Ciencia e Ingeniería Neogranadina 2022 Vol. 32(1) enero-junio 2022 ■ ISSN: 0124-8170 · ISSN-e: 1909-7735 ■ pp. 43-57

Editorial Neogranadina

DOI: https://doi.org/10.18359/rcin.5531

CC BY NC ND

Diseño y análisis sistémico de una red *backhaul* autogestionable en topologías estrella y anillo para conectividad rural en Caldas*

Claudia Lucía Cortés Cortés[a] ■ Mauricio Alejandro Montaño Argote[b] ■ Alejandra María Osorio[c] ■ Neil Guerrero González[d]

Resumen: En este artículo se valida una metodología de diseño de una red inalámbrica de telecomunicaciones para extender la conectividad rural en zonas andinas de Colombia en el marco del posconflicto. La metodología presentada permite el diseño de diferentes tipologías de red de acuerdo con información geográfica de la zona urbano-rural del municipio de Marulanda, localizado en la región de Caldas, Colombia. La conectividad a Internet se entregará a través de una tecnología de telecomunicaciones autogestionable conocida como WiBACK, que admitirá la tecnología futura de comunicación 5G. Así, se comparan las ventajas y desventajas de dos topologías de red y se presenta una proyección de los componentes tecnológicos para la implementación de la red. Los resultados de la investigación diseñarán la hoja de ruta y la evaluación comparativa de los escenarios de expansión de la red de acceso colombiana de banda ancha en escenarios de postconflicto.

Palabras clave: brechas urbano-rurales; conectividad rural; redes *backhaul*

Recibido: 19/12/2020 **Aceptado:** 29/11/2021

Disponible en línea: 03/06/2022

* Este trabajo hace parte del Proyecto "Modelo ecosistémico de mejoramiento rural y construcción de paz. Instalación de capacidades locales" del Programa Reconstrucción del Tejido Social en Zonas de Posconflicto en Colombia. Financiado por el Fondo Nacional de Financiamiento para la Ciencia, la Tecnología y la Innovación, Fondo Francisco José de Caldas, contrato No 213-2018, código 58960.

a Magister en Automatización Industrial. Universidad Nacional de Colombia. Manizales, Colombia. Correo electrónico: clcortesc@unal.edu.co ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5760-9990

b Especialista en Telecomunicaciones. Universidad de Caldas, Manizales, Colombia. Correo electrónico: m.montanho.a@gmail.com ORCID: http://orcid.org/0000-0002-6255-0898

c Maestría en Ecología Humana y Saberes Ambientales. Universidad de Caldas. Universidad de Caldas, Manizales, Colombia. Correo electrónico: alejandram.osorio@ucaldas.edu.co ORCID: http://orcid.org/0000-0003-3235-7058

d Doctor en Fotónica, Universidad Tecnológica de Dinamarca. Universidad Nacional de Colombia sede Manizales, Manizales, Colombia. Correo electrónico: nguerrerog@unal.edu.co ORCID: http://orcid.org/0000-0002-8504-3741

Cómo citar: C. L. Cortés Cortés, M. A. Montaño Argote, A. M. Osorio, y N. Guerrero González, «Diseño y análisis sistémico de una red backhaul autogestionable en topologías estrella y anillo para conectividad rural en Caldas», *Cien.Ing.Neogranadina*, vol. 32, n.º 1, pp. 43-57, jun 2022.

Systemic design and analysis of a self-managed backhaul network in star and ring topologies for rural connectivity in Caldas

Abstract: This article validates a design methodology for a wireless telecommunications network to extend rural connectivity in Andean areas of Colombia in the post-conflict framework. The presented methodology allows the design of different types of networks according to geographic information of the urban-rural area of the municipality of Marulanda, located in the region of Caldas, Colombia. Internet connectivity will be delivered through a self-managing telecommunications technology known as WiBACK, which will support future 5G communication technology. Thus, the advantages and disadvantages of two network topologies are compared and a projection of the technological components for the implementation of the network is presented. The results of the research will design the roadmap and the comparative evaluation of the expansion scenarios of the Colombian broadband access network in post-conflict scenarios.

Keywords: urban-rural gaps; rural connectivity; backhaul networks

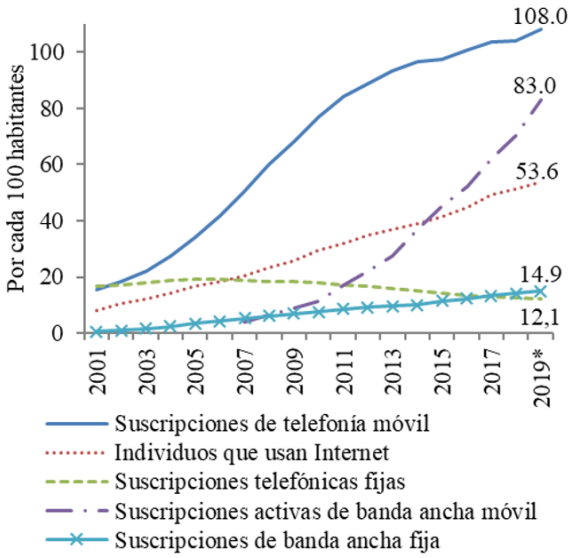
Introducción

A nivel mundial, el uso y acceso a las tecnologías de la información y la comunicación (TIC) se identifican como factores fundamentales para el desarrollo económico y social de cada país. Para países subdesarrollados o emergentes, estos factores, al igual que otros aspectos de la vida, se ven afectados por la desigualdad. Por este motivo, en el año 2015 la Organización de las Naciones Unidas (ONU) mediante los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), presentó los objetivos que regirán el desarrollo estratégico de los países hasta el año 2030. El noveno de los ODS, titulado *Construir infraestructuras resilientes, promover la industrialización inclusiva y sostenible y fomentar la innovación*, en su meta 9.c. establece: "aumentar significativamente el acceso a la tecnología de la información y las comunicaciones y esforzarse por proporcionar acceso universal y asequible a Internet en los países menos adelantados de aquí a 2020" [1, p. 24].

Estadísticas presentadas por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU) sobre el comportamiento de los indicadores de desarrollo mundial de las TIC desde el año 2001 hasta el 2019 [2], muestran los avances en cuanto a suscriptores por cada 100 habitantes para telefonía móvil, uso de Internet, telefonía fija, banda ancha móvil y banda ancha fija. Excepto por las suscripciones a telefonía fija, los indicadores se han incrementado desde la *Declaración del Milenio* en el año 2000 (figura 1), cuando los objetivos previos a los ODS fueron presentados. A pesar de los esfuerzos realizados por los diferentes gobiernos, se evidencian notorias deficiencias en cuanto a conexiones de banda ancha fijas e individuos que usan Internet a nivel mundial.

Frente a este panorama, diferentes instituciones tecnológicas, empresas y organizaciones han avanzado en cuanto al desarrollo de tecnologías que puedan facilitar el acceso a las TIC, e iniciativas económicamente sustentables que permitan conectar áreas rurales, donde reside alrededor del 60% de la población sin conectividad [3]. Tal es el caso de los globos de Google Loon, el dron Aquila de Facebook, satélites de órbita baja, la tecnología WiBACK del Instituto Fraunhofer FIT o los esfuerzos para implementar tecnologías de red celular gratuitas, permitiendo extender a un ritmo más acelerado la cobertura de los operadores móviles a las zonas rurales.

Figura 1. Desarrollo mundial de las TIC, 2001-2019* (*estimado).



Fuente: ITU World Telecommunication / ICT Indicators database [2].

> La brecha digital se comprende como:
>
> la separación que existe entre las personas (comunidades, estados, países…) que utilizan las Tecnologías de Información y Comunicación (TIC) como una parte rutinaria de su vida diaria y aquellas que no tienen acceso a las mismas y que, aunque las tengan no saben cómo utilizarlas [4, p. 8].

Encargarse de la reducción de esta forma parte de la revolución social y económica necesaria para impulsar el desarrollo de la población más vulnerable, brindándoles oportunidades en cuanto a educación, economía, investigación y servicios de salud.

El presente trabajo está enmarcado en el programa de Colombia Científica: *Reconstrucción del Tejido Social en Zonas de Posconflicto*, y uno de sus objetivos es integrar servicios de conectividad a modelos de desarrollo rural mediante el diseño de una red de retorno para extender la conectividad a las zonas rurales del municipio de Marulanda en el departamento de Caldas, Colombia. La estrategia

de *backhauling* estudiada es WiBACK [5], la cual fue presentada en el año 2016 por el Instituto Fraunhofer de Tecnología de Información Aplicada (FIT), con la virtud de estar diseñada con características de Redes Definidas por Software (SDN) [5]. Además, posee ventajas asociadas a la instalación rápida y expandible de la infraestructura, así como la reconfiguración del ancho de banda.

La conectividad en Colombia

En Colombia, el Departamento Nacional de Planeación (DNP) de la mano con el Ministerio de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (MinTIC) plantea las metas proyectadas para el cumplimiento del noveno objetivo (meta 9.c.) de los Objetivos del Desarrollo Sostenible (ODS) [6]. A nivel público, desde el año 2010, MinTIC ha llevado a cabo su proyecto *Plan Vive Digital para la Gente*, dividido en cuatro componentes: usuarios, infraestructura, servicios y aplicaciones. Cada uno está enfocado en desarrollar iniciativas para construir un ambiente digital. El componente de usuarios busca fomentar la cultura digital y el uso y apropiación de las TIC por parte de la ciudadanía mediante el programa *Redvolución* [7] y los cursos de formación en competencias y certificaciones TIC.

El componente de infraestructura, uno de los más importantes, plantea iniciativas para la ampliación de infraestructura de red con el *Proyecto Nacional de Fibra Óptica*, que tiene como objetivo conectar 788 municipios para mejorar la cobertura de servicios a nivel nacional. Otro proyecto es el *Proyecto Nacional de Conectividad de Alta Velocidad* con el objetivo dar cobertura del 100% a municipios del país. Además, también se cuenta con proyectos como *Conexiones Digitales*, que busca prestar servicios de banda ancha a hogares de estratos 1 y 2; *Kioscos Vive Digital*, para brindar acceso público a las TIC en comunidades rurales; *Puntos Vive Digital*, para formar a la ciudadanía en competencias digitales en las diferentes cabeceras urbanas; y el proyecto de *Zonas Wifi Gratis para la Gente*, que brinda conexión a Internet gratuita en espacios públicos de mayor concurrencia en los diferentes municipios del país. En cuanto al acceso a la televisión pública se tienen iniciativas para brindar acceso universal a este servicio mediante el uso de la tecnología TDT (Televisión Digital Terrestre).

Por su parte, el componente de servicios define la calidad de las conexiones de banda ancha e iniciativas para fortalecer tanto a la industria de las tecnologías de la información como a las MiPyMEs (Micro, pequeñas y medianas empresas). Un ejemplo de este componente es la iniciativa *Computadores para Educar*, la cual busca contribuir al cierre de la brecha digital y de conocimiento en las sedes educativas públicas del país por medio de herramientas tecnológicas.

Por otro lado, el componente de aplicaciones busca impulsar la industria de aplicaciones y contenidos. Por ejemplo, por medio de la iniciativa *Apps.co* se promueve y potencia el emprendimiento, creando ambientes de negocio y desarrollo de habilidades. A su vez, se fomenta la creación de contenidos digitales para las industrias creativas. Por último, con la iniciativa TIC *y Agro* se busca que a través del uso y apropiación de las TIC se dinamice la interacción de los productores agropecuarios para que puedan tomar mejores decisiones de planificación predial, administración del agronegocio, siembra, recolección, uso eficiente del suelo y el agua, entre otros. Esto con el objetivo de reducir riesgos inherentes a su actividad agropecuaria y cerrar las brechas productivas [8].

En complemento al *Plan Vive Digital*, en el año 2016 MinTIC en alianza con la compañía Microsoft realizaron tres pruebas piloto con la tecnología TVWS, donde se conectaron a Internet de banda ancha a tres escuelas en zonas rurales en los municipios de Dibulla-La Guajira, Pamplonita-Norte de Santander y Aguadas-Caldas. Como resultado, se logró llevar Internet a más de 200 estudiantes, lo cual impulsó la necesidad de generar normativas para regular la utilización de los espacios blancos de televisión [9].

En ese mismo sentido, empresas privadas han mostrado sus esfuerzos para la reducción de la brecha digital en Colombia. Por ejemplo, la compañía Blazing Soft en unión con el Instituto Alemán Fraunhofer-Gesellschaft implementaron la tecnología WiBACK en el municipio de la Jagua de Ibirico en el departamento de Cesar. Donde, con el proyecto *Nativos Digitales,* lograron llevar

conexión de banda ancha a una escuela, promoviendo así la apropiación tecnológica y el desarrollo de competencias pedagógicas. También, la compañía Blazing Soft en unión con el Instituto Alemán Fraunhofer-Gesellschaft, y en cooperación con el Centro de Investigación de la Caña de Azúcar en Colombia (Cenicaña), iniciaron una prueba piloto de esta tecnología en la Red Meteorológica Automatizada (RMA), donde el acceso a Internet era difícil mediante la infraestructura convencional.

A nivel nacional, estas iniciativas han sido motor de avance en la construcción de un mejor país y factor clave en el cierre de la brecha digital. Sin embargo, se deben tener en cuenta las necesidades y respectivas soluciones en cuanto a dispositivos de última milla y suministros de energía.

Dinámicas territoriales en el municipio de Marulanda, Caldas (Colombia)

El municipio de Marulanda se localiza en la subregión Alto Oriente del departamento de Caldas. Abarca una extensión de 378 km^2, predominando el clima frío, y con una altitud media de 2825 m.s.n.m. El municipio cuenta con una población de 2544 habitantes. De ellos, el 31.3% se ubican en la zona urbana y el 68.7% en la zona rural [10]. Según el Registro Único de Víctimas (RUV), con corte al 10 de julio de 2020 se registraron 749 personas que manifestaron ser victimizadas por hechos durante el conflicto armado [11].

La economía local es agrícola. Los principales cultivos transitorios son la papa (con 4559 toneladas por año), el frijol (76 toneladas por año) y el maíz (72 toneladas por año). Mientras que los principales cultivos permanentes son el plátano (308 toneladas por año) y el café (204 toneladas por año) [12]. El 84.88% de las Unidades de Producción Agropecuaria (UPA) cuentan con acceso a riego [13]. Este es uno de los porcentajes más altos del país debido al potencial hídrico de la subregión que también es aprovechado para la generación de energía hidroeléctrica, como es el caso de la Pequeña Central Hidroeléctrica (PCH) en Montebonito que cuenta con licencia ambiental [14].

Uno de los retos de política pública en el municipio es la emigración de las personas que en su edad productiva salen del territorio para buscar mejores oportunidades de empleo y formación en las ciudades. Esta situación se evidencia en la disminución de la población desde el año 2005 al año 2020. De acuerdo con el censo del 2005, la población del municipio era de 3489 habitantes [15], en 2014 la población disminuyó a 3410 habitantes y en 2018 la población continuó reduciendo significativamente hasta llegar a 2702 personas [16]. Es decir que durante cuatro años la emigración fue de 708 habitantes. A inicios del año 2020 la población total era de 2544 personas.

Marulanda cuenta con dos instituciones educativas. En el casco urbano se localiza la Institución Efrén Cardona Chica, la cual contaba con ocho sedes y 360 estudiantes matriculados para febrero 25 de 2019 [17]. La Institución Educativa Montebonito cuenta con cinco sedes que prestan los servicios de preescolar, básica primaria, secundaria y media técnica agropecuaria. El servicio de salud es prestado por el Hospital San José de Marulanda y el Centro de Salud de Montebonito, cuya infraestructura se encuentra deteriorada y hay falencias de equipamiento [17], razones que hacen que las comunidades tengan una percepción de abandono por parte del Estado.

Según el documento diagnóstico *Plan de Desarrollo Marulanda 2020-2023* [17], el municipio contó en su momento con el programa *Vive Digital*, pero actualmente este programa se encuentra fuera de servicio. Adicionalmente, el único operador de Internet presta el servicio por lo menos a 130 usuarios de la comunidad y a las instituciones, incluida la administración municipal. Sin embargo, la conexión carece de calidad.

Conceptos técnicos en el diseño de una red

El diseño de una red de comunicaciones cableada o inalámbrica siempre busca ofrecer, entre otras cosas, las mejores prestaciones en seguridad, ancho de banda y disponibilidad a los usuarios. La disponibilidad en la red es uno de los aspectos que más puede impactar a los usuarios, debido a que es el tiempo promedio durante el cual podrán o no acceder a los recursos de la red. Lo que se traduce

en una buena o mala experiencia y es expresado en porcentaje [19].

Para mantener una red disponible, su diseño debe prever que el funcionamiento se vea afectado el menor tiempo posible ante la presencia de una falla, y que la cantidad de equipos y usuarios afectados también sea mínima [20]. Uno de los métodos para mantener una alta disponibilidad en una red es tener redundancia de dispositivos y rutas de enlace como respaldo en caso de que la principal esté fuera de línea, bien sea por fallas, mantenimientos programados o incluso trabajos de ampliación de la misma red. Sin embargo, tener una redundancia completa para una red puede incrementar considerablemente los costos de implementación y operación, dependiendo de las características y el tamaño de esta. Por tal motivo, se hace importante escoger apropiadamente la topología que mejor se adapte a las necesidades específicas, ya que definir cómo se interconectan físicamente los nodos de la red no solo repercute en costos económicos, sino también en el desempeño de la red [19]. Son cuatro las topologías básicas que se pueden implementar en redes inalámbricas, y que también pueden ser combinadas para dar origen a redes más complejas [21]. Estas son: lineal, estrella, anillo y malla.

La conexión con topología lineal es la forma más básica; está comprendida por una o más conexiones punto a punto; una falla en cualquier enlace afecta a los nodos conectados posteriormente en la serie. La ventaja que tiene la conexión con topología estrella sobre la lineal es que, al estar los nodos secundarios directamente al principal, transcurre menos tiempo entre el momento del envío y la recepción de datos. Este concepto se conoce como latencia en la comunicación [22]. Lo anterior se debe a que no existen retransmisiones entre el origen y el destino, pero una falla en el enlace dejaría fuera de comunicación a dicho nodo y solo a ese.

Por su parte, con la topología en anillo, si hubiese problema con un enlace la comunicación se realizaría por el otro lado de la red hasta alcanzar el nodo de destino. Lo que hace que este sistema pueda tolerar la falla de algún enlace gracias a que tiene rutas redundantes. Sin embargo, el precio que se debe pagar por esa tolerancia a fallas es el tiempo que se agrega a la comunicación por las retransmisiones que se realizan en el camino. He ahí la importancia de la capacidad de los equipos de comunicación para hacer el enrutamiento con la menor latencia posible. Por último, la topología en malla ofrece una tolerancia a fallas aún mayor que la topología en anillo, ya que podrían haber más de dos rutas redundantes para comunicar dos nodos cualesquiera. No obstante, tiene el inconveniente de ser la solución más costosa. Pues tiene la mayor cantidad de enlaces y requiere más antenas para dicho propósito y, dado el caso, transmisores con capacidad para conectar antenas extras, dependiendo de la cantidad requerida; lo que también se traduce en mayor carga de trabajo para los equipos en procesamiento.

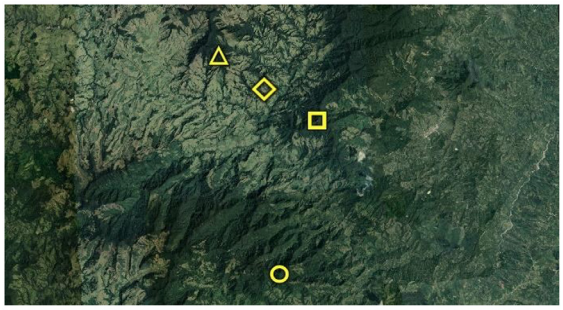
La tolerancia a fallas por redundancia de enlaces es una de las propiedades más importantes en una arquitectura de red. Esta facilita mantener el servicio a los usuarios, pudiendo acceder a sus recursos aun cuando se presente la desconexión de uno de sus nodos, permitiendo así eliminar o reducir en gran medida el impacto de las fallas mientras se recupera la operatividad y reconexión a la red [23]. Un sistema de tolerancia a fallas puede cubrir varios aspectos técnicos, dependiendo de para qué falla se quiere estar preparado. Entre estos aspectos, se encuentra el suministro de energía eléctrica, utilizando UPS o fuentes de energía renovables como la fotovoltaica [24]. Es posible tener varios canales suministrados por diferentes proveedores si se necesita mantener una alta disponibilidad en el acceso a Internet. Por supuesto, la implementación de estas técnicas de respaldo implican costos adicionales que se deben tener en cuenta a la hora de decidir cuáles se implementarán, sabiendo primero la disponibilidad requerida y qué tan indispensable es según el propósito de uso de la red.

Diseño de una red *backhaul* rural WiBACK para el municipio de Marulanda, Caldas (Colombia)

El diseño de una red *backhaul* capaz de multiplicar la cobertura del servicio de Internet desde la cabecera municipal hasta el corregimiento

de Montebonito, donde se ubican las principales instituciones educativas del municipio, brindará grandes beneficios y oportunidades a la población. Con el propósito de diseñar una red robusta, a continuación se presenta el diseño de una red *backhaul* rural WiBACK tolerante a fallos. La red diseñada se localiza en Marulanda, Caldas. En la figura 2 se presenta la ubicación geográfica del nodo principal (rombo), ubicado en la cabecera municipal de Marulanda (lugar donde se puede tomar la conexión del servicio de Internet para su distribución hacia las zonas rurales escogidas), y tres nodos secundarios ubicados en zonas rurales pertenecientes al mismo municipio: Las tres Ave Marías (triángulo), El Castillo (cuadrado) y Montebonito (círculo). Las coordenadas geográficas de cada nodo se presentan en la tabla 1.

Figura 2. Ubicación geográfica de las poblaciones donde se instalarán torres.



Fuente: imagen generada en Google Earth Pro.

Tabla 1. Coordenadas y referencia poblaciones ubicadas en la figura 3.

Población	Latitud	Longitud	Símbolo
Marulanda	5.284206°	-75.260045°	Rombo
Las tres Ave Marías	5.306297°	-75.286508°	Triángulo
El Castillo	5.261678°	-75.228942°	Cuadrado
Montebonito	5.167813°	-75.256926°	Círculo

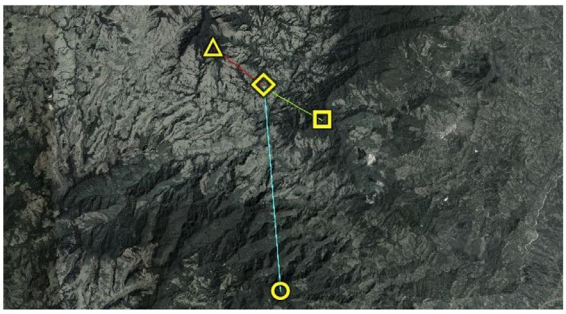
Fuente: elaboración propia.

Según la distribución geográfica de las poblaciones objetivo, se presenta un primer escenario para diseñar la red con topología en estrella, ya que todos los nodos secundarios se pueden conectar directamente al nodo principal en la cabecera municipal de Marulanda. Adicionalmente, las cualidades técnicas de la tecnología WiBACK permiten implementar diseños de redes más exigentes que enlaces punto a punto conectados directamente al nodo principal [25]. Bondades como la capacidad de cálculos de mejores rutas, la baja latencia en retransmisiones y la autorecuperación de enlaces son características que presentan un segundo escenario para diseñar la red con topología en anillo. En el segundo escenario, cada nodo se conecta a su respectivo vecino. La redundancia de enlaces físicos da a la red la característica de tolerancia a fallos.

Escenario 1: diseño de red con topología en estrella

La red con topología en estrella consta de tres enlaces punto a punto entre cada uno de los nodos secundarios (ubicados en los sitios rurales) y el nodo principal como se aprecia en la figura 3 y se describe en la tabla 2.

Figura 3. Enlaces de red con topología en estrella.



Fuente: elaboración propia.

Tabla 2. Identificación de enlaces en topología estrella.

Origen	Destino	Símbolos
Marulanda	Las tres Ave Marías	Rombo - Triángulo
Marulanda	El Castillo	Rombo - Cuadrado
Marulanda	Montebonito	Rombo - Círculo

Fuente: elaboración propia.

El modelo básico de un nodo WiBACK tiene la capacidad de incorporar hasta dos antenas, permitiendo establecer conexión con otros dos nodos inalámbricamente. En el escenario planteado, se hace necesario disponer de un segundo nodo en la

ubicación del nodo principal para tener cobertura completa sobre las tres zonas rurales escogidas. Dejando la disponibilidad para un cuarto enlace en caso de una futura expansión de la red.

Dado que la conexión entre nodos geográficamente distantes se hace de manera inalámbrica a través de las antenas, los nodos WiBACK están equipados con un puerto ethernet que les permite: i) integrarse a una red LAN (a través un *switch, router,* transceptor de fibra óptica u otro), y ii) recibir el suministro eléctrico para el funcionamiento del equipo a través del mismo puerto. El puerto Ethernet cuenta con la tecnología PoE (*Power over Ethernet*) regulada por la norma 802.3at de IEEE [26]. Esta característica hace posible que dos nodos ubicados en una misma estructura de soporte, bien sea torre, mástil u otro, puedan formar un clúster, interconectando las interfaces LAN de sus respectivos inyectores PoE con un cable de red. Crear un clúster en el nodo principal y distribuir la señal directamente a los tres nodos secundarios es necesario para formar la red con topología estrella. En la tabla 3 se presenta la distribución de los equipos de comunicación en las diferentes locaciones.

Tabla 3. Cantidades de equipos de comunicación por cada sitio.

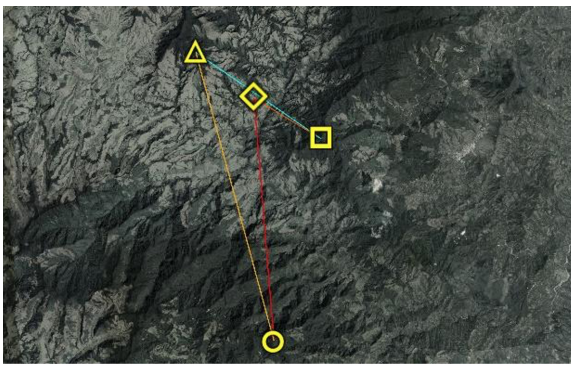
Población	Nodos	Antenas
Marulanda	2	3
Las tres Ave Marías	1	1
El Castillo	1	1
Montebonito	1	1

Fuente: elaboración propia.

Escenario 2: diseño de red con topología en anillo

La red con topología en anillo requiere que cada uno de los cuatro nodos que conforman la red esté conectado con otros dos nodos. De forma que el último nodo de la cadena se enlace con el penúltimo nodo y "cierre" el anillo con el primer nodo. Para conformar una red en anillo con esta misma distribución de nodos, se varía el orden de origen y destino de cada enlace con respecto a la tabla 2. En la figura 4 se presentan los enlaces de la red con topología en anillo, y en la tabla 4 se presentan cómo están conformados los enlaces.

Figura 4. Enlaces de red con topología en anillo.



Fuente: elaboración propia.

Tabla 4. Identificación de enlaces en topología anillo.

Origen	Destino	Símbolos
Marulanda	El Castillo	Rombo - Cuadrado
Las tres Ave Marías	El Castillo	Triángulo - Cuadrado
Las tres Ave Marías	Montebonito	Triángulo - Círculo
Marulanda	Montebonito	Rombo - Círculo

Fuente: elaboración propia.

La ventaja de este modelo de topología es la capacidad de tolerancia a falla ante la desconexión de alguno de sus nodos, a excepción del nodo principal. En el evento de la pérdida de uno de los enlaces, bien sea por un mantenimiento programado o por una falla, los demás enlaces se mantendrían activos al haber una ruta de respaldo. Esta capacidad es de gran importancia en redes con planificación de crecimiento en el futuro, debido a que los nodos que no están conectados directamente al nodo principal, sino a través de uno o varios secundarios, tendrán su conexión supeditada a la disponibilidad de estos nodos intermedios.

Resultados de la simulación de red *backhaul* rural WiBACK en el municipio de Marulanda, Caldas (Colombia)

Para realizar las simulaciones se tuvieron en cuenta las mismas características técnicas de los equipos de comunicación (WiBACK Node II) para las cuatro poblaciones. Dado que se proyecta el uso de los mismos modelos de nodos WiBACK [27]: dispositivos de transmisión/recepción para redes inalámbricas diseñadas especialmente para su implementación en zonas rurales y de difícil acceso gracias, tanto a la facilidad para su instalación y operación, como a su mínima necesidad de mantenimiento; lo que ha conducido a su uso en diferentes países de Europa, África y América. En la tabla 5, se muestran tales características que son requeridas por el software Radio Mobile.

Tabla 5. Características técnicas de equipos de comunicación.

Característica	Valor	Unidad
Potencia máxima del transmisor	30	dBm
Sensibilidad del receptor	-96	dBm
Ganancia de las antenas	23	dBi
Frecuencia de transmisión	5725	MHz

Fuente: elaboración propia.

Nota: Según la cantidad de enlaces requerido para cada sitio y su ubicación geográfica, variará la altura de la estructura de soporte de las antenas, además de las cantidades de nodos y antenas.

En las siguientes tablas de datos de simulaciones se muestran los datos calculados por el software simulador de radioenlaces, Radio Mobile. Se debe tener presente que la distancia calculada en base a las coordenadas de cada sitio varía para cada simulación y tiene una precisión de ±10 m. También se muestra la frecuencia utilizada, que se mantiene en el mismo valor para todas las simulaciones siguientes. Al igual que el PIRE y la ganancia del sistema, pues son calculados con los mismos datos de la tabla 5. Los datos de señal recibida y margen de escucha de señal son valores que sí serán propios de cada enlace simulado.

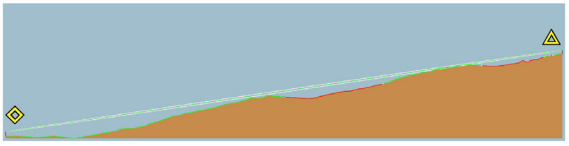
Escenario 1: red con topología en estrella

Para usar la topología en estrella, todos los nodos secundarios deben estar conectados directamente al nodo principal, para este caso de estudio: Marulanda. El cual, por su condición de cabecera municipal, debe estar dentro de la cobertura de la fibra óptica nacional. Por lo tanto, este tiene acceso al suministro de Internet que sería utilizado para distribuir a sus zonas rurales.

Enlace Marulanda-Las tres Ave Marías

A pesar de que este primer enlace es de solo 3.82 km, debido a la topografía del terreno, es necesario utilizar dos torres con 39 m de elevación cada una para instalar las antenas y así evitar las pérdidas en la señal por obstáculos (figura 5). No obstante, el nivel de señal recibida de -86.35 dBm es viable para la recepción y mantiene un margen de escucha de señal de 9.65 dBm con respecto a la capacidad del receptor (-96 dBm, ver tabla 6).

Figura 5. Enlace Marulanda-Las tres Ave Marías



Fuente: elaboración propia.

Tabla 6. Resultado de simulación del enlace Marulanda-Las tres Ave Marías en software Radio Mobile.

Parámetro	Valor	Unidad
Distancia	3.82	km
Precisión	10	m
Frecuencia	5725	MHz
pire	1	W
Ganancia del sistema	146	dB
Fiabilidad	70	%
Señal recibida	-86.35	dBm
Margen de escucha de señal	9.65	dB

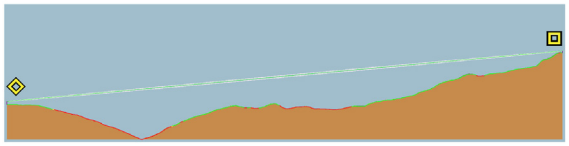
Fuente: elaboración propia.

Enlace Marulanda-El Castillo

Al ser una topología estrella y todos los nodos secundarios tener una conexión a Marulanda, se desarrollan las simulaciones restantes con la misma altura de torre de este sitio que fue calculada en la simulación del enlace Marulanda-Las tres Ave Marías. Sin embargo, la elevación para la antena de El Castillo es suficiente con 21 m para un enlace posible, ya que no se presentan obstáculos de gran altura como se puede apreciar en la figura 6.

Según los cálculos realizados por el simulador (tabla 7), este enlace tiene un mejor nivel de señal recibida comparado a la del enlace Marulanda-Las tres Ave Marías. A pesar de que este último tiene una distancia menor. La razón de esta diferencia es que, en la mayor parte del recorrido de la señal, esta se encuentra más cercana al suelo debido a la topografía de dicha zona. Lo que la hace más propensa a tener pérdidas por reflexión de la señal transmitida en algunas superficies [28]. Al final, esto también afecta en el valor del margen de escucha de señal que, para este segundo enlace, es de 18.87 dB.

Figura 6. Enlace Marulanda-El Castillo.



Fuente: elaboración propia.

Tabla 7. Resultado de simulación del enlace Marulanda-El Castillo en software Radio Mobile.

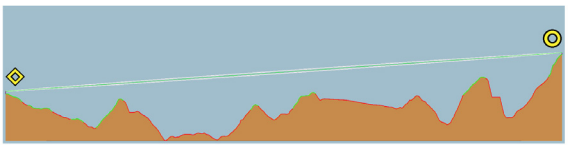
Parámetro	Valor	Unidad
Distancia	4.25	km
Precisión	10	m
Frecuencia	5725	MHz
pire	1	W
Ganancia del sistema	146	dB
Fiabilidad	70	%
Señal recibida	-77.13	dBm
Margen de escucha de señal	18.87	dB

Fuente: elaboración propia.

Enlace Marulanda-Montebonito

El tercer enlace es el más largo de esta topología con una distancia de 12.94 km. A pesar de ello, el nivel de la señal recibida tiene una medida dentro de la sensibilidad de recepción (tabla 7) al ser un enlace totalmente despejado y línea de vista clara con la antena de Montebonito soportada sobre una torre de 21 m. En la figura 8 se puede observar que las elevaciones de terreno en el recorrido de la señal están alejadas de la representación gráfica de esta.

Figura 7. Enlace Marulanda-Montebonito.



Fuente: elaboración propia.

Tabla 8. Resultado de simulación del enlace Marulanda-Montebonito en software Radio Mobile.

Parámetro	Valor	Unidad
Distancia	12.94	km
Precisión	10	m
Frecuencia	5725	MHz
pire	1	W
Ganancia del sistema	146	dB
Fiabilidad	70	%
Señal recibida	-85.63	dBm
Margen de escucha de señal	10.37	dB

Fuente: elaboración propia.

Escenario 2: red con topología en anillo

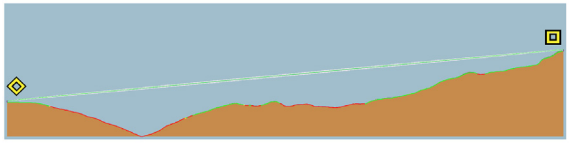
A diferencia de la topología en estrella, en esta topología no todos los nodos se conectan al principal, sino que cada uno está enlazado con dos nodos "vecinos" y estos, a su vez, hacen lo mismo con otros nodos. Hasta que el último nodo cierre la secuencia conectándose al primer nodo del enlace (nodo principal), formando así un anillo en su diagrama de conexión. Al ser una red con solo cuatro nodos,

varios de los enlaces necesarios pueden coincidir para una topología u otra. Sin embargo, al haber variantes en algunos de ellos, puede influir para alterar el dimensionamiento del resto de enlaces.

Enlace Marulanda-El Castillo

El Enlace Marulanda-El Castillo es una de las conexiones que coinciden con las realizadas en la topología estrella (escenario 1). Pero a diferencia de aquella, en esta topología no existe el enlace Marulanda-Las tres Ave Marías que demandaba una torre con elevación de 39 m en el nodo principal, debido a la topografía de ese terreno. Lo que condicionaba la elevación en este punto para las demás conexiones. Esto da como resultado que la simulación de este primer enlace en topología en anillo no requiera de tanta elevación, sino que puede ser un enlace exitoso con 21 m de altura en ambos extremos (figura 8). Comparando la tabla 9 con la tabla 7 se observan los mismos resultados en las simulaciones, aun habiéndo disminuido la altura de la torre en Marulanda.

Figura 8. Enlace Marulanda-El Castillo.



Fuente: elaboración propia.

Tabla 9 . Resultado de simulación del enlace Marulanda-El Castillo en software Radio Mobile.

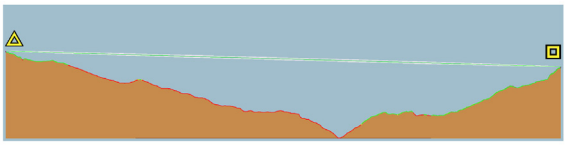
Parámetro	Valor	Unidad
Distancia	4.25	km
Precisión	10	m
Frecuencia	5725	MHz
pire	1	W
Ganancia del sistema	146	dB
Fiabilidad	70	%
Señal recibida	-77.13	dBm
Margen de escucha de señal	18.87	dB

Fuente: elaboración propia.

Enlace Las tres Ave Marías-El Castillo

Como segundo enlace del anillo, la conexión que parte desde El Castillo es posible con 21 m de elevación en destino a Las tres Ave Marías, dado que hay una línea de vista sin obstrucciones como se muestra en la figura 9. Esto permite que la señal se degrade muy poco y deje un gran margen de escucha de señal (tabla 10) en la trayectoria de 8.07 km.

Figura 9. Enlace Las tres Ave Marías-El Castillo.



Fuente: elaboración propia.

Tabla 10. Resultado de simulación del enlace Las tres Ave Marías-El Castillo en software Radio Mobile.

Parámetro	Valor	Unidad
Distancia	8.07	km
Precisión	10	m
Frecuencia	5725	MHz
pire	1	W
Ganancia del sistema	146	dB
Fiabilidad	70	%
Señal recibida	-83.18	dBm
Margen de escucha de señal	15.52	dB

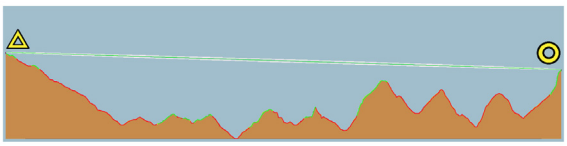
Fuente: elaboración propia.

Enlace Las tres Ave Marías-Montebonito

Tras recibir la señal de El Castillo, Las tres Ave Marías completa su segundo enlace con Montebonito, localizado a 17.74 km. A pesar de haber varias elevaciones en el terreno sobre el que viaja la señal, esta llega a su destino sin pérdidas por obstrucción, gracias a que las alturas donde están situados los nodos son aún mayores que la de las montañas en medio (figura 10). Este es el enlace

de mayor longitud en la red, alcanzando 78,71% de la capacidad máxima de los nodos WiBACK (20 km). Lo cual muestra su efecto en la señal recibida, evidenciando una diferencia mayor que con los demás enlaces. En la simulación de la tabla 11 se muestra un nivel de señal recibida de -87.48 dBm.

Figura 10. Enlace Las tres Ave Marías-Montebonito.



Fuente: elaboración propia.

Tabla 11. Resultado de simulación del enlace Las tres Ave Marías-Montebonito en software Radio Mobile.

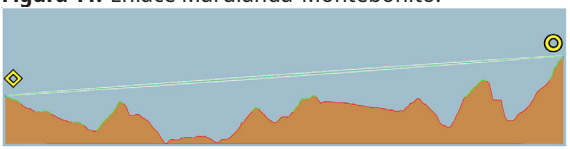
Parámetro	Valor	Unidad
Distancia	15.74	km
Precisión	10	m
Frecuencia	5725	MHz
pire	1	W
Ganancia del sistema	146	dB
Fiabilidad	70	%
Señal recibida	-87.48	dBm
Margen de escucha de señal	8.52	dB

Fuente: elaboración propia.

Enlace Marulanda-Montebonito

El enlace que "cierra" el anillo es una variación del otro enlace simulado entre Marulanda y Montebonito (escenario 1). Que, a su vez, tiene la misma alteración que se hace en el otro enlace que involucra a Marulanda en el escenario 2 (enlace Marulanda-El Castillo). Es decir, la disminución de 39 m a 21 m en la altura requerida para la instalación de las antenas. En el trayecto de esta transmisión, el terreno tiene mayores elevaciones e irregularidades que en los otros enlaces (figura 11). Al hacer la comparación de los datos en los ítems de señal recibida en las tablas 8 y 12 se encuentran valores de -85.63 dBm y -87.36 dBm, respectivamente. Evidenciando una desmejora de 1.73 dBm con solo variar la altura en Marulanda y manteniendo la misma en Montebonito.

Figura 11. Enlace Marulanda-Montebonito.



Fuente: elaboración propia.

Tabla 12. Resultado de simulación del enlace Marulanda-Montebonito en software Radio Mobile.

Parámetro	Valor	Unidad
Distancia	12.94	km
Precisión	10	m
Frecuencia	5725	MHz
pire	1	W
Ganancia del sistema	146	dB
Fiabilidad	70	%
Señal recibida	-87.36	dBm
Margen de escucha de señal	8.64	dB

Fuente: elaboración propia.

Conclusiones

Una vez contempladas dos posibles topologías de red para implementación, se presentan también dos aspectos a analizar. El primero es el de las cantidades de equipos de comunicación y la infraestructura de soporte. En las siguientes tablas se puede ver consolidada la información de cantidades de equipos de comunicación e infraestructura de soporte por topología.

Tabla 13. Cantidades con topología en estrella.

Ubicación	Antenas	Nodos	Torre (m)
Marulanda	3	2	39
El Castillo	1	1	21
Las tres Ave Marías	1	1	39
Montebonito	1	1	21
Total	6	5	120

Fuente: elaboración propia.

Tabla 14. Cantidades con topología en anillo.

Ubicación	Antenas	Nodos	Torre (m)
Marulanda	2	2	21
El Castillo	2	1	21
Las tres Ave Marías	2	1	21
Montebonito	2	1	21
Total	8	4	84

Fuente: elaboración propia.

En cuanto a funcionalidad, ambas topologías presentan cualidades diferentes, y la mejor opción dependerá de las necesidades propias de la red. La topología en estrella tiene como primera ventaja que todos los nodos secundarios están conectados directamente al nodo principal, lo que evita agregar latencias en retransmisiones si hubiese uno más nodos intermedios. Por lo tanto, se hace más rápida la transmisión. La segunda ventaja, con respecto a la topología en anillo y usando nodos con solo dos salidas para antenas, es que la topología en estrella únicamente utiliza una de estas para conectarse al nodo principal antes mencionado. De manera que la segunda salida para antena queda disponible para un futuro crecimiento de la red, agregando un segundo enlace. Si bien, tener enlaces sin retransmisiones mejora el tiempo de la comunicación, el hecho de no tener una conexión de respaldo, la deja vulnerable ante un fallo hasta que sea restablecido.

Por su parte, la topología en anillo destaca porque cada nodo secundario usa doble enlace. Cada uno con un nodo vecino diferente, bien sea con el nodo principal y un secundario o ambos nodos vecinos secundarios. Al usar dos enlaces, uno sirve de respaldo para el otro en caso de que alguno presente una desconexión. Pues el software de autogestión del controlador WiBACK se encarga de identificar la falla y reenrutar la comunicación por una vía activa. Esta opción cobra importancia cuando la alta disponibilidad es una característica necesaria en la red. No obstante, al utilizar estos doble enlaces no queda la opción para hacer crecer la red a partir del mismo nodo, sino que se hace necesario agregar otro para crear un clúster o reemplazarlo con un modelo con más salidas para antenas acorde a la necesidad.

Otro aspecto a considerar en las redes con topología en anillo es que solo habrá dos nodos secundarios conectados directamente al nodo principal y, en una red grande, esto puede representar un crecimiento en la latencia de la transmisión proporcional a la cantidad de nodos. Puesto que cada nodo intermedio debe recibir y reenviar la información hasta llegar a su destino. En una red como la de este caso de estudio, solo el nodo de Montebonito recibiría la señal con retransmisión (de El Castillo o Las tres Ave Marías) en operación sin fallas, dado que solo son cuatro nodos en la red. Además, de acuerdo con la guía técnica de los nodos WiBACK, cada retransmisión agrega 2 ms de latencia y, en una red con diez de ellas, resultaría con 20 ms de latencia, lo que puede ser considerado como baja o alta según las aplicaciones utilizadas en la red.

Referencias

[1] Asamblea General de la Organización de las Naciones Unidas, "Transformar nuestro mundo: la agenda 2030 para el desarrollo sostenible", 2015. https://unctad.org/meetings/es/SessionalDocuments/ares70d1_es.pdf

[2] Estadísticas Unión Internacional de Telecomunicaciones, itu*: Committed to connecting the world*. [En línea]. Disponible en: https://www.itu.int/en/ITU-D/Statistics/Pages/stat/default.aspx [Accedido: 04-oct-2020]

[3] Fraunhofer Institute for Applied Information Technology, "Connecting the unconnected-tackling the challenge of cost-effective broadband Internet in rural areas", 2019. https://www.wiback.org/content/dam/wiback/en/documents/Study_Connect%20the%20Unconnected_2019.pdf

[4] A. Santoyo y E. Martínez. La brecha digital: mitos y realidades. Mexicali: Editorial UABC, 2003.

[5] C. Niephaus O. G. Aliu, Kretschmer M *et al.,* "WiBACK: a back-haul network architecture for 5G networks", *Int. Conf. on Front. of Commun. Net. and Appl,* pp. 1-6, 2014. DOI: https://doi.org/10.1049/cp.2014.1403

[6] Departamento Nacional de Planeación, "CONPES 3918-estrategia para la implementación de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) en Colombia", 2018.

[7] Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, *RedVolución*. [En línea]. Disponible en: https://colombiatic.mintic.gov.co/679/w3-propertyvalue-36669.html [Accedido: 05-oct-2020].

[8] Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, "Informe de gestión al Congreso de la República Sector TIC", 2017. https://mintic.gov.co/portal/715/articles-124509_doc_pdf.pdf

[9] Contaduría General de la Nación, "Resolución. 461 de 2017", oct. 2017.[10] Departamento Administrativo Nacional de Estadística, "Censo nacional de población y vivienda 2018", DANE. [En línea]. Disponible en: https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/censo-nacional-de-poblacion-y-vivenda-2018 [Accedido: 04-oct-2020].

[11] Red Nacional de Información, *Registro Único de Víctimas -Unidad de víctimas*. [En línea]. Disponible en: https://www.unidadvictimas.gov.co/es/ruv/37385 [Accedido: 10-oct-2020].

[12] Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, "Evaluaciones agropecuarias municipales 2007 a 2018", *Datos.gov.co.* [En línea]. Disponible en: https://www.datos.gov.co/Agricultura-y-Desarrollo-Rural/Evaluaciones-Agropecuarias-Municipales-EVA/2pnw-mmge [Accedido: 30-sep-2020].

[13] Departamento Administrativo Nacional de Estadística, "Censo nacional agropecuario", DANE. [En línea]. Disponible en: https://www.dane.gov.co/files/images/foros/foro-de-entrega-de-resultados-y-cierre-3-censo-nacional-agropecuario/CNATomo2-Resultados.pdf [Accedido: 05-oct-2020].

[14] Sociedad Central Hidroeléctrica Montebonito, "Modificación Licencia Ambiental Central Hidroeléctrica Montebonito", 2015. http://www.corpocaldas.gov.co/publicaciones/1527/2017-03-10/03-3-2015-EI-000118 05-08-10-2015-InformeModificacionLicennciaAmbientalVF.pdf

[15] Departamento Administrativo Nacional de Estadística, "*Censo general 2005",* DANE. [En línea]. Disponible en: https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/censo-general-2005-1#proyecciones-de-poblacion-linea-base-2005 [Accedido: 05-oct-2020].

[16] Departamento Administrativo Nacional de Estadística, "Proyecciones nacionales y departamentales de población 2005-2020", DANE. [En línea]. Disponible en: https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/poblacion/proyepobla06_20/7Proyecciones_poblacion.pdf [Accedido: 01-oct-2020].

[17] Secretaría de Planeación Municipio de Marulanda, "Plan de desarrollo municipal 2020-2023. Marulanda unido, sostenible y con arraigo", *Alcaldía Municipal de Marulanda en Caldas.* [En línea]. Disponible en: http://www.marulanda-caldas.gov.co/planes/plan-de-desarrollo-20202023-marulanda-unida-sostenible [Accedido: 06-oct-2020].

[18] F. Coelho y J. Sauvé, "Availability considerations in network design", presentado en Proceedings 2001 Pacific Rim International Symposium on Dependable Computing, Seúl, Corea del Sur, 2001. DOI: https://doi.org/10.1109/PRDC.2001.992688

[19] Cisco Networking Academy, "Capítulo 1: Exploración de la red Introducción a redes", 2008. http://www.ie.tec.ac.cr/acotoc/CISCO/R&S%20CCNA1/R&S_CCNA1_ITN_Chapter1_Exploracion%20de%20la%20red.pdf

[20] M. T. Y. Chan, "Wide-area wireless network topology" 20080025208A1, 2008.

[21] Cisco CCNA study notes, "The different wide area network (WAN) topologies," CCNA *study notes*. [En línea]. Disponible en: https://study-ccna.com/wan-topologies/ [Accedido: 10-nov-2021].

[22] H. Hanrahan, *T Network Convergence: Services, Applications, Transport, and Operations Support*. Johannesburgo, Sudáfrica: John Wiley & Sons, 2007, pp. 1-86.

[23] W. A. Wallach, B. Findlay, T. J. Pellicer *et al.,* "Method for providing a fault tolerant network using distributed server processes to remap cluster network resources to other servers during server failure", 6292905B1, 2001.

[24] J. Garzón-Álvarez, "Análisis de viabilidad de implementación de la tecnología WiBACK en zonas rurales colombianas", *Ing.* USB*Med*, vol. 5, no. 1, pp. 53-60, 2014. DOI: https://doi.org/10.21500/20275846.300

[25] Fraunhofer Institute for Applied Information Technology, *WiBACK Software.* [En línea]. Disponible en: https://www.wiback.org/en/wiback-technology/software.html [Accedido: 17-dic-2020].

[26] "IEEE Standard for Ethernet Amendment 2: Physical Layer and Management Parameters for Power over Ethernet over 4 pairs", IEEE *Std 802.3bt-2018 (Amendment to* IEEE *Std 802.3-2018 as amended by* IEEE *Std 802.3cb-2018)*, pp.1-291, 2019. DOI: https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2019.8632920

[27] Fraunhofer Institute for Applied Information Technology, "WIBACK-node-2-connect II datasheet", 2015. https://www.wiback.org/content/dam/wiback/en/documents/WiBACK_EN_N2C2_11-2017.pdf

[28]Unión Internacional de Telecomunicaciones, "Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial line-of-sight systems", 2017. https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.530-17-201712-I!!PDF-E.pdf