

Proyecto final de Sistemas y comunicaciones II

Profesor:

Andrés Navarro Cadavid

Universidad Icesi

Sistemas y Comunicaciones II

2025

Introducción

La tecnología de Espacios en Blanco de Televisión (TVWS) ha surgido como una alternativa innovadora dentro del campo de las telecomunicaciones, al permitir el uso de frecuencias del espectro radioeléctrico que anteriormente no habían sido aprovechadas. Su flexibilidad, alcance y adaptabilidad la convierten en una opción útil para el diseño de soluciones inalámbricas eficientes.

Este proyecto tiene como objetivo implementar y evaluar una red basada en TVWS, utilizando dispositivos Innonet configurados en una topología MASTER-SLAVE. A través de este trabajo se busca validar la funcionalidad de esta tecnología, comprender sus requerimientos técnicos y su labor como una herramienta que puede ser útil dentro de proyectos a mayor escala. El informe presenta la metodología seguida, los aspectos técnicos y regulatorios considerados, así como los resultados obtenidos durante el proceso de configuración y prueba.

Objetivo General

Evaluar el funcionamiento y la configuración de una red inalámbrica experimental basada en tecnología TVWS, utilizando dispositivos Innonet en una arquitectura tipo punto-a-punto.

Objetivos Específicos

- Diseñar e implementar un enlace inalámbrico TVWS mediante la configuración de nodos Master y Slave.
- Configurar y ajustar los parámetros técnicos, entre ellos: potencia, canal, ancho de banda y asignación de direcciones IP.
- Verificar la conectividad y calidad de señal transmitida.

Tecnología TVWS

Los Espacios en Blanco de Televisión (TVWS) son segmentos del espectro radioeléctrico originalmente asignados a la radiodifusión televisiva que han quedado disponibles debido a la transición de la televisión analógica a digital. Estos espacios, también conocidos como “white spaces”, se encuentran principalmente en la banda UHF, específicamente entre 470 y 698 MHz en el caso de Colombia, y son considerados altamente valiosos para sistemas de comunicación inalámbrica debido a sus propiedades de propagación.

La existencia de estos espacios se explica por dos razones principales: en primer lugar por la separación histórica entre canales activos, para evitar interferencias entre estaciones de televisión y en segundo lugar por buscar una mayor eficiencia espectral de la Televisión Digital Terrestre (TDT), que permite empaquetar más señales en menos ancho de banda que la televisión analógica.

Gracias a su capacidad de propagarse a largas distancias y atravesar obstáculos como árboles, paredes y edificaciones, los TVWS ofrecen una oportunidad innovadora para proporcionar conectividad en zonas rurales o con baja infraestructura, donde tecnologías como la fibra óptica o la red celular presentan limitaciones económicas y técnicas. La tecnología TVWS permite establecer enlaces inalámbricos de largo alcance mediante una arquitectura de red típicamente punto-a-punto o punto-a-multipunto, con un nodo Master conectado a internet y uno o varios nodos Slave que redistribuyen la señal a los usuarios finales.



Imagen 1: Diagrama de conexión de la tecnología TVWS

Aspectos Regulatorios

En Colombia, el uso de TVWS está regulado por la Resolución 105 de 2020 de la Agencia Nacional del Espectro (ANE), la cual define condiciones técnicas y jurídicas para su operación segura. Entre sus disposiciones principales se incluyen: la frecuencia autorizada es de 470 – 698 MHz (canales de 6 MHz). Una potencia máxima de transmisión de 12.6 dBm por cada 100 kHz (equivale a 1 W por canal). La ganancia máxima de antena debe ser de 14 dBd. La altura máxima permitida es de 50 metros sobre el nivel del terreno. Y entre sus condición de uso solo se permite el uso de dispositivos fijos. Cualquier interferencia a servicios prioritarios como la televisión debe ser solucionada por el operador del sistema.

Además, los dispositivos deben tener geolocalización habilitada y conectarse periódicamente a una Base de Datos de Espacios en Blanco (BDEB), gestionada por la ANE, para consultar los canales disponibles y evitar interferencias. Un caso de aplicación destacado en Colombia fue el proyecto piloto en Caldas, donde se implementó TVWS para conectar escuelas rurales, demostrando su viabilidad como solución alternativa a la fibra óptica.

Componentes del Sistema

Para implementar una red inalámbrica funcional basada en TVWS, se requiere la siguiente infraestructura:

- **Nodo MASTER:** Punto principal de conexión a internet. Se configura con una IP estática (192.168.100.1) y transmite la señal a través de TVWS.
- **Nodo SLAVE:** Dispositivo receptor que redistribuye la señal a clientes finales mediante WiFi. Su IP cambia a 192.168.1.1 tras la configuración.
- **Antenas direccionales:** Utilizadas por su alta ganancia y su capacidad de transmitir a largas distancias, son ideales para entornos rurales.

- Sistema de gestión web (LuCI/OpenWrt): Interfaz para ajustar configuraciones como el modo de operación (Master/Slave), canal, potencia, SSID y parámetros de red como DHCP y DNS.
- Canal y frecuencia de operación: Por ejemplo el empleado en este laboratorio, canal 31 correspondiente a 575 MHz, con ancho de banda de 6 MHz.
- Red de usuarios: Se genera desde el nodo Slave una red WiFi con rango de direcciones 192.168.25.0/24, a la que se conectan los usuarios.

Ventajas y Desafíos de la Tecnología TVWS

Entre sus ventajas podemos encontrar que tienen una cobertura extensa que puede alcanzar entre 10 y 15 km con un solo nodo, lo cual reduce la necesidad de infraestructura adicional. Opera en frecuencias bajas, lo que facilita la transmisión a través de obstáculos naturales o artificiales. Además, es más económico que desplegar fibra óptica o infraestructura celular, sobre todo en zonas rurales. El sistema de bases de datos BDEB permite la asignación dinámica y segura del espectro disponible.

Entre los desafíos que enfrenta esta tecnología está la dependencia de la base BDEB por lo que si el dispositivo no logra conexión con la base de datos autorizada, no puede operar. Pueden encontrarse obstáculos regulatorios donde la adopción depende de políticas locales por lo cual puede frenar su expansión. Otro desafío es que pese a que el sistema es robusto, puede verse afectado por otros servicios que usen bandas similares, como micrófonos inalámbricos. Y por último tenemos que aún se están desarrollando y adoptando estándares globales como IEEE 802.22, IEEE 802.19.1 y el protocolo IETF PAWS, lo cual puede afectar la interoperabilidad.

Protocolo DHCP

El Protocolo de Configuración Dinámica de Host (DHCP, por sus siglas en inglés) es un protocolo de red basado en arquitectura cliente-servidor, diseñado para asignar automáticamente configuraciones

TCP/IP a dispositivos dentro de una red local. Un servidor DHCP administra un rango de direcciones IP (conocido como pool) y asigna una dirección única a cada cliente al momento de conectarse, junto con otros parámetros esenciales como máscara de subred, puerta de enlace predeterminada y servidores DNS.

El proceso de asignación de dirección IP sigue cuatro fases conocidas por el acrónimo DORA: el cliente envía un mensaje Discover, el servidor responde con un Offer, el cliente solicita esa dirección mediante un Request, y el servidor la confirma con un Acknowledge. Además, el DHCP permite la renovación automática de la concesión (lease) antes de su expiración, garantizando la continuidad del servicio. Este protocolo surgió como extensión del antiguo protocolo BOOTP, y su adopción ha sido esencial para simplificar la gestión de redes de cualquier tamaño, evitando conflictos de IP, reduciendo errores manuales y brindando escalabilidad. En el contexto de este informe, el uso de DHCP en el nodo Master permite que la interfaz WAN obtenga automáticamente la IP y parámetros de red necesarios para establecer conectividad a Internet.

Metodología

Hardware Utilizado

Para la implementación del sistema de conectividad basado en tecnología TVWS se utilizaron los siguientes componentes físicos:

- Dos equipos TVWS Innonet, uno de ellos como nodo MASTER que actúa como el dispositivo central conectado a internet a través de la interfaz WAN. Emite la señal mediante TVWS hacia el nodo esclavo. Y otro como nodo SLAVE el cual recibe la señal transmitida por el Master y la redistribuye mediante una red WiFi local a los usuarios finales.



Imagen 2: Imagen de referencia de los dispositivos de Innonet empleados en este laboratorio

- Antenas Monopolo 900 MHz comúnmente empleadas en transmisiones dentro del rango UHF y compatibles con aplicaciones TVWS. Estas antenas ofrecen buena penetración de señal y cobertura en distancias cortas y medias, funcionando con polarización vertical y siendo aptas para enlaces punto a punto o punto a multipunto. Si bien no eran las más adecuadas para esta prueba principalmente porque su frecuencia central de 900 MHz no coincide exactamente con el rango de operación regulado para TVWS en Colombia (470–698 MHz), demostraron ser funcionales para establecer y mantener el enlace durante las pruebas, permitiendo validar la estabilidad del sistema en las condiciones del laboratorio.



Imagen 3: Imagen de referencia de la antena monopolo empleada en este laboratorio

Software Implementado

- Interfaz Web basada en OpenWrt (LuCI) la cual es una plataforma de configuración y monitoreo de los equipos, se accede a ella por medio del navegador.
- DHCP para la asignación automática de direcciones IP a clientes y la resolución de nombres en la red local.

Configuración Paso a Paso

Configuración del Nodo MASTER

Primero, conectamos ambos dispositivos Innonet a la corriente para garantizar la fuente de alimentación.



Imagen 4: Dispositivos conectados a la corriente

Luego, conectamos un cable Ethernet desde un PC al puerto LAN del dispositivo configurado como nodo Master y también conectamos la antena. A continuación, asignamos manualmente al PC una dirección IP estática 192.168.100.10/24 con su respectiva dirección de gateway 192.168.100.1/24.

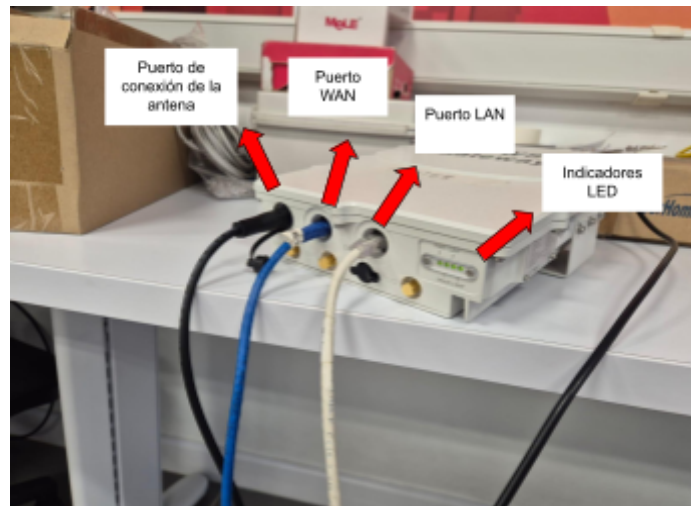


Imagen 5: Vista del dispositivo innonet - TVWS durante su conexión



Imagen 6: Direcciones IP configuradas en el PC conectado al nodo Master

Luego de realizar eso, accedimos a la interfaz de configuración mediante un navegador web, ingresando la dirección <http://192.168.100.1:8800>, lo cual abrió la página de administración del dispositivo. Allí iniciamos sesión utilizando las credenciales predeterminadas (usuario: root / contraseña: innonet160905).

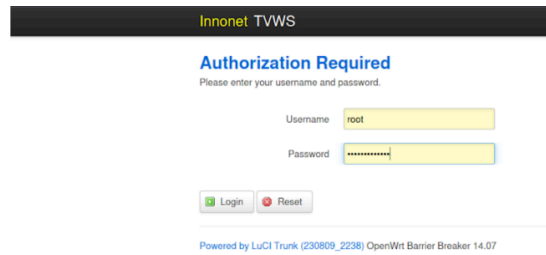


Imagen 7: Interfaz Web para acceder a la administración del dispositivo

Una vez dentro de la interfaz, procedimos a la configuración inalámbrica. Para ello, navegamos a la opción Network → Wireless/DB, donde registramos los parámetros correspondientes. Estos parámetros definen aspectos como el modo de operación, el canal, la potencia de transmisión, el ancho de banda y el SSID.

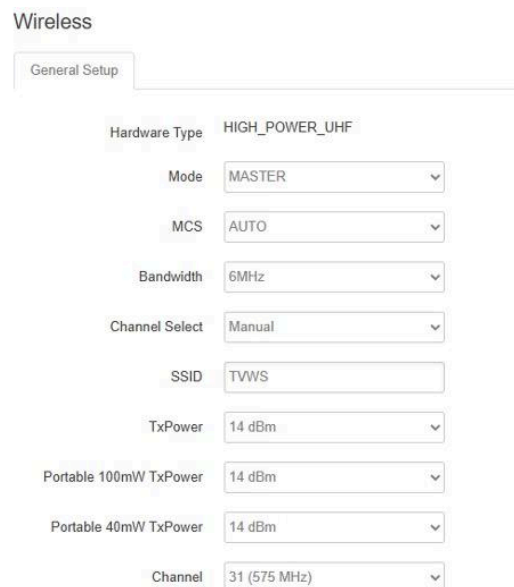


Imagen 8: Parámetros configurados en el nodo Master

La imagen 7 muestra la sección de configuración inalámbrica del nodo Master. En esta sección se definen los parámetros esenciales para el funcionamiento del enlace. Se establece el modo de operación como Master, con un ancho de banda de 6 MHz, selección de canal en modo manual, y una

frecuencia central de 575 MHz correspondiente al canal 31 el cual está dentro del rango UHF disponible como espacio blanco televisivo. El SSID configurado fue TVWS, y la potencia de transmisión (TxPower) fue ajustada a 14 dBm, valor mínimo recomendado para pruebas de laboratorio. El valor de MCS (Modulation and Coding Scheme) fue dejado en modo AUTO para que el dispositivo seleccione la modulación más adecuada según las condiciones del enlace.

Finalmente, para guardar y aplicar correctamente todos los cambios realizados, seleccionamos primero la opción Save, luego Save & Apply, y reiniciamos el dispositivo para asegurar que las configuraciones quedarán activas.

Interfaces

Interface Overview



Network	Status	Actions
LAN  br-lan	Uptime: 1h 31m 20s MAC-Address: 98:FA:A7:21:02:4A RX: 24.54 MB (87081 Pkts.) TX: 69.35 MB (85065 Pkts.) IPv4: 192.168.100.1/24	Connect Stop Edit Delete
WAN  eth1	Uptime: 1h 31m 12s MAC-Address: 98:FA:A7:20:02:4A RX: 70.45 MB (99978 Pkts.) TX: 25.53 MB (73639 Pkts.) IPv4: 192.168.88.29/24	Connect Stop Edit Delete

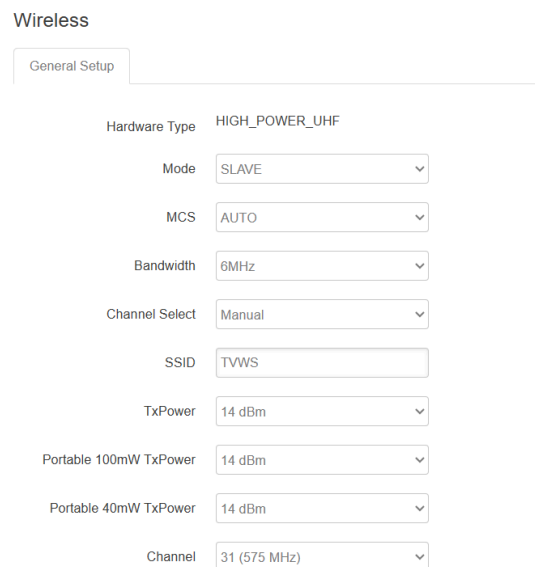
Imagen 9: Interfaces activas del nodo Master

En la imagen 8 se observan dos interfaces principales. Está la interfaz LAN que corresponde a la red local interna del dispositivo, con dirección IPv4 192.168.100.1/24. Esta interfaz es utilizada para acceder al equipo durante su configuración inicial desde un PC conectado por cable Ethernet. Y por otro lado está la interfaz WAN que es la interfaz de salida a internet del nodo Master. En este caso, ha recibido automáticamente una dirección IP dentro del rango 192.168.89.29/24, lo que indica que se encuentra operando correctamente como cliente DHCP, recibiendo configuración desde un servidor externo.

Configuración del Nodo SLAVE

Para configurar el nodo Slave, conectamos nuevamente el PC al puerto LAN del segundo dispositivo, que por defecto también viene configurado como Master. A este PC se le asignó la dirección IP estática 192.168.100.1 para permitir el acceso inicial.

Ingresamos a la interfaz web del equipo a través de <http://192.168.100.1:8800>, utilizando las mismas credenciales predeterminadas que en el Master (root / innonet160905). Dentro de la interfaz, accedimos a Network → Wireless/DB, donde cambiamos el modo de operación a Slave, asegurándonos también de que el SSID coincidiera exactamente con el configurado en el nodo Master, en este caso TVWS. Las demás configuraciones las dejamos igual que en el nodo Master ya que deben coincidir para poderse dar la conexión, especialmente el canal debe ser el mismo en ambos.



Wireless	
General Setup	
Hardware Type	HIGH_POWER_UHF
Mode	SLAVE
MCS	AUTO
Bandwidth	6MHz
Channel Select	Manual
SSID	TVWS
TxPower	14 dBm
Portable 100mW TxPower	14 dBm
Portable 40mW TxPower	14 dBm
Channel	31 (575 MHz)

Imagen 10: Parámetros configurados en el nodo Slave

Luego de realizar los ajustes, aplicamos los cambios siguiendo el mismo procedimiento: seleccionamos Save, después Save & Apply, y finalmente ejecutamos un reboot (reinicio) del equipo.



Imagen 11: Opción de reboot para reiniciar el dispositivo











Tras el reinicio, la dirección IP del nodo Slave cambió automáticamente a 192.168.1.1, por lo que también se ajustó la IP de la PC a 192.168.1.10/24 para poder acceder nuevamente a la interfaz del equipo.

Asignación de IP:	Manual
Dirección IPv4:	192.168.1.10
Máscara IPv4:	255.255.255.0
Puerta de enlace de IPv4:	192.168.1.1
Asignación de servidor DNS:	Manual
Servidores DNS IPv4:	192.168.215.20 (sin cifrar) 192.168.215.30 (sin cifrar)
Velocidad de vínculo agregada (recepción/transmisión):	100/100 (Mbps)
Dirección IPv6 del vínculo local:	fe80::e5f5:3d7e:2b54:9f64%10
Dirección IPv4:	192.168.1.10
Puerta de enlace predeterminada IPv4:	192.168.1.1
Servidores DNS IPv4:	192.168.215.20 (sin cifrar) 192.168.215.30 (sin cifrar)
Sufijo DNS principal:	lan
Lista de búsqueda de sufijos DNS:	lan
Fabricante:	Realtek
Descripción:	Realtek PCIe GbE Family Controller
Versión del controlador:	10.65.421.2023
Dirección física (MAC):	74-D4-DD-6E-CA-89

Imagen 12: Nuevas direcciones IP configuradas en el PC conectado al nodo Slave

Interfaces

Interface Overview

Network	Status	Actions
LAN  br-lan	Uptime: 1h 47m 55s MAC-Address: 98:FA:A7:21:02:47 RX: 13.19 MB (54024 Pkts.) TX: 22.57 MB (51657 Pkts.) IPv4: 192.168.1.1/24	 Connect  Stop  Edit  Delete
WAN  mt7790u_sta.network1	MAC-Address: 00:00:00:00:00:00 RX: 0.00 B (0 Pkts.) TX: 0.00 B (0 Pkts.)	 Connect  Stop  Edit  Delete



 Add new interface...

Imagen 13: Interfaces activas del nodo Slave

Common Configuration

General Setup **Advanced Settings** Physical Settings Firewall Settings

Status  **Uptime:** 1h 48m 10s
MAC-Address: 98-FA-A7-21-02-47
RX: 13.33 MB (54294 Pkts.)
TX: 22.69 MB (51905 Pkts.)
IPv4: 192.168.1.1/24

Protocol

IPv4 address

IPv4 netmask

IPv4 gateway

IPv4 broadcast

Use custom DNS servers

IPv6 assignment length


 Assign a part of given length of every public IPv6-prefix to this interface

Imagen 14: Configuración dentro de la interfaz LAN del nodo Slave

Verificación del Enlace

Para verificar la conexión entre los dispositivos, observamos los indicadores LED de ambos equipos.

Un LED verde en estado fijo en cada uno indicaba una conexión estable; si el LED titilaba constantemente, significaba que el enlace era inestable.

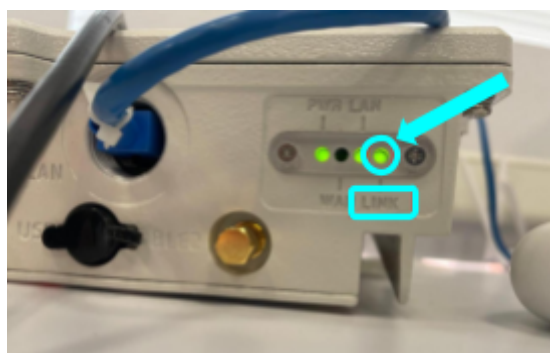


Imagen 15: LED LINK que indica el estado del enlace

Además de la verificación visual, accedimos a la interfaz web del equipo y nos dirigimos a la sección Network → Status/Settings, donde se muestra el estado actual del enlace inalámbrico. Allí pudimos confirmar que el link estaba activo y operando dentro de los parámetros esperados como es el RSSI que debe estar en un rango de -90 y -40, el valor que marcaba era de -76 en el nodo Master y de -61 en el nodo Slave, lo que indicaba una calidad de conexión adecuada.

TVWS STATUS/SETTINGS

Status/Settings

TVWS Status TVWS Settings HPA Update BIS Panel

TVWS Status CH 31 AP TVWS RSSI: -76

RSSI Alarm Threshold (Min, Max) -90, -40

TVWS TSSI 12.1

TSSI Alarm Threshold (Min, Max) 5, 30

WiFi1 TSSI ---

WiFi2 TSSI ---

IP Address 192.168.100.1

WAN Network Config NOT CHANGED

Imagen 16: Indicadores del estado del link y dirección IP en el nodo Master

TVWS STATUS/SETTINGS

Status/Settings

TVWS Status TVWS Settings HPA Update BIS Panel

TVWS Status CH 31 AP TVWS RSSI: -61

RSSI Alarm Threshold (Min, Max) -90, -40

TVWS TSSI -253.7

TSSI Alarm Threshold (Min, Max) 5, 30

WiFi1 TSSI ---

WiFi2 TSSI ---

IP Address 192.168.100.100

Gateway 192.168.1.1

Imagen 17: Indicadores del estado del link y dirección IP en el nodo Slave

Una parte relevante durante la configuración del sistema fue la asignación correcta de direcciones IP en los nodos Master y Slave. Como se muestra en la imagen 15, el nodo Master debe mantener su dirección IP predeterminada 192.168.100.1, correspondiente a la red local de gestión. Sin embargo, al configurar el nodo Slave, fue necesario modificar su dirección IP para evitar conflictos dentro de la misma red como se observa en la imagen 16. En este caso, se asignó manualmente la dirección 192.168.100.100, la cual pertenece al mismo segmento de red 192.168.100.0/24, pero no interfiere con la del Master. Inicialmente, ambos dispositivos vienen configurados con la misma IP por defecto, lo que provocaba incompatibilidad y fallos en la comunicación, impidiendo que el nodo Master pudiera transmitir correctamente la señal al nodo Slave. Este fue uno de los problemas detectados durante el proceso, y su resolución fue clave para lograr el funcionamiento exitoso del enlace.

Durante las fases iniciales de prueba, se presentaron problemas de estabilidad en el enlace inalámbrico, ya que este se caía constantemente y era difícil mantener una conexión continua entre los nodos. Se realizaron múltiples intentos variando progresivamente la distancia entre los dispositivos, comenzando con aproximadamente dos metros y aumentando el rango para evaluar el comportamiento del sistema. Sin embargo, los resultados seguían siendo inconsistentes.

Ante esta situación, se procedió a probar diferentes modelos de antenas, con el fin de mejorar la calidad del enlace. Finalmente, con el último par de antenas utilizadas, se logró una conexión estable y sostenida, sin interrupciones. Aunque en algunos momentos se observó una leve disminución en la intensidad de la señal, el enlace no volvió a caerse, lo que permitió continuar con las pruebas y validar el funcionamiento general del sistema.

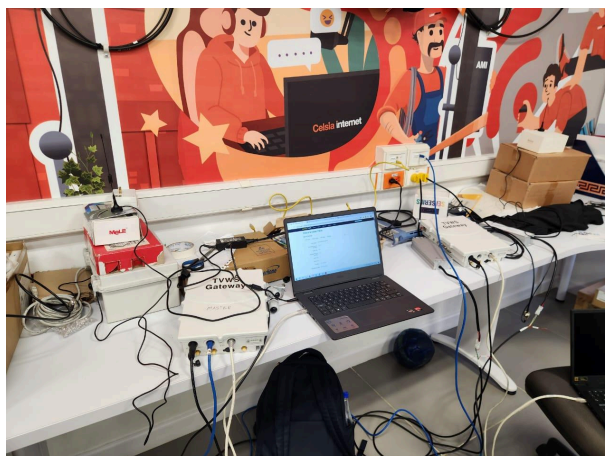


Imagen 18: Montaje de los dos dispositivos Innonet conectados a las antenas

Configuración de la Salida a Internet

La salida a internet se configuró desde la interfaz WAN del nodo Master. Esta fue establecida como cliente DHCP, permitiéndole obtener automáticamente una dirección IP del servidor correspondiente. También se configuraron los servidores DNS asignados por dicho servidor DHCP, lo que facilitó la resolución de nombres en la red.

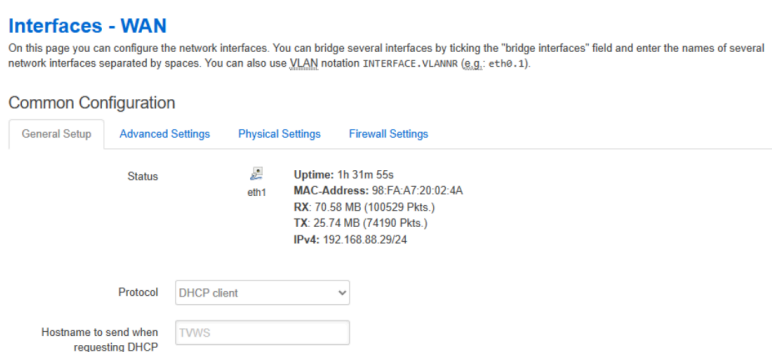


Imagen 19: Configuración de la interfaz WAN con el protocolo DHCP en el nodo Master

Common Configuration

General Setup | **Advanced Settings** | Physical Settings | Firewall Settings

Status: **UP** | In: lan | Uptime: 0h 5m 35s | MAC-Address: 98 FA A7 21 02 4A | RX: 4.85 MB (18810 Pkts) | TX: 43.10 MB (83248 Pkts) | IPv4: 192.168.100.1/24

Protocol: Static address

IPv4 address: 192.168.100.1

IPv4 netmask: 255.255.255.0

IPv4 gateway:

IPv4 broadcast:

Use custom DNS servers: 192.168.88.17, 192.168.88.18

IPv6 assignment length: disabled

Assign a part of given length of every public IPv6 prefix to this interface

IPv6 address:

Imagen 20: Configuración de los DNS dentro de la interfaz LAN del nodo Master

Para comprobar que el nodo Master tenía salida a internet utilizamos una opción que se encuentra en Network → Diagnostics la cual nos permite hacer traceroute a una dirección específica. En este caso se realizó un traceroute al dominio www.google.com. La prueba nos muestra los saltos que realiza un paquete desde el dispositivo de origen hasta el destino, registrando el tiempo de respuesta en milisegundos en cada punto.

192.168.100.1:8800/cgi-bin/luci/stok=4b457a063b2b852f18e9d357352fa3f6/admin/network/diagnostics

Innonet TVWS | Status | System | New IOT | Network | Logout

Diagnostics

Network Utilities

openert.org | www.google.com | openert.org

IPv4 | Ping | Traceroute | Nslookup

Install iputils-traceroute6 for IPv6 traceroute

```

traceroute to www.google.com (142.251.132.65), 30 hops max, 38 byte packets
 1 192.168.88.1 0.367 ms
 2 192.168.88.10 0.386 ms
 3 192.168.50.1 0.501 ms
 4 192.168.160.1 0.579 ms
 5 200.3.192.1 1.078 ms
 6 200.3.193.2 0.880 ms
 7 10.188.84.145 2.070 ms
 8 190.131.207.80 9.827 ms
 9 190.131.207.4 18.817 ms
10 190.242.157.13 9.291 ms
11 *
12 142.250.210.118 10.674 ms
13 142.251.241.106 12.207 ms
14 142.251.77.109 10.490 ms
15 142.251.226.97 9.350 ms
16 142.251.132.65 9.244 ms

```

Imagen 21: Resultado de la prueba Traceroute en el nodo Master

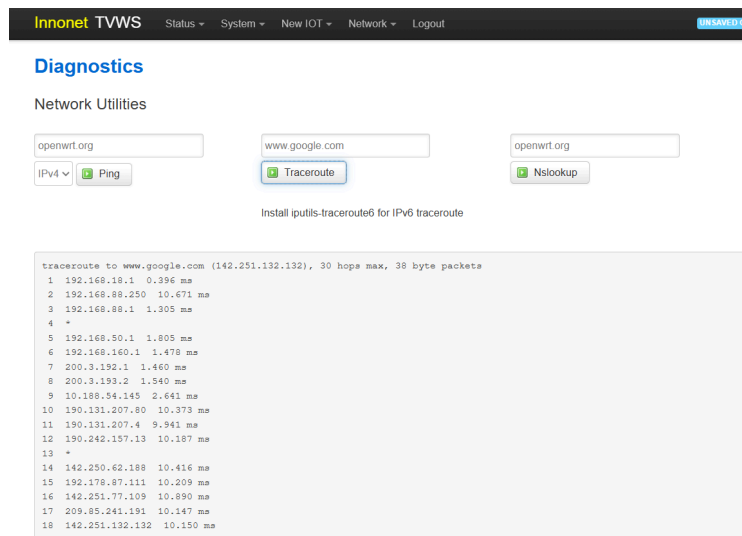


Imagen 22: Resultado de la prueba Traceroute en el nodo Slave

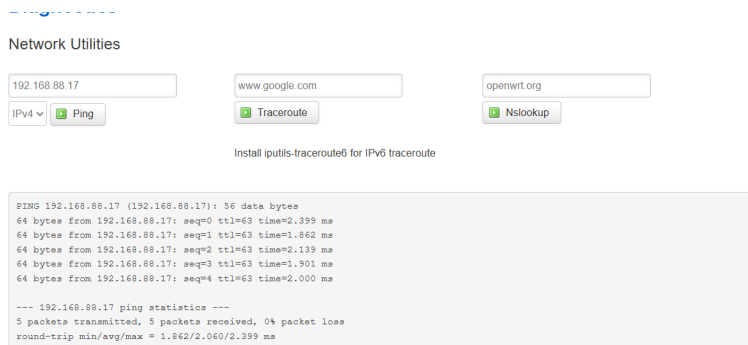


Imagen 23: Prueba de PING a la primera dirección de DNS

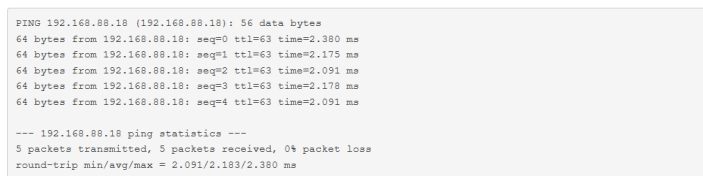


Imagen 24: Prueba de PING a la segunda dirección de DNS

La prueba nos permitió confirmar que el nodo Master tiene salida a internet ya que el traceroute logró alcanzar correctamente el servidor de google pasando por múltiples saltos de red.

Conexión de Clientes Finales

Finalmente, verificamos la conexión de los clientes finales, es decir, los dispositivos de los usuarios que se conectarían a la red WiFi generada por el nodo Slave. El SSID configurado fue TVWS_Slave para la red del Slave y TVWS-Wifi-1086 para la red del Master, y el rango de direcciones IP asignadas a estos dispositivos fue 192.168.25.0/24. Durante las pruebas, fue posible detectar y conectar tanto a la red generada por el nodo Master como a la del nodo Slave. Sin embargo, se presentó inestabilidad en la señal, ya que en algunos momentos las redes no aparecían o mostraban niveles bajos de intensidad. Este comportamiento se dio principalmente por la inestabilidad del enlace inalámbrico entre los nodos, así como a las limitaciones propias de las antenas utilizadas en el entorno de laboratorio.



Imagen 25: Conexión a la red Wifi del nodo Master desde un dispositivo móvil

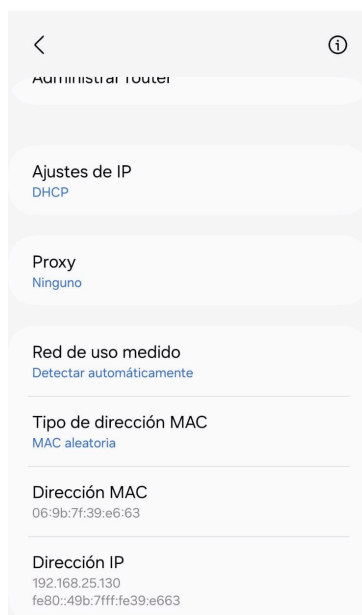


Imagen 26: Direcciones asignadas luego de la conexión a la red del nodo Master en el dispositivo móvil

Desde distintos equipos pudimos acceder correctamente a la interfaz web del Slave utilizando la dirección <http://192.168.25.1> y las credenciales root / fts. Al acceder podemos observar la sección Wireless Overview correspondiente al nodo Slave, operando como punto de acceso WiFi. En este panel se visualiza el estado general de la red inalámbrica bajo la frecuencia de 2.4 GHz (802.11bgn), y el SSID activo. En el apartado Associated Stations se listan los dispositivos que se conectaron exitosamente a la red generada por el nodo Slave. Con esto pudimos validar que la red proporcionaba acceso a internet funcional a través del enlace Master–Slave, lo cual validó el correcto funcionamiento del sistema.

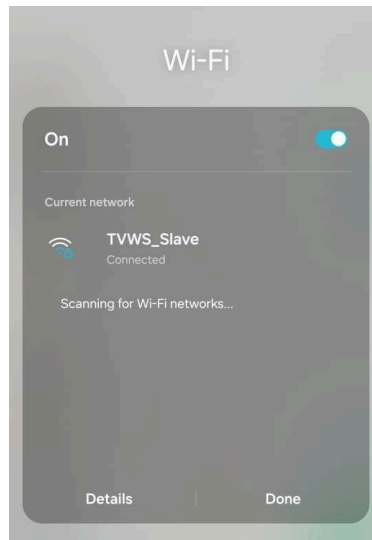


Imagen 27: Conexión a la red Wifi del nodo Slave desde un dispositivo móvil

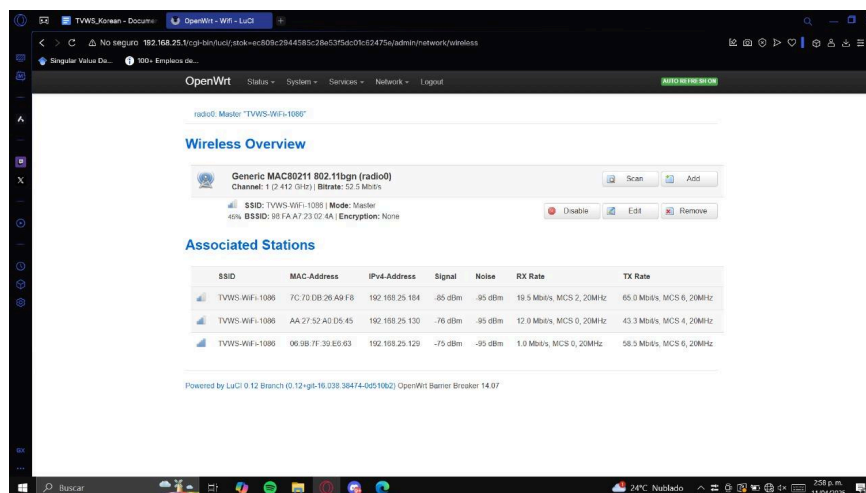


Imagen 28: Resumen de dispositivos conectados a la red inalámbrica del nodo SLAVE

Una vez verificado el correcto funcionamiento en el entorno de laboratorio, se procede a integrar el sistema con el OLT (Optical Line Terminal) desarrollado por el equipo de infraestructura

Resultados obtenidos

Una vez finalizado el proceso de configuración de los dispositivos, procedimos a realizar pruebas funcionales de la red inalámbrica generada por el nodo Slave, con el fin de validar la conectividad, el rendimiento del enlace y la salida efectiva a internet desde dispositivos cliente. Entre las pruebas realizadas, se ejecutó un test de velocidad (speed test) desde un computador conectado a la red WiFi del nodo Slave. El objetivo era evaluar el desempeño de la red en condiciones de uso real, una vez establecido el enlace entre el nodo Master y el Slave.

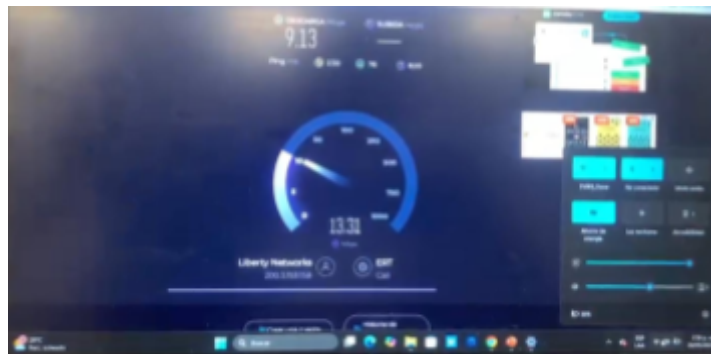


Imagen 29: Evidencia del proceso del test de velocidad realizado a la red Wifi del nodo Slave

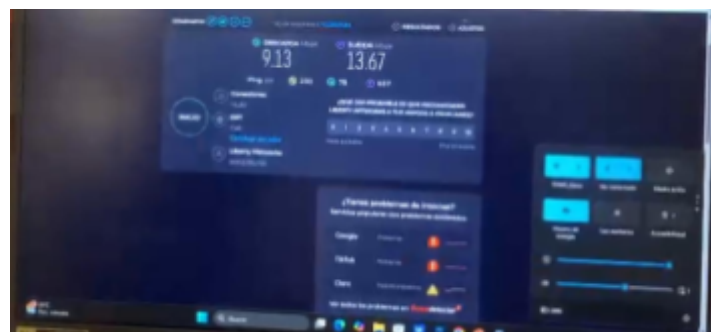


Imagen 30: Resultado del test de velocidad de la red Wifi del nodo Slave

Los resultados obtenidos del test de velocidad fueron:

- Velocidad de descarga: 9.13 Mbps
- Velocidad de subida: 13.67 Mbps

- Latencia (ping promedio): 230 ms

Estos valores indican que el sistema fue capaz de transmitir correctamente la señal desde el nodo Master hasta el nodo Slave, y desde allí brindar acceso a internet funcional a los usuarios conectados vía WiFi. A pesar de que la latencia fue relativamente alta, posiblemente debido a interferencias, calidad del entorno o limitaciones del hardware utilizado, tanto la velocidad de subida como de descarga fueron suficientes para navegación básica, transmisión de contenido multimedia y servicios de mensajería.

Para mejorar el rendimiento del sistema en futuras pruebas, especialmente en lo relacionado con la latencia y la estabilidad del enlace, se recomendaría utilizar antenas de mayor ganancia y diseñadas específicamente para el rango de frecuencias autorizado (470–698 MHz), optimizar la ubicación física de los dispositivos evitando obstáculos e interferencias, probar distintos canales dentro de la banda UHF para identificar los menos saturados, aumentar la altura de las antenas dentro de los límites regulatorios para mejorar la línea de vista, monitorear el tráfico de red para evitar saturaciones que afecten el desempeño y realizar pruebas adicionales en entornos reales de tipo rural o con mayores distancias, donde esta tecnología puede demostrar su verdadero alcance y eficacia.

Conclusiones

La implementación de un sistema de conectividad inalámbrica basado en tecnología TVWS demostró ser viable y funcional en condiciones de laboratorio, utilizando una arquitectura punto-a-punto compuesta por nodos Master y Slave. A lo largo del proyecto, se configuraron correctamente los equipos Innonet, se ajustaron los parámetros de red y se resolvieron inconvenientes técnicos relacionados con conflictos de direcciones IP, selección de antenas y estabilidad del enlace.

Durante las pruebas iniciales se evidenciaron caídas frecuentes del enlace lo que obligó a realizar ajustes como el cambio de antenas y la correcta asignación de IP entre nodos. Una vez resueltos estos

problemas, se logró establecer una conexión estable que permitió transmitir señal de internet desde el nodo Master hasta el nodo Slave, y desde allí distribuirla vía WiFi a los usuarios finales.

Los resultados del test de velocidad reflejaron un rendimiento aceptable, con velocidades de descarga de 9.13 Mbps, subida de 13.67 Mbps, y una latencia de 230 ms. Si bien esta latencia es elevada para ciertos usos sensibles al retardo, el sistema fue funcional para navegación, carga de contenido y tareas básicas. Además, se validó la salida a internet mediante pruebas como traceroute y conexión real desde clientes WiFi.

Este proyecto permitió evidenciar tanto el potencial de la tecnología TVWS como sus limitaciones, resaltando la importancia de una configuración cuidadosa, una elección adecuada del hardware (especialmente las antenas) y el conocimiento de los parámetros técnicos y regulatorios involucrados. Asimismo, sirvió como una introducción práctica al manejo de protocolos de red como DHCP y al uso de plataformas como OpenWrt (LuCI) para la gestión de dispositivos.

Referencias

Agencia Nacional del Espectro. (s.f.). *Esquema de la Base de Datos de Espacios en Blanco*.

<https://www.ane.gov.co/SitePages/la-entidad/index.aspx?p=22>

Agencia Nacional del Espectro. (2021, mayo 7). *Espacios en blanco de TV*.

<https://www.ane.gov.co/Sliders/prensa/presentaciones/2021/5.%20MAYO/20210507%20Espacios%20en%20Blanco%20de%20TV.pdf>

Chung, F. (2025, abril 6). *¿Qué es una antena TVWS? Guía completa*. Tesswave Technology Limited.

<https://www.tesswave.com/es/what-is-a-tvws-antenna/>

Everything RF. (s.f.). *¿Qué es el espacio en blanco de televisión (TV White Space)?*

https://www-everythingrf-com.translate.goog/community/what-is-tv-white-space?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es&_x_tr_pto=tc

Fortinet. (s.f.). *¿Qué es el protocolo dinámico de configuración de host (DHCP)?* Recuperado de

<https://www.fortinet.com/lat/resources/cyberglossary/dynamic-host-configuration-protocol-dhcp>