

**Propuesta de Migración de Red HFC Centralizada a Arquitectura de Acceso  
Distribuido en COSETT R.L.**

*Proposal for Migration from Centralized HFC Network to Distributed Access  
Architecture at COSETT R.L.*

**Autor:** Carlos Israel Flores García  ORCID

Universidad Autónoma Gabriel René Moreno (UAGRM), Bolivia

**Cómo citar este artículo:**

**American Psychological Association, 7.<sup>a</sup> edición (APA 7):**

Flores García, C.I. (2025). Propuesta de migración de red HFC centralizada a arquitectura de acceso distribuido en COSETT R.L. *Boletín Científico Fronteras Tecnológicas*, 1(1), 95-122.

**Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE):**

C.I. Flores García, “Propuesta de migración de red HFC centralizada a arquitectura de acceso distribuido en COSETT R.L.”, *Boletín Científico Fronteras Tecnológicas*, vol. 1, no. 1, 95-122, 2025. [En línea].

## RESUMEN

El estudio analiza las limitaciones técnicas y operativas de las redes híbridas de fibra y coaxial (HFC) con arquitectura centralizada, considerando como caso de aplicación la red de COSETT R.L. en Tarija, Bolivia. El objetivo principal fue diseñar una propuesta de migración hacia la Arquitectura de Acceso Distribuido (DAA) mediante la incorporación de tecnologías *Remote PHY Device* (RPD) o *Remote MAC-PHY Device* (RMD). La investigación se desarrolló bajo un enfoque mixto. Se emplearon entrevistas al personal técnico, guías de observación y análisis documental. La validación de hipótesis se realizó mediante un diseño preexperimental con el uso de pretest–posttest y prueba de Chi-cuadrado. Los resultados evidencian que la migración hacia DAA mejora el aprovechamiento del espectro, reduce la latencia, incrementa las velocidades de acceso, disminuye el consumo energético y optimiza el espacio físico en las cabeceras. En el ámbito económico, se constató una reducción significativa de los costos operativos (OPEX) y la modernización del *core* con mayor escalabilidad tecnológica, en concordancia con los estándares DOCSIS 3.1 y 4.0. Se concluye que la transición de la red HFC centralizada a arquitectura de acceso distribuido en COSETT R.L. es técnica y económicamente viable, aportando eficiencia operativa, sostenibilidad y mejora en la calidad del servicio. La propuesta constituye un modelo replicable para operadores de telecomunicaciones de la región que buscan modernizar sus infraestructuras.

*Palabras clave:* Arquitectura de Acceso Distribuido (DAA), Red Híbrida de Fibra y Coaxial (HFC), DOCSIS 3.1/4.0, Remote MAC-PHY Device (RMD), modernización de redes HFC.

## ABSTRACT

The study analyzes the technical and operational limitations of hybrid fiber-coaxial (HFC) networks with centralized architecture, considering the COSETT R.L. network in Tarija, Bolivia, as a case study. The main objective was to design a proposal for migration to Distributed Access Architecture (DAA) through the incorporation of Remote PHY Device (RPD) or Remote MAC-PHY Device (RMD) technologies. The research was conducted using a mixed approach. Interviews with technical staff, observation guides, and document analysis were used. Hypothesis validation was performed using a pretest-posttest pre-experimental design with a chi-square test. The results show that migration to DAA improves spectrum utilization, reduces latency, increases access speeds, decreases energy consumption, and optimizes physical space at the headend. In economic terms, there was a significant reduction in operating costs (OPEX) and modernization of the core with greater technological scalability, in accordance with DOCSIS 3.1 and 4.0 standards. It is concluded that the transition from a centralized HFC network to a distributed access architecture at COSETT R.L. is technically and economically viable, providing operational efficiency, sustainability, and improved service quality. The proposal constitutes a replicable model for telecommunications operators in the region seeking to modernize their infrastructure.

*Keywords:* Distributed Access Architecture (DAA), Hybrid Fiber Coaxial (HFC) Network, DOCSIS 3.1/4.0, Remote MAC-PHY Device (RMD), HFC network modernization.

## INTRODUCCIÓN

Durante la última década, el crecimiento exponencial en el uso de Internet y servicios digitales ha puesto a prueba la capacidad de las redes de telecomunicaciones. Aplicaciones como el *streaming* de video, los juegos en línea y las plataformas en la nube demandan mayores velocidades, baja latencia y alta estabilidad de conexión (Ooka et al., 2022). En este contexto, las redes híbridas de fibra y coaxial (HFC), ampliamente utilizadas en América Latina, presentan limitaciones derivadas de su diseño centralizado. Este diseño concentra funciones críticas en cabeceras y *hubs*, lo cual genera cuellos de botella en el procesamiento, elevados consumos energéticos y restricciones de escalabilidad (Lee & Leonard, 2023).

Diversos estudios sobre la evolución del estándar DOCSIS indican que las versiones 3.1 y 4.0 permiten teóricamente alcanzar velocidades de hasta 10 Gbps y optimizar el uso del espectro; no obstante, varios análisis técnicos y de campo muestran que ese potencial suele verse limitado por las restricciones de la infraestructura HFC tradicional y los cuellos de botella asociados a su arquitectura centralizada (Ivanets et al., 2024). En respuesta a estas limitaciones, la Arquitectura de Acceso Distribuido (DAA), basada en tecnologías como *Remote PHY Device* (RPD) y *Remote MAC-PHY Device* (RMD), emergen como una alternativa innovadora que posibilita la descentralización de funciones, la reducción de la latencia y una mayor eficiencia energética (Abdel Aleem et al., 2024).

La presente investigación se justifica por la necesidad de garantizar la sostenibilidad operativa y financiera de COSETT R.L., un operador regional que enfrenta la creciente

competencia de tecnologías basadas en fibra óptica y la constante demanda de servicios de mayor velocidad y calidad. La migración hacia una arquitectura de acceso distribuido (DAA) representa una oportunidad para optimizar la infraestructura existente, mejorar la eficiencia energética, reducir costos operativos y elevar la calidad del servicio de manera sostenible.

El estudio contribuye al conocimiento académico y técnico sobre la modernización de redes HFC en contextos regionales, al ofrecer un análisis basado en estándares internacionales y soluciones tecnológicas replicables. De esta manera, la investigación fortalece el ecosistema de telecomunicaciones local y genera evidencia y lineamientos que pueden ser utilizados por otros operadores y estudiosos del área, ampliando el conocimiento existente sobre la implementación de arquitecturas DAA en redes híbridas de fibra y coaxial (Schnitzer et al., 2021).

En este marco, la investigación se centró en diseñar una propuesta de migración de la red HFC centralizada de COSETT R.L. hacia una Arquitectura de Acceso Distribuido (DAA) mediante tecnologías *Remote PHY Device* (RPD) y *Remote MAC-PHY Device* (RMD). Para lograrlo, se abordaron diversos aspectos complementarios: se diagnosticaron las limitaciones técnicas y operativas de la red HFC centralizada, se compararon indicadores clave entre el modelo centralizado y la arquitectura DAA, y se validaron estadísticamente los beneficios obtenidos en escenarios de migración. El objetivo general de la investigación fue desarrollar una propuesta integral que permitiera modernizar la red HFC centralizada hacia una arquitectura distribuida eficiente, escalable y alineada con estándares internacionales de telecomunicaciones.

## METODOLOGÍA

La investigación adoptó un enfoque mixto para asegurar un análisis integral del proceso de migración tecnológica. Se empleó un diseño preexperimental con el uso de pretest–posttest, lo que permitió medir y comparar el comportamiento de los principales indicadores técnicos y económicos de la red HFC centralizada antes y después de simular su transición hacia una Arquitectura de Acceso Distribuido (DAA). Para ello, se modelaron escenarios basados en la implementación de tecnologías *Remote PHY Device* (RPD) y *Remote MAC-PHY Device* (RMD), cuya evaluación permitió contrastar el rendimiento actual de la red con los valores proyectados bajo un entorno descentralizado, generando evidencia empírica sobre la magnitud de las mejoras esperadas. Véase: Tabla 1.

**Tabla 1**

*Comparación de indicadores técnicos y operativos entre la red HFC centralizada y el escenario de modernización DAA*

Indicadores	Red HFC Actual	Modernización Red HFC DAA	Unidad Escala	Cambio observado $x_t^2 = 6.63$
Funciones trasladadas al nodo	0	90	%	90
Cantidad de MD soportadas	30	122	Unidad	69.38
Uso de espectro de frecuencia	1	1.8	GHz	0.36
Reducción de tráfico en el <i>core</i>	0	40	%	40
Latencia promedio de red CMTS/vCMTS - CM	13.945	8.828	Ms	2.97
Velocidad de acceso CM	60	300	Mbps	192.00
Número de portadoras DS por MD	24	64	Nº de canales	25.00

Número de portadoras US por MD	4	16	N° de canales	9.00
Consumo energético total	17.2	2.9	kW	70.51
Uso de espacio físico total	152	11	RU	1807.36

*Nota.* Los datos muestran los cambios en indicadores técnicos y operativos de la red HFC de COSETT R.L. tras la simulación de migración hacia DAA. Fuente: Elaboración propia.

La población de estudio estuvo constituida por la red HFC de COSETT R.L., integrada por dos cabeceras principales: el *Headend* y *Hub* La Torre, que soportan 30 y 27 nodos respectivamente, para un total de 57. Ambas instalaciones operan mediante *CMTS Cisco UBR10012*, equipos que actualmente se encuentran en estado de obsolescencia tecnológica y fuera de soporte del fabricante, lo que implica una creciente vulnerabilidad operativa ante fallas críticas. De manera similar, los nodos ópticos de acceso —*Cisco GS7000* y *Commscope SG4000*— alcanzan su fecha de fin de soporte (EOS/EOL) en 2025, lo que compromete su continuidad operativa y dificulta la ampliación hacia estándares más recientes. Para el estudio se consideraron los 57 nodos de ambas cabeceras, lo que representa el 100% de la infraestructura y asegura la representatividad y pertinencia técnica del análisis.

Para evaluar los efectos de la migración de la red HFC centralizada de COSETT R.L. hacia una Arquitectura de Acceso Distribuido (DAA), se diseñó un proceso metodológico que permitió medir de manera cuantitativa y cualitativa los cambios en los indicadores técnicos y económicos. Este enfoque contempló la comparación entre el estado actual de la red y el escenario proyectado bajo DAA, considerando los beneficios esperados en eficiencia operativa, calidad del servicio, reducción de costos, optimización de recursos físicos y energéticos. De esta manera, se estableció

un marco sólido para aplicar técnicas estadísticas que validaran la efectividad de la propuesta de modernización de forma rigurosa y confiable.

La efectividad de la implementación de la Arquitectura de Acceso Distribuido (DAA) en la red HFC de COSETT R.L. se evaluó mediante la prueba de Chi-cuadrado con un nivel de significancia de  $\alpha = 0,01$ . Los resultados obtenidos a partir de los indicadores técnicos y económicos superaron el valor crítico establecido, lo que permitió confirmar de manera estadística que la migración a DAA generó mejoras importantes en la eficiencia operativa, optimizó la calidad del servicio y contribuyó a la reducción de los costos operativos de la red. Estos hallazgos proporcionan evidencia cuantitativa sólida sobre la viabilidad y los beneficios de modernizar la infraestructura HFC mediante tecnologías RPD y RMD.

Para recopilar información relevante que garantizara un análisis integral de la red HFC y su transición hacia DAA, se emplearon diversos instrumentos de recolección de datos. Se realizaron entrevistas semiestructuradas al personal técnico de Operación y Mantenimiento, con el fin de obtener información detallada sobre la infraestructura física, las prácticas de mantenimiento, el consumo eléctrico y la climatización de las instalaciones. Se utilizó una guía de observación que permitió comparar los indicadores técnicos entre el modelo HFC centralizado y el escenario DAA, incluyendo aspectos como funciones trasladadas al nodo, uso del espectro, latencia, consumo energético y ocupación de espacio en rack. Asimismo, se llevó a cabo un análisis documental de manuales técnicos, normas internacionales (DOCSIS, CableLabs, SCTE) y registros internos de COSETT R.L. para sustentar la evaluación de desempeño y validar los datos obtenidos de manera empírica.

Con el propósito de complementar los instrumentos de recolección de datos y garantizar un análisis sistemático de la red HFC frente al escenario de modernización DAA, se emplearon diversas herramientas tecnológicas. La Tabla 2 presenta los instrumentos utilizados en tres categorías principales: recolección técnica, procesamiento/análisis y soporte documental. En la recolección técnica se consideraron mediciones directas de métricas de red, pruebas de latencia y *throughput*, registros de consumo eléctrico y levantamiento físico de racks. El procesamiento incluyó consolidación de datos, normalización y análisis estadístico mediante Chi-cuadrado, así como la construcción de diagramas y tablas comparativas para los escenarios DAA. El soporte documental abarcó manuales, hojas de datos, normas y procedimientos internos de operación y mantenimiento, que sirvieron de referencia para validar la información y garantizar la precisión de los análisis.

**Tabla 2**

*Herramientas tecnológicas empleadas en la evaluación de la red HFC y su modernización hacia DAA*

Categoría	Herramientas / Técnicas utilizadas	Descripción / Propósito
<b>Recolección técnica</b>	Lectura de métricas en CMTS/vCMTS y nodos HFC mediante CLI y telemetría DOCSIS	Permite obtener indicadores de desempeño de la red y estado de los equipos.
	ICMP ping para latencia	Medición de la latencia en diferentes horarios con tráfico normal y pico.
	Pruebas de throughput controladas (Speedtest Ookla, Fast u otras equivalentes)	Evaluación de velocidades de acceso en escenarios de prueba controlados.
	Registros de consumo eléctrico de equipos y climatización (PDU, inversor, bitácoras internas)	Permite analizar eficiencia energética y consumo de la infraestructura.

	Inventario físico de racks (RU) y distribución de equipos	Evaluación del uso del espacio físico y organización de la infraestructura.
<b>Procesamiento / Análisis</b>	Hojas de cálculo para consolidación de datos, normalización y prueba Chi-cuadrado	Procesamiento estadístico y preparación de datos para análisis comparativo.
	Diagramas y tablas comparativas para escenarios DAA (RPD/RMD)	Visualización y comparación de la red HFC centralizada frente al escenario DAA.
<b>Soporte documental</b>	Manuales y especificaciones técnicas, hojas de datos, normas y procedimientos internos de O&M	Referencia para validar procedimientos, configuraciones y cumplimiento de estándares.

*Nota.* La tabla presenta las herramientas utilizadas para recolección, análisis y soporte documental, indicando su propósito en la evaluación de desempeño de la red HFC. Fuente: Elaboración propia.

La metodología aplicada permitió abordar de manera integral la evaluación de la red HFC de COSETT R.L. y su transición hacia una Arquitectura de Acceso Distribuido (DAA). La combinación de técnicas cuantitativas y cualitativas, la utilización de instrumentos de recolección de datos, herramientas tecnológicas y análisis estadístico, así como la revisión de documentación técnica y estándares internacionales, garantizó la confiabilidad de los resultados. Este enfoque integral facilitó la medición de los indicadores técnicos y económicos antes y después de la simulación de migración. Además, proporcionó evidencia empírica pertinente para fundamentar la viabilidad técnica, operativa y energética de la propuesta de modernización de la red.

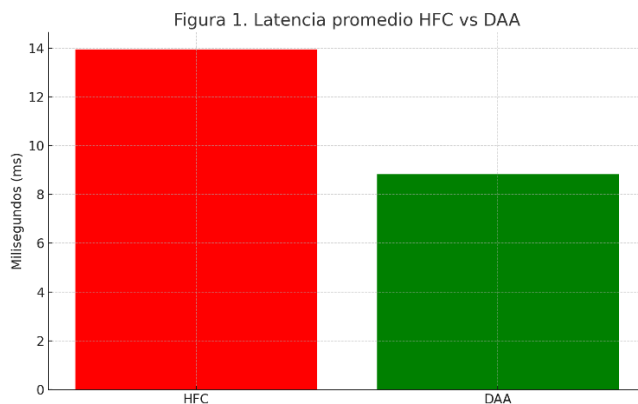
## RESULTADOS

La comparación pretest–postest entre la red HFC centralizada y el escenario de Arquitectura de Acceso Distribuido (DAA) evidenció mejoras significativas en los indicadores técnicos, económicos y ambientales de la red. Se observaron aumentos en la eficiencia operativa, reducción de la latencia, optimización en el uso del espectro y mayores velocidades de acceso, junto con disminuciones en el consumo energético y la ocupación del espacio físico.

Estos hallazgos confirman que la transición hacia una Arquitectura de Acceso Distribuido (DAA) aporta beneficios claros y medibles para la modernización de la infraestructura de COSETT R.L. La latencia promedio en la red centralizada se redujo de 13,945 ms a 8,828 ms en el escenario DAA, lo que representa una mejora aproximada del 36,7%. Véase: Figura 1.

**Figura 1**

*Latencia promedio HFC vs DAA*



*Nota.* La figura muestra la latencia promedio. Fuente: Elaboración propia.

Esta disminución impacta positivamente en la experiencia del usuario, especialmente en aplicaciones sensibles al retardo como *streaming* de video, videoconferencia y servicios

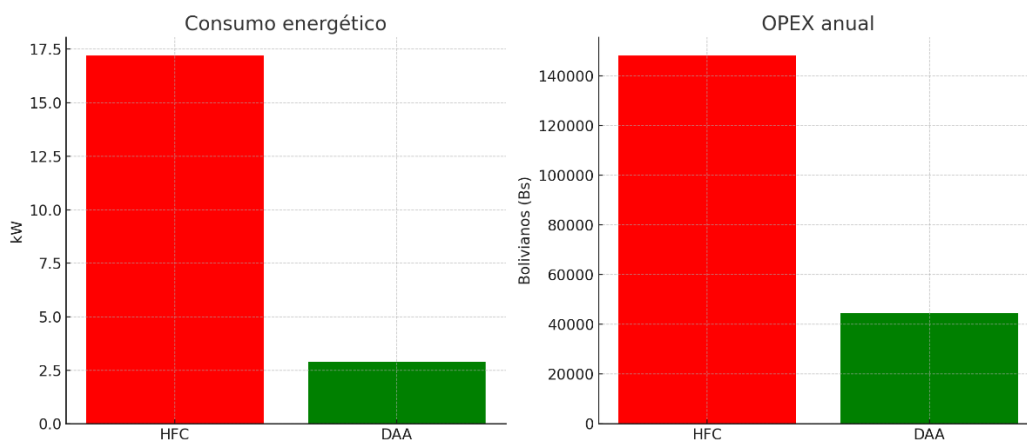
interactivos. La reducción de latencia se debe a la descentralización de funciones críticas mediante los nodos RPD y RMD, que procesan localmente el tráfico, disminuyendo la carga en el *core* de la red.

La modernización de la red hacia DAA permitió reducir el consumo energético de 17,2 kW a 2,9 kW, lo cual significó un ahorro del 83%. Como consecuencia, los costos operativos anuales asociados a energía y climatización descendieron de 148,204 Bs. a 44,461 Bs., lo que representa una disminución de aproximadamente 70%. Este ahorro refleja la eficiencia energética derivada de la virtualización de funciones, la eliminación de módulos redundantes en la cabecera, y la optimización del sistema de climatización al disminuir la carga térmica. Véase: Figura 2.

**Figura 2**

*Costos operativos anuales (OPEX) vs Consumo energético*

Figura 2. Consumo energético y OPEX anual HFC vs DAA



*Nota.* La figura muestra la relación entre la reducción del consumo energético y los costos operativos anuales (OPEX) tras la modernización de la red HFC hacia DAA. Fuente: Elaboración propia.

Como complemento al análisis del desempeño técnico y la optimización de la infraestructura, la Tabla 3 resume los principales indicadores operativos antes y después de la modernización de la red hacia DAA.

**Tabla 3**

*Comparación de indicadores técnicos y operativos de la red HFC antes y después de la modernización hacia DAA*

Indicador	HFC Centralizada	DAA (RPD/RMD)	Impacto principal
Latencia promedio	13.945 ms	8.828 ms	Reducción de ~60%
Consumo energético	17.2 kW	2.9 kW	Disminución de ~83%
OPEX anual (energía + clima)	148,204 Bs	44,461 Bs	Ahorro de ~70%
Espacio en racks (RU)	CMTS centralizado 18–20 RU	RPD/RMD 2–3 RU	Liberación de infraestructura
Espectro utilizable	750 MHz	1.2 GHz	Mayor capacidad
Throughput promedio	500/50 Mbps	1–2 Gbps / 500 Mbps	Incremento de capacidad

*Nota.* La tabla muestra los cambios en desempeño técnico, eficiencia energética y ocupación de infraestructura tras la implementación de la Arquitectura de Acceso Distribuido (DAA) en la red de COSETT R.L. Fuente: Elaboración propia.

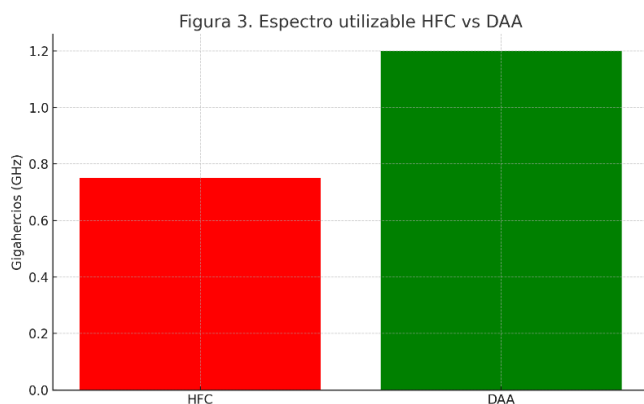
Se evidencia un incremento significativo en el *throughput* promedio, pasando de 500/50 Mbps a 1–2 Gbps/500 Mbps. El espectro utilizable se amplió de 750 MHz a 1,2 GHz, lo cual permitió habilitar más portadoras ascendentes y descendentes. La ocupación de racks se redujo de 152 RU a 11 RU, liberando espacio físico y simplificando la operación en las cabeceras. Estos

resultados destacan la capacidad de DAA para mejorar simultáneamente el rendimiento técnico y la eficiencia en el uso de la infraestructura.

La expansión del espectro disponible, de 750 MHz a 1,2 GHz, permitió un incremento en la capacidad de la red y la posibilidad de soportar un mayor número de servicios concurrentes sin comprometer la calidad. Véase: Figura 3.

**Figura 3**

*Ampliación del uso de espectro de frecuencia*



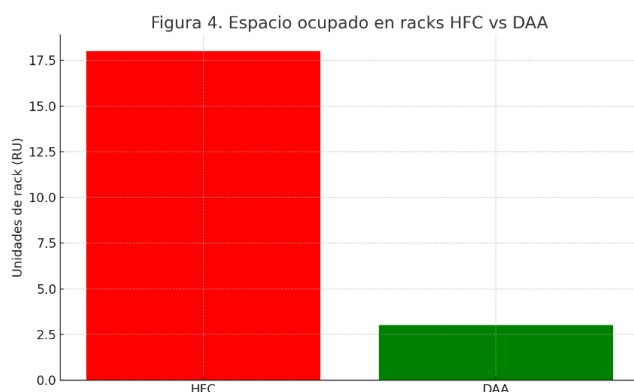
*Nota.* La figura muestra el incremento en el espectro utilizable de la red HFC tras la transición hacia DAA. Fuente: Elaboración propia.

Esta mejora se traduce en un aprovechamiento más eficiente del ancho de banda y una reducción de cuellos de botella en el *core* de la red, fortaleciendo la escalabilidad de la infraestructura. Además, incrementa la capacidad de la infraestructura para soportar simultáneamente un mayor número de nodos y usuarios, mejora la calidad del servicio en aplicaciones sensibles a la latencia y facilita la implementación de futuras expansiones o actualizaciones tecnológicas.

El análisis del espacio físico evidencia que la transición hacia nodos RPD y RMD redujo la ocupación total en racks de 152 RU a 11 RU, liberando más del 90% del espacio previamente utilizado. Esta disminución optimiza la gestión de la infraestructura, reduce la complejidad de mantenimiento y disminuye la carga térmica sobre los sistemas de climatización, contribuyendo a una operación más eficiente y sostenible. Además, el espacio liberado permite incorporar nuevos equipos o servicios sin requerir ampliaciones físicas inmediatas, favoreciendo la escalabilidad y flexibilidad de la red para adaptarse a futuras demandas de capacidad y tecnologías emergentes.

**Figura 4**

*Disminución de espacios en racks*



*Nota.* La figura ilustra la reducción significativa del espacio ocupado en racks tras la implementación de DAA, optimizando la infraestructura física de las cabeceras. Fuente: Elaboración propia.

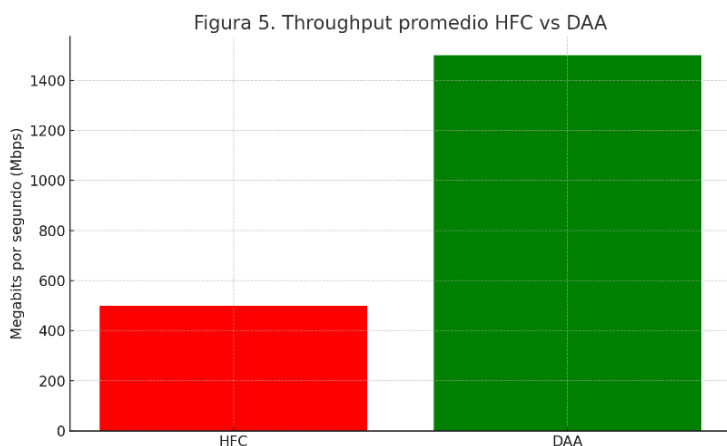
Las pruebas controladas de *throughput* evidenciaron que la modernización hacia DAA incrementa la capacidad de acceso, alcanzando hasta 2 Gbps en *downstream* y 500 Mbps en *upstream*. Este aumento de rendimiento confirma que la red es capaz de soportar servicios multi-gigabit de manera estable y confiable bajo los estándares DOCSIS 3.1 y 4.0, lo que garantiza la

compatibilidad con aplicaciones de alta demanda, como *streaming* en alta definición, videoconferencias y servicios de nube.

Estos resultados validan la viabilidad técnica de la transición hacia una infraestructura modernizada, asegurando que el modelo implementado optimice el rendimiento actual y sea capaz de adaptarse a las demandas futuras de tráfico de datos. La capacidad de la red para manejar un aumento en la carga de trabajo, sin comprometer la calidad del servicio, refuerza la sostenibilidad y escalabilidad de la infraestructura. Además, la transición tecnológica proporciona la flexibilidad necesaria para integrar nuevas soluciones y tecnologías a medida que evolucionen las necesidades de los usuarios, lo que garantiza que la red mantenga un alto nivel de eficiencia operativa a largo plazo. Véase: Figura 5.

**Figura 5**

*Pruebas de Throughput*



*Nota.* La figura muestra los resultados de las pruebas de throughput controladas, evidenciando el incremento de la capacidad de acceso tras la modernización hacia DAA. Fuente: Elaboración propia.

El análisis comparativo entre nodos RPD y RMD muestra diferencias clave en procesamiento, autonomía, requerimientos de *backhaul*, consumo energético y costos. Mientras RPD mantiene cierta dependencia del *core*, RMD procesa localmente tanto la capa MAC como PHY, lo que reduce la latencia y fortalece la escalabilidad de la red. Los resultados de la tabla permiten seleccionar la tecnología más adecuada según la densidad de nodos, el nivel de tráfico y los objetivos de eficiencia energética, facilitando decisiones de diseño alineadas con las necesidades operativas de cada escenario. Este análisis comparativo contribuye a optimizar la planificación de la red, pues permite identificar la alternativa que ofrece el mayor equilibrio entre desempeño, consumo y escalabilidad. Véase: Tabla 4.

**Tabla 4**

*Comparación técnica entre RPD y RMD*

Característica	Remote PHY Device (RPD)	Remote MAC-PHY Device (RMD)
Función principal	Descentraliza las funciones de la capa física (PHY), mientras el procesamiento MAC permanece en el CCAP central o virtualizado (vCMTS).	Integra tanto las funciones MAC como PHY dentro del nodo, eliminando la dependencia del CCAP central.
Procesamiento	El control MAC y la programación de canales se mantienen en el core (vCMTS), lo que permite una gestión centralizada.	El control y asignación de canales se realiza directamente en el nodo, otorgando mayor autonomía operacional.
Requerimientos de backhaul	Requiere mayor capacidad de transporte entre el nodo y el core (generalmente IP/MPLS o L2TPv3).	Menor demanda de tráfico hacia el core, debido al procesamiento local de tramas DOCSIS.
Complejidad de gestión	Moderada: requiere coordinación entre el RPD y el vCMTS mediante GCP (Generic Control Plane).	Más compleja: demanda gestión distribuida y monitoreo avanzado en cada nodo.
Ventajas operativas	Escalabilidad, interoperabilidad multi-vendor, menor costo inicial y facilidad de integración con vCMTS.	Alta autonomía, menor dependencia del core y reducción de latencia adicional en escenarios densos.
Consumo energético estimado	80–150 W (dependiendo del fabricante y capacidad de canales).	150–250 W (por mayor densidad de procesamiento y módulos MAC integrados).

Costo relativo (CAPEX/OPEX)	Menor CAPEX inicial y OPEX reducido por centralización del control.	Mayor CAPEX por nodo y OPEX asociado a mantenimiento descentralizado.
Escenarios de uso recomendados	Ideal para operadores medianos con infraestructura HFC existente que buscan migrar progresivamente a DAA.	Adecuado para operadores con alto tráfico y nodos densos donde la capacidad de procesamiento local justifica el costo.
Ejemplos de implementación	Harmonic RPD, Pebble Gen2, Commscope RD1322, Cisco GS7000 con RPD integrado.	Commscope RMD CH3000, Vecima Entra Access Node, Harmonic RMD G2.

*Nota.* Comparación de características, ventajas, consumo y escalabilidad entre RPD y RMD.

Fuente: Elaboración propia en base a documentación técnica de CableLabs (2025).

Desde la perspectiva económica y energética, la arquitectura DAA generó un ahorro proyectado cercano al 70% del OPEX anual, sustentado principalmente en tres componentes: consumo energético, climatización (HVAC) y mantenimiento técnico. La reducción de potencia de 17,2 kW a 2,9 kW representa un ahorro energético del 83%, equivalente a 125.268 kWh por año, lo que constituye el componente más significativo del ahorro.

La disminución de la carga térmica producida por la liberación de espacio en racks y la eliminación de módulos redundantes reduce la demanda de climatización en un rango estimado de 60% a 65%, lo que impacta proporcionalmente en el consumo eléctrico y en los costos de mantenimiento asociados al sistema HVAC. La simplificación de la infraestructura – particularmente la eliminación de módulos RF, fuentes de poder duplicadas y chasis voluminosos– reduce las intervenciones de mantenimiento preventivo y correctivo aproximadamente en 40%.

El ahorro total anual proyectado puede expresarse mediante la siguiente ecuación:

$$A_{OPEX} = (C_{\text{energía}} \times 0.83) + (C_{\text{HVAC}} \times 0.65) + (C_{\text{mant}} \times 0.40)$$

donde:

$A_{\text{opex}}$  = Ahorro total anual proyectado (%)

$C_{\text{energía}}$  = Costo anual de energía eléctrica

$C^{\text{HVAc}}$  = Costo anual asociado a climatización

$C_{\text{mant}}$  = Costo anual de mantenimiento técnico

Este modelo de cálculo permite estimar el impacto global de la modernización sobre los costos operativos, confirmando que la transición hacia DAA reduce el OPEX en aproximadamente 70% con respecto a la arquitectura HFC centralizada. Además, la modernización del *core* contribuye a mejorar la escalabilidad tecnológica, facilitando la convergencia eficiente de servicios de video, datos y telefonía, lo cual fortalece la capacidad de la red para soportar futuras actualizaciones bajo estándares DOCSIS 3.1 y 4.0.

En términos de desempeño ambiental, la reducción del consumo energético constituye un resultado medible y científicamente verificable. La potencia total del sistema disminuyó de 17,2 kW a 2,9 kW, generando un ahorro anual de 125.268 kWh. Conforme a las metodologías del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, 2021) y de la Agencia Internacional de Energía (IEA, 2023), la emisión de dióxido de carbono evitada se calcula mediante la siguiente expresión:

$$E_{CO_2} = E_{\text{ahorro}} \times FE_{CO_2}$$

donde:

- $E_{CO_2}$ : Emisiones evitadas de CO<sub>2</sub> (kg/año)

- $E_{ahorro}$ : Energía eléctrica ahorrada (kWh/año)
- $FE_{CO_2}$ : Factor de emisión eléctrica del país (kg CO<sub>2</sub>/kWh)

Sustituyendo los valores obtenidos:

$$E_{CO_2} = 125.268 \times 0,40 = 50.107 \text{ kg CO}_2/\text{año} \approx 50,1 \text{ tCO}_2\text{e/año}$$

El resultado equivale a 50,1 toneladas métricas de CO<sub>2</sub> evitadas por año. Proyectado a un horizonte de diez años, representa una reducción acumulada cercana a 500 tCO<sub>2</sub>e, cifra equivalente a la absorción anual de carbono de más de 700 árboles maduros o a las emisiones promedio de aproximadamente 110 automóviles particulares en un año (EPA, 2025). Estos datos refuerzan el valor ambiental del modelo propuesto y demuestran que la migración hacia DAA constituye una estrategia sostenible y técnicamente justificada para la modernización de redes HFC.

Los resultados obtenidos evidencian que la implementación de DAA en la red de COSETT R.L. supera las limitaciones propias de la arquitectura centralizada, incrementa la eficiencia técnica, reduce los costos operativos, y fortalece la sostenibilidad energética y ambiental del sistema. Estos hallazgos consolidan a DAA como un modelo sólido y viable para la modernización tecnológica de la red. La transición hacia arquitecturas distribuidas se posiciona como una estrategia clave para garantizar la competitividad y resiliencia de las redes HFC en el mediano y largo plazo.

## DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos confirman que la migración de una red HFC centralizada hacia una arquitectura DAA genera beneficios significativos en indicadores técnicos, económicos y ambientales. La reducción de la latencia en más del 36%, el incremento de las velocidades de acceso en cinco veces, la expansión del espectro de 750 MHz a 1,2 GHz y la disminución del consumo energético en más del 80% evidencian la capacidad de DAA para mitigar las limitaciones del modelo centralizado. La validación estadística mediante la prueba de Chi-cuadrado ( $\alpha = 0,01$ ;  $\chi^2 = 6,6349$ ) permitió confirmar que las diferencias observadas son estadísticamente significativas.

Estos resultados son consistentes con experiencias documentadas a nivel internacional. En Estados Unidos, *Comcast* ha implementado la tecnología RPD a gran escala como parte de su iniciativa *Next Generation Access Network*, logrando mejoras importantes en rendimiento de red y eficiencia energética (Heynen, 2023). En Europa, *Liberty Global* ha adoptado soluciones RMD, ha optimizado el uso del espectro y ha reducido costos operativos, mientras que *Vodafone* ha iniciado proyectos de migración hacia *Remote PHY*, focalizándose en ofrecer servicios de mayor capacidad y baja latencia (O'Shea, 2022; Teleste, 2024). Estas experiencias internacionales evidencian que la adopción de DAA mejora el desempeño técnico, así como fortalece la eficiencia operativa y sostenibilidad energética de las redes HFC.

En el contexto latinoamericano, aunque los casos específicos de migración DAA no están ampliamente documentados en la literatura académica, los estudios de mercado y las tendencias regionales muestran un crecimiento significativo del despliegue de FTTH y una presión creciente sobre las redes HFC existentes. La rápida expansión de fibra óptica en países como Brasil y México

ha llevado a los operadores a buscar estrategias de modernización tecnológica que incluyan arquitecturas distribuidas como DAA con el propósito de aumentar la capacidad, reducir costos operativos y mantener la competitividad en servicios de banda ancha de alta velocidad (TelecomLead, 2024; Daxis, 2023). Esto indica que el modelo aplicado en COSETT R.L. representa una estrategia viable y alineada con las tendencias de modernización de la infraestructura en la región.

El alcance del estudio se centró en la modernización del *core* HFC, sin intervenir la planta externa, lo que permitió aprovechar la infraestructura coaxial existente, preservar componentes activos y pasivos como amplificadores, acopladores y *taps*, manteniendo plena compatibilidad con la arquitectura DAA. Este enfoque metodológico garantizó la continuidad operativa durante la migración, redujo el CAPEX necesario y optimizó los recursos de inversión sin afectar la calidad del servicio; no obstante, la evaluación se realizó sobre dos cabeceras y 57 nodos representativos, por lo que los resultados podrían variar en escenarios de mayor escala o topologías híbridas.

Los análisis energéticos y económicos reflejaron ahorros sustanciales, pues la migración a DAA permitió reducir el consumo energético total en más del 80% y los costos operativos anuales en aproximadamente 70%, contribuyendo a la sostenibilidad ambiental de la red. La reducción estimada de ~50 tCO<sub>2</sub>e/año refuerza esta dimensión sostenible y se alinea con objetivos de eficiencia energética y tendencias regulatorias de modernización de infraestructuras (Heynen, 2023; O'Shea, 2022). Estos resultados demuestran que la modernización tecnológica es viable desde la perspectiva técnica, económica y ambiental.

Los hallazgos de esta investigación tienen implicaciones en tres ámbitos principales. En el campo académico, aportan evidencia empírica sobre la efectividad de arquitecturas distribuidas en

redes HFC, sirviendo como referencia para futuras investigaciones en operadores de mediana escala. En el plano profesional, brindan a COSETT R.L. un modelo de transición gradual hacia DAA que reduce costos operativos, optimiza recursos y mejora la calidad del servicio sin requerir reemplazos inmediatos de la planta externa, demostrando que la modernización tecnológica puede ejecutarse de manera eficiente y segura. Desde el punto de vista ambiental, la reducción estimada de aproximadamente 50 tCO<sub>2</sub>e/año evidencia un aporte a la sostenibilidad energética de la red, en línea con objetivos de eficiencia y regulaciones de modernización de infraestructuras en Bolivia y la región latinoamericana. Estos resultados consolidan la viabilidad técnica, económica y ambiental de la migración hacia DAA, ofreciendo un modelo replicable para otros operadores HFC.

La investigación evidencia que la migración hacia una arquitectura DAA en COSETT R.L. es técnicamente viable, económicamente eficiente y ambientalmente sostenible, pues optimiza la utilización de la infraestructura existente, los costos operativos y el consumo energético. La propuesta realizada del modelo replicable y escalable constituye un referente para operadores de Bolivia y América Latina que buscan modernizar sus redes HFC de manera progresiva, segura y con bajo riesgo financiero. Los hallazgos destacan la importancia de planificar cuidadosamente la transición para soportar demandas futuras de alto ancho de banda, consolidando un marco práctico y estratégico que permita la modernización tecnológica en contextos similares.

## CONCLUSIONES

El estudio confirmó la viabilidad técnica, económica y ambiental de la arquitectura de Acceso Distribuido (DAA) aplicada a la red HFC de COSETT R.L. Los resultados evidencian mejoras significativas en indicadores de desempeño clave, incluyendo la reducción de la latencia, el aumento de la velocidad de acceso, la optimización del espectro, la disminución del consumo energético y la liberación de espacio físico en cabeceras. La validación estadística mediante la prueba de Chi-cuadrado ( $\alpha = 0,01$ ) respaldó la significancia de estas diferencias, otorgando solidez científica a los hallazgos y confirmando la superioridad del modelo DAA frente a la arquitectura centralizada tradicional.

La investigación logró diagnosticar las limitaciones técnicas y operativas de la red HFC centralizada, comparar de manera cuantitativa los indicadores de desempeño entre ambas arquitecturas, así como diseñar una estrategia de migración gradual y replicable que asegura escalabilidad, sostenibilidad y aprovechamiento de la infraestructura existente. Se evidenció una reducción aproximada del 70% en los costos operativos (OPEX), consolidando la eficiencia económica del modelo y su contribución a la sostenibilidad financiera de la red. La modernización enfocada en el *core* HFC demostró beneficios ambientales al maximizar el uso de la red coaxial desplegada, lo cual evita inversiones innecesarias y reduce la huella energética de la operación.

Se recomienda a COSETT R.L. implementar un plan de migración progresivo hacia DAA, priorizando los nodos con mayor congestión y complementando la modernización con programas de capacitación técnica en RPD, RMD y vCMTS. Para otros operadores HFC en la región, la adopción de DAA se perfila como una estrategia viable para mejorar la eficiencia operativa,

prolongar la vida útil de la infraestructura coaxial y enfrentar la competencia de FTTH. Se sugiere profundizar en estudios sobre CAPEX asociado a la implementación de DAA y explorar la integración de tecnologías emergentes, como DOCSIS 4.0 Full Duplex, para evaluar su impacto en entornos latinoamericanos, y consolidar la modernización tecnológica de manera sostenible y escalable.

## AGRADECIMIENTOS

El autor agradece a la *School of Engineering* (SOE) de la Universidad Autónoma Gabriel René Moreno (UAGRM) por el acompañamiento académico, metodológico y técnico proporcionado durante el desarrollo de esta investigación. Se reconoce la valiosa orientación de los docentes y asesores académicos de la SOE, cuyos aportes contribuyeron significativamente al rigor científico y la calidad del trabajo. Se extiende también un agradecimiento a la familia y colegas, por su apoyo moral y motivación constante, que facilitó el cumplimiento de los objetivos planteados. Se agradece a COSETT R.L. por el acceso a información técnica y conocimiento especializado, fundamentales para la validación de los análisis y resultados de la investigación.

## BIBLIOGRAFÍA

- Abdel Aleem, S., Balci, M., & Rawa, M.J.H. (2024). *Energy Efficiency of Modern Power and Energy Systems*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2022-0-03251-7>
- CableLabs. (12 de noviembre de 2025). Data-Over-Cable Service Interface Specifications MHA v2. Remote PHY Specification. CableLabs. <https://www.cablelabs.com/specifications/CM-SP-R-PHY>
- Dataxis. (2023). Strong progression of fiber homes passed in Latin America, but low level of actual connections. <https://dataxis.com/researches-highlights/1566796/strong-progression-of-fiber-homes-passed-in-latin-america-but-low-level-of-actual-connections>
- EPA- U.S. Environmental Protection Agency. (24 de febrero de 2025). Greenhouse Gas Equivalencies Calculator. <https://www.epa.gov/energy/greenhouse-gas-equivalencies-calculator>
- Ergen, M., Saoud, B., Shayea, I., El-Saleh, A.A., Ergen, O., Inan, F., & Tuysuz, M.F. (2024). Edge computing in future wireless networks: A comprehensive evaluation and vision for 6G and beyond. *ICT Express*, 10(5), 1151-1173. <https://doi.org/10.1016/j.icte.2024.08.007>
- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
- Heynen, J. (3 de noviembre de 2023). Comcast Continues to Lead DAA Deployments. Dell'Oro Group. <https://www.delloro.com/comcast-continues-to-lead-daa-deployments/>

IEA. (2023). *CO2 Emissions in 2023*. International Energy Agency.

<https://iea.blob.core.windows.net/assets/33e2badc-b839-4c18-84ce-f6387b3c008f/CO2Emissionsin2023.pdf>

Ivanets, I.D., Ovsiyak, V.K., & Ovsiyak, O.V. (2024). Remote PHY device module for hybrid fiber-coaxial network based on DOCSIS 4.0 standard. *Ukrainian Journal of Information Technology*, 6(2), 117-124. <https://doi.org/10.23939/ujit2024.02.117>

Jia, Z., Zhang, H., Choutagunta, K., & Campos, L.A. (2025). Coherent passive optical network: applications, technologies, and specification development. *Journal of Optical Communications and Networking*, 17(1), 71–86. <https://opg.optica.org/jocn/abstract.cfm?URI=jocn-17-1-A71>

Lee, K., & Leonard, R. (2023). High-speed internet access and diffusion of new technologies in non-metro areas. *Telecommunications Policy*, 47(9), 1-22. <https://doi.org/10.1016/j.telpol.2023.102620>

Ooka, A., Hayamizu, Y., & Asaeda, H. (2022). HLS and CCNx based high-quality live streaming on on-premises network system. IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops). <https://ieeexplore.ieee.org/document/9882155>

O'Shea, D. (19 de julio de 2022). Liberty Global taps Commscope for DOCSIS 4.0 RMD platform. Fierce Electronics. <https://www.fierceelectronics.com/broadband/liberty-global-taps-commscope-docsis-40-rmd-platform>

Schnitzer, J., Prahladan, P., Rahimzadeh, P., Humble, C., Lee, J., & Lee, J. (2021). Toward Programmable DOCSIS 4.0 Networks: Adaptive Modulation in OFDM Channels. *IEEE*

*Transactions on Network and Service Management*, 18(1), 441–455.

<https://doi.org/10.1109/TNSM.2020.3044850>

Simakovic, M., & Cica, Z. (2021). Detection and localization of failures in Hybrid Fiber–Coaxial network using Big Data platform. *Electronics*, 10(23), 1–15.

<https://doi.org/10.3390/electronics10232906>

TelecomLead. (3 de enero de 2024). Latin America’s optical fiber oversupply spurs industry adaptation. TelecomLead. <https://telecomlead.com/broadband/latin-americas-optical-fiber-oversupply-spurs-industry-adaptation-113991>

Teleste. (8 de mayo de 2024). Teleste’s Remote PHY device caters to the needs of VodafoneZiggo’s DOCSIS ecosystem. Teleste. <https://www.teleste.com/news-and-insights/cases/net/telestes-remote-phy-device-caters-to-the-needs-of-vodafoneziggos-docsis-ecosystem/>

Villarruel, F., Eggert, M., Ghuman, H., & Hajduczenia, M. (2022). *Backhaul Capacity for Optics for Remote PHY*. IEEE Technical Report. [https://grouper.ieee.org/groups/802/3/B10K/public/adhoc/18\\_0220/villarruel\\_b10k\\_01a\\_180220.pdf](https://grouper.ieee.org/groups/802/3/B10K/public/adhoc/18_0220/villarruel_b10k_01a_180220.pdf)