las Tecnologías Móviles, Disponible en:
<https://www.androidestudio.com/2014/10/generaciones-de-las-tecnologias-moviles.html>

Ignacio Mártil, ¿Cómo funcionan las redes inalámbricas de telefonía móvil?, (24 de febrero, 2017), disponible en: <https://blogs.publico.es/ignacio-martil/2017/02/24/como-funcionan-las-redes-inalambricas-de-telefonía-movil/>

Centro de Control de la red, disponible en: <http://ccrmas3g.blogspot.com/p/arquitectura-de-red.html>

TCRobotics, LoRa + TTN: comunicando cosas con Internet, Disponible en:
https://bricolabs.cc/wiki/guias/lora_ttn