

**Viabilidad de la Implementación de la Tecnología
Broadband Power Line (BPL) en Proyectos de Viviendas
100% Subsidiadas, Ubicados en Zonas Apartadas y de
Baja Densidad Demográfica en Colombia.**

(Trabajo de Grado)

JAIME ENRIQUE TORRES SANTOS

Director:

Ing. Gustavo Alonso Chica Pedraza, PhD(c)

Codirector:

Ing. Germán Macías Muñoz, M.Sc.

UNIVERSIDAD SANTO TOMAS
FACULTAD DE INGENIERIA DE TELECOMUNICACIONES
MAESTRIA EN TELECOMUNICACIONES Y REGULACION TIC
BOGOTÁ, 2020

Para el motor de mi vida,
mi adorada esposa Johanna y mis maravillosas hijas Alejita y July.
A mis padres (q.e.p.d) Herminia y Luis Ángel, que me forjaron e impulsaron el sentido de mi vida.
A mis hermanos Ángel Javier y Luis Fernando, que enriquecen mi camino.
A mis queridos suegros Matilde y Luis Alfredo, que han prolongado el amor de mis padres.
A toda la familia, que llenan de luz mi existencia.
A Dios, que lo es todo.

AGRADECIMIENTOS

Al Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, por permitirme aprender y conocer la visión estatal y la política pública relacionada con las TIC, especialmente en lo concerniente a infraestructura y tecnologías de acceso con enfoque social, cuya información fue fundamental para este trabajo de grado; al Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, por confiar en el trabajo efectuado para sus proyectos, de los cuales se obtuvo una buena parte de la información expuesta en este documento; a mis apreciados amigos expertos en telecomunicaciones que, pese a sus múltiples ocupaciones, dedicaron tiempo de su descanso para atenderme y apoyar con todo su profesionalismo este estudio.

Especial agradecimiento a la Universidad Santo Tomás por el programa de Maestría en Telecomunicaciones y Regulación TIC, que me ha permitido profundizar conocimientos y enriquecer integralmente mi vida profesional; al ingeniero Gustavo Chica por sus sobresalientes capacidades para transmitir sus amplios conocimientos tecnológicos y gerenciales, por su apoyo permanente y disponibilidad con este proyecto y, sin duda, por ser una gran persona; al Ingeniero Germán Macías por sus opiniones técnicas, aportes metodológicos y revisiones al proyecto; a la ingeniera Ángela Tatiana Zona por sus recomendaciones metodológicas y valiosos comentarios a esta propuesta durante el módulo de proyecto de grado; a todo el grupo de docentes de la maestría, quienes merecen mi mayor reconocimiento y respeto, y finalmente, a mis compañeros de clase por su amistad, por enriquecerme personal y profesionalmente y porque de una u otra manera aportaron con comentarios y opiniones para el logro de este trabajo.

TABLA DE CONTENIDO

ACRONIMOS.....	vi
RESUMEN.....	1
INTRODUCCION.....	2
1 MARCO GENERAL DEL PROYECTO.....	5
1.1 OBJETIVOS	5
1.1.1 Objetivos específicos.....	5
1.2 ALCANCE	5
1.3 METODOLOGÍA.....	6
2 TECNOLOGÍAS DE ÚLTIMA MILLA MÁS USADAS PARA SERVICIO DE ACCESO A INTERNET.....	8
2.1 TECNOLOGÍAS DE ÚLTIMA MILLA IMPLEMENTADAS.....	10
2.1.1 Panorama mundial de redes de última milla para acceso a internet.	11
2.1.2 Panorama nacional de redes de última milla para acceso a internet.....	15
2.2 GENERALIDADES DE LAS TECNOLOGÍAS DE ÚLTIMA MILLA PARA ACCESO FIJO A INTERNET MÁS UTILIZADAS EN COLOMBIA.....	21
2.2.1 Redes xDSL en redes de cobre.	21
2.2.2 Redes por cable (HFC – HÍBRIDAS FIBRA / COAXIAL).....	27
2.2.3 Redes de fibra óptica (FTTx)	35
2.3 DESCRIPCIÓN DE LA TECNOLOGÍA BPL.....	38
2.3.1 Retrospectiva de la tecnología BPL	40
2.3.2 Bandas de frecuencia de la tecnología BPL	48
2.3.3 Especificaciones y estándares de la tecnología BPL	49
2.3.4 Topología de las redes eléctricas	53
2.4 IMPACTO AMBIENTAL DE LAS TECNOLOGÍAS DE ÚLTIMA MILLA	55
2.5 COMPARATIVO DE LAS TECNOLOGÍAS DE ÚLTIMA MILLA	60
3 GENERALIDADES DE LOS PROYECTOS DE VIVIENDAS 100% SUBSIDIADAS EN COLOMBIA.....	65
3.1 PROYECTOS DE VIVIENDAS 100% SUBSIDIADAS OBJETO DEL ESTUDIO	68
3.2 SERVICIOS DE ACCESO FIJO A INTERNET EN LOS MUNICIPIOS OBJETIVO	72
4 CRITERIOS PARA LA EVALUACIÓN DE LA IMPLEMENTACIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS DE ÚLTIMA MILLA.....	77

4.1	IDENTIFICACIÓN DE CRITERIOS GENERALES MEDIANTE REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	77
4.2	IDENTIFICACIÓN DE CRITERIOS CLAVES MEDIANTE METODO DELPHI ...	80
4.2.1	Método Delphi – Fase 1.....	81
4.2.2	Método Delphi – Fase 2.....	82
4.2.3	Método Delphi – Fase 3.....	84
4.2.4	Método Delphi – Fase 4.....	84
4.3	CRITERIOS CLAVES PARA LA EVALUACIÓN	85
4.3.1	Condicionante técnico	87
4.3.2	Condicionante de infraestructura	88
4.3.3	Condicionante económico.....	89
4.3.4	Condicionante social / cultural	90
4.3.5	Condicionante regulatorio	91
4.3.6	Condicionante ambiental	91
5	ANÁLISIS DE VIABILIDAD DE LA IMPLEMENTACIÓN DE LA TECNOLOGÍA BPL EN PROYECTOS DE VIVIENDAS 100% SUBSIDIADAS UBICADOS EN ZONAS APARTADAS Y DE BAJA DENSIDAD DEMOGRÁFICA EN COLOMBIA	93
5.1	LA TOMA DE DECISIONES	93
5.2	LA TOMA DE DECISIONES MULTICRITERIO.....	95
5.3	DESCRIPCIÓN DEL PROCESO ANALÍTICO JERÁRQUICO - AHP	98
5.3.1	PASO 1: Descomposición del problema en una jerarquía.....	100
5.3.2	PASO 2: Establecer las prioridades de los criterios.	101
5.3.3	PASO 3: Revisar la consistencia de los juicios.	103
5.3.4	PASO 4: Llegar a una decisión final.	104
5.3.5	PASO 5: Análisis de sensibilidad	104
5.4	APLICACIÓN DEL MÉTODO AHP PARA DETERMINAR LA VIABILIDAD DE LA IMPLEMENTACIÓN DE BPL EN LA ZONA OBJETIVO	105
5.4.1	Objeto del estudio.....	105
5.4.2	Selección de alternativas	105
5.4.3	Selección de expertos	106
5.4.4	Selección de los criterios de decisión	106
5.4.5	Preguntas a los expertos	107
5.4.6	Análisis de dominancia	108
5.4.7	Ponderación de los criterios.....	110

5.4.8	Valoración de las alternativas según cada criterio	116
5.4.9	Cálculo de la prioridad global en el conjunto de alternativas.....	118
5.4.10	Análisis de resultados.....	127
5.4.11	Análisis de sensibilidad.....	129
6	CONDICIONES NECESARIAS PARA VIABILIZAR LA IMPLEMENTACIÓN DE LA TECNOLOGÍA BPL EN PROYECTOS DE VIVIENDAS 100% SUBSIDIADAS, UBICADOS EN ZONAS APARTADAS Y DE BAJA DENSIDAD DEMOGRÁFICA EN COLOMBIA ...	145
6.1	ASPECTOS TÉCNICOS.....	145
6.2	ASPECTOS REGULATORIO / POLÍTICOS.....	148
6.3	ASPECTOS AMBIENTALES	152
6.4	RESUMEN DE CONDICIONES VIABILIZANTES	155
7	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	158
7.1	CONCLUSIONES.....	158
7.2	RECOMENDACIONES.....	159
	REFERENCIAS	161
	LISTA DE FIGURAS	169
	LISTA DE TABLAS	171

ACRONIMOS

Nro	Abreviatura	Término
1	AC	Alternating Current
2	ADSL	Asymmetric Digital Subscriber Line
3	ADSL2	Asymmetric Digital Subscriber Line - 2
4	AHP	Analytic Hierarchy Process
5	AMR	Automatic Meter Reading
6	AR	Augmented Reality
7	A-TDMA	Advanced-Time Division Multiplex Access
8	ATM	Asynchronous Transfer Mode
9	BB-PLC	Broadband Power Line Communication
10	BOCR	Benefit, Opportunity, Cost and Risk
11	BPL	Broadband Powerline Communication
12	CapEx	Capital expenditures
13	CATV	Community Antenna Television
14	CDMA	Code Division Multiple Access
15	CGN	Contaduría General de la Nación
16	CGR	Contraloría General de la República
17	CM	Cable Modem
18	CMTS	Cable Modem Terminating System
19	COVID	Coronavirus Disease
20	CR	Consistency Ratio
21	CSMA	Carrier Sense Multiple Access
22	CWDM	Coarse Wavelength Division Multiplexing
23	DANE	Departamento Administrativo Nacional de Estadística
24	DC	Direct Current
25	DHCP	Dynamic Host Configuration Protocol
26	DLC	Digital Loop Carrier
27	DLC	Distribution Line Carrier
28	DOCSIS	Data-Over-Cable Service Interface Specification
29	DOE	Department of Energy
30	DPL	Digital Power Line
31	DSLAM	Digital Subscriber Line Access Multiplexer
32	DSP	Digital Signal Processing
33	DWMT	Discrete Wavelet Multitone Modulation
34	e-commerce	Electronic commerce
35	EDS DOCSIS	Extended Spectrum DOCSIS
36	EoLT	End-of-Life Treatment
37	EOT	Esquema Básico de Ordenamiento Territorial

38	ETSI TC EE	European Telecommunications Standards Institute / Technical Committee / Environmental Engineering
39	FCC	Federal Communications Commission
40	FDM	Frequency-Division Multiplexing
41	FDX DOCSIS	DOCSIS Full Duplex
42	FEC	Forward Error Correction
43	FFT-OFDM	Fast Fourier Transform - OFDM
44	FN	Fiber Node
45	FonTIC	Fondo Único de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones
46	FTTB	Fiber To The Building
47	FTTB	Fiber To The Building
48	FTTC	Fiber To The Curb
49	FTTC	FTTC – Fiber Top The Curb
50	FTTdp	Fiber To The distribution point
51	FTTH	Fiber To The Home
52	FTTH	Fiber To The Home
53	FTTN	Fiber To The Node
54	FTTx	Fiber To The "x"
55	Gbps	Gigabits por segundo
56	GHG	Green-House Gases
57	HD-PLC	High-Definition Power Line Communication
58	HDR NB PLC	High Data Rate Narrowband PLC
59	HDSL	High bit rate Digital Subscriber Line
60	HDSL2	High bit rate Digital Subscriber Line - 2
61	HDSL4	High bit rate Digital Subscriber Line - 4
62	HF	High Frequency
63	HFC	Hybrid Fiber - Coaxial
64	HPA	HomePlug Powerline Alliance
65	Hz	Hertz
66	ICLD	Ingresos Corrientes de Libre Destinación
67	IDI	Information and communication technology Development Index
68	IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc
69	IMT	International Mobil Telecommunication
70	IoT	Internet of Things
71	IP	Internet Protocol
72	IPP	Inter-PHY
73	IPv6	Internet Protocol version 6
74	ISDN	Integrated Services Digital Network
75	ISO	International Organization for Standardization
76	ISP	Internet Service Provider
77	ISP	Inter-System Protocol

78	ISPLC	International Symposium on Power Line Communications and its Applications
79	ITU	International Telecommunication Union
80	ITU-T	International Telecommunication Union - Standardization Sector
81	Kbps	Kilobits por segundo
82	kHz	kilohertz
83	Km	Kilómetros
84	kW	kilo-Watts
85	LAN	Local Area Network
86	LCA	Life Cycle Assessment
87	LDPC	Low-Density Parity-Check
88	LDR NB PLC	Low Data Rate Narrowband PLC
89	LF	Low Frequency
90	LTE	Long Term Evolution
91	LV	Low Voltage
92	M2M	Machine To Machine
93	MAC	Media Access Control
94	MADM	Multiple Attribute Decision Making
95	MAUT	Multi Attribute Utility Theory
96	MAVT	Multi Attribute Value Theory
97	Mbps	Megabits por segundo
98	MCDA	Multi Criteria Decision Analysis
99	MCDM	Multi Criteria Decision Making
100	MF	Medium Frequency
101	MIMO	Multiple Input – Multiple Output
102	MinTIC	Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones
103	MODM	Multiple Objective Decision-Making
104	MV	Medium Voltage
105	MVCT	Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio
106	MW	Mega-Watts
107	NB	Narrowband
108	NB PLC	Narrow-Band Power Line Communication
109	OCDE	Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico
110	OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
111	OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
112	OLT	Optical Line Terminal
113	ONT	Optical Network Terminal
114	ONU	Optical Network Unit
115	OSI	The Open Systems Interconnection model
116	PBOT	Plan Básico de Ordenamiento Territorial
117	PLC	Power Line Communication
118	PLT	Power Line Communication

119	PMP	Point to Multi-Point
120	PON	Passive Optical Network
121	POT	Plan de Ordenamiento Territorial
122	PRST	Proveedores de Redes y Servicios de Telecomunicaciones
123	PtP	Point to Point
124	PVG II	Plan de Vivienda Gratuita - II
125	QAM	Quadrature Amplitude Modulation
126	QoS	Quality of Service
127	RCS	Ripple Control Signaling
128	RDSI	Red Digital de Servicios Integrados
129	RS	Concatenated Reed-Solomon
130	S-CDMA	Synchronous Code Division Multiple Access
131	SDG	Sustainable Development Goals
132	SHDSL	Single-pair High-speed Digital Subscriber Line
133	SLF	Super Low Frequency
134	SNMP	Simple Network Management Protocol
135	SNMPv3	Simple Network Management Protocol version 3
136	SNR	signal-to-noise ratio
137	TC-PLC	Technical Committee on Power Line Communications
138	TDM	Time-Division Multiplexing
139	TDMA	Time Domain Multiple Access
140	TELCO	Telecomunicaciones
141	TFTP	Trivial File Transfer Protocol
142	TIA	Telecommunications Industry Association
143	TIC	Tecnologías de la Información y las Comunicaciones
144	TPBC	Telefonía Pública Básica Conmutada
145	TRM	Technology Road-Mapping
146	UIT	Unión Internacional de Telecomunicaciones
147	UIT-T	Unión Internacional de Telecomunicaciones - Sector de Normalización
148	ULF	Ultra Low Frequency
149	UNB PLC	Ultra Narrowband PLC
150	UPA	Universal Powerline Association
151	USD	Dólares Americanos
152	V	Voltios
153	VDSL	Very high Digital Subscriber Line
154	VDSL	Very high-bit-rate Digital Subscriber Line
155	VDSL2	Very high-bit-rate Digital Subscriber Line - 2
156	VHF	Very High Frequency
157	VLF	Very Low Frequency
158	VoIP	Voice over Internet Protocol
159	VR	Virtual Reality

160	WoS	Web of Science
161	xDSL	x - Digital Subscriber Loop/Line

RESUMEN

Mediante la utilización del método AHP, y como aporte a las alternativas para la reducción de la brecha digital que afronta Colombia, se demuestra la viabilidad de implementar la tecnología de última milla BPL, para la prestación del servicio de acceso fijo a Internet a los habitantes de las viviendas 100% subsidiadas de zonas apartadas con baja densidad demográfica. Para tal fin, se hace una comparación entre BPL y las tres tecnologías más utilizadas en Colombia (xDSL, HFC y FTTx) mediante el análisis de 30 criterios clave, identificando a su vez, que es necesario abordar algunos aspectos técnicos, regulatorios y ambientales para hacer de BPL la mejor opción de última milla a ser implementada.

Palabras clave: Brecha digital; Tecnologías de última milla; Acceso fijo a Internet; Servicios banda ancha.

ABSTRACT

By using the AHP method, and as a contribution to the alternatives for the reduction of the digital divide that Colombia faces, the feasibility of implementing the BPL last mile technology for providing fixed Internet access service to the inhabitants of 100% subsidized homes in remote areas with low population density is demonstrated. To achieve the above, a comparison is made between BPL and the three most used technologies in Colombia (xDSL, HFC and FTTx) through the analysis of 30 key criteria, identifying at the same time, that it is necessary to address some technical, regulatory and environmental aspects to make BLP the best last-mile option to be implemented.

Keywords: Digital divide; Last mile technologies; Fixed Internet access; Broadband services.

INTRODUCCIÓN

En un mundo envuelto en una cuarta revolución industrial, apalancada en los grandes desarrollos tecnológicos, digitales e Internet, donde muy pocos podrían manifestar desacuerdo con que *“La transformación de átomos a bits es irrevocable e imparable”*[1], es indispensable trabajar en la reducción de la brecha digital, de tal forma que la sociedad de la información y el conocimiento sea incluyente y permita un desarrollo más equitativo de todos los seres humanos.

Hablar del cierre de la brecha digital es hablar de transformación e inclusión digital, es hablar de tecnología al servicio del ser humano, pero para que esto sea una realidad, el acceso a internet debe considerarse un servicio indispensable, a la par de los servicios básicos de saneamiento y de energía, con el fin de orientar los esfuerzos hacia un verdadero desarrollo sostenible de la sociedad.

De acuerdo con los reportes de medición de la sociedad de la información, efectuados por la UIT, en lo relacionado con brecha digital, Colombia se encuentra en el tercio medio de la lista de los 176 países evaluados, lo cual refleja una falta de desarrollo en las TIC, y muestra la existencia de una brecha digital grande respecto a los países desarrollados e, incluso, internamente entre los grandes centros urbanos y las zonas rurales y apartadas [2].

Para alcanzar el desarrollo de las TIC, y generar una verdadera inclusión digital, se requiere avanzar en el desarrollo de tres aspectos fundamentales: más y mejor infraestructura de telecomunicaciones, apropiación tecnológica y el uso adecuado de la tecnología, recordando que es este desarrollo de las TIC, el que podría allanar el camino para el logro de los objetivos de desarrollo sostenible que plantea la Organización de Naciones Unidas[2].

Aunque en Colombia se tiene infraestructura de redes de alta velocidad para transportar señales desde y hacia casi el 99% de sus municipios, la infraestructura de redes de última milla para la prestación del servicio de acceso fijo a Internet, está concentrada en grandes

centros urbanos y en estratos socioeconómicos medio y alto, quedando rezagados, o hasta abandonados, los estratos socioeconómicos bajos, los pequeños centros urbanos y las zonas rurales [68], siendo esta la razón para no llegar si quiera al 40% de la penetración del servicio de Internet en hogares [7].

Esta situación lleva a buscar y evaluar alternativas tecnológicas para lograr la inclusión digital de las personas que hacen parte de los estratos socioeconómicos bajos y de aquellos que, adicionalmente, se encuentran en zonas apartadas y de baja densidad demográfica, donde sufren un mayor olvido por parte de la sociedad en general y por parte del estado.

En razón a que Colombia, por diversos motivos, no parece contar con los recursos necesarios para desplegar, de manera rápida, la totalidad de la infraestructura de telecomunicaciones que se requiere para brindar el servicio de acceso a Internet a todos los habitantes, es importante considerar y evaluar cada alternativa tecnológica que busque aprovechar la infraestructura existente y que, adicionalmente, propenda por una sostenibilidad económica y a su vez ambiental, aportando a la reducción de las emisiones de carbono durante el ciclo de vida de la tecnología, tal como podría ser el caso de la tecnología de última milla BPL (Broadband Powerline Communication).

Con el fin de aportar a la búsqueda de alternativas tecnológicas para avanzar en el cierre la brecha digital, especialmente para aquellos ciudadanos de zonas apartadas y cuasi olvidadas del país, este documento busca establecer la viabilidad de la instalación de la tecnología de última milla BPL, para brindar el servicio de acceso fijo a internet a un segmento de la población ubicado en zonas apartadas y de baja densidad poblacional, a quienes, por sus condiciones de pobreza extrema, el gobierno nacional adjudicó viviendas totalmente subsidiadas, que cumplen con características mínimas para garantizar una vida digna, donde se podría sacar provecho de la infraestructura eléctrica construida bajo los parámetros de calidad exigidos en la normatividad existente en el país.

Por otro lado, es importante resaltar que la ejecución de este trabajo de grado es una buena oportunidad para poner a prueba, como lo han hecho en múltiples sectores de la economía y la ciencia, el proceso analítico jerárquico (AHP, por sus siglas en inglés), con el cual se pueden integrar múltiples criterios, opiniones y aspectos objetivos y subjetivos de diferentes interesados, para llegar a un consenso, de tal forma que se pueda tomar una decisión respecto a un problema planteado, que en este caso es la viabilidad de la implementación

de la tecnología BPL en la zona objetivo, al ser comparada con las tres soluciones tecnológicas de última milla más utilizadas en Colombia que son xDSL, HFC y FTTH.

El desarrollo del presente trabajo se aborda en siete capítulos, donde en el primero de ellos se plasman los objetivos, alcance y metodología para su realización; en el segundo capítulo se hace una revisión de las tecnologías de última milla fija más usadas a nivel mundial y nacional, haciendo adicionalmente una descripción de la tecnología BPL, e incluyendo una generalidad del impacto ambiental de las tecnologías de última milla, para terminar con un cuadro comparativo de los factores más relevantes de las tecnologías consideradas para el análisis; en el tercer capítulo se presentan las generalidades de los proyectos de vivienda 100% subsidiadas objeto del estudio y, a su vez, se hace una revisión de los servicios de acceso fijo a internet prestados en los municipios donde se ubican dichos proyectos de vivienda; en el cuarto capítulo se identifican los condicionantes y criterios claves que se tendrán en cuenta para la evaluación; en el quinto capítulo se realiza el análisis de la viabilidad de la implementación de la tecnología BPL, mediante la aplicación del método AHP, efectuando también el análisis de sensibilidad de los resultados obtenidos; en el sexto capítulo se exponen las condiciones necesarias que harían de la tecnología BPL la mejor opción a utilizar en la zona objetivo; y, finalmente, en el séptimo capítulo se relacionan las conclusiones y recomendaciones resultantes de la ejecución del trabajo.

1 MARCO GENERAL DEL PROYECTO

1.1 OBJETIVOS

Determinar la viabilidad de la implementación de la tecnología BPL en proyectos de viviendas 100% subsidiadas, ubicados en zonas apartadas y de baja densidad demográfica en Colombia, mediante la aplicación del método Analítico Jerárquico, teniendo en cuenta condicionantes técnicos, económicos, sociales, políticos, regulatorios, ambientales y de infraestructura.

1.1.1 Objetivos específicos

- Identificar la actualidad de la tecnología Broadband Power Line y las tres tecnologías más utilizadas a nivel nacional para dar conectividad de última milla, para el servicio de acceso a internet, mediante la realización de un cuadro comparativo.
- Establecer los principales criterios a tener en cuenta para la evaluación de las tecnologías de red de última milla, resultantes del numeral anterior, para sectores de viviendas 100% subsidiadas ubicadas en zonas apartadas y de baja densidad demográfica de Colombia.
- Determinar la viabilidad de la implementación de la tecnología Broadband Power Line en proyectos de viviendas 100% subsidiadas ubicadas en zonas apartadas y de baja densidad demográfica de Colombia, mediante la aplicación del método Analítico Jerárquico (AHP), teniendo en cuenta condicionantes técnicos, económicos, sociales, políticos, regulatorios, ambientales y de infraestructura.
- Identificar las condiciones necesarias para que la implementación de la tecnología Broadband Power Line pueda ser viable en proyectos de vivienda 100% subsidiadas ubicadas en zonas apartadas y de baja densidad demográfica de Colombia, teniendo en cuenta los resultados obtenidos en el objetivo anterior.

1.2 ALCANCE

Mediante la identificación de las tres tecnologías de última milla más usadas a nivel nacional, el establecimiento de los criterios relevantes a considerar para la zona de evaluación y apoyado en el Método Analítico Jerárquico para toma de decisiones,

determinar la viabilidad de la implementación de la tecnología Broadband Power Line para la prestación del servicio de acceso a internet en los proyectos de viviendas 100% subsidiadas ubicados en zonas apartadas y de baja densidad demográfica de Colombia.

1.3 METODOLOGÍA

Con el fin de asegurar un avance certero para cada uno de los objetivos específicos planteados, y lograr alcanzar el objetivo general del presente trabajo, se sigue la siguiente metodología:

- Consultar e identificar las características físicas de los proyectos de viviendas 100% subsidiadas, ubicados en zonas apartadas y de baja densidad demográfica de Colombia, en cuanto a su urbanismo, distribución de viviendas y caracterización de las redes eléctricas.
- Revisión de fuentes oficiales locales, e internacionales de ser necesario, para establecer las tres tecnologías de última milla más usadas a nivel nacional para la prestación del servicio de acceso a internet.
- Mediante la consulta a expertos, establecer los principales criterios a tener en cuenta para la evaluación comparativa de las cuatro tecnologías (Broadband Power Line y las 3 más usadas a nivel nacional); Adelantar las evaluaciones correspondientes.
- Hacer el modelamiento del Método Analítico Jerárquico, con las consideraciones particulares de la evaluación, utilizando el software “Expert Choice”.
- Basado en el análisis de los resultados obtenidos con el software utilizado, emitir las conclusiones finales respecto a la viabilidad de la implementación de la tecnología Broadband Power Line, para la prestación del servicio de acceso a internet, en proyectos de viviendas 100% subsidiadas ubicados en zonas apartadas y de baja densidad demográfica de Colombia.

En la *Figura 1* se presente el cronograma de ejecución de las diferentes actividades con las que se asegura el desarrollo de la metodología:

ITEM	ACTIVIDADES	2019				2020							
		Jun-Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago
1	Sesiones de trabajo con Dirección de Sistemas Habitacionales de MinVivienda (búsqueda de información de proyectos 100% subsidiados)												
2	Sesiones de búsqueda de información con Fideicomiso de Proyecto de Viviendas 100% Subsidiadas Fase II (información sobre los términos de referencia y caracterización de los proyectos)												
3	Revisión fuentes oficiales UIT, OCDE, MinTIC, Colombia TIC, etc para establecer las 3 tecnologías de última milla más usadas en el mundo y en Colombia												
4	Identificación y contacto de expertos en proyectos de implementación de última milla (área gerencial, técnica, regulatoria, social, pública, privada, etc)												
5	Encuestas a expertos para establecer los criterios a considerar para el modelo analítico jerárquico (AHP)												
6	Encuestas a expertos para para la evaluación comparativa de las 4 tecnologías												
7	Ejecución del método analítico jerárquico (AHP) utilizando el software Expert Choice												
8	Análisis de resultados del AHP, con acompañamiento de los expertos												
9	Resultados finales de la evaluación según AHP												
10	Conclusiones finales respecto a la Viabilidad de la implementación de BPL												
11	Revisiones periódicas con el director y codirector del proyecto												

Figura 1. Cronograma de actividades de ejecución del estudio de viabilidad de BPL

2 TECNOLOGÍAS DE ÚLTIMA MILLA MÁS USADAS PARA SERVICIO DE ACCESO A INTERNET

Las TIC son fundamentales en la medida que son el medio para generar la verdadera transformación digital, que mediante el acceso ubicuo a la conectividad, a la información y la convergencia con múltiples avances tecnológicos, permite empoderar cada día más al individuo [3]. En la actualidad, el Internet es el gran generador del cambio, tanto que ha sido el cimiento para impulsar la cuarta revolución industria, la cual aprovecha la gran capacidad de innovación del ser humano para seguir avanzando en desarrollos tecnológicos, especialmente en los que hasta el momento se consideran los cuatro grandes impulsores: la analítica de macro datos, el Internet de las cosas, la computación en la nube y la inteligencia artificial [2].

Solo hay que ver lo que pasa en un minuto en internet para percibir su relevancia y el impacto que puede tener su crecimiento exponencial de conexiones, usuarios y aplicaciones. A 2019, en promedio, tal como se aprecia en la *Figura 2*, cada minuto se envían 188 millones de correos electrónicos, Google procesa 3,8 millones de consultas de búsquedas o se visualizan 694.444 horas de Netflix, entre cientos o miles de actividades que se pueden efectuar sobre la red de redes. De la misma manera, se muestra un ejemplo de la gran cantidad de actividades que minuto a minuto se roban la atención de la sociedad en general [4].

Por otro lado, de acuerdo con los datos presentados por el banco mundial, a 2017, el 49.7% de la población mundial usaba internet [5], es decir que de los 7.594 millones de habitantes existentes a 2017 [6], aproximadamente 3.774 millones usaban internet.

Por su parte, la UIT reportó que para finales de 2018, por primera vez, más de la mitad de la población mundial estaría usando Internet, lo cual se constituye en una muestra del buen camino que se está recorriendo en aras de lograr una sociedad de la información más incluyente, que brinde grandes oportunidades a través del uso de las TIC [2].

Sin embargo, lo anterior muestra que todavía hay mucho camino por recorrer en cuanto a penetración del servicio de internet a nivel mundial, y hace necesario tener presente lo mencionado por Brahima Sanou, Director de la Oficina de Desarrollo de telecomunicaciones

2019 Esto es lo que está pasando en Un Minuto en Internet



Figura 2. Lo que pasa en 1 minuto en Internet

Fuente: Adaptado de [4]

de la UIT, en cuanto a la existencia de un gran reto para el cierre de la enorme brecha digital existente entre los países desarrollados y aquellos en vía de desarrollo o subdesarrollados, al igual que al interior de los países, entre las zonas urbanas y las zonas rurales, de tal forma que se contribuya al logro de los objetivos de desarrollo sostenible planteados por la Organización de Naciones Unidas [2].

En Colombia, para lograr un avance significativo de la inclusión social digital, es indispensable aumentar la penetración del servicio de internet, para lo cual no solo se requiere de estrategias para la masificación del acceso universal a las TIC, también se requiere avanzar en la masificación del servicio universal, es decir, que las tecnologías de la información y las comunicaciones lleguen al hogar de cada uno de los colombianos [7].

Esto significa que, para lograr la inclusión social digital en Colombia, es necesario reducir el déficit de infraestructura de redes de última milla en todo el país, ya que a 2018 solo el 37.5% de los hogares contaban con servicio de Internet fijo y el 50% de ellos contaban con

una conexión a Internet suscrita, razón por la cual el gobierno nacional a través del Ministerio TIC y su Plan TIC 2018- 2022 “El Futuro Digital es de Todos” tiene como meta para 2022, alcanzar una penetración del 50% del servicio de internet fijo a hogares y del 70% para el caso de internet suscrita [7].

Como consecuencia de esta situación, el presente trabajo se enfoca en las tecnologías de acceso, redes de última milla, para brindar conectividad y servicio de internet, en este caso, en los proyectos de viviendas 100% subsidiados, ubicados en zonas apartadas y de baja densidad demográfica en Colombia.

A continuación, se hace una revisión sobre las tecnologías de última milla más usadas a nivel mundial y local, con el fin de conocer como es la situación colombiana respecto al panorama mundial. Posteriormente, se escogerán las tres tecnologías más usadas localmente y se describirán sus principales características, para finalmente hacer una comparación entre ellas, incluyendo la tecnología BPL.

2.1 TECNOLOGÍAS DE ÚLTIMA MILLA IMPLEMENTADAS

Las tecnologías de acceso, también conocida como tecnologías de última milla, corresponden al tramo de red que incluye aquellos elementos, como equipos de transmisión y cables, de ser el caso, que permiten efectuar el transporte (capacidad portadora) necesario para la prestación del servicio de telecomunicaciones entre el nodo y cada una de las interfaces de red de usuario [8]. En otras palabras, una red de acceso es el segmento de red comprendido entre el backbone y las premisas de los usuarios ubicados en el área de un nodo, permitiendo que cada uno de los usuarios, bien sea un individuo, un hogar o un grupo de personas, hagan parte activa de la sociedad de la información y el conocimiento, promoviendo que se genere la inclusión social digital. Así las cosas, podría decirse que las tecnologías de última milla son esenciales para vincular a cualquier usuario al servicio de telecomunicaciones.

El siguiente es el panorama mundial y local de las tecnologías de última milla actualmente desplegadas.

2.1.1 Panorama mundial de redes de última milla para acceso a internet.

La UIT presenta el índice de desarrollo de TIC (IDI – por sus siglas en inglés) para 176 países, índice calculado respecto a 3 factores esenciales: i) la infraestructura, ii) el uso y iii) las habilidades en las TIC en cada uno de los países, señalando que el índice además de mostrar el desarrollo general de las TIC, muestra también que la brecha digital entre países más y menos conectados sigue siendo un desafío que debe abordarse para que las sociedades de la información inclusivas contribuyan al logro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (SDG – por sus siglas en inglés) [2].

Tal como lo muestra la UIT, según *Figura 3*, existe a nivel mundial una tendencia general creciente en la disponibilidad de servicios de comunicación, impulsada por un crecimiento rápido en banda ancha; con un predominio creciente de servicios móviles sobre servicios fijos [2].

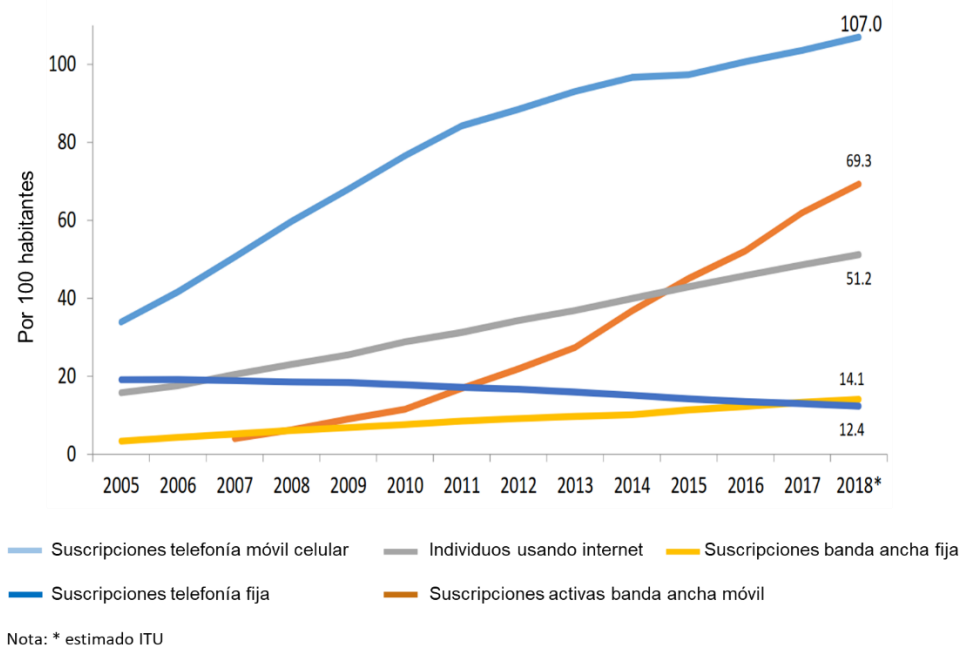


Figura 3. Desarrollo mundial de las TIC, 2005-2018*

Fuente: Adaptado de [2]

En línea con la UIT, y considerando como servicios de banda ancha aquellos con una velocidad superior a 256 Kbps [2], en la *Figura 3* se aprecia que a nivel mundial:

- El número de suscripciones de telefonía móvil-celular crecieron de 2005 a 2018 de 33.9 % a un estimado de 107 % de penetración, es decir que la cantidad de suscripciones móviles superan la población mundial, lo cual no significa que todas las personas tienen acceso a un teléfono móvil. Sin embargo, de acuerdo con los estudios de TIC en hogares, efectuado por la UIT, el 76.4% de la población mundial posee un teléfono móvil.
- El número de suscriptores de telefonía fija ha continuado cayendo, al pasar de un pico de 1.3 billones en el año 2006, equivalente a una penetración de 19.2%, a 1 billón en 2016, a 972 millones para finales de 2017, y llegando a 942 millones en 2018, es decir una penetración estimada de 12.4%.
- El número de suscriptores activos de servicio de banda ancha móvil creció de una penetración de 4% en 2007 a 69.3% en 2018. Es decir, pasó de 268 millones de suscriptores en 2007 a 5.300 millones en 2018.
- El número de suscriptores de servicios de banda ancha fija incrementaron sustancialmente entre 2005 y 2018, pasando de 220 millones a 1.100 millones, es decir, pasaron de una penetración de 3.4 % en 2005 a 14.1% en 2018 y sobrepasando la cantidad de conexiones de telefonía fija.

De lo anterior, y teniendo en cuenta que los suscriptores de servicio banda ancha fija son cerca de la quinta parte de los suscriptores activos de servicio banda ancha móvil, se podría decir que la mejor opción para acceder a servicios de Internet de banda ancha es mediante redes móviles celulares, sin embargo, esto no es necesariamente cierto, pues esto depende de diversos factores, como son, el tipo de usuario (persona, corporativo, hogar, etc.), el tipo de servicio o aplicaciones que se quieran utilizar, la necesidad o importancia de la movilidad, la calidad de servicio que se requiera, entre otros.

Adicionalmente, es importante mencionar que muchos de los países en vía de desarrollo o menos desarrollados, tienen una penetración mucho más baja de servicios banda ancha fija, respecto a los países desarrollados, debido al bajo despliegue existente de redes telefónicas fijas, como se aprecia en la *Figura 4*. De hecho, la UIT ha manifestado su preocupación, en los reportes previos al de Medición de la Sociedad de la Información 2017 y en otros análisis efectuados, acerca de la importancia potencial de la conectividad de

banda ancha fija para permitir a los países en vía de desarrollo maximizar el uso de los servicios de comunicaciones más avanzadas [2].

En la *Figura 4* se muestra la penetración del servicio de banda ancha fijo, por cada 100 habitantes a nivel mundial y por nivel de desarrollo (países desarrollados, países en vía de desarrollo y países menos desarrollados).

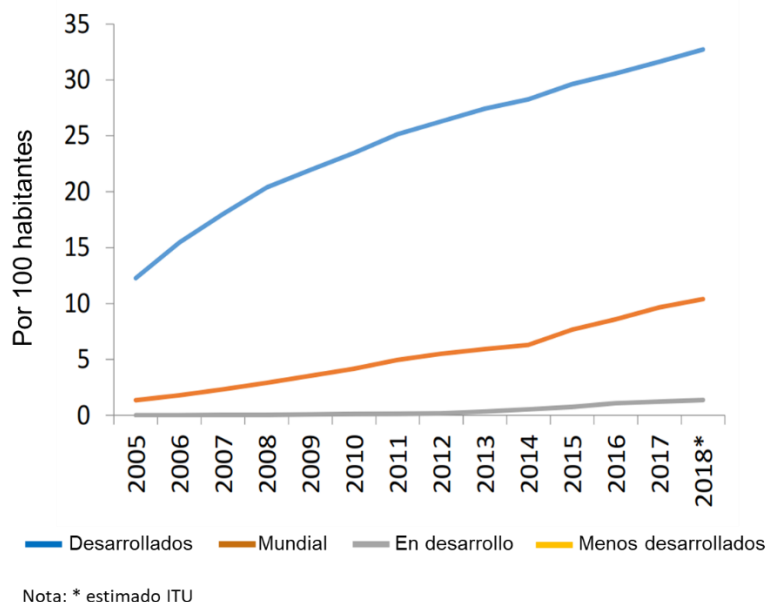


Figura 4. Suscripciones banda ancha fija x 100 habitantes y por nivel de desarrollo, 2005– 2018*

Fuente: Adaptado de [2]

Sumado a lo anterior, de acuerdo con la UIT, promover la instalación del servicio de Internet para Hogares, es uno de los caminos más efectivos para lograr una sociedad de la información incluyente, en donde toda gente, independiente del género, la edad, discapacidades, situación económica o social, puede hacer uso del Internet y todos sus recursos, además, el servicio puede ser compartido por todos los miembros de la familia [2].

De la misma manera, informa la UIT, dentro de las estrategias adoptadas por los países que buscan avanzar en el cierre de la brecha digital, asegurando el acceso universal a Internet, es fundamental promover el acceso a internet en todos los hogares [9].

Se debe tener en cuenta que una red de alta calidad para servicios de banda ancha debe caracterizarse por ser una red de alta disponibilidad, pocas interrupciones, permitir entregar una cantidad de datos suficiente para satisfacer la necesidad del cliente, pero a su vez debe entregarlos a una velocidad alta, con baja latencia, y ser económica, de tal forma que el modelo de negocio viabilice su despliegue, la administración, operación y mantenimiento, y que sea fácilmente escalable, es decir ampliable según aumente la demanda del servicio [10].

Aunque las tecnologías inalámbricas y cableadas son complementarias, pues estas últimas se constituyen en el backhaul o backbone de las primeras, a nivel de redes de acceso pueden ser competencia. Respecto a servicios de banda ancha, existen aspectos que limitan la calidad de una red inalámbrica que no afectan a las redes cableadas. Por un lado, un aspecto fundamental que afecta la velocidad y la capacidad del servicio en las redes inalámbricas es la poca disponibilidad de espectro, lo cual se percibe, por parte de los clientes, en mayor o menor grado dependiendo de la cantidad de usuarios y de su proximidad a la torre que los atiende, por otro lado, los aspectos climáticos y barreras físicas (obstáculos en el terreno) atenúan las señales reduciendo la disponibilidad y su fiabilidad [10].

La disponibilidad de espectro se ve limitada, especialmente en los países en desarrollo, por la convivencia que durante mucho tiempo van a tener las redes móviles con tecnologías 2G, 3G y 4G, y aunque las IMT (por sus siglas en inglés) evolucionan para tener mayores velocidades de transferencia de información, el crecimiento del número de emplazamientos crece a un ritmo mucho más bajo, generando una percepción de mala calidad del servicio. Esto hace que por ahora se requiera trabajar en permitir el uso de una mayor cantidad de frecuencias para transmisión de datos, aprovechando las tecnologías LTE (por sus siglas en inglés) [10].

A 2017, las tecnologías de acceso de Fibra Óptica (incluidas FTTH, FTTB, FTTC, VDSL, VDSL2 y Gfast) y las tecnologías de cable (incluida HFC) representan algo más de tres cuartas partes de los suscriptores mundiales de banda ancha fija (57% Fibra y 20% Cable), siendo los demás suscriptores atendidos por otras tecnologías como ADSL principalmente [11], [12].

Por otro lado, en los 37 países que hacen parte de la OCDE, de la cual hace parte Colombia [13], a 2018, los suscriptores de banda ancha, dependiendo la tecnología de acceso utilizada, se distribuían tal como se muestra en la *Figura 5* , donde se aprecia que al igual que a nivel global, las tecnologías de redes de acceso en fibra óptica, cable y DSL son las predominantes [14].

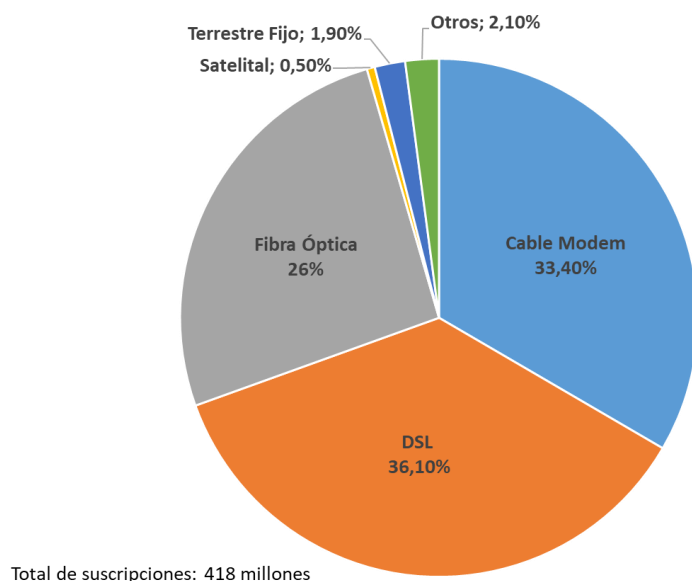


Figura 5. Suscriptores banda ancha fija por tecnología - OCDE, diciembre 2018

Fuente: Adaptado de [14]

2.1.2 Panorama nacional de redes de última milla para acceso a internet

Teniendo en cuenta el contexto mundial anteriormente presentado, las recomendaciones de la UIT en materia de redes de acceso fijo a Internet y que el análisis del presente documento se centra en redes de última milla para brindar conectividad y servicio de internet a hogares (en los proyectos de viviendas 100% subsidiados, ubicados en zonas apartadas y de baja densidad demográfica en Colombia) donde por razones de costo-eficiencia es muy importante que con una misma conexión se tenga el mayor impacto posible a los integrantes de un mismo hogar, el análisis para establecer la viabilidad de la implementación de la tecnología BPL en la viviendas 100% subsidiadas antes descritas, se

efectuará tomando como base las tecnologías cableadas para acceso fijo más usadas en el mercado colombiano.

Para lo anterior, se toma como fuente oficial los reportes o boletines expedidos por el Portal Oficial de Estadísticas del Sector TIC – Colombia TIC, de MinTIC, al que los PRST reportan de manera periódica la cantidad de usuarios atendidos y los servicios prestados mediante las diferentes tecnologías de acceso ofrecidas.

Es importante mencionar que, la conexión que se requiere del servicio de datos o acceso a Internet para los usuarios de los proyectos de viviendas 100% subsidiadas, objeto del estudio, no necesariamente debe ser de “Banda Ancha” tal como está definida en la resolución 5161 de 2017, entendiéndose esta como “La capacidad de transmisión cuyo ancho de banda es suficiente para permitir, de manera combinada, la provisión de voz, datos y video, ya sea de manera alámbrica o inalámbrica”, cuyos valores mínimos de la velocidad efectiva de subida y bajada son 5 y 25 Megabits por segundos (Mbps) respectivamente [15].

Lo anterior, teniendo en cuenta que los residentes de las viviendas 100% subsidiadas, clasificados socio-económicamente como estrato 1, son familias que, por su condición de pobreza, han requerido de este apoyo gubernamental para acceder a un lugar digno para vivir, y que por este mismo motivo, por ahora, no necesitan una conexión a internet para acceder a aplicaciones robustas o a grandes procesamiento de datos e información, pues en este momento requieren de lo necesario para acceder a una educación de calidad y desarrollar actividades personales, de entretenimiento o de negocio, que con velocidades efectivas de descarga de datos por debajo de los 25 Mbps pueden ser atendidas.

Adicionalmente, lo anterior tiene mucho más sentido si se tiene en cuenta que para los 6.8 millones de accesos fijos a Internet existentes en Colombia al primer trimestre de 2019, ver *Figura 6*, la velocidad efectiva de bajada promedio nacional fue de 10.5 Mbps, como se aprecia en la *Figura 7*, y que para el segmento residencial a nivel nacional la velocidad fue de 9.9 Mbps, tal como se ve en la *Figura 8*, donde la velocidad efectiva de bajada promedio en el Estrato 1 fue de 5.4 Mbps y para los suscriptores residenciales sin estratificar, la velocidad efectiva de bajada promedio nacional fue de 3.1 Mbps, como se presenta en la *Figura 9* [16].

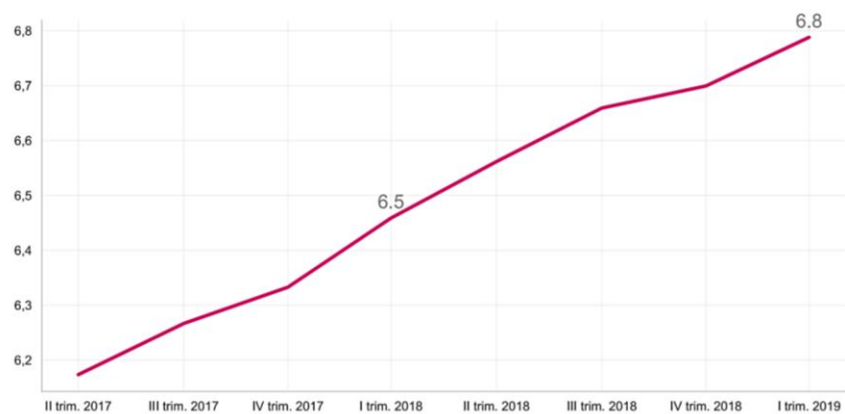


Figura 6. Acceso fijo a Internet (Millones) - 1T / 2019

Fuente: [16]

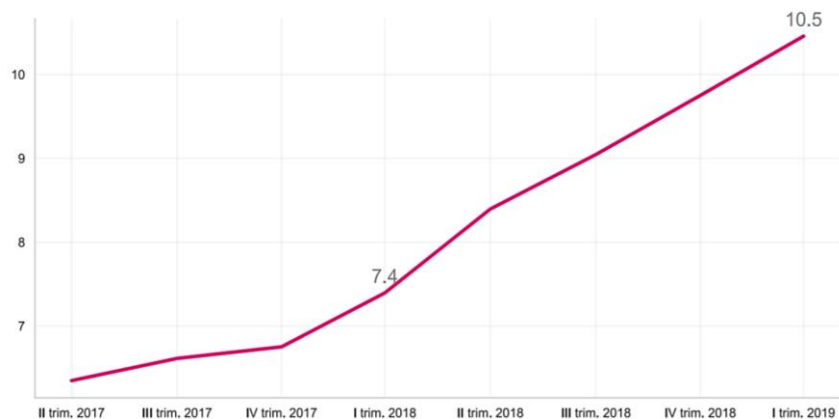


Figura 7. Velocidad de descarga promedio nacional (Mbps) - acceso fijo a Internet 1T/ 2019

Fuente: [16]

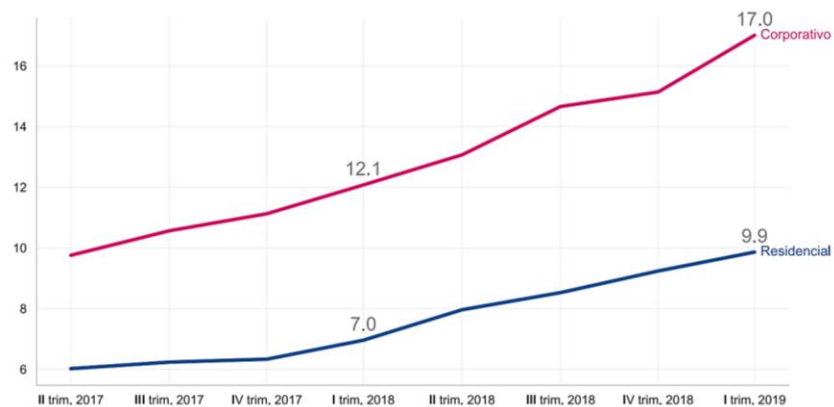


Figura 8. Velocidad de descarga promedio por segmento (Mbps)- acceso fijo a Internet -1T/ 2019

Fuente: [16]

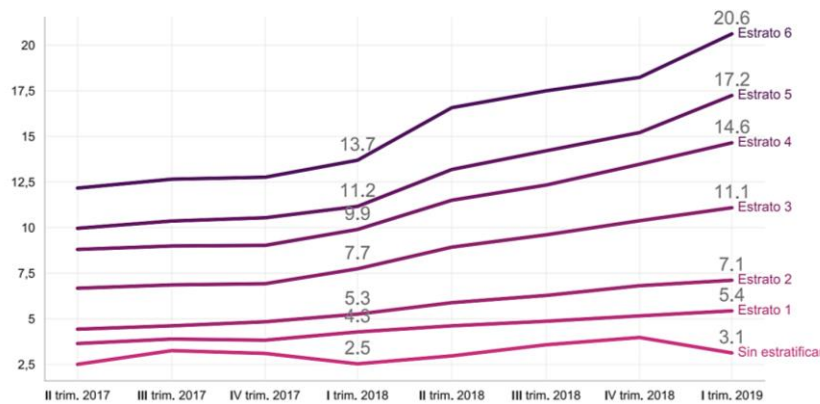


Figura 9. Velocidad de descarga promedio por estrato (Mbps) - acceso fijo a Internet - 1T / 2019

Fuente: [16]

El mismo panorama se puede ver cuando se revisa la velocidad de descarga promedio en algunos de los departamentos más alejados de los grandes centros urbanos del país, como son Vichada, Guainía, Amazonas, Vaupés, Putumayo, Chocó, Guaviare, etc, tal como se observa en la *Figura 10*, aunque son zonas que con la llegada de las redes de transporte (servicio portador) de alta velocidad, especialmente del Proyecto Nacional de Fibra Óptica [17] y del Proyecto Nacional de Conectividad de Alta Velocidad (Red de Micro-Ondas de Alta Velocidad) [18], y otras iniciativas de incentivo a la oferta y a la demanda ejecutadas por MinTIC [19], deben incrementar la capacidad, velocidad y, en general, la calidad del servicio de acceso fijo y móvil a internet.

Se debe recordar que la velocidad efectiva de bajada se entiende como la capacidad de transmisión medida en Megabits por segundo (Mbps) garantizada por el proveedor de servicio de Internet (ISP – por sus siglas en inglés) hacia el usuario, incluyendo tanto el segmento de acceso como los canales nacionales e internacionales [20].

Como consecuencia del análisis anterior, relacionado con la velocidad efectiva de bajada necesaria para dar servicio a las viviendas 100% subsidiadas objeto de evaluación, y teniendo en cuenta la regulación vigente en Colombia, en adelante, en el presente documento, no se hará mención a acceso fijo a Internet de banda ancha, solo se hará referencia a Acceso Fijo a Internet.

Con relación a las diferentes tecnologías a través de las cuales se puede prestar el servicio de acceso fijo a internet, se tienen i) tecnologías alámbricas, como redes de acceso por par

de cobre (xDSL, Modems), redes de acceso por cable, redes híbridas de fibra y cable (HFC), acceso fijo por red eléctrica (BPL), redes de acceso por fibra óptica (FTTx, PON, GPON, EFM), y ii) tecnologías inalámbricas como son accesos satelitales y acceso fijo terrenal (inalámbricos fijos, LTE, Wifi y Wimax) [21], esto alineado con lo señalado en la resolución 5050 de 2016 [22].

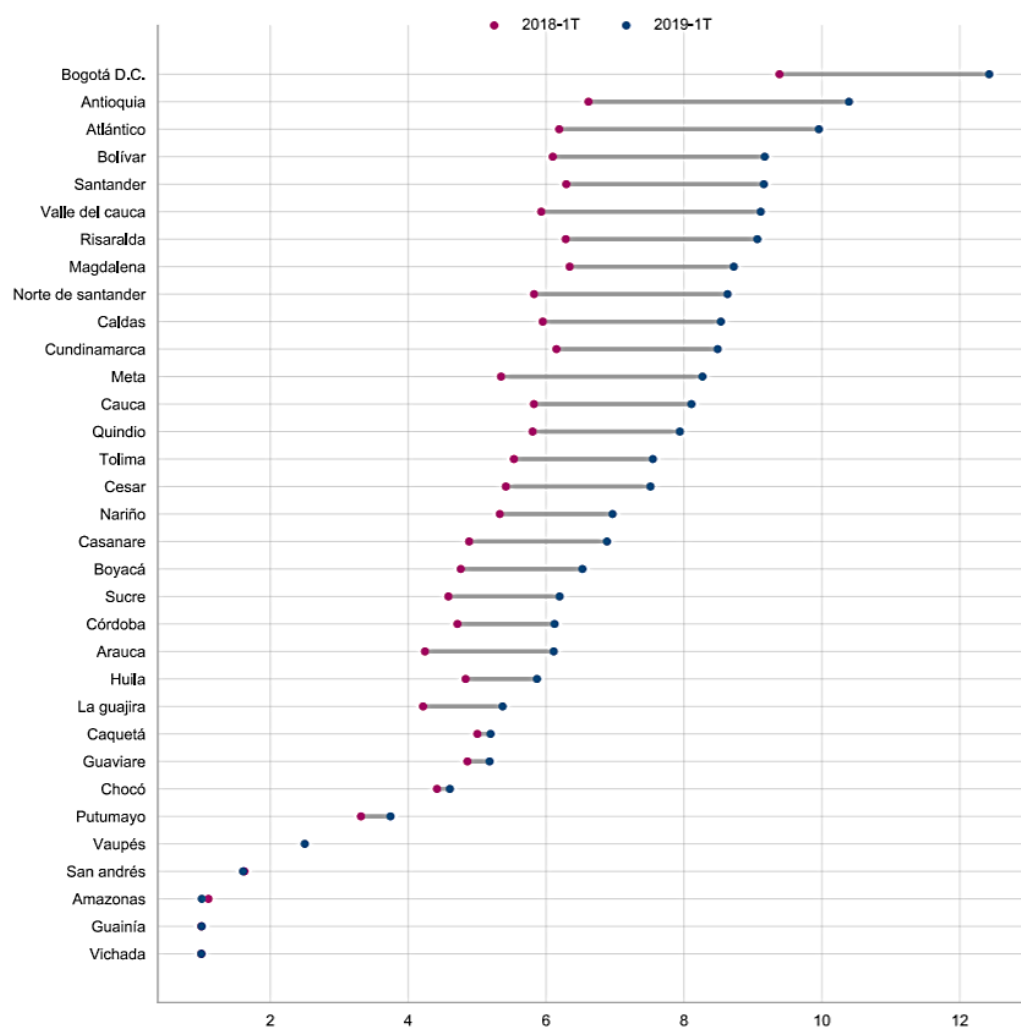


Figura 10. Velocidad de descarga promedio en el segmento residencial por departamento (Mbps) - acceso fijo a Internet - 1T / 2019

Fuente: [23]

Las principales tecnologías de acceso fijo a Internet implementadas en Colombia, al primer trimestre de 2019, se presentan en la *Figura 11*, evidenciando que los accesos mediante redes de cable, compuestas por cables coaxiales y que en Colombia predominan en redes

híbridas con fibra óptica (redes HFC), son los más instalados, alcanzando cerca de 3.9 millones de usuarios, seguidos de los accesos mediante tecnologías xDSL con 1.7 millones y en tercer lugar, con 900 mil usuarios, están los accesos en tecnologías basadas en fibra óptica (FFTx) [16].

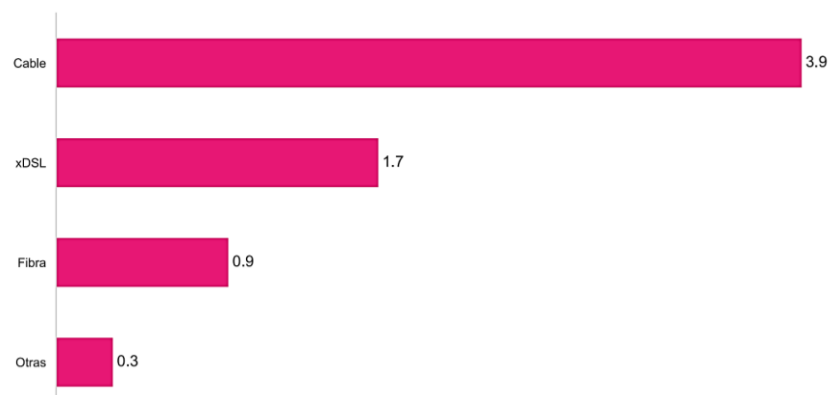


Figura 11. Accesos fijos a Internet por tipo de tecnología (millones) - 1T / 2019

Fuente:[16]

Es necesario resaltar que las velocidades de descarga promedio, para todas las tecnologías de acceso fijo en Colombia, han venido en aumento durante el último año y medio, tal como se aprecia en la *Figura 12*, donde las tecnologías de acceso a través de fibra óptica y cable, marcan una diferencia sustancial con las otras tecnologías [16].

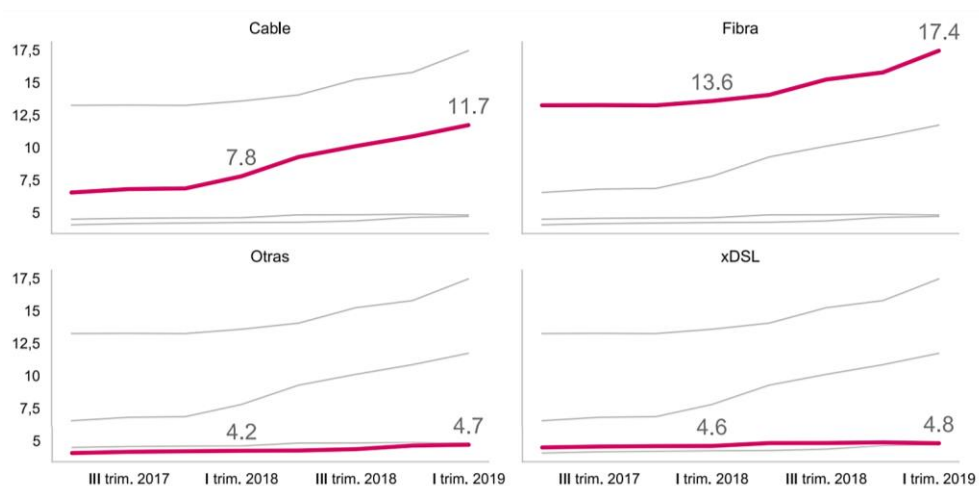


Figura 12. Vel. descarga promedio por tipo de tecnología (Mbps) Acceso fijo Internet - 1T/2019

Fuente:[16]

Ya identificadas las tecnologías de acceso más usadas en Colombia, en el siguiente numeral se presentan las generalidades de cada una de estas tecnologías con el fin de conocer sus características y establecer las diferencias.

2.2 GENERALIDADES DE LAS TECNOLOGÍAS DE ÚLTIMA MILLA PARA ACCESO FIJO A INTERNET MÁS UTILIZADAS EN COLOMBIA

Después de determinar las tecnologías de acceso fijo más utilizadas en Colombia para prestar el servicio de acceso a internet, es necesario hacer un breve recuento de la historia, pero sobre todo identificar las principales características técnicas de cada una de ellas, que permiten, mediante la utilización de un medio portador específico, transmitir las señales que finalmente hacen posible la prestación del servicio de acceso a internet de forma masiva.

Es importante recordar que, a mediados de los años 90 no era claro para muchos si el segmento masivo del servicio de internet necesitaba o quería capacidades de descarga mayores a los 100 Kbps, si existía disponibilidad de pago por un mayor ancho de banda, si habría sostenibilidad en los modelos de negocio para brindar servicios más avanzados de banda ancha y si la tecnología realmente podría brindar un servicio confiable, sin embargo, gracias a que existieron personas visionarias, hoy día se vive en un mundo donde las tecnologías de banda ancha son lo común y es obvio que todos necesitan acceso a internet. Pero igualmente, ha quedado claro que ninguna tecnología de acceso tendrá todo el mercado, pues cada una tiene ventajas y desventajas (velocidad, costo, cobertura, redes existentes de los operadores, regulación etc), y que la participación de cada una de ellas cambia con el tiempo [24].

Como se evidenció en el numeral anterior, las siguientes son las tres tecnologías de acceso fijo con mayor cantidad de usuarios en Colombia, sin embargo, esto no significa que su participación se mantenga en el tiempo o que no puedan ser desplazadas por otras tecnologías menos utilizadas en este momento o por tecnologías emergentes.

2.2.1 *Redes xDSL en redes de cobre.*

Las antiguas redes de acceso consistían en una conexión punto a punto, cableada por un par de cobre (dedicado) entre el abonado y la oficina central de conmutación (Switch System), que se conocía como el bucle (loop) de abonado. En la oficina central se efectuaba

la multiplexación electrónica, pero debido a los avances en las tecnologías de multiplexación y su reducción de costos, se fueron instalando terminales remotos que podían multiplexar una cantidad determinada de llamadas y llevarlas hacia la central utilizando menor cantidad de cables, pero a su vez permitieron que un bucle más corto hacia el abonado, lo cual impactó positivamente en la reducción del valor de las redes externas. Con la evolución y el paso de transmisión analógica a digital, pasando del dominio de la frecuencia (FDM) al dominio del tiempo (TDM), los terminales remotos se convirtieron en sistemas de portadora de bucle digital (DLC) [24].

La transmisión de datos sobre la red telefónica se dio utilizando módems en banda de voz, los cuales enviaban los datos como una señal modulada dentro de la frecuencia de banda de paso de la banda de voz nominal de 4 kHz. Posteriormente, los bucles más cortos permitieron la implementación de tecnologías de modulación más eficientes, sin embargo, la capacidad de transmisión máxima de estos módems llegó hasta los 33.6 Kbps o 56 Kbps en escenarios especiales [24] [25]. Pero este límite de 56 Kbps corresponde solamente al ancho de banda teórico de los 4 kHz inferiores del total del espectro disponible en un par de hilos del bucle de abonado, pues el espectro total de frecuencias que se puede transmitir sobre dichos hilos se encuentra en la región de 500 kHz [26].

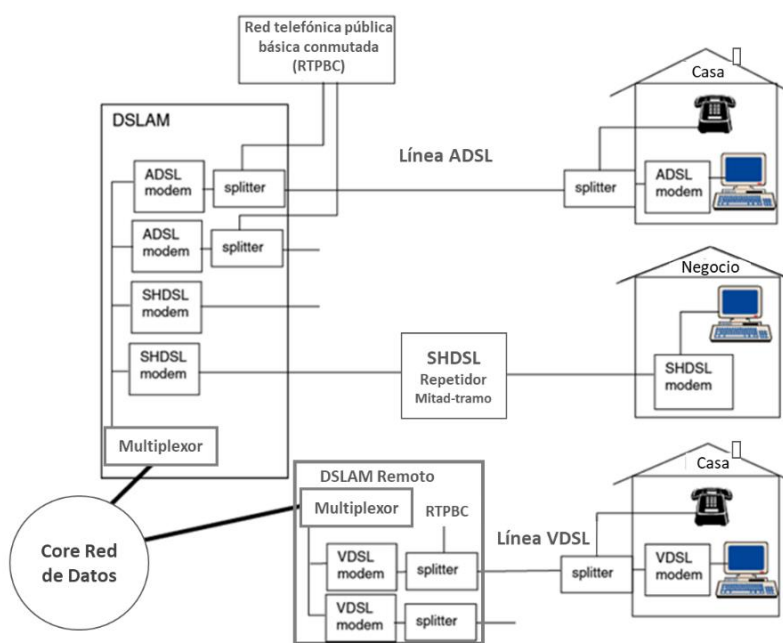
Es necesario mencionar que, dentro de la evolución de las redes telefónicas, el primer gran paso a redes completamente digitales fue la red digital de servicios integrados (RDSI), por oposición a la utilización de módems sobre circuitos analógicos conmutados, publicándose en 1988 la Recomendación UIT-T I.121, que describía un servicio de RDSI mejorado mediante la multiplexación de canales de 64 kbit/s y utilizando el Modo de Transferencia Asíncrono (ATM) para su gestión. En 1991 se publicó una revisión de esta recomendación, donde se exponían los principios básicos de los aspectos de banda ancha de la RDSI. Sin embargo, la tecnología RDSI nunca prosperó como una tecnología de acceso en banda ancha para el segmento masivo a nivel mundial [10].

Los elevados costos que podría generar el reemplazo de los cables de cobre existentes, bucle de abonado, y el avance existente en procesamiento de señales, favoreció el surgimiento de las tecnologías de bucle o línea de abonado digital (DSL), logrando una mejor utilización de la anchura de banda disponible, por encima de los 4kHz, y alcanzando velocidades de transmisión más altas [26], es decir que con DSL se logra transmitir señales

digitales a través de la línea de cobre pero en frecuencias fuera de la banda de voz [24]. Cabe anotar que, el rápido desarrollo y comercialización de DSL, cuyas normas han sido publicadas por la UIT desde finales de los años 90, fue el golpe más duro para la RDSI [10].

DSL utiliza técnicas avanzadas que reducen y limitan la “paradiafonía” (factor de degradación en sistemas que comparten la misma banda de frecuencias para transmisión en los sentidos descendente y ascendente) lo cual permite utilizar una anchura de banda mucho más grande sobre un par de hilos de cobre, sin dejar de prestar (en la mayoría de sus tecnologías) el servicio telefónico de manera simultánea sobre el mismo par de cobre. Esto es posible por el adelanto en la potencia de microcircuitos (chips) de procesamiento de señalización digital (DSP), con menor consumo de energía, haciéndolos, de paso, cada día más económicos [26].

La Figura 13 muestra la estructura general de un sistema típico DSL, el cual se compone de un multiplexador de accesos de línea de abonado digital (DSLAM), en donde termina cada DSL, el cual contiene un modem DSL dedicado para cada línea y a su vez multiplexa el tráfico de todas las DSL en una trocal de alta velocidad hacia el core de la red [24].



Nota: Los splitters ubicados en las terminaciones de las conexiones ADSL y VDSL combinan la señal de la voz análoga con la señal DSL digital.

Figura 13. Estructura general de un sistema típico DSL

Fuente: [24]

Existen diferentes tipos de tecnología DSL, cada una de las cuales posee diferentes atributos, algunas de las más conocidas son las siguientes:

- ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Line - línea de abonado digital asimétrica), es la tecnología DSL más implementada en el mundo, que junto a VDSL fueron diseñadas para proporcionar mayor velocidad de bajada que de subida. Su primer estándar fue publicado en 1995 como ANSI T1.413. Proporciona hasta 8 Mbps (downstream – bajada) y 1 Mbps (upstream – subida), simultáneamente con el servicio telefónico, alcanzando distancias de hasta 6 km, aunque la velocidad disminuye con el incremento de la longitud de las líneas. Posterior a esta tecnología vinieron G.lite, ADSL2 y ADSL plus. Usualmente, las líneas ADSL se conectan directamente desde la oficina central al cliente, como se muestra en la *Figura 13* [24].

La estructura del ancho de banda suministrado por ADSL se obtiene con cuatro clases de canales: canales simplex (unidireccionales) en la anchura de banda más alta, canales dúplex (bidireccionales) en la anchura de banda más baja, un canal de control dúplex, y un canal del servicio telefónico ordinario, que ocupa los 4 kHz de frecuencia más bajos en la línea [26].

- HDSL (High bit rate Digital Subscriber Line - Línea de abonado digital de alta velocidad binaria), proporciona en su mayoría velocidades de 1,5 o 2 Mbps simétricos (down / upstream), utilizando dos o tres pares de cobre trenzados hasta 3 Km de la central, estas velocidades satisfacen las normas T-1 (para soportar 1.544 Kbps) y E-1 (2.048 Mbps), por lo cual eran preferidas por clientes comerciales [26]. La primera especificación sobre HDSL fue publicada como TR28 en 1994 y la UIT-T produjo la primera recomendación (G.991.1) en 1998. Posteriormente vinieron las tecnologías HDSL2, con el estándar T1.418 del año 2.000, y HDSL4 incluida en el estándar T1.418 revisado del año 2001 [24].
- VDSL (Very high-bit-rate Digital Subscriber Line - línea de abonado digital de muy alta velocidad), la cual suministra un gran rango de velocidades asimétricas, al igual que ADSL, entre 2 Mbps (para unos pocos kilómetros) y 51 Mbps (para unos cientos de metros) [26], simultáneamente con el servicio telefónico. Usualmente el DSLAM se

ubica en un terminal remoto como se muestra en *Figura 13*. Las distancias de los usuarios normalmente deben estar por debajo de 1.5 Km , por ejemplo, VDSL puede suministrar 25 Mbps (downstream) y 3.5 Mbps (upstream) para una línea con un bucle de abonado de 1 Km. Debido a las altas velocidades que se manejan en VDSL se utilizan estructuras de fibra óptica entre la central y el terminal remoto [24] [26]. Como evolución de VDSL1, posteriormente vino VDSL2. En 2002 se produjo el primer estándar llamado VDSL1 y en 2005 se completó el estándar de VDSL2 [24].

- SHDSL (Single-pair High-speed Digital Subscriber Line – Línea de abonado digital de alta velocidad binaria de un solo par), la cual suministra velocidades simétricas en downstream y upstream de hasta 5.7 Mbps, pero a diferencia de ADSL y VDSL no porta el servicio telefónico por la misma línea. En 2001 la UIT-T publicó el primer estándar como Recomendación G.991.2 [24]. Aunque a la mayoría de líneas no se les incluye repetidores en el tramo de la línea, en la *Figura 13* se muestra una línea SHDSL con repetidor, el cual incrementa la velocidad de transmisión a distancias más largas [24].

En la *Figura 14* se muestran las diferentes tasas promedio de subida y bajada, para cada una de las tecnologías DSL, y en la *Tabla 1* se presenta con más detalle una comparación entre las principales características de estas tecnologías, como son velocidad, alcance, pares de cobre utilizados y las aplicaciones que soportan.

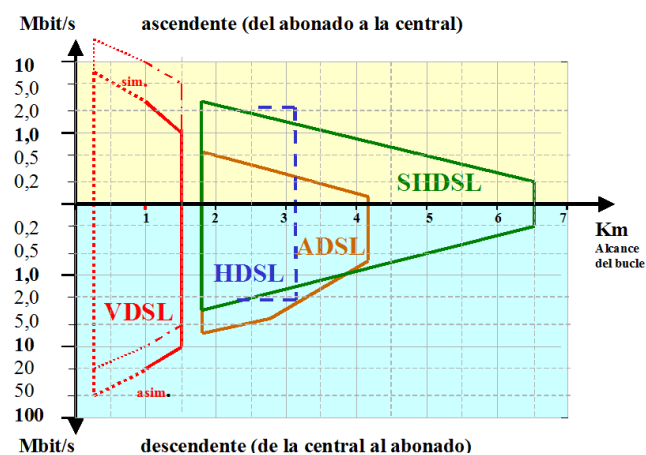


Figura 14. Velocidad promedio por tipo de tecnología (Mbps)

Fuente: [26]

Tabla 1. Comparación de sistemas DSL

Tipo	Descripción	Acceso/Velocidad/Alcance/Pares			Aplicaciones
ADSL	Línea de abonado digital asimétrica	Asim:	Hasta – Descendente 1.5 a 6 Mbps		Acceso a Internet video, video en demanda, acceso LAN distante, multimedia, interactivos
			Ascendente 16 a 640 kbps		
		Alcance:	2.8 Km	Descendente 4 Mbps	
				Ascendente 320 kbps	
			3.5 Km	Descendente 2 Mbps	
		Ascendente 128 kbps			
		4,2 Km	Descendente 578 kbps		
			Ascendente 128 kbps		
		Pares:	1		
HDSL	Línea de abonado digital de alta velocidad binaria	Simétrico	Hasta 3Km sin repetidor		Servicios T1 y E1. Servicios sincrónicos
		Alcance:	Hasta 3Km sin repetidor		
		1 Par	1 x	2320 kbps	
		2 pares	2 x	(1168 o 784 kbps)	
		3 pares	3 x	784 kbps	
VDSL	Línea de abonado digital de muy alta velocidad	Asim:	Hasta - Descendente 13 a 51 Mbps		Igual que ADSL
			Ascendente 1,6 a 6,6 Mbps		
		Alcance:	Hasta	2.8 Km	
		Pares:	1		
SHDSL	Línea de abonado digital de alta velocidad de un solo par	Sim:	velocidades binarias n x 128 kbps(n= 1 -18)		Servicios T1 y E1. Servicios sincrónicos
		Alcance:	6.5 Km para 192 kbps		
			1,8 Km para 2304 kbps		
		Pares:	1 (posibilidad de usar regenerador)		

T1 = 1,544 Mbps, E1 = 2,048 Mbps

Fuente: Adaptado de [26]

La UIT, dentro de sus recomendaciones de la “Serie L”, incluye la recomendación “ITU-T L.19” relacionada con “Red de cobre multipar que soporta servicios múltiples compartidos tales como telefonía tradicional, RDSI y xDSL”, y en ella presenta un resumen de las tecnologías xDSL más importantes, existentes al momento de la aprobación de la recomendación, incluyendo las máximas velocidades en downstream y las respectivas recomendaciones de la UIT, como se observa en la *Tabla 2* [27].

Tabla 2. Velocidades de transmisión y recomendaciones UIT para Tecnologías xDSL

"Familia" xDSL	Velocidad (Downstream)	Recomendaciones
ADSL (ADSL2)	hasta 8 Mbps	[ITU-T G.992.1],[ITU-T G.992.2] [ITU-T G.992.3],[ITU-T G.992.4]
ADSL2plus	Min. 16 Mbps	[ITU-T G.992.5]
HDSL	2 Mbps	[ITU-T G.991.1]

"Familia" xDSL	Velocidad (Downstream)	Recomendaciones
SHDSL	Hasta 2 Mbps	[ITU-T G.991.2]
VDSL	Decenas de Mbps	[ITU-T G.993.1]
VDSL2	200 Mbps (downstream + upstream)	[ITU-T G.993.2]

Fuente: [27]

- G. fast (FTTC DSL), esta tecnología es la más reciente de la familia DSL, y es conocida por varios nombres, como G.fast, G.9701, FTTC (Fiber To The Curb - fibra hasta la acera) o FTTdp (Fiber To The distribution point – fibra hasta el punto de distribución), el concepto de esta tecnología parte de proveer lo mejor de ADSL y de FTTH (Fiber To The Home). La capacidad agregada de G.fast se estima podría estar entre 150 Mbps a 250 metros y 1Gbps a 60 metros, es decir que la capacidad de esta tecnología es comparable con coaxial y fibra óptica al hogar. Los estándares G.9700 y G.9701 de la UIT-T fueron aprobados en 2014. [24]

2.2.2 Redes por cable (HFC – HÍBRIDAS FIBRA / COAXIAL)

Las compañías prestadoras de servicio de televisión de acceso comunitario por cable, fueron quienes desplegaron las redes de cable coaxial (CATV). Más adelante, aprovechando el gran ancho de banda de los cables coaxiales, que es mucho mayor al de los pares de cobre telefónicos, los operadores de televisión evolucionaron con el fin de prestar servicios “triple-play” (tres servicios: video, datos y voz, en este caso, voz sobre protocolo de Internet – VoIP), ajustando sus redes para realizar transmisión de datos en upstream, y fue así como iniciaron con la instalación de fibra óptica, con su virtualmente ilimitada capacidad de ancho de banda, para un mejor desempeño en la alimentación hacia sus redes coaxiales [24].

De hecho, es usual que los operadores continúen desplegando fibra óptica hasta los hogares o que instalen más fibra óptica para acercarse a los usuarios y en algunos casos aprovechar las avanzadas tecnologías DLS para prestar servicios de banda ancha de alta velocidad. Es importante tener en cuenta que los componentes ópticos de los sistemas HFC, elevan sus costos y se convierte en un factor importante a considerar. Por otro lado, las redes originales de CATV incluían amplificadores para mejorar las señales análogas en

el downstream, con lo cual se atendían hasta 2.000 usuarios por cada cable coaxial, los cuales tuvieron que ser reequipados con repetidores digitales para soportar el upstream del flujo creciente de servicio de datos, y adicionalmente la carga de usuarios por cable coaxial de un nodo óptico se redujo a cerca de 500, que actualmente, debido precisamente al creciente flujo de datos, se ha reducido a 64 usuarios por cable coaxial [24].

En definitiva, las redes HFC nacen de la necesidad de tener redes bidireccionales para prestar servicio de banda ancha, especialmente Internet, aprovechando las redes coaxiales de CATV, y se componen, como se muestra en la *Figura 15*, de una red de cable coaxial compartido que conecta los cable módems (CM), ubicados en cada uno de los diversos usuarios (hogares), con el correspondiente nodo de fibra (FN - Fiber Node), donde se hace la conversión electro-óptica, o viceversa, y de allí a través de una red de fibra óptica, típicamente en topología de estrella, se conecta con el hub de distribución, seguidamente con el hub primario y finalmente alcanza la cabecera principal (Master Headend) [24].

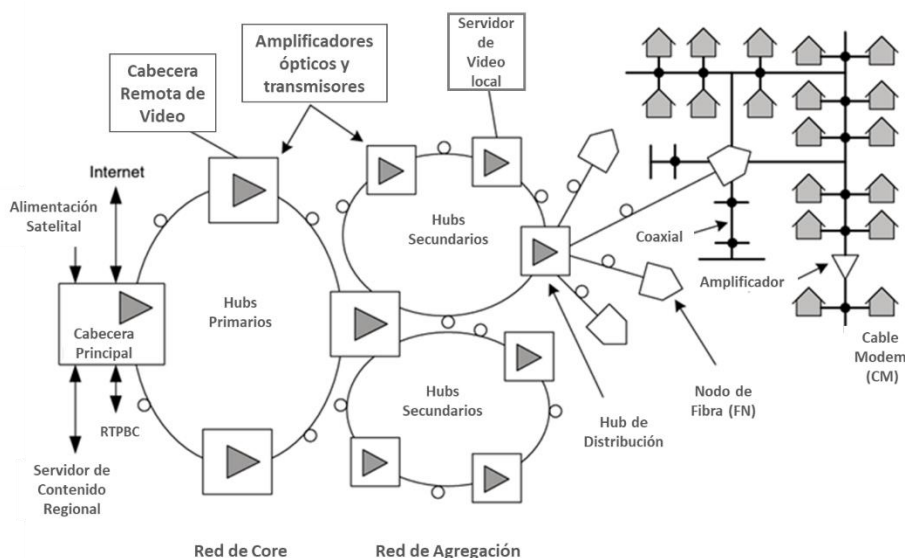


Figura 15. Diagrama típico Red HFC

Fuente: [24]

La parte de la red de fibra óptica, que usualmente es anillada, puede estar conformada por una o varias redes de agregación (Aggregation Networks) que contienen los hubs

secundarios, los cuales se interconectan con un hub primario de la red de core (Core Network). En los hubs primarios generalmente se ubican las cabeceras de video (video head ends) y las conexiones a los ISP's, mientras que los hubs secundarios, normalmente contienen los equipos de conmutación telefónica, los servidores de caché local de video, las interfaces de servicio de datos interactivos y el sistema terminal de cable módems (CMTS) que es el host de DOCSIS. Lo anterior significa que los CMTS y los CM son los equipos directamente interconectados por la red HFC [24].

DOCSIS es el protocolo más implementado para proveer transmisión de datos bidireccional en este tipo de redes, se encarga de asignar a cada uno de los cable módems (CM), ubicados en los predios de los usuarios, las frecuencias disponibles y usa un protocolo de medio compartido MAC (Media Access Control – control de acceso al medio) para determinar los time slot (intervalo de tiempo) en los que cada CM pueden transmitir en upstream [24]. De una manera muy general, podría decirse que DOCSIS es el servicio de internet que se transmite por la red HFC y que no utiliza el tradicional par de cobre ni el modem como distribuidor de señal [28].

Por otro lado, la red coaxial, usualmente requiere de amplificadores cada 530 metros en promedio, con la tecnología actual (aunque depende de varios factores), sin embargo, con el fin de no tener más de 3 amplificadores por ramal, se están diseñando redes coaxiales de no más de 1.5 Km, y aprovechando los costos asequibles de la fibra óptica, los nodos (FN) se han ido acercando a los usuarios, con el fin de lograr segmentos de red coaxial de no más de 200 metros, no usar amplificadores y reducir costos. Pese a lo anterior, y aunque las DOCSIS pueden manejar distancias máximas de 160 Km entre el CMTS y el CM, la distancia promedio entre el CMTS y CM, es decir la longitud de la red HFC, está alrededor de los 24 Km [24].

Tal como se puede apreciar en la *Figura 16*, la banda del espectro de 5 a 42 MHz es utilizada para el upstream y es suficiente para formatos de modulación digital, mientras que la banda para el downstream inicia desde los 54 MHz, desde donde pueden operar los canales analógicos de video, lo cual ha tenido una mejora al adicionar canales de mayor frecuencia para señales digitales. Una de las grandes diferencias entre el estándar norte americano (ITU-T J.83-B) y el europeo (ETSI EN 300 429 Digital Video Broadcast - DVB) a nivel de las señales de downstream, es que los anchos de canal son de 6 MHz y 8 MHz

respectivamente, lo cual obviamente está directamente relacionado con la capacidad de transmisión de datos [24].

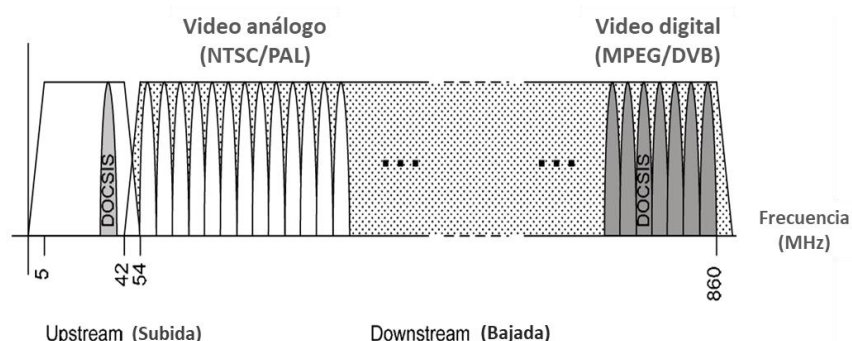


Figura 16. Espectro usado por DOCSIS

Fuente [24]

Las bandas de frecuencias antes descritas, para el downstream y upstream, de la tecnología HFC, han ido ajustándose como resultado de los acelerados avances del protocolo DOCSIS, como se presenta a continuación [24].

En 1997 se publicaron las DOCSIS, a través de la cuales se pueden incluir los servicios de datos de alta velocidad en las redes existentes de CATV, adicionalmente, con el desarrollo del protocolo de Voz por Internet (VoIP), los cables operadores pudieron prestar un servicio similar al de la Telefonía Pública Básica Conmutada -TPBC [10]. Desde sus inicios, DOCSIS han evolucionado con la ventaja que cada nueva versión hace que las CMTS y CM que soportan las nuevas funcionalidades, sean compatibles con los equipos que solo soportan las versiones anteriores [24], es decir, el estándar DOCSIS garantiza la interoperabilidad [29].

Es importante recordar que, más de 100 millones de usuarios alrededor del mundo tienen acceso al servicio de Internet gracias a la tecnología HFC, como se mostró anteriormente, *Figura 5*, y que su creciente demanda de conectividad, ha impulsado un crecimiento permanente de las capacidades de las redes DOCSIS [29].

Con el fin de dar un rápido vistazo a la evolución de las DOCSIS, a continuación se relaciona una descripción general de su evolución, desde la versión 1.0 hasta la 3.0, incluyendo algunas de las principales características, que con más detalle se exponen en [24]:

- DOCSIS 1.0: Su principal función fue proveer acceso a Internet de banda ancha y las características mínimas para soportar ese servicio. Para lo anterior, estandarizó el protocolo de aprovisionamiento basado en DHCP (Dynamic Host Configuration Protocol) y TFTP (Trivial File Transfer Protocol), y a su vez definió el protocolo de gestión de red basado en SNMP (Simple Network Management Protocol) [24].
- DOCSIS 1.1: Adicionó una serie de capacidades mejoradas, siendo una de las más importantes la de soportar calidad de servicio (QoS) garantizada, como, por ejemplo, garantía de ancho de banda, latencia y desempeño del jitter. Por otro lado, el protocolo de gestión de red se actualizó a SNMPv3, se incluyó soporte de IP Multicast para mejorar el envío de video y también se incrementó la seguridad mediante un método mucho más fuerte de encriptación [24].
- DOCSIS 2.0: Adicionó nuevas capacidades de la capa física y de MAC. Los canales de upstream soportan dos modos de operación, Advanced-TDMA (A-TDMA) y Synchronous CDMA (S-CDMA), permitiendo el uso de porciones de espectro que no eran utilizables. En cuanto a las mejoras de MAC, se incluyeron el concepto de canales lógicos para el upstream, con lo cual múltiples canales lógicos pueden correr sobre un mismo canal físico. Igualmente permitió el balanceo autónomo de cargas [24].
- DOCSIS 3.0: Una de las características principales que introduce es la de unir canales físicos (Channel Bonding), tanto en upstream como en downstream, para crear canales lógicos de mayor ancho de banda. Igualmente permitió el balanceo autónomo de cargas para el grupo de canales unidos. DOCSIS 3.0 incluye otras características importantes como soportar IPv6 y tener una encriptación más fuerte de tráfico [24].

El sistema DOCSIS 3.0, asume para el downstream canales de 6MHz en Norte América (8 MHz para Europa), en una banda de frecuencias entre 108 MHz y 870 MHz (opcionalmente 1002 MHz), que usando modulación 256-QAM alcanza tasas de transmisión del orden de 42 Mbps (para los canales de 6MHz). Para el sentido upstream, utiliza canales de 3.2 o 6.4 MHz, en una banda de frecuencias entre 5 y 42 MHz (65 MHz en Europa) y opcional hasta 85 MHz en Norte América, que usando modulación 64-QAM pueden alcanzar tasas de transmisión de 30 Mbps. Sin embargo,

una configuración típica, aprovechando el Channel Bonding, es unir 8 canales en downstream y 4 en Upstream, logrando tasas de transmisión de hasta 320 Mbps y 120 Mbps respectivamente [30].

- DOCSIS 3.1: Hace parte de la quinta generación de la familia DOCSIS, publicada por CableLabs¹ en 2015, en la cual se adoptan OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing – multiplexación por división de frecuencias ortogonales) y OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access – acceso múltiple por división de frecuencias ortogonales) para los canales de downstream y upstream respectivamente [30].

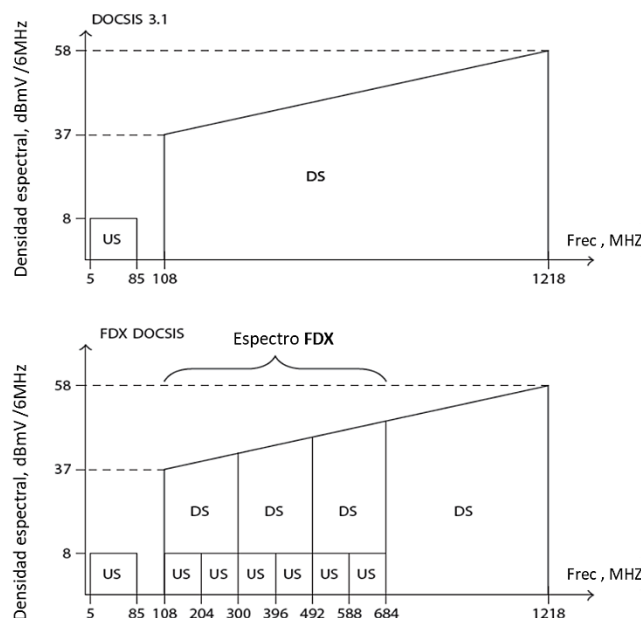
La separación de subportadora puede ser de 25 kHz y 50 kHz en ambos canales; se manejan anchos de banda entre 24 y 192 MHz para canales downstream, y entre 6.4 y 96 MHz para canales upstream. Uno de los aspectos claves es la inclusión para el upstream de dos rangos de bandas (5 - 117 MHz y 5 - 204 MHz), adicionales a los ya existentes (5 - 42 MHz, 5 - 65 MHz y 5 - 85 MHz), mientras que para el downstream, el límite inferior de la banda de frecuencia, que normalmente debe ser 254 MHz, tendría opción de bajar hasta 108 MHz, y el rango superior, que normalmente debe ser 1218 MHz, tiene la posibilidad de extenderse hasta 1794 MHz. En cuanto a modulación, para downstream es obligatorio soportar hasta 4096-QAM y opcional soportar 8192-QAM y 16384-QAM, y para el upstream es obligatorio soportar 1024-QAM y opcional soportar 2048-QAM y 4096-QAM [30]. Con las especificaciones DOCSIS 3.1 puede manejar velocidades de transmisión de hasta 10 Gbps en downstream y hasta 1.5 Gbps en upstream [31].

- DOCSIS 4.0: Es la más reciente publicación de DOCSIS de CableLabs, primer trimestre de 2020, la cual permite prestar servicios simétricos con velocidades de multi-gigabits, logrando tasas de transmisión de hasta 10 Gbps en downstream y 6 Gbps en upstream [32]. Dos aspectos claves de DOCSIS 4.0 es que incluye el estándar DOCSIS FDX (Full

¹ CableLabs (Cable Television Laboratories Inc.), es la organización de investigación y desarrollo para MSO (Multiple System Operator), como se les conocen a las compañías de televisión por cable - operadores de tecnologías HFC [30].

Duplex) y EDS (Extended Spectrum DOCSIS), mediante el cual autoriza a los operadores a ampliar el espectro de downstream hasta 1.8 GHz [33].

En [29], donde se explica en detalle FDX DOCSIS, se señala que este estándar asume que la red HFC es “Nodo + 0”, es decir, no existen amplificadores entre el nodo de fibra (FN) y los cable modems (CM); de la misma manera expone otra consideración clave, es que la banda de frecuencia FDX se divide en una serie de canales de downstream de 192 MHz, compatibles con DOCSIS 3.1, cada uno de los cuales se superpone con un par de canales upstream de 96 MHz, como se muestra en la *Figura 17*, con lo cual se pretende aliviar el inconveniente del pequeño ancho de banda que, desde el principio de la tecnología HFC, se asignaba al upstream.



Nota: DS: Canal Downstream, US: Canal Upstream

Figura 17. Asignación de espectro y densidad espectral de potencia en un puerto de un nodo en DOCSIS 3.1 y FDX DOCSIS

Fuente: [29]

Podría decirse que con DOCSIS 4.0 se prevé larga vida para la tecnología FHC, teniendo en cuenta que el talón de Aquiles venía siendo las restricciones,

especialmente, en las tasas de transmisión del upstream, con lo cual se enfrentaba una difícil situación para atender la creciente demanda de servicios de cloud, servicios simétricos empresariales, envío de videos de alta definición, juegos y streaming en tiempo real, VR (Virtual Reality) y AR (Augmented Reality) [31].

En la *Figura 18* se puede apreciar la evolución en capacidad de transmisión de datos para las tecnologías HFC y xDSL, dejando a la vista que HFC ha manejado mayores velocidades de transferencia en cada momento del tiempo, sin embargo, con la llegada de G.fast, en la cual se hace un gran recorte del bucle de abonado, siendo prácticamente un solución FTTC, xDSL sigue siendo una buena alternativa para continuar dándole vida a los pares de cobre [31].

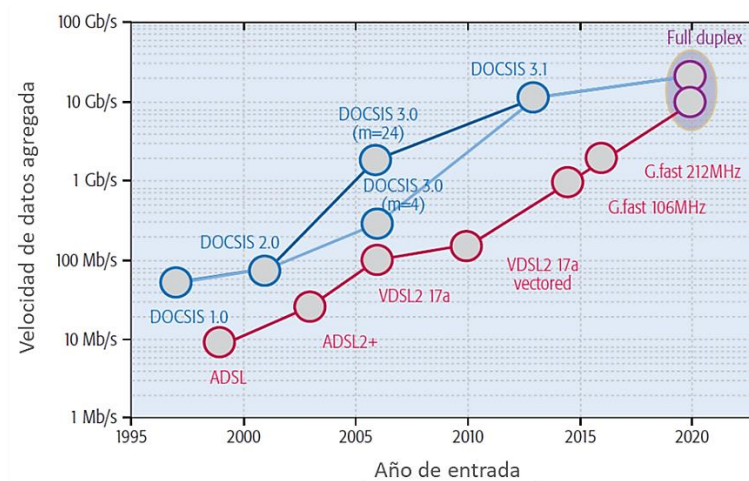


Figura 18. Evolución velocidad de datos tecnologías xDSL y HFC (DOCSIS)

Fuente: [31]

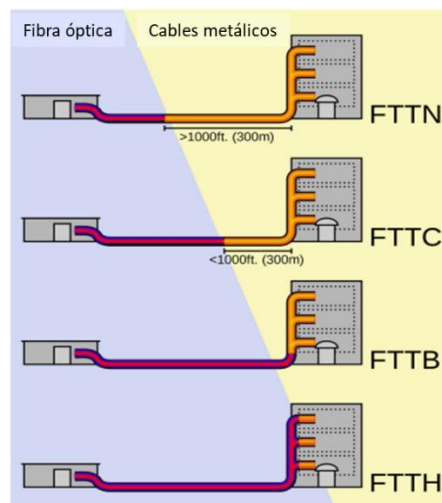
Finalmente, vale la pena mencionar, con el fin de mostrar la importancia de la tecnología HFC en la actualidad y a futuro, que existen proyecciones que muestran que se mantendrá un importante crecimiento anual compuesto del 8.2% en el mercado global de la tecnología HFC, al pasar de USD 9.6 billones en 2018 a un valor esperado de USD 13.6 billones en 2023 [34].

2.2.3 Redes de fibra óptica (FTTx)

Debido a la evolución de las redes de los operadores de televisión en redes HFC y al incremento de los servicios de telefonía móvil, los operadores tradicionales con redes de cobre perdieron parte de sus usuarios, por esta razón, con el fin de suministrar servicios triple-play y contar con un medio no compartido hacia el usuario o en el que se limite la cantidad de compartición, iniciaron el despliegue de redes de fibra óptica [24].

Las redes de fibra óptica pueden tener diversas configuraciones dependiendo del punto hasta donde se instala la unidad óptica de red (ONU), conocida también como terminal de red óptico (ONT), siendo cuatro de las principales tipologías: fibra hasta el hogar (FTTH), fibra hasta el edificio (FTTB), fibra hasta la acera (FTTC), fibra hasta el nodo (FTTN) [10].

La *Figura 19* muestra un esquema de las diferentes tipologías de acceso por fibra óptica [35].



Nota: En cada caso, la red óptica termina en una ONU.

Figura 19. Tipologías de acceso por fibra óptica

Fuente:[35]

Para el sistema FTTN, la ONU se instala en un nodo de la red existente de F.O. y se atiende a cientos de usuarios a través de los bucles locales de pares trenzados, aunque también podría convertirse en una red HFC si se instala un acceso en coaxial. Para los sistemas FTTB o FTTC, las ONU se ubican generalmente en un poste o en un gabinete de

distribución de un edificio, y sirven de interfaz común para varios clientes, desde donde se instala un cable de par trenzado hacia el usuario, y desde donde podría implementarse un sistema DSL (VDSL o G.fast), por la corta distancia al hogar. Para los sistemas FTTH, la ONU se ubica en el usuario, marcando el límite entre la red del operador y del usuario [10].

En las redes FTTx (nombre genérico para las redes en cuya arquitectura hay algún segmento de fibra óptica) se tienen dos arquitecturas fundamentales: i) Punto a Punto (PtP), en la cual se efectúa una conexión de fibra óptica (una o dos fibra) dedicadas desde la ONU hasta la oficina central y ii) Red Óptica Pasiva (PO), cuya arquitectura de red es punto a multipunto (PMP) hasta las instalaciones del usuario, para la cual se utilizan divisores no alimentados (splitter), permitiendo que una única fibra óptica, que sale del terminal óptico de línea (OLT) ubicada en la oficina central, alimente a varias ONU ubicadas cerca de los usuarios finales, llegando a atender hasta 256 usuarios finales [10]. El alto costo especialmente de los láseres y los receptores ópticos, y la búsqueda de una menor cantidad de fibras ópticas a utilizar, hace que las redes PON se impongan en el mercado.

En la *Figura 20* se presenta el diagrama típico de una red PON [24].

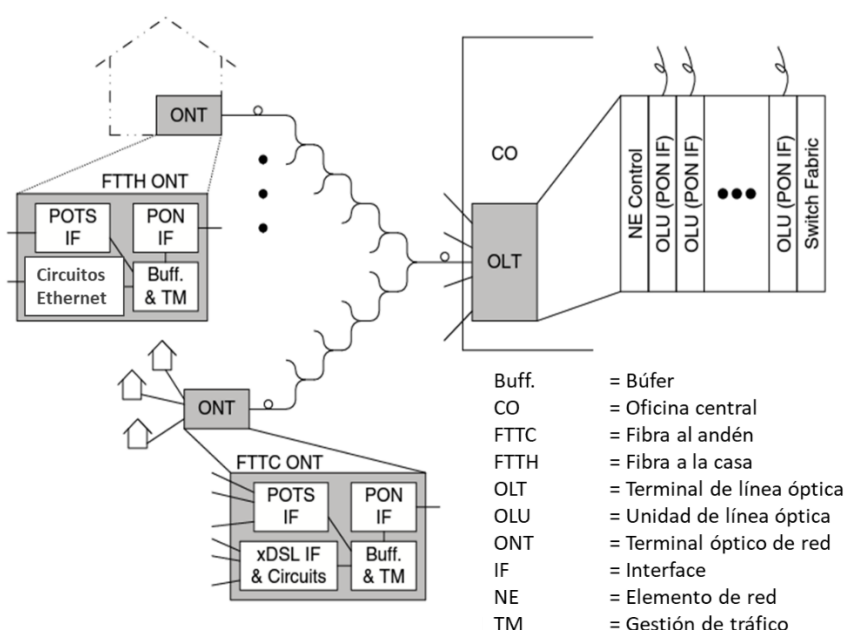


Figura 20. Diagrama típico red PON

Fuente: [24]

Actualmente, alrededor del mundo, hay un interés creciente de los operadores en las redes ópticas pasivas con capacidad de Gigabit (GPON), las cuales se consideran para desplegar en combinación con VDSL (Incluye una red de acceso con fibra hasta el armario, FTTCab, y posteriormente se llega al usuario con VDSL) o como acceso hasta el hogar (FTTH) [10].

Existen diferentes tecnologías PON para implementar redes FTTx, las cuales se diferencian básicamente por el protocolo de transmisión que manejan, la velocidad de descarga (downstream) y carga (upstream), el alcance que tienen entre la OLT y la ONU (sin instalación de elementos activos o energizados) y la relación de división (cantidad de ONUs que pueden ser conectadas), tal como se presenta en la *Tabla 3*.

Tabla 3. Características de tecnologías PON

Características	EPON	BPON	GPON	XG-PON	NG-PON2
Norma	IEEE 802.3ah	ITU-T G.983	ITU G.984	ITU-T G.987	ITU-T G.989
Protocolo	Ethernet	ATM	Ethernet, TDM		
Velocidad(Mbps)	1250 de bajada 1250 de subida	622 de bajada 155 de subida	2488 de bajada 1244 de subida	10 Gbps (de bajada)	40 Gbps (de bajada)
Alcance (Km)	10	20	20		
Relación de División	16	32	64		

Fuente:[10]

Los sistemas PON de mayor velocidad generalmente hacen el downstream y el upstream por la misma fibra, mediante la utilización de longitudes de onda de 1490 nm y 1310 nm respectivamente, utilizando multiplexación por división de onda gruesa (CWDM) lo cual genera una gran ventaja económica en el despliegue de la infraestructura, pues en las ONTs se instalan los láseres de 1310 nm [24], que son menos costosos, ya que no requiere de láseres refrigerados, utilizan multiplexores y demultiplexores de menor calidad y no requiere de alimentación en los equipos terminales (tecnología pasiva), aunque, cabe agregar que, CWDM tiene la desventaja que solo permite un máximo de 18 longitudes de onda (generalmente se usan solo las 8 superiores), en el rango espectral de 1271 a 1611 nm, pues tiene un espaciamiento de canales de 20 nm, y adicionalmente en este rango espectral no permite el uso de amplificadores de fibra dopada con erbio, que funcionan

óptimamente a 1550 nm, limitando el alcance de los sistemas CWDM a distancias entre 60 y 80 km. Adicionalmente, en el upstream, ya que se debe compartir el sistema PON, las ONUs requieren un protocolo MAC, que generalmente es un protocolo de acceso múltiple en el dominio del tiempo (TDMA) [24] [36].

En cuanto al downstream, la OLT transmite los datos hacia todas sus ONTs, y estas los descargan dependiendo bien sea de la información del Time Slot o de la dirección de la celda/paquete. De la misma manera, la OLT envía la información de sincronización para que posteriormente las ONTs efectúen el upstream [24].

Después de presentadas las características generales de las tres tecnologías de última milla más utilizadas en Colombia, y teniendo en cuenta el objetivo del presente documento, a continuación, se exponen los aspectos más importantes de la tecnología BPL, con el fin de realizar la comparación respecto a las tecnologías antes descritas.

2.3 DESCRIPCIÓN DE LA TECNOLOGÍA BPL

Desde hace al menos 100 años, se ha considerado el uso de las redes de energía como medio de transmisión de señales de comunicación, sin embargo, después de la desregulación del mercado de telecomunicaciones, hacia finales del siglo XX, los antiguos operadores de telecomunicaciones siguieron siendo los dueños de las redes, lo cual impulsó a los nuevos operadores a buscar alternativas para proveer servicios de telecomunicaciones por sus propias redes o por otros medios de acceso, como es la red eléctrica, encontrando así en PLC (Power Line Communication – comunicación sobre red de energía), desplegada sobre la red eléctrica de baja tensión, una buena alternativa a través de la cual podrían brindar servicios sin necesidad de desplegar una costosa red de última milla, pareciendo ser esta una solución costo eficiente. El deseo de suministrar servicios de telecomunicaciones con altos niveles de calidad de servicio (QoS) dieron paso a la aparición del Broadband PLC (Broadband Power Line Communication – comunicaciones de banda ancha sobre red de energía) [37], conocida con diferentes nombres, entre ellos BB-PLC [24] o BPL [38] [39].

Después de éxitos y decepciones en las últimas dos décadas, dependiendo la aplicación para la cual se haya implementado la tecnología BPL, pero especialmente debido a la gran

penetración de las redes de energía, en algunas zonas mucho mayor que las redes de comunicaciones, y a pesar de los desafíos técnicos que implica la implementación de la tecnología para transmitir señales de comunicación sobre líneas eléctricas, esta opción tecnológica siempre ha tenido un gran atractivo, y se hace mucho más convincente la idea de unificación de estas redes en nuestros días, por ser una era en que la conectividad a Internet es tan importante como la conectividad al sistema eléctrico, donde cada dispositivo para acceder a Internet está conectado a una red eléctrica y donde virtualmente cada dispositivo conectado a la red eléctrica puede ser objeto de un servicio de valor agregado [24]. De hecho, debido al incremento de tecnologías como Internet de las cosas (IoT), PLC y BPL han recibido una gran atención de investigación en los últimos años [40].

Pese a que la tecnología BPL, no es nueva a nivel mundial, en Colombia aún es relativamente desconocida como tecnología para la prestación de servicio de acceso Internet, pues, aunque se efectuaron localmente algunos pilotos que pretendían evaluar su implementación en redes eléctricas de baja tensión [41] [42], como una manera de evitar la construcción de la última milla o redes de acceso tradicionales de los PRST, en la actualidad no se conoce comercialmente ningún despliegue para la prestación del servicio de acceso a internet de manera masiva. Esto no quiere decir que otras aplicaciones de BPL, que cuentan con grandes avances e implementaciones a nivel mundial, no se estén evaluando y utilizando en el país, como son las aplicaciones para mediciones y control avanzado en compañías eléctricas (Smart Grid²) y soluciones para el manejo de comunicaciones sobre la red de energía al interior de las viviendas (Soluciones In-Home o Home-Networking).

Por lo anterior, y con el fin de mostrar que la tecnología BPL puede ser tenida en cuenta para ser implementada como red de acceso para prestar el servicio de acceso a internet en el área objetivo del presente documento, es decir, en un área con unas condiciones particulares, en los siguientes numerales se expone una breve historia y los aspectos generales de la tecnología.

² Smart Grid, de acuerdo con [98], "es la tecnología que mediante el uso de sensores, comunicación, habilidades computacionales y de control, mejora la funcionalidad del sistema de suministro eléctrico", y de acuerdo con [99] "se puede definir como una red eléctrica modernizada, una infraestructura de transmisión y distribución confiable y segura, que puede atender el crecimiento de demanda futura, mientras responde inteligentemente a los comportamientos y acciones de todos los usuarios de energía eléctrica conectados a ella, suministrándoles energía de forma confiable, eficiente, económica y sostenible".

2.3.1 Retrospectiva de la tecnología BPL

Cuando se utiliza la tecnología BPL se busca usar como medio de transporte, de la solución de telecomunicaciones, las redes existentes de energía AC (50 o 60 Hz) y DC, utilizando un amplio espectro de bandas de frecuencias que se encuentran entre unos cientos de Hz hasta unos cientos de MHz, las cuales se consideran de alta frecuencia al compararse con las usadas para la transmisión de energía eléctrica. Este rango de frecuencias es necesario con el fin de adaptarse de la mejor manera a las características de los diferentes tipos de servicio que se pretendan prestar y a las condiciones de la red eléctrica sobre la cual se va a implementar la tecnología [38].

En cuanto al nombre, la tecnología para transmisión de señales sobre red de energía es identificada o llamada de varias maneras, siendo las más comunes, Carrier-Current System, Power Line Carrier, Distribution Line Carrier (DLC), Digital Power Line (DPL), Power Line Communication (PLT) comúnmente usada en Europa, Power Line Communication (PLC) bastante aceptada alrededor del mundo y los nombres más recientes BB-PLC o BPL generalmente utilizado en Norte América para los sistemas que operan en el rango de frecuencias de 2 a 30 MHz y con los cuales se puede prestar servicios de banda ancha (decenas de Mbps) [24] [38] [39] .

Con relación a los inicios de la tecnología para transmisión de señales sobre red de energía, se reporta en la historia que el inglés Edward Davy, en el año 1838, propuso una solución que permitía la medición remota de los niveles de las baterías de los telégrafos ubicados entre Londres y Liverpool, y que posteriormente, en 1897, el mismo Davy obtuvo la primera patente británica, de número 24833, por la técnica de medición remota de los contadores de la red eléctrica que se comunican por el cable eléctrico [43], sin embargo, algunos autores reportan que fueron los suizos Joseph Routin y C.E.L. Brown quienes obtuvieron la patente británica de número 24833, resultado de la invención de un medidor de electricidad controlado por señales desde la compañía eléctrica [44] [45].

Pese a lo anterior, es acertado decir que los primeros pasos hacia BPL se dieron a finales del siglo XIX y principios del siglo XX, con algunas patentes relacionadas con toma de medición remotas y adicionalmente con la primera descripción de la gestión de carga remota Ripple Control Systems (RCS) [24] [38].

Con relación a la idea de transmitir voz sobre las líneas de energía, esta parece haberse despertado a partir de 1911, después que el Mayor George Squier, de la United States Army Signal Corps, demostrara la transmisión de múltiples canales telefónicos sobre un único circuito telefónico mediante la técnica carrier-frequency, a la que llamó “wired wireless”. Basados en esta técnica, en mayo de 1918, en Japón, se efectuaron las primeras pruebas de la llamada “wave telephony” sobre una línea de energía de 144 Km, y en diciembre de ese año se puso en servicio la primera operación comercial sobre un circuito de Fuji Hydro-Electric Co. sobre una línea de energía de 3 fases de 22 kV [46].

Hacia los años 20’s (siglo XX) se popularizó la transmisión de voz sobre los circuitos de alta y media tensión eléctrica, llamada Power Line Telephony o Carrier Frequency Telephony Over Power Lines o Wired Wireless, con aproximadamente 1.000 sistemas instalados alrededor de Estados Unidos y de Europa, la mayoría de ellos en Alemania, utilizando anchos de banda de unos pocos kHz, y operando en un rango de frecuencias entre los 15 y 500 kHz [38] [46].

Más adelante, entre los años 30’s y 50’s, se desarrollaron realmente los Ripple Control Systems o Ripple Control Signaling (RCS), con los cuales se establecieron comunicaciones unidireccionales para diferentes tipos de funciones de control de las redes eléctrica de media (MV) y baja tensión (LV), usando frecuencias entre 125 Hz y 2 kHz que pueden pasar a través de los transformadores y llegar hasta los usuarios. Con esta tecnología se hace posible generar señales para prender o apagar electrodomésticos que puedan estar generando picos de consumo, de tal forma que permita balancear la oferta y la demanda de energía, igualmente se puede controlar el apagado y prendido de las luces del alumbrado público y el cambio de tarifas del servicio. El primer sistema industrial llamado Pulsadis apareció en Francia en 1960. Es importante mencionar que después de la segunda guerra mundial (1945), después de la destrucción de una gran cantidad de redes eléctricas y telefónicas, permanecieron en pie más redes eléctricas, lo cual impulsó el diseño de sistemas de transmisión de datos sobre estas redes. Sin embargo, a lo largo del tiempo se fueron evidenciando diferentes problemas, entre ellos el de una comunicación unidireccional, que lo era debido a su alto requerimiento de potencia de transmisión, en el orden de las decenas de kW y algunas veces hasta 1 MW [24][41][38] [43].

En los años 80's se inicia con el desarrollo de sistemas de comunicación bidireccional PLC para la lectura automatizada de medidores (AMR) y la automatización de redes de distribución eléctrica, industria y edificios, [38]. Por lo anterior, se iniciaron estudios más profundos de las frecuencias entre 5 y 500 kHz, de la relación señal-ruido (SNR) y de atenuación de la transmisión de datos en la red eléctrica [41].

A partir de los años 90's se dio un gran salto en la tecnología, cuando las compañías eléctricas empezaron a considerar la prestación de nuevos servicios, debido a la desregulación del mercado eléctrico y de telecomunicaciones en Europa, y se introdujo BPL usando bandas de frecuencias entre 1.8 y 250 MHz, y se iniciaron despliegues como opción de última milla para acceso a Internet y como home-networking para aplicaciones multimedia. Con el surgimiento de BPL vinieron una oleada de investigaciones, libros y publicaciones científicas, junto con la realización en 1997 del primer ISPLC³ [24] [38].

En [24] [41] se expone como a finales de los 90's se iniciaron en Europa importantes esfuerzos para ejecutar proyectos orientados a la prestación masiva del servicio de acceso a Internet a hogares, mediante el despliegue de tecnología BPL:

- En 1997, NorWeb (sociedad formada entre Nortel Networks y la compañía electrificadora británica United Utilities), inició con su proyecto, sin embargo, aunque demostraron, en algunos prototipos y pilotos en Manchester, capacidades de transmisión de aproximadamente 1 Mbps, los altos costos y aspectos de EMC (Electromagnetic Compatibility – compatibilidad electromagnética) obligaron el cierre del proyecto en 1999 [24] [41].
- Proyectos liderados por Ascom y Siemens en otros países europeos también fallan, pese a que el 1998 Siemens y ENBW logran avances tecnológicos al usar OFDM y obtener tasas de transmisión del 1.2 Mbps [24] [41].

³ ISPLC (International Symposium on Power Line Communications and its Applications), es la conferencia científica líder a nivel mundial de la tecnología PLC y sus aplicaciones, en 2006 se convirtió en el IEEE ISPLC. En mayo de 2020 realizó su vigésima cuarta versión [100].

- La Unión Europea funda la Alianza para la Investigación Europea de PLC Abierto (OPERA – The Open PLC European Research Alliance), quien lidera un proyecto de varios años y adelanta la mayoría de investigaciones en BPL [24].

A inicios del nuevo siglo (XXI), dados los negativos resultados vistos en los proyectos de BPL para acceso a hogares, la industria miró hacia el in-home, surgiendo múltiples alianzas para crear especificaciones de esta tecnología [24], y adicionalmente aparecieron nuevas innovaciones en NB PLC orientadas a Smart Grid (redes inteligentes) haciendo que los operadores eléctricos consideraran PLC como un medio para lograr una infraestructura de comunicaciones eficiente y confiable para gestionar sus redes. De la misma manera, surgieron sistemas HDR NB PLC (High Data Rate NB PLC) que adoptaron métodos de transmisión usados en BPL para aumentar su capacidad de transmisión, publicando más adelante sus especificaciones en los estándares ITU-T G.9901 - 9904 en 2012 e IEEE 1901.2 en 2013 [38].

Sin embargo, parece que los avances y disponibilidad en los equipos de in-home y los desarrollos en procesamiento de señales generaron confianza y reactivaron el interés en BPL, razón por la cual se iniciaron nuevamente, en esa primera década, nuevos proyectos piloto en Europa, especialmente en Alemania (Mannheim y Ellwangen) y España (Barcelona y Zaragoza), Asia (Korea, donde el PLC Forum fue fundado para la estandarización de sistemas PLC), Norte América (Cincinnati, North Kentucky, Dallas-Fort Worth y en áreas rurales sin cobertura de telecomunicaciones) y en Sur América (Chile, Brasil, Ecuador y Colombia) [24].

Esta nueva dinámica que retomó la tecnología BPL en la década de los 2000, generó hechos importantes en el sector, es así como en el año 2004 se funda la IEEE Communications Society TC-PLC⁴ [47], y en 2010 fueron consolidadas las especificaciones de BPL en los estándares IEEE 1901 e ITU-T G.9960/61 [24].

En [41] se relacionan diferentes proyectos e iniciativas ejecutadas, durante la primera e inicios de la segunda década del siglo XXI, en América del sur (Chile, Brasil, Ecuador) y

⁴ IEEE Communications Society TC-PLC (IEEE ComSoc TC-PLC), es uno de los 28 comités técnicos de la IEEE, que aborda todas las áreas relacionadas con comunicaciones sobre redes de energía (PLC), en los aspectos analíticos, teóricos, de simulación, experimentales y prácticos.

para el caso de Colombia se describe el interés de universidades (ejemplo, Universidad Nacional de Colombia), empresas electrificadoras y operadores de telecomunicaciones (EMCALI, EPM, ESSA, BPLC Latín América Colombia S.A. E.S.P.), en realizar investigaciones y en algunos casos pilotos en campo, relacionados con diferentes aspectos de la tecnología BPL, como acceso para el servicio de Internet o como parte de tecnologías de Smart Grid.

Pasado el 2010, durante la primera mitad de la siguiente década, se continuaron realizando proyectos piloto para el servicio de acceso a internet con tecnología BPL en diferentes partes del mundo, es el caso del proyecto iniciado en 2011 por Scottish Power para atender 1.000 viviendas en Liverpool (Reino Unido), lo cual confirmó el interés en esta tecnología, e impulsó la ratificación de los nuevos estándares IEEE 1901 e ITU-TG.hn. [24].

Hacia 2012, en Estados Unidos se reportó un caso exitoso de transmisión de datos del orden de los 10 Mbps, con tecnología BPL sobre redes de alta tensión, obteniendo una latencia menor a 10 ms y dando cumplimiento de los límites de emisiones exigidos por la Comisión Federal de Comunicaciones (FCC – por sus siglas en inglés), para lo cual se utilizaron diferentes bandas de 5Mz (en el rango de 2 a 30 Mhz) sobre una línea de 8Km de un circuito de 69 kV, estas pruebas fueron desarrolladas por el Departamento de Energía de los Estados Unidos (DOE - por sus siglas en inglés), American Electric Power y la pequeña empresa de Massachusetts, Amperion, y seguidamente continuarían con pruebas sobre un circuito de 138 kV. Otros proyectos similares fueron efectuados hacia 2014 en Italia, España y Korea [24] [48].

El Technology Road-Mapping (TRM)⁵ que se estimaba a inicios de la década del 2010, de acuerdo con [49], se muestra en la *Figura 21*, donde se aprecia que la tecnología BPL era contemplada para la red de acceso, sobre redes de energía de media (MV) y baja tensión (LV), e in-home, siendo una opción competitiva con las tecnologías de fibra óptica y cable, como se observa en *Figura 22* [49].

⁵ Technology Roadmapping (TRM) Implementation, es una herramienta efectiva para alcanzar ventajas competitivas sostenibles para enlazar las tecnologías con las estrategias de negocio [101].

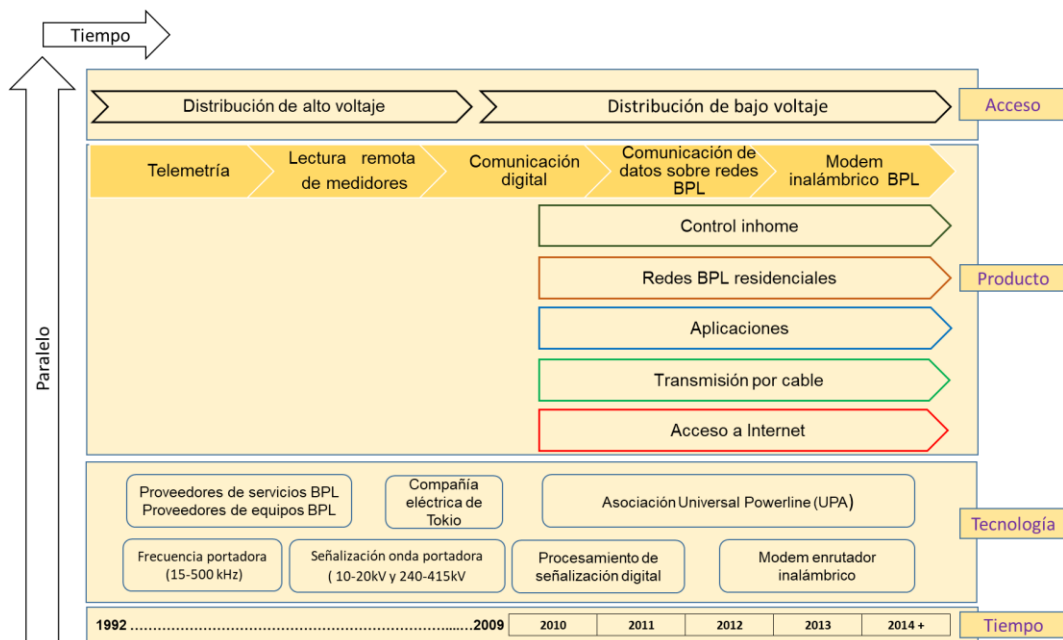


Figura 21. Technology Road-mapping PLC

Fuente: Adaptado de [49]

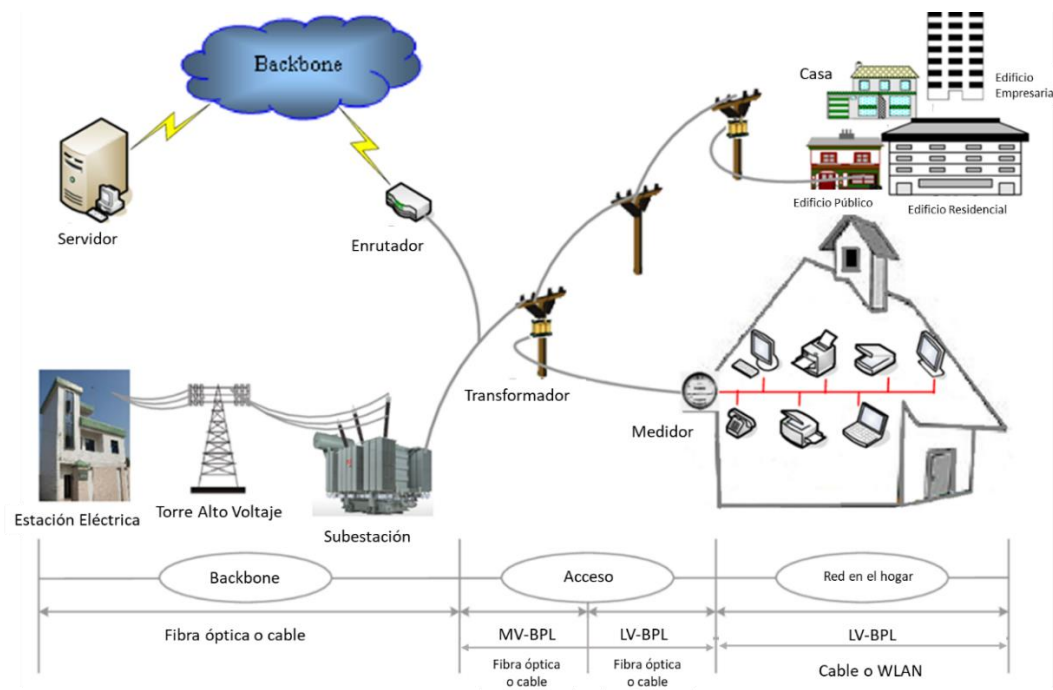


Figura 22. Diagrama de flujo general de la tecnología BPL

Fuente: Adaptado de [49]

Para facilitar la visualización de la evolución de la tecnología PLC hasta llegar a BPL, en la *Figura 23* se muestra de manera bastante general la historia [38].

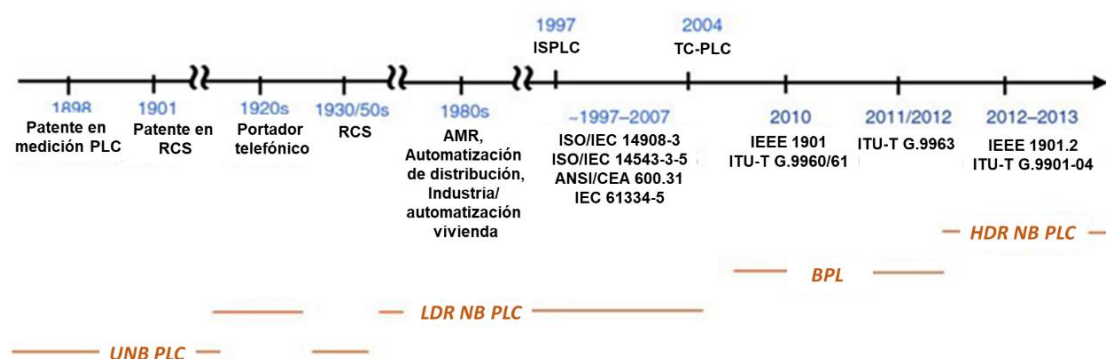


Figura 23. PLC en el tiempo

Fuente: Adaptado de [38]

Después del rápido vistazo a la evolución de BPL y a algunas de las investigaciones e implementaciones (proyectos piloto), tal como se presentan en [24][37][38][39][41][50], es claro que esta tecnología ha tenido un gran avance, actualmente con grandes inversiones e implementaciones para Smart Grid como soporte fundamental para alcanzar sistemas eficientes de generación, transporte y distribución eléctrica, pero que a su vez puede ser un buen competidor de las tecnologías xDSL, Fibra Óptica y Cable para la prestación del servicio de acceso a internet, especialmente para aquellas zonas apartadas o rurales sin cobertura de redes de telecomunicaciones, por su gran capacidad para transmisión de datos a alta velocidad, su teórico bajo costo y rápida implementación respecto a las otras tecnologías, al no requerir despliegue de nueva infraestructura.

Es muy importante resaltar que, el desarrollo e incremento en la implementación de sistemas Smart Grid a nivel mundial, es un indicador del avance en la integración de las TIC con los sistemas eléctricos. A través de estos sistemas Smart Grid los grandes consumidores de energía (Estados Unidos y la Unión Europea), buscan efectuar una gestión flexible, limpia, segura, confiable y económica del recurso energético. La convergencia de las TIC y los sistemas eléctricos, puede cambiar ese rol pasivo del usuario del sistema eléctrico, capturando información clave para optimizar la distribución y el consumo de energía, generando a su vez una interacción que originará nuevas

oportunidades de negocio, siendo necesario pensar en nuevas arquitecturas de la red de energía eléctrica para facilitar su integración con las TIC [51].

Lo anterior favorece a la tecnología BPL, no solo por sus desarrollos para IoT e infraestructura de medición de avanzada (AMI, por sus siglas en inglés), que proporciona información que puede emplearse para optimizar la operación y comercialización del sistema eléctrico [51], sino para su retorno y entrada definitiva al negocio de suministro masivo de acceso a Internet.

En Colombia se está dando una alta importancia a la implementación de Smart Grids y, entre otros, los sistemas AMI, pues según las proyecciones realizadas por la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), se podría esperar un aumento del 52% en el consumo de energía eléctrica entre los años 2016 y 2030, razón por la cual, a parte de la diversificación de la oferta que se debe lograr mediante la generación distribuida, se debe incentivar una eficiencia energética, para mejorar la seguridad del suministro, ayudando a su vez a mantener constante o disminuir las emisiones de gases efecto invernadero y de otras emisiones contaminantes [52].

Uno de los objetivos para generar eficiencia energética es lograr la respuesta de la demanda, que tal como la define la ley 1715 de 2014, consiste en lograr “cambios en el consumo de energía eléctrica por parte del consumidor, con respecto a un patrón usual de consumo, en respuesta a señales de precios o incentivos diseñados para inducir bajos consumos”, reduciendo así el pico de demanda de potencia y aliviando restricciones en generación y transmisión, tarea para la cual es fundamental la implementación de tecnologías de medición avanzada [52], donde BPL, sin duda, jugará un papel importante.

Colombia, siguiendo la tendencia de países europeos y americanos, en relación con Smart Grid, en el año 2016, con el liderazgo del Ministerio de Minas y Energía, la UPME y MinTIC, elaboró el documento “Smart Grids Colombia Visión 2030” cuyo objetivo fue identificar las estrategias, estándares y regulaciones más apropiadas para lograr la implementación de las redes inteligentes de energía [52], y en donde se identifica a BPL, dentro de las tecnologías de la estructura de comunicaciones para las redes inteligentes [53].

Una muestra del auge y crecimiento que está teniendo BPL en el mundo, se puede ver a través de empresas como la canadiense Corinex, compañía de la cual se tiene referencia en realización de investigación y fabricación de equipos para el suministro del servicio de

acceso a Internet con tecnologías BPL [41], y que actualmente son uno de los líderes mundiales en tecnologías Smart Grid sobre BPL, que provee, entre otras, soluciones y servicios IoT “end to end”, para medición inteligente en redes de energía, con tasas de transmisión por encima a los 50 Mbps, y que, con su tecnología de nueva generación, G.hn BPL, suministrará tasas de transmisión superiores a los 100 Mbps. Esta tecnología BPL de Corinex, está siendo respaldadas por grandes operadores de energía eléctrica como E.ON (Alemania) e Iberdrola (España) [54]. Actualmente Corinex ya ha instalado más de 1 millón de módulos BPL y despachado más de 14.000 gateways al rededor del mundo para soluciones Smart Grid [55].

Después de todo lo anterior, es necesario tener presente que la tecnología BPL, que por ahora está participando en el auge de las soluciones para Smart Grid a nivel global, hace parte de la evolución hacia la integración o convergencia de las TIC y las redes de energía, lo cual va allanando el camino para nuevos negocios y servicios, y especialmente para el retorno de BPL como solución masiva de última milla para la prestación del servicio de acceso a Internet, sin embargo, por el momento, BPL puede ser evaluada para casos particulares como las zonas apartadas o rurales, donde se cuenta con cobertura de redes de energía (que para el caso de estudio, son redes nuevas construidas con parámetros RETIE) y que cuentan, en el mejor de los casos, con una deficiente cobertura de redes de telecomunicaciones.

2.3.2 Bandas de frecuencia de la tecnología BPL

La forma como fueron apareciendo en la historia los sistemas PLC, permite mostrar su clasificación, ver *Figura 23*, la cual se fue dando a medida que se incrementó la frecuencia de transmisión, con excepción de la HDR NB PLC que no opera en una banda más alta de frecuencias que los sistemas BPL [38].

Los primeros sistemas, como se muestra en la *Figura 23*, se clasifican como PLC de ultra banda angosta (UNB PLC), que operan en la parte superior de la banda SLF (30 - 300Hz) y en la banda ULF (0.3 – 3 kHz) con una velocidad aproximada de transmisión de datos de 100 bps [38].

Las siguientes tecnologías, clasificadas como PLC banda angosta de baja velocidad de datos (LDR NB PLC) junto con las tecnologías clasificadas como PLC banda angosta de alta velocidad de datos (HDR NB PLC), hacen parte de la familia de las tecnologías de

banda angosta (NB) que operan en las bandas VLF/LF/MF (3 - 500 kHz) con velocidades de algunos cuantos de kbps para LDR y de hasta 500 Kbps para HDR [38].

Finalmente, las tecnologías clasificadas con BPL operan en bandas HF/VHF (1.8 - 250 MHz) para lograr velocidad de transmisión de datos de cientos de Mbps [24] [38].

En la *Figura 24* se muestran las bandas de frecuencia para cada una de las clases de tecnología PLC [56].

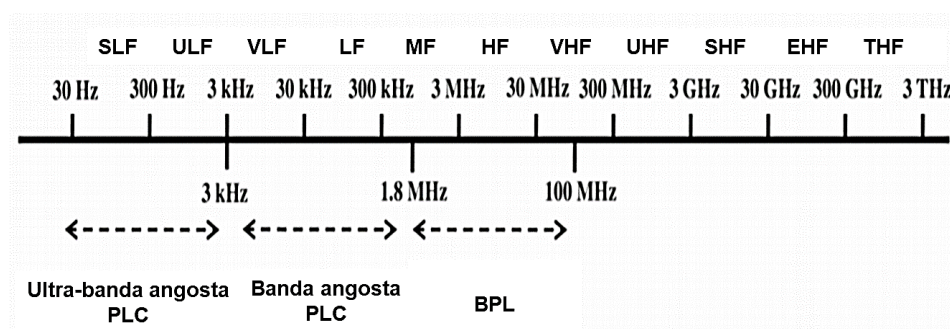


Figura 24. Bandas de frecuencia para las tecnologías PLC

Fuente: Adaptado de [56]

2.3.3 Especificaciones y estándares de la tecnología BPL

La estandarización de las tecnologías es el camino para impulsar su despliegue masivo y permanente evolución, protegiendo a los usuarios, prestadores de servicios e incentivando las inversiones de los fabricantes. Es por esto que se destacan los grandes esfuerzos que desde 2005 iniciaron la IEEE y la ITU-T para lograr una estandarización de las tecnologías BPL, y eliminar las barreras que existían para el desarrollo y despliegue tanto de redes de acceso como de home-networking, y lograr solucionar la fragmentación que existía en el mercado con la existencia de tres tipos de soluciones impulsadas por: HomePlug Alliance (HPA), High-Definition Power Line Communication (HD-PLC) y Universal Powerline Association (UPA) [38].

Estos esfuerzos conjuntos se capitalizaron con la publicación de dos estándares, IEEE 1901 e ITU-T G.hn (o G.996x), más un estándar independiente “stand-alone” de coexistencia de BPL, G.Cx (o G.9972), los cuales abarcan tanto la capa física (PHY), como la subcapa de

acceso al medio (MAC) de la capa de enlace del modelo de referencia básico OSI (las capas superiores de los protocolos son genéricas) [38].

De acuerdo con [56], en la *Figura 25* se presenta una foto general de los estándares y especificaciones para la familia de tecnologías PLC.

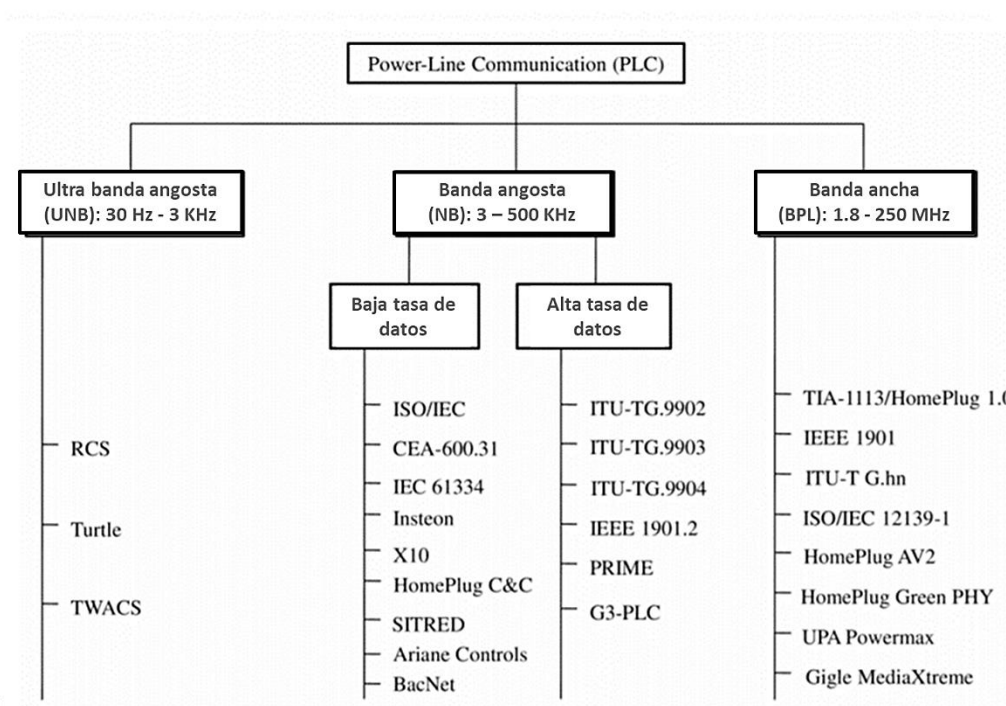


Figura 25. Estándares y especificaciones de las tecnologías PLC

Fuente: Adaptado de [56]

Cabe agregar que la regulación de las tecnologías PLC es importante para que puedan coexistir con otras tecnologías que también usan la red eléctrica, como cualquier clase de equipo o electrodoméstico, o con las tecnologías inalámbrica que operan en las mismas bandas de frecuencia, adicionalmente, debido a que la red eléctrica no fue concebida para transmisión de datos, es decir para operar señales de altas frecuencias, se produce radiación electromagnética, afectando especialmente a las tecnologías BPL que posee las menores longitudes de ondas entre las tecnologías PLC, por lo cual, desde el punto de vista regulatorio se tienen diferencias entre NB y BPL [57].

En la primera columna de la *Figura 26* se ve como HomePlug inició con su estándar HomePlug 1.0, publicado en Junio de 2001, el cual se convirtió en 2008 el estándar TIA 1113, (TIA -Telecommunications Industry Association), sin embargo, la existencia de diferentes estándares no interoperables, hicieron que la IEEE en 2005 y la UIT-T en 2006, como se observa en las columnas 2 y 3, iniciaran la consolidación en estándares internacionales, terminando con la publicación en 2010 de los correspondientes estándares IEEE 1901 y el ITU-T G.9960/61 acompañado del ITU-T G.9972 (coexistencia) [57].

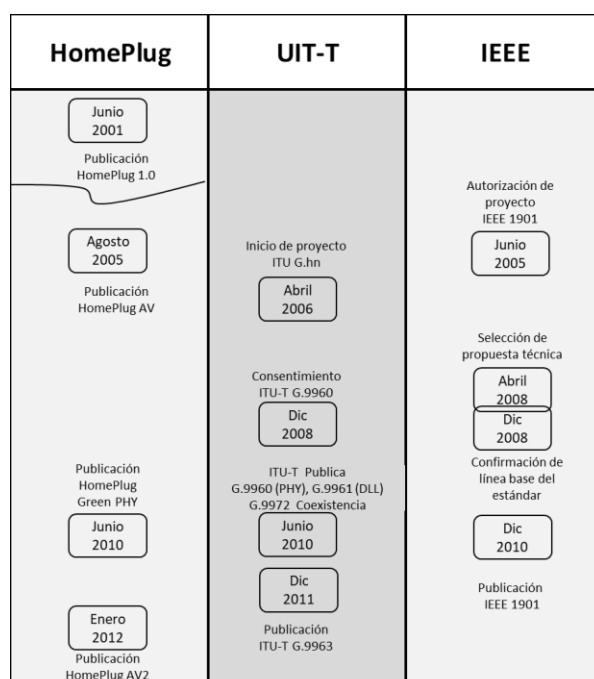


Figura 26. Evolución de especificaciones y estándares de la tecnología BPL

Fuente: Adaptado de [57]

Mientras el estándar IEEE 1901 tiene disposiciones para in-home y redes de acceso, el estándar ITU-T G.hn aplica exclusivamente para home-networking, pero aplica no solo para tecnología PLC sino también para comunicaciones sobre línea telefónica y cables coaxiales [57].

El estándar de la IEEE usa la banda de frecuencias de 2-30 MHz, con una banda extendida opcional de hasta 50 MHz, incluyendo dos capas físicas multiportadoras (PHY), llamadas

normalmente OFDM a través de la Transformada rápida de Fourier (FFT-OFDM) y Wavelet OFDM, la primera es típica (en ventana) OFDM, mientras que la segunda tiene una modulación multitono wavelet discreta (DWT), las cuales no son interoperables pero su coexistencia está habilitada por un protocolo Inter-PHY (IPP), que luego fue extendió para permitir la convivencia con G.9960, y esta extensión se llamó Inter-System Protocol (ISP) [57].

La FFT-PHY aplica un código Turbo para FEC (Forward Error Correction), mientras que Wavelet-PHY utiliza RS (Concatenated Reed-Solomon) y códigos convolucionales, que pueden ser opcionalmente reemplazados por códigos convolucionales LDPC (Low-Density Parity-Check) [57].

Las capas físicas multiportadoras (PHY), admiten múltiples señales constelaciones y enmascaramiento espectral como lo requieren las regulaciones. Encima de estas dos capas físicas reside, a través de protocolos de convergencia de capa PHY, una capa común de control de acceso al medio que permite tanto CSMA como TDMA [57].

Por su lado, el estándar ITU-T G.hn, para PLC, incluye 3 planes de banda desde 2 hasta 25, 50 y 100 MHz. La máscara espectral para cumplir con el límite de emisiones es consistente con la usada por el estándar IEEE 1901. De la misma manera que en IEEE 1901, se aplica OFDM en ventana con carga de bits flexible, y CSMA y TDMA se utilizan para acceso al medio. En contraste con los modos PHY de IEEE 1901, la capa física de ITU-T G.hn utiliza códigos de bloque LDPC [57].

Los estándares IEEE 1901 y ITU-T G.hn no son interoperables, sin embargo, la coexistencia se habilita a través del ISP especificado en IEEE 1901 y ITU-T G.9972, cuyo soporte es obligatorio para dispositivos IEEE 1901 [57].

En el camino hacia transmisiones en el orden de Gbps, en el estándar ITU-T G.9963 se especifica una extensión de las transmisiones MIMO (Multiple Input – Multiple Output). Igualmente, HomePlug publicó el estándar HomePlug AV2, que es compatible con HomePlug V y IEEE 1901, e incluye transmisión MIMO y disminución de potencia para reducción de emisiones [57].

Teniendo en cuenta que el objeto del presente documento es establecer la viabilidad de la utilización de la tecnología BPL como red de acceso o última milla para prestación del

servicio de acceso a internet, a continuación, se presentan las consideraciones generales de las topologías de las diferentes clases de redes eléctricas, sobre las cuales se podría instalar la tecnología.

2.3.4 Topología de las redes eléctricas

Precisamente, son las redes eléctricas existentes y su cobertura las que vuelven interesante la tecnología BPL, en la medida que reducen el gasto de capital (CapEx) requerido para la construcción de nuevas redes de última milla (al desplegarse sobre redes de baja tensión), inversión de capital que en algún momento llegaron a considerar se reducía en aproximadamente un 50%, sumado a la reducción en el tiempo de implementación [37] [56].

Sin embargo, la tecnología BPL para la prestación de servicio de acceso a internet tiene grandes desafíos por atender, pues, tal como se presenta en [24] [37] [38] [39] [50], las redes eléctricas no fueron construidas para prestar servicios de telecomunicaciones y, por otro lado, las redes de cada país o de cada ciudad, o hasta cada sector de la ciudad, tienen diferentes características (longitud, cantidad de ramales, tipo de cables, variedad de dispositivos eléctricos conectados a la red, ambiente que la rodea, etc), lo cual hace que el desempeño de la tecnología sea diferente en cada red al tener diferentes resultados en aspectos como ruido, atenuación, interferencia, reflexión, desvanecimiento multitrayectoria, etc. Todo esto, a su vez, ha redundado en la dificultad de tener un modelamiento preciso y común del canal de transmisión.

Las siguientes son las topologías de las redes eléctricas que sirven de medio de transmisión para la tecnología PBL.

2.3.4.1 Red de alta tensión (HV – High Voltage).

Son redes normalmente aéreas con un voltaje entre 110 y 380 kV, que conectan las centrales eléctricas con extensas regiones de suministro, o grandes clientes, a lo largo de grandes distancias [37], normalmente no se recomienda la transmisión de datos sobre este tipo de redes, debido al alto campo eléctrico y las pérdidas de corona, al igual que las interferencia generadas con radiocomunicaciones al usar las bandas de frecuencia bajas y medias [50].

2.3.4.2 Redes de media tensión (MV – Medium Voltage)

Son redes que se encuentran tanto aéreas como canalizadas, con un voltaje entre 10 y 30 kV, y atienden grandes áreas, industrias y clientes comerciales, aunque sus longitudes son grandes, son mucho menores a las redes de alta tensión [37]. Al desplegar la tecnología BPL sobre estas redes, se constituye en el Backbone de la red de transmisión [50].

2.3.4.3 Redes de baja tensión (LV –Low Voltage)

Son redes que se encuentran tanto aéreas como canalizadas, con un voltaje entre 110 y 400 V), es la última parte de la red del operador para alcanzar el predio de los usuarios finales, conectándolos desde el transformador, y llegando a una gran cantidad de hogares, sitios comerciales, gubernamentales, etc, y sus longitudes no son superiores a unos cuantos cientos de metros. Desplegando BPL sobre estas redes, se convierte en el reemplazo de la llamada última milla [37]. Existe diferencia en los voltajes y las frecuencias, dependiendo el país, por ejemplo, para los países que suministran 220 V se trabaja a 50 Hz, y para los países que suministran 120 V se trabaja a 60 Hz [50].

2.3.4.4 Redes eléctricas internas (In-home)

Hacen parte de las redes eléctricas de baja tensión, siendo complementaria a la red externa, aunque pertenecen al dueño del sitio donde se encuentran instaladas [37], aunque son esenciales para llegar con el servicio al cliente, para el caso de BPL no se han usado completamente debido al ruido y a que las características del canal se considera hostil al trabajar con señales de alta frecuencia [50].

En [24] y [38] se expone con detalle las configuraciones de las redes de media y baja tensión, y las redes internas, dependiendo de las cantidad de fases del circuito.

En la *Figura 27* se muestra la topología de las redes eléctricas y un ejemplo de la última milla para el caso de la tecnología BPL desplegada sobre redes de baja tensión [56].

La sustancial disminución en el interés que se tuvo de la tecnología BPL, para el suministro del servicio de acceso a Internet, hacia finales de los años 90 y primera década del nuevo milenio, como resultado, entre muchas otras, de las interferencias con los servicios de radio

en banda HF, las menores capacidades de transmisión comparadas con tecnologías como ADSL y HFC, la mayor disponibilidad e incluso los menores costos de otras soluciones de

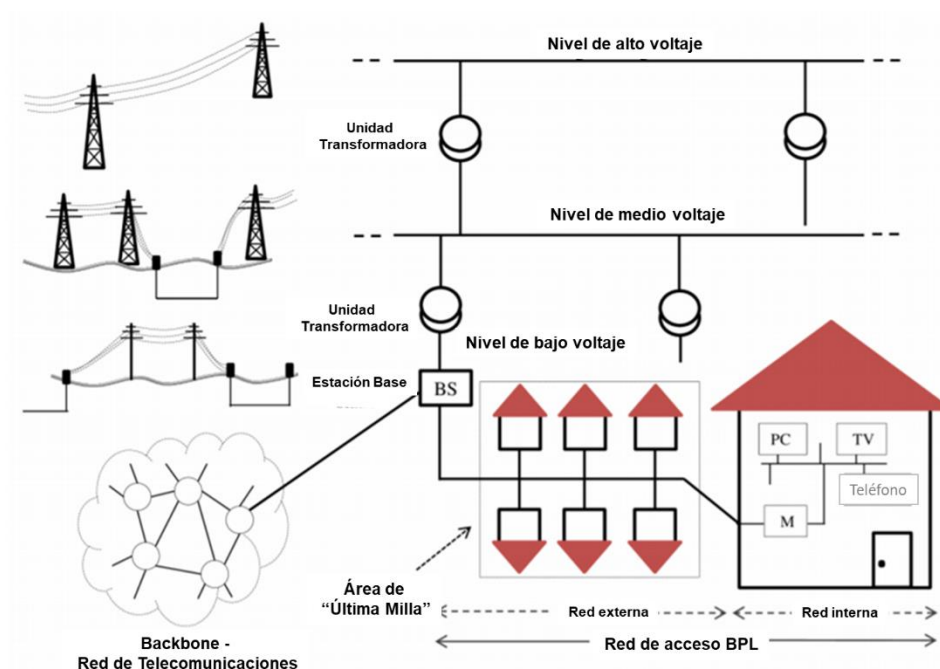


Figura 27. Topología redes eléctricas y última milla en BPL

Fuente: Adaptado de [56]

de banda ancha, ocasionaron que esta tecnología no se encuentre desplegada masivamente en países desarrollados y que por consiguiente se considere como una tecnología marginal, sin embargo, BPL aún puede tener opciones en países en vía de desarrollo o subdesarrollados, y en zonas rurales de cualquier país, inclusive desarrollados, donde la infraestructura de los operadores de telecomunicaciones no tiene la cobertura adecuada pero que si pueden contar con infraestructura eléctrica [24].

2.4 IMPACTO AMBIENTAL DE LAS TECNOLOGÍAS DE ÚLTIMA MILLA

Las tecnologías de la información y las comunicaciones han cambiado y siguen cambiando la forma de vida del ser humano, al introducirse en cada uno de los sectores de la economía y la sociedad, generando impactos y positivos y negativos para el medioambiente. Sin

embargo, cuando se habla de evaluación de impactos ambientales no solo se debe considerar el sector TIC en sí mismo, sino también el efecto que el uso de las TIC genera en el medioambiente [58].

Debido a la preocupación por los efectos medio ambientales generados por el permanente desarrollo de las TIC, la UIT-T en conjunto con el comité técnico y de ingeniería ambiental del Instituto Europeo de Normas de Telecomunicaciones (ETSI TC EE – por sus siglas en inglés) desarrollaron la recomendación ITU-T L.1410 y el estándar ES 203 199, respectivamente, los cuales tienen el mismo contenido técnico, y son un complemento a la ISO-14040 e ISO-14044, en lo relacionado con la evaluación del impacto ambiental del ciclo de vida de los bienes, redes y servicios de las TIC [59].

La UIT y algunos documentos académicos mencionan que, desde el punto de vista ambiental, las TIC tienen una naturaleza de “doble filo”, pues por un lado su existencia física genera una carga ambiental (efecto de primer orden⁶) en cada etapa de su ciclo de vida, desde los recursos naturales utilizados para su fabricación, algunos de ellos escasos y no-renovables, y el consumo de energía de los sistemas, hasta los desechos electrónicos resultantes, pero por otro lado genera una disminución en la carga ambiental (efecto de segundo orden⁷) al crear eficiencias tanto en el estilo de vida de los seres humanos como en los diferentes sectores de la economía, en los cuales, por ejemplo, puede aportar de manera significativa a la eficiencia energética, optimización logística, eficiencia de los negocios, desmaterialización (resultante de la digitalización de la información), reducción de transporte y viajes, lo cual se puede percibir de primera mano con la implementación del teletrabajo, video conferencias, e-commerce, etc. Adicionalmente, existen impactos y oportunidades indirectas (otros efectos⁸), que se generan por los cambios estructurales de una sociedad que hace uso de las TIC o como consecuencia del uso de algunos servicios específicos, efectos conocidos como “efecto rebote” [59].

⁶ Efectos de primer orden, según las definiciones de ITU-T L.1410, corresponden al impacto creado por la existencia física de las TIC y los procesos involucrados, por ejemplo, emisiones de GHG (Greenhouse Gas – gas efecto invernadero), desechos electrónicos, uso de sustancias peligrosas y uso de recursos escasos no renovables.

⁷ Efecto de segundo orden, según las definiciones de ITU-T L.1410, corresponde al impacto y las oportunidades creadas por el uso y la aplicación de las TIC. Esto incluye efectos de reducción de carga ambiental que pueden ser reales o potenciales.

⁸ Otros efectos, según las definiciones de ITU-T L.1410, son aquellos diferentes a los efectos de primer y segundo orden.

Teniendo en cuenta lo anteriormente expuesto, y tal como se muestra en la *Figura 28*, la recomendación obvia para generar una sociedad sostenible, desde el punto de vista ambiental, es minimizar los efectos de primer orden (lado izquierdo de la figura) y potencializar los efectos de segundo orden (lado derecho de la figura) [59].



Figura 28. Modelo esquemático para análisis medioambiental de bienes, redes y servicios TIC

Fuente: Adaptado de [59]

De acuerdo con lo señalado en las recomendaciones antes mencionadas de la UIT-T, serie L.1400, los efectos ambientales de primer y segundo orden, relacionados con los bienes, redes y servicios de las TIC, se pueden estimar a través de evaluaciones ambientales, las cuales se efectúan mediante un método y modelo analítico sistemático llamado evaluación del ciclo de vida (LCA – por sus siglas en inglés), que incluye las etapas de: adquisición de materia prima, producción, uso y finalización de la vida útil [59].

Acorde con la última versión de la ITU L-1410 aprobada el 7 de diciembre de 2014, en la *Tabla 4* se presentan las definiciones de los componentes del sector TIC “Bienes”, “Redes” y “Servicios”, listando los aspectos o factores que se incluye dentro de cada uno de ellos, y

adicionalmente en *Tabla 5* se mencionan los componentes de las cuatro etapas del ciclo de vida “adquisición de materia prima”, “producción”, “uso” y “finalización de la vida útil” [59].

Tabla 4. Componentes de las TIC

Componente	Definición	Aspectos Incluidos
Bienes	Son los bienes tangibles derivados de tecnologías dedicadas o relacionadas con (siguiente columna).	La adquisición, almacenamiento, manipulación (incluida la transformación), gestión, movimiento, control, visualización, conmutación, intercambio, transmisión o recepción de una diversidad de datos.
		El desarrollo y uso del hardware, software y procedimientos asociados con esta entrega.
		La representación, transferencia, interpretación y procesamiento de datos entre personas, lugares y máquinas, observando que el significado asignado a los datos se conserva durante estas operaciones.
Redes	Conjunto de nodos y enlaces que proporcionan información física o inalámbrica y conexiones de comunicación entre dos o más puntos definidos.	Ejemplo: red inalámbrica, red fija, red de área local (LAN), red doméstica y red de servidores, redes de acceso, redes de core, redes de computación en la nube.
Servicios	Uso de bienes y / o redes de TIC para proporcionar valor a uno o más usuarios.	Ejemplo: Teleconferencia, teletrabajo, emisión de boletos electrónicos, aprendizaje electrónico, atención médica electrónica, transporte y logística inteligentes, sistemas de adquisición, sistemas de gestión de la cadena de suministro, distribución de música / películas a través de Internet o voz sobre IP, sistemas M2M.

Elaboración Propia, Fuente: [59]

Tabla 5. Etapas del ciclo de vida

Etapas	Componentes
Adquisición de materia prima de bienes	Extracción de materia prima. Procesamiento de materias primas.
Producción	Producción de bienes TIC. Producción de bienes de soporte.
Uso	Uso de bienes TIC. Uso de bienes de soporte. Actividades de soporte del operador. Actividades de soporte de proveedores de servicios.
Tratamiento de bienes al final de su vida útil (EoLT):	Reúso. EoLT específico para TIC.

Elaboración Propia, Fuente: [59]

En cuanto a las tecnologías de última milla, es necesario resaltar la importancia de generar conciencia en los PRST para determinar los efectos, tanto positivos como negativos, que estas tecnologías podrían generar al medio ambiente, con el fin de propender por soluciones que reduzcan al máximo la emisión de gases efecto invernadero (GHG – por sus siglas en inglés) y, por ende, ganar en calidad del medioambiente, o al menos no incrementar el deterioro ambiental actual.

Aunque no se ha tenido acceso a evaluaciones ambientales del ciclo de vida de cada uno de los componentes (bienes, redes y servicios) de las tecnologías de última milla abordadas en este documento, se puede decir que el gran diferenciador de la tecnología BPL respecto a las otras tecnologías, desde el punto de vista físico, es que no requiere de construcción de la red de acceso en su componente cableado, pues usa la red eléctrica existente, lo cual podría arrojar un mejor resultado en una evaluación ambiental del ciclo de vida en los componentes de bienes y redes.

Como se dijo anteriormente, es importante que se realicen las evaluaciones ambientales correspondientes, pues pese a que se podría creer que el balance del impacto ambiental resultante de las TIC es positivo, por los grandes beneficios y eficiencias que se pueden percibir de primera mano con su uso, algunos autores señalan que los beneficios netos no están asegurados, como consecuencia de los efectos de rebote e inducción, sin dejar de mencionar que la evaluación ambiental de los efectos indirectos (llamados de orden superior) continúa siendo controvertida [60].

Un ejemplo de lo complicado que resulta evaluar los efectos ambientales indirectos relacionados con las TIC, podría verse con las enfermedades infecciosas, las cuales se ven favorecidas con el cambio climático y la destrucción de la biodiversidad [61], y, sin duda, durante las etapas del ciclo de vida de los componentes de bienes, redes y servicios de las TIC, se aporta negativamente al cambio climático.

Cabe mencionar, que la rápida expansión del COVID-19, que la convirtió en una pandemia global, se atribuye a la hipermovilidad humana [61], y es claro que la hipermovilidad está asociada con la globalización, y esta, se ha facilitado y encuentra su sustento y motor en las TIC [62] .

Finalmente, tal como se indica en [63] , basado en publicaciones de la OCDE⁹ relacionadas con la situación del COVID-19 en América Latina y el Caribe, al pensar en elementos relevantes para la etapa post-COVID-19 en la región, y que podrían representar una oportunidad para la región, se plantea como una de las tres dimensiones fundamentales para el rediseño de un pacto social, definir una estrategia de desarrollo sostenible que ayude a transformar el modelo de desarrollo de la región, “aprovechando las oportunidades y abordando los desafíos que conllevan dos importantes tendencias mundiales: el cambio climático, que debe convertirse en una oportunidad para dirigir el estímulo económico hacia la construcción de un modelo de desarrollo basado en la sostenibilidad ambiental. Segundo, la transformación digital, que a lo largo de esta crisis está demostrando ser una herramienta para preservar ciertas actividades económicas y salvar empleos en la región, al tiempo que expone las consecuencias negativas de la brecha digital. La necesidad de impulsar una transformación digital que incluya a todas y todos es otra lección de esta crisis.”

Lo anterior da más fuerza a establecer la viabilidad de soluciones como la que se aborda en el presente documento, pues entre otras, la tecnología BPL al aprovechar la red eléctrica existente, puede favorecer a la sostenibilidad ambiental, y la implementación de redes de última milla en zonas apartadas y de baja densidad demográfica en Colombia, redundan en la reducción de la brecha digital, incrementando la transformación e inclusión social digital de todos los sectores de la sociedad.

2.5 COMPARATIVO DE LAS TECNOLOGÍAS DE ÚLTIMA MILLA

Basado en la información de las tecnologías de última milla, descrita en los numerales 2.2 y 2.3 anteriores, en la *Tabla 6* se presenta un comparativo que permite establecer las principales ventajas y desventajas de cada una de las tecnologías más utilizadas en Colombia, con el fin de tener bases para la evaluación de la viabilidad objeto del presente documento.

A continuación se relacionan los aspectos a considerar en la comparación, y el alcance de cada uno de ellos:

⁹ OCDE: Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico.

1. Medio físico / última milla: es el tipo de cable que se utiliza para el tramo que llega al usuario final.
2. Requiere construcción de segmento cableado de Última milla en P.O. (Proyectos objetivo): se refiere a la necesidad de construir una red nueva para llevar el servicio al usuario final, específicamente para los proyectos objeto del presente estudio.
3. Requerimiento de compartición de infraestructura eléctrica para última milla P.O. (en los Proyectos objetivo): es la necesidad de negociar el uso de infraestructura de terceros para la instalación de la última milla o segmento de red que llega al usuario final. Entre más elementos se requiera del tercero dueño de la infraestructura, más alto o complejo es el requerimiento.
4. Conocimiento y experiencia local de la tecnología: se refiere al conocimiento existente por parte de los técnicos y trabajadores del sector de telecomunicaciones en Colombia, incluido el grado de capacitación que deben tener para la instalación de la tecnología.
5. Dificultad de logística y despliegue en campo: es el grado de dificultad que se tiene para la instalación de la tecnología, incluyendo los tipos de materiales requeridos para la construcción de la red de última milla, el transporte, el tiempo de despliegue de la red y el perfil del personal requerido para la construcción y puesta en servicio.
6. Impacto ambiental por la red de última milla en P.O. (proyectos objetivo): es el grado de afectación negativa que pueda tener el medio ambiente como resultado del ciclo de vida de la tecnología de última milla, específicamente para la zona en la que se ubican los proyectos objeto del presente estudio.
7. Riesgo de vulnerabilidad física por efecto del tipo de cable utilizado en la última milla: se refiere a la posibilidad de robos o daños debido a lo atractivo y fácil que puede ser tomar el material instalado en la red de última milla.
8. CapEx Última Milla P.O. (en los proyectos objetivo): hace referencia a la inversión requerida para la construcción y puesta en servicio de la red de última milla, específicamente para los proyectos objeto del presente estudio.
9. OpEx Última Milla P.O. (en los proyectos objetivo): hace referencia al gasto generado por la operación y mantenimiento de la red de última milla, específicamente para los proyectos objeto del presente estudio.
10. Cant. accesos Colombia 1T / 2019 (Millones): es la cantidad, expresada en millones, de servicios instalados con una tecnología, por parte de los PRST, en todo el país,

de acuerdo con los datos reportados en Colombia TIC con fecha de corte marzo de 2019.

11. Cant. accesos municipios objetivo 4T/2019: es la cantidad de servicios instalados con una tecnología, por parte de los PRST, en los municipios donde se ubican los proyectos objeto de estudio, de acuerdo con los datos reportados en Colombia TIC con fecha de corte marzo de 2019.
12. Tecnología Madura para acceso a Internet: está relacionado con el grado de avance tecnológico y utilización comercial, que hace que la tecnología se considere madura en el mercado de telecomunicaciones.
13. Velocidad de transmisión de datos: se refiere a la tasa de transferencia de datos en sentidos downstream (DS) y upstream (US).
14. Capacidad de transferencia de datos suficiente para atender los P.O. (proyectos objetivo): busca confirmar si la tecnología evaluada tiene la capacidad de transferencia de datos suficiente para atender las necesidades de conectividad para el servicio de acceso a Internet de los hogares ubicados en los proyectos objetivo.
15. Distancia de cobertura: hace relación al alcance o longitud que puede tener la red de última milla, para la prestación del servicio con un nivel de calidad adecuado.
16. Nivel de estandarización: está relacionado con el grado de avance que a nivel de estandarización (normatividad técnica) tiene la tecnología, lo cual hace que sea más o menos atractiva para el mercado, dado que garantiza, entre otras, su interoperabilidad.

Tabla 6. Comparación tecnologías de última milla más utilizadas en Colombia

	xDSL	HFC	FTTx	BPL
1. Medio Físico / Última Milla	Hilos Trenzados de Cobre	Fibra Óptica y Cable coaxial	Fibra Óptica (podría incluir un tramo final de hilos trenzados de cobre dependiendo de la tecnología)	Cables de la Red Eléctrica
2. Requiere construcción de segmento cableado de Última milla en P.O.	Si	Si	Si	No
3. Requerimiento de compartición de infraestructura eléctrica para última milla P.O.	Bajo (Postes de apoyo para cables)	Medio (Postes de apoyo para cables y energía para amplificadores)	Bajo (Postes de apoyo para cables)	Alto (Requiere de la infraestructura eléctrica: Cables red baja tensión, postes, acometida y red interna en casa)

	xDSL	HFC	FTTx	BPL
4. Conocimiento y experiencia local de la tecnología	Alto	Medio-Alto	Medio-Alto	Bajo
5. Dificultad de logística y despliegue en campo	Medio/Alto	Alto	Alto	Bajo
6. Impacto ambiental por la red de última milla en P.O.	Alto (Ciclo de vida de la red - Última milla en cobre)	Alto (Ciclo de vida de la red - Última Milla en Cobre)	Medio (Ciclo de vida de la red - Posibilidad de unos metros de última milla en cobre)	Bajo (No existe nuevo componente cableado de última Milla)
7. Riesgo de vulnerabilidad física por efecto del tipo de cable utilizado en la última milla	Alto (Última milla en cobre - multipar)	Medio/Alto (Última milla en cobre -Coaxial)	Medio (Posibilidad de solo unos metros de última milla en cobre)	Bajo (Red eléctrica existente)
8. CapEx Última Milla (P.O.)	Alto	Alto	Medio	Bajo
9. OpEx Última Milla (P.O.)	Medio	Alto (Red activa)	Medio	Medio
10. Cant. Accesos Colombia 1T / 2019 (Millones)	1,7	3,9	0,9	0
11. Cant. Accesos Municipios Objetivo 4T/2019	307	0	49	0
12. Tecnología Madura Para Acceso a Internet	Si	Si	Si	No
13. Velocidad de Transmisión de Datos	ADSL: Hasta 8 Mbps - DS Hasta 1 Mbps - US HDSL: Hasta 2 Mbps - Sim VDSL: Hasta 51 Mbps - DS Hasta 20 Mbps - US SHDSL: Hasta 5.7 Mbps - Sim G.Fast: Hasta 1 Gbps - US	DOCSIS 3.0: Hasta 320 Mbps - DS Hasta 120 Mbps - US DOCSIS 3.1: Hasta 10 Gbps - DS Hasta 1.5 Gbps - US DOCSIS 4.0: Hasta 10 Gbps - DS Hasta 6 Gbps - US	BPON: Hasta 622 Mbps - DS Hasta 155 Mbps - US EPON: Hasta 1.25 Gbps - DS Hasta 1.25 Gbps - US GPON: Hasta 2.48 Gbps - DS Hasta 1.24 Gbps - US XG-PON: Hasta 10 Gbps - DS NG-PON2 Hasta 10 Gbps - DS	En bandas HF/VHF: cientos de Mbps
14. Capacidad de transferencia de datos suficiente para atender los P.O.	Si	Si	Si	Si
15. Distancia de Cobertura	ADSL: Hasta 6 Km HDSL: Hasta 3 Km VDSL: Hasta 1.5 Km SHDSL: Hasta 6.5 Km	Hasta 160 Km Promedio: 24 Km	EPON: 10 Km BPON: 20 Km GPON: 20 Km	Sobre red de baja tensión: Cientos de metros
16. Nivel de Estandarización	Alto	Alto	Alto	Medio

Nota: P.O.: Proyectos Objetivo, DS: Downstream; US: Upstream; Sim: Simétrica.

Una vez revisadas las diferentes tecnologías de acceso y efectuada la comparación correspondiente, es necesario conocer las generalidades de los proyectos de vivienda 100% subsidiada del gobierno nacional, y determinar cuáles de ellos se ubican en zonas apartadas de baja densidad demográfica, de tal forma que se establezca de manera específica los proyectos y las zonas objeto de estudio. A continuación, se desarrolla el análisis correspondiente.

3 GENERALIDADES DE LOS PROYECTOS DE VIVIENDAS 100% SUBSIDIADAS EN COLOMBIA.

De acuerdo con lo manifestado por Brahima Sanou, director de la Oficina de Desarrollo de Telecomunicaciones, de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU), el índice de desarrollo de las tecnologías de la información y las comunicaciones (IDI, por sus siglas en inglés), refleja que existe un reto grande para reducir la brecha digital, no solo entre los países más y menos conectados, sino también, al interior de los países, entre las zonas urbanas y las zonas rurales, de tal forma que se contribuya al logro de los objetivos de desarrollo sostenible [2].

Teniendo en cuenta lo anterior, Colombia requiere avanzar de manera simultánea en la reducción de la brecha digital frente a los países desarrollados, que finalmente son los más conectados, y entre las zonas rurales, apartadas y de baja densidad demográfica, y los grandes centros urbanos del país. En el presente caso, las zonas “rurales y apartadas” se enmarcan dentro de la definición dada por la UIT-D [64], en la medida que son zonas alejadas de los grandes centros urbanos, con una baja cantidad de habitantes (menor a 2.500), donde se percibe una pobreza resultante de los bajos ingresos y poca posibilidad de obtenerlos por la falta de inversión pública y privada, siendo zonas que cuentan con una baja calidad de vías de acceso y/o medios transporte que genera un alto costo de acceso físico y de equipos de instalación, generando la falta o inadecuada disponibilidad de infraestructura básica, incluida infraestructura de telecomunicaciones, alto grado de analfabetismo y una alta inconciencia de las ventajas de las telecomunicaciones modernas.

En términos de disminución de brecha digital, es particularmente más complicada la situación colombiana, cuando se enfrenta una situación de pobreza del 26.9% de la población (12,9 millones de personas), a diciembre de 2017, de la cual, alrededor de 7.5% (3.6 Millones de personas) se encuentra en pobreza monetaria extrema, y de estas, 3.5% (1.7 Millones de personas) se encuentran dispersas en áreas rurales [65].

Aunque, a noviembre de 2018, el país contaba con 1.106 municipios, del total de 1.122 existentes, conectados con redes de transporte de telecomunicaciones (servicio portador) a través de redes de alta velocidad (1.073 con Fibra Óptica [66] y 33 con Microondas [67]),

los planes de infraestructura de redes de última milla en cabeceras municipales pequeñas o zonas rurales son apenas incipientes y las penetraciones de internet fijo son muy bajas, lo cual ocurre de manera similar en las redes móviles, en las que el sistema 4G alcanza únicamente zonas urbanas restringidas [68].

Con relación a los nuevos proyectos de vivienda 100% subsidiadas (también conocidas como viviendas gratuitas o viviendas de interés prioritario) adelantados por el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio (MVCT), que son aquellos proyectos de vivienda a través de los cuales el gobierno nacional busca atender el déficit habitacional del sector de la población que, por su condición de extrema pobreza, no tiene posibilidad de acceder a una vivienda digna [69], estos no cuentan con una garantía de acceso asequible a internet, lo cual es mucho más complicado para aquellos proyectos ubicados en zonas apartadas y de baja densidad demográfica, en la medida que es difícil para los operadores TELCO encontrar un modelo sostenible para la prestación del servicio, por lo cual se requeriría (tal como se hizo con los proyectos de Conexiones Digitales ejecutados por FonTIC entre 2013 y 2019) desarrollar nuevos programas de incentivos tanto a la oferta como a la demanda, que mejoren el acceso y servicio universal y en consecuencia el cierre de las brechas digitales [68].

Según Presidencia de la República, al 26 de noviembre de 2015 se habían construido 100.000 viviendas gratuitas en un total de 283 proyectos, ubicados en 205 municipios de 29 departamentos [69].

El Programa de Viviendas 100% subsidiadas de la Presidencia de la República, adelantados por el MVCT, consta de dos fases, la primera con 103.809 viviendas ya construidas y la segunda con 30 mil soluciones habitacionales, de las cuales, al 23 de septiembre de 2018, aún faltaban por construir 22 mil. El Gobierno Nacional comunicó que el proceso de construcción y entrega del total de las viviendas termina en 2020 [70].

El MVCT, en su página web publica la relación de los proyectos de vivienda 100% subsidiados, junto con la cantidad de viviendas construidas y su ubicación por municipio y departamento [71].

Para el objeto del presente trabajo, es necesario asegurar que los proyectos de vivienda 100% subsidiada cuenten con el servicio de energía a cada hogar, razón por la cual, es de

resaltar que, en los documentos de convocatoria que el MVCT publica para la revisión de la viabilidad de los proyectos, se exige a los constructores interesados “Certificaciones de disponibilidad total, inmediata y continua de servicios públicos domiciliarios del(los) predio(s) en el(los) cual(es) se pretende ejecutar el proyecto postulado, expedidas por las empresas de servicios públicos domiciliarios o la autoridad o autoridades municipales o distritales competentes” [72].

De la misma manera, tal como lo exigen los términos de convocatoria, para la construcción de los diferentes proyectos de vivienda 100% subsidiada, los constructores deben tramitar las licencias o documentos correspondientes exigidos por la ley, es decir se debe dar cumplimiento a lo reglado, bien sea en el Plan de Ordenamiento Territorial (POT), para municipios mayores a 100.000 habitantes, en el Plan Básico de Ordenamiento Territorial (PBOT), para municipios entre 30.000 y 100.000 habitantes o en el Esquema Básico de Ordenamiento Territorial (EOT), para municipios con menos de 30.000 habitantes [73].

Lo señalado en los dos párrafos anteriores, implica que los proyectos y cada una de las viviendas contarán con servicios domiciliarios suministrados a través de redes de distribución nuevas, que cumplen con las condiciones técnicas exigidas por la normatividad existente, lo cual, adicionalmente, es certificado por las interventorías contratadas para el recibo de los proyectos. La contratación de las interventorías hace parte del proyecto de vivienda gratuita; de acuerdo con lo manifestado por MVCT “el Gobierno Nacional promueve un trabajo conjunto entre el sector público y el sector privado, para definir un método de selección objetivo, ágil y transparente de los diseñadores, constructores e interventores de las obras” [69].

Finalmente, cabe mencionar que, para tener información más detallada de las condiciones generales, legales y técnicas de los proyectos de vivienda 100% subsidiada, se puede consultar, entre muchos otros, los documentos de convocatoria para la revisión de la viabilidad de los proyectos [72], y los términos de referencia de 109 convocatorias para el proceso de selección de proyectos de la segunda fase, publicados en [74] por el Consorcio Alianza Colpatría, en calidad de vocero y administrador del FIDEICOMISO – PVG II.

3.1 PROYECTOS DE VIVIENDAS 100% SUBSIDIADAS OBJETO DEL ESTUDIO

Partiendo de la definición de zonas rurales y apartadas anteriormente citada, se encuentra que, en Colombia, según las proyecciones publicadas por el Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas (DANE) para 2020, existen 43 municipios y 15 áreas no municipalizadas, con una población menor a 2.500 habitantes [75], los cuales a su vez son clasificados como categoría seis (6) por la Contaduría General de la Nación, según la resolución 400 del 29 de noviembre de 2019 [76], y se distribuyen como se muestra en las *Tabla 7* y *Tabla 8*.

Tabla 7. Cantidad de municipios con menos de 2.500 habitantes y su categoría - por departamento

Departamento	Cantidad Municipios	Categoría (CGN)
Boyacá	19	6
Cundinamarca	4	6
Meta	2	6
Santander	14	6
Casanare	3	6
Amazonas	6*	N/A
Guainía	7*	N/A
Vaupés	1 + 2*	6
Total	43 + 15*	

* Áreas No Municipalizadas (ANM)

Elaboración propia, Fuente:[75], [76]

Tabla 8. Municipios con menos de 2.500 habitantes

Departamento	Código	Municipio	Población	Departamento	Código	Municipio	Población
Boyacá	15022	Almeida	1.807	Santander	68245	El Guacamayo	2.085
Boyacá	15090	Berbeo	1.582	Santander	68322	Guapotá	2.413
Boyacá	15092	Betétiva	1.935	Santander	68344	Hato	2.370
Boyacá	15106	Briceño	2.163	Santander	68370	Jordán	1.336
Boyacá	15114	Busbanzá	1.153	Santander	68425	Macaravita	2.104
Boyacá	15226	Cúitva	1.810	Santander	68522	Palmar	1.407
Boyacá	15317	Guacamayas	1.834	Santander	68682	San Joaquín	2.208
Boyacá	15362	Iza	1.995	Santander	68686	San Miguel	2.478
Boyacá	15401	La Victoria	1.117	Santander	68705	Santa Bárbara	2.448
Boyacá	15511	Pachavita	2.441	Santander	68867	Vetas	2.168

Departamento	Código	Municipio	Población	Departamento	Código	Municipio	Población
Boyacá	15518	Pajarito	2.414	Casanare	85136	La Salina	1.369
Boyacá	15522	Panqueba	1.697	Casanare	85279	Recetor	1.796
Boyacá	15550	Pisba	1.793	Casanare	85315	Sácama	2.059
Boyacá	15621	Rondón	2.373	Amazonas	91263	El Encanto*	2.077
Boyacá	15660	San Eduardo	1.660	Amazonas	91430	La Victoria*	662
Boyacá	15720	Sativanorte	2.153	Amazonas	91460	Mirití - Paraná*	1.879
Boyacá	15723	Sativasur	1.105	Amazonas	91530	Puerto Alegría*	771
Boyacá	15832	Tununguá	1.576	Amazonas	91536	Puerto Arica*	1.042
Boyacá	15839	Tutazá	2.039	Amazonas	91669	Puerto Santander*	1.772
Cundinamarca	25086	Beltrán	1.885	Guainía	94663	Mapiripana*	1.071
Cundinamarca	25368	Jerusalén	2.315	Guainía	94883	San Felipe*	1.743
Cundinamarca	25483	Nariño	2.464	Guainía	94884	Puerto Colombia*	1.984
Cundinamarca	25871	Villagómez	1.826	Guainía	94885	La Guadalupe*	296
Meta	50245	El Calvario	1.652	Guainía	94886	Cacahual*	903
Meta	50686	San Juanito	1.243	Guainía	94887	Pana Pana*	2.011
Santander	68013	Aguada	1.867	Guainía	94888	Morichal*	962
Santander	68121	Cabrera	2.021	Vaupés	97666	Taraira	2.423
Santander	68132	California	2.232	Vaupés	97777	Papunahua*	776
Santander	68160	Cepitá	2.025	Vaupés	97889	Yavaraté*	1.097

* Áreas No Municipalizadas (ANM)

Elaboración propia Fuente:[75], [76]

En Colombia, los municipios son clasificados en categorías del 1 al 6 más una categoría especial, lo cual se establece con base a los Ingresos Corrientes de Libre Destinación (ICLD) y los Gastos de Funcionamiento del año inmediatamente anterior, certificados por la Contraloría General de la República (CGR), y a su vez se tiene en cuenta la información sobre población para el año anterior, certificada por el DANE [76].

Para el caso de los municipios de categoría seis (6), son aquellos con población igual o inferior a diez mil (10.000) habitantes y con ICLD anuales no superiores a quince mil (15.000) SMLV - salarios mínimos legales mensuales vigentes [77].

Cruzando los proyectos de viviendas 100% subsidiadas del MVCT [71] con los municipios menores a 2.500 habitantes [75], se encuentra que solo existen 6 proyectos, ubicados en 4 municipios de los departamentos de Boyacá y Santander, con un total de 300 viviendas, como se muestra en la *Tabla 9*.

Tabla 9. Viviendas 100% subsidiadas ubicadas en municipios con menos de 2.500 habitantes

	Departamento	Municipio	Proyecto	Cantidad de Viviendas
1	Boyacá	Pisba	No reporta nombre	50
2	Boyacá	Pisba	Urb San Miguel I	38
3	Boyacá	Pisba	Urb San Miguel II	12
4	Boyacá	Rondón	Betania	80
5	Boyacá	Sativanorte	La Meseta	50
6	Santander	El Guacamayo	Urb El Porvenir	70
Total de Viviendas				300

Elaboración propia, Fuente:[71], [75]

Ahora bien, teniendo en cuenta la definición de zonas rurales y apartadas, pero haciendo el filtro no para municipios si no para las cabeceras municipales, ya que el MVCT en los documentos de convocatoria para la revisión de la viabilidad de los proyectos de vivienda gratuita señala que estos se deben construir en suelo urbano [72], se encuentra que, según las proyecciones publicadas por el DANE para 2020 [75], en Colombia existen 341 municipios cuyas cabeceras municipales tienen una población menor a 2.500 habitantes, los cuales a su vez son clasificados como categoría seis (6) por la Contaduría General de la Nación [76], y se distribuyen como se muestra en las *Tabla 10*.

Tabla 10. Cantidad de municipios con cabecera municipal menor a 2.500 habitantes y su categoría
- por departamento

Departamento	Cantidad Municipios	Categoría (CGN)
Antioquia	21	6
Bolívar	3	6
Boyacá	95	6
Caldas	4	6
Caquetá	4	6
Cauca	20	6
Cesar	1	6
Cundinamarca	47	6
Chocó	12	6
Huila	7	6
Magdalena	1	6

Departamento	Cantidad Municipios	Categoría (CGN)
Meta	5	6
Nariño	23	6
Norte de Santander	19	6
Quindío	1	6
Risaralda	1	6
Santander	51	6
Tolima	14	6
Valle del Cauca	2	6
Casanare	7	6
Amazonas	9*	N/A
Guainía	8*	N/A
Guaviare	1	6
Vaupés	2 + 3*	6 + N/A
Total	341 + 20*	

* Áreas No Municipalizadas (ANM)

Elaboración propia, Fuente:[75], [76]

Cruzando los proyectos de viviendas 100% subsidiadas del MVCT [71] con las cabeceras municipales menores a 2.500 hab [75], se tiene que existen 31 proyectos (en 27 municipios de 8 departamentos) con un total de 2.188 viviendas, como se muestra en la *Tabla 11*.

Tabla 11. Viviendas 100% subsidiadas ubicadas en cabeceras municipales menores a 2.500 hab.

	Departamento	Municipio	Proyecto	Cantidad de Viviendas
1	Antioquia	Caramanta	Urb Mirador de San José	30
2	Antioquia	Girardo	Urbanización Los Naranjos	64
3	Antioquia	Guadalupe	Urbanización Villa Linda	106
4	Antioquia	Liborina	Urbanización Viento Verde	80
5	Antioquia	Peque	Los Mangos	42
6	Antioquia	Uramita	La Copa	36
7	Boyacá	Arcabuco	Proyecto Vivienda Urbana	50
8	Boyacá	Coper	Marquetalia	50
9	Boyacá	Pisba	No reporta nombre	50
10	Boyacá	Pisba	Urb San Miguel I	38
11	Boyacá	Pisba	Urb San Miguel II	12
12	Boyacá	Rondón	Betania	80
13	Boyacá	Sativanorte	La Meseta	50

	Departamento	Municipio	Proyecto	Cantidad de Viviendas
14	Boyacá	Tota	Proyecto VIP Tota	50
15	Boyacá	Ventaquemada	Urb Las Manitas	100
16	Boyacá	Ventaquemada	Las Manitas	17
17	Caldas	Marulanda	Santa Clara	30
18	Cauca	Morales	Huellas	300
19	Cauca	Rosas	Urb Quintas de San Francisco	60
20	Cauca	Totoró	Urb San Martín	56
21	Nariño	El Peñol	Urb Don Juan Boquerón	100
22	Nariño	El Rosario	Los Muros	50
23	Nariño	Imués	Terruel	130
24	Nariño	Ospina	Urbanización San Juan	200
25	Nariño	San Lorenzo	Urbanización Juan Pablo II	24
26	Norte de Santander	Labateca	San Rafael	22
27	Norte de Santander	Labateca	San Rafael	45
28	Norte de Santander	Santiago	Brisas de Santiago	62
29	Santander	El Guacamayo	Urb El Porvenir	70
30	Santander	Gambita	Urb Villa Duba	80
31	Tolima	Piedras	Valle de las Ostras	104
Total de Viviendas				2188

Nota: Aunque las cabeceras municipales de Arcabuco y Ventaquemada quedan sobre vías principales nacionales (Bogotá-Tunja-Bucaramanga), siendo de relativamente fácil acceso desde la capital del país, se han dejado los tres proyectos allí construidos para efectos de revisar su situación.

Elaboración propia, Fuente: [71], [75]

3.2 SERVICIOS DE ACCESO FIJO A INTERNET EN LOS MUNICIPIOS OBJETIVO

Después de establecida la cantidad de municipios y proyectos de vivienda 100% subsidiadas, ubicados en la zona objetivo, es importante hacer la revisión de la penetración del servicio de acceso fijo a internet en los 27 municipios identificados, con el fin de conocer la situación de conectividad e inclusión social digital de estas comunidades.

De acuerdo con la información reportada por los PRST, en la *Tabla 12* se puede ver claramente la deficiencia, en cuanto a cantidad de accesos fijos a internet, que tiene todos los municipios objeto del presente estudio. En el 2019 los accesos disminuyeron de 3.199 en el primer trimestre, a 2.590 en el último trimestre, mostrando que se tiene una penetración, respecto a la población total, de tan solo 1.5% al primer trimestre de 2019 y

1.21% al cierre de 2019. Solo en 7 de los 27 municipios, la cantidad de servicios tuvieron incremento en 2019. Por otro lado, también se evidencia que la tendencia del servicio de acceso fijo a internet en los últimos 9 trimestres, tal como se muestra en la última columna de la *Tabla 12*, es a la baja en la mayoría de municipios, lo cual agrava la situación de conectividad, incrementa la brecha digital y hace más lejana la expectativa de inclusión social digital para los habitantes de esos municipios.

Tabla 12. Cantidad de accesos fijos del servicio de Internet en los municipios objetivo

Departamento	Municipio	Población Total Municipio (Dic 2019)	Cantidad Accesos Fijos a Internet		Tendencia Accesos Fijos a Internet últimos 9 trimestres (4Trim 2017 - 4Trim 2019)	
			1T/ 2019	4T / 2019		
1	Antioquia	Caramanta	5.276	267	305	
2	Antioquia	Giraldo	3.953	203	214	
3	Antioquia	Guadalupe	6.324	418	418	
4	Antioquia	Liborina	9.586	416	380	
5	Antioquia	Peque	11.462	236	263	
6	Antioquia	Uramita	8.203	259	277	
7	Boyacá	Arcabuco	5.249	122	133	
8	Boyacá	Coper	3.455	79	18	
9	Boyacá	Pisba	1.262	39	10	
10	Boyacá	Rondón	2.751	47	23	
11	Boyacá	Sativanorte	2.177	56	25	
12	Boyacá	Tota	5.242	63	22	
13	Boyacá	Ventaquemada	15.827	212	100	
14	Caldas	Marulanda	3.379	101	33	
15	Cauca	Morales	26.707	26	48	
16	Cauca	Rosas	13.614	24	16	
17	Cauca	Totoró	21.298	28	16	
18	Nariño	El Peñol	6.355	59	15	
19	Nariño	El Rosario	9.670	7	13	
20	Nariño	Imués	5.776	144	18	
21	Nariño	Ospina	8.861	148	13	
22	Nariño	San Lorenzo	20.403	81	29	
23	Nte Santander	Labateca	5.911	60	63	
24	Nte Santander	Santiago	2.887	24	35	
25	Santander	El Guacamayo	1.883	70	21	
26	Santander	Gambita	5.043	50	27	
27	Tolima	Piedras	5.705	227	55	
Total			212.983	3.199	2.590	

Elaboración propia Fuente: [78]

Para continuar con el análisis del segmento objetivo, en la *Tabla 13* se presentan los datos de la cantidad de accesos fijos a internet, existentes en el estrato 1 residencial de los 27 municipios a los cuales pertenecen los 31 proyectos de viviendas 100% subsidiadas relacionados en el numeral anterior. No se debe perder de vista que los habitantes de las viviendas 100% subsidiadas hacen parte del estrato socioeconómico más bajo del país.

Tabla 13. Cantidad de accesos fijos a internet en estrato 1 residencial

Cantidad Accesos Fijos a Internet Residencial - Estrato 1											
	Dpto	Municipio	Todas las Tecnologías Existentes		xDSL		HFC		FTTx		Operador
			1T/ 2019	4T / 2019	1T/2019	4T / 2019	1T/ 2019	4T / 2019	1T/ 2019	4T / 2019	
1	Antioquia	Caramanta	33	32	33	32					Edate
2	Antioquia	Giraldo	46	42	45	41					Edate
3	Antioquia	Guadalupe	50	52	49	50					Edate
4	Antioquia	Liborina	104	91	104	90					Edate
5	Antioquia	Peque	29	39	28	36					Edate
6	Antioquia	Uramita	54	60	54	58					Edate
7	Boyacá	Arcabuco	3	24					0	20	Superfibras
8	Boyacá	Coper	22	2					22	1	Azteca
9	Boyacá	Pisba	21	2					2	0	Azteca
10	Boyacá	Rondón	4	2					4	2	Azteca
11	Boyacá	Sativanorte	2	4					1	3	Azteca
12	Boyacá	Tota	23	7					21	3	Azteca
13	Boyacá	Ventaquemada	23	7					23	1	Azteca
14	Caldas	Marulanda	22	0					22	0	Azteca
15	Cauca	Morales	2	28					0	1	Azteca
16	Cauca	Rosas	1	2					0	0	
17	Cauca	Totoró	1	3					0	1	Azteca
18	Nariño	El Peñol	29	1					29	0	Azteca
19	Nariño	El Rosario	1	2					0	1	Azteca
20	Nariño	Imués	108	4					108	4	Azteca
21	Nariño	Ospina	115	2					115	2	Azteca
22	Nariño	San Lorenzo	17	6					14	0	Azteca
23	N. Santander	Labateca	4	5					0	1	Azteca
24	N. Santander	Santiago	0	3					0	1	Azteca
25	Santander	El Guacamayo	32	3					32	2	Azteca
26	Santander	Gambita	9	3					8	1	Azteca
27	Tolima	Piedras	84	12					83	5	Azteca
Total			839	438	313	307			484	49	

Nota 1: El operador que se registra en la tabla, corresponde al operador que brinda los servicios en las tecnologías xDSL, HFC o FTTx para el estrato 1 residencial.

Elaboración propia Fuente: [78]

De la información reportada por los PRST, se puede concluir que el estrato 1, de los 27 municipios, tiene una cantidad de servicios de acceso a Internet fijo bastante baja, y que, entre el primer y cuarto trimestre de 2019, disminuyeron considerablemente al pasar de 839 accesos a 438, motivado especialmente por la gran disminución de accesos suministrados por el operador Azteca, quien proveía la mayor parte de estos servicios, con tecnología FTTC, en el marco del contrato de aporte 876 de 2013, firmado con el Fondo de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (hoy Fondo Único de TIC), denominado Conexiones Digitales Fase 1 [79], en el cual muchos de sus usuarios terminaron el periodo de operación en el año 2019, y los restantes terminan en 2020.

Lo sucedido con el operador Azteca, muestra que desafortunadamente el proyecto de conexiones digitales no fue un proyecto sostenible en el tiempo, y una vez terminó el apoyo estatal los servicios fueron desconectados, agravando la situación de los estratos más vulnerables de la sociedad. Este proyecto, después de una serie de otrosíes, contó con aproximadamente 75.000 millones de pesos de aporte del estado, y tuvo como finalidad prestar servicio de acceso a Internet, con tarifas sociales por un periodo de 24 meses, a 894 instituciones públicas, a más de 146.000 familias de estratos 1 y 2, incluidas Viviendas de Interés Prioritario (viviendas 100% subsidiadas) en las cuales se entregarían cerca de 24.000 computadores, e instalar 763 zonas WiFi, en un total de 19 departamentos del país (617 municipios) [79].

Es importante mencionar, para que sea evaluado por el estado, que en la licitación pública LP-012 de 2013 efectuada por MinTIC, que generó la suscripción del contrato de aporte 876 de 2013 con Azteca, se preveía la instalación obligatoria de aproximadamente 79.000 accesos de banda ancha en estratos 1,2 y viviendas VIP, para ser ejecutadas con un presupuesto cercano a los 60.000 millones de pesos, sin embargo, el operador, con el fin de asegurarse la adjudicación, ofreció instalar un poco más de 65.000 accesos adicionales, lo cual podría haber sido parte de la causa que ocasionó la no sostenibilidad del proyecto. También es importante decir que Azteca fue el único oferente en la licitación antes mencionada.

Se puede apreciar que, aunque en los 27 municipios objeto del presente estudio, tal como se muestra en la *Tabla 11*, se han construido 2.188 viviendas 100% subsidiadas, solo se cuenta, a final de 2019, con 307 servicios xDSL y 49 servicios FTTx en el estrato 1

residencial, mostrando una gran necesidad de servicios de acceso a Internet y reflejando la baja inclusión social digital que se tiene.

Se aclara que el estrato 1 de los 27 municipios no solo está compuesto por los residentes de las viviendas 100% subsidiadas, ni que los servicios reportados por los operadores sean necesariamente instalados en dichas viviendas, lo cual muestra que la problemática es mucho más grande de lo que se percibe en el presente documento.

Se puede ver en la *Tabla 13* que, para los municipios de Ventaquemada y Arcabuno, cuyos cascos urbanos están ubicados sobre vías nacionales y con un relativo fácil acceso desde la capital del país, la situación del servicio de acceso a internet en el estrato 1 residencial no es diferente respecto a los demás municipios de análisis, contando con 1 y 20 accesos respectivamente y con una cantidad de viviendas 100% subsidiadas de 117 en Ventaquemada y 50 en Arcabuco (recordando la aclaración que se efectuó en el párrafo anterior).

Con relación a la tecnología de última milla utilizada para prestar el servicio de acceso fijo a Internet en el estrato 1 residencial, se puede apreciar en la *Tabla 13* que, casi la totalidad de las conexiones (que se reportan en la columna 3 y 4, para el primer y cuarto trimestre de 2019 respectivamente) son realizadas con tecnologías ADSL, para el caso del departamento de Antioquia, y con tecnología FTTx en los demás departamentos. Se evidencia, de la misma manera, que la tecnología HFC no es utilizada en ninguno de los municipios del análisis para brindar conectividad al estrato 1.

Como resultado de los datos anteriormente presentados, se ratifica la gran necesidad del servicio de acceso fijo a Internet en el estrato 1 de los municipios de baja densidad demográfica de zonas apartadas, aunque, con la información presentada, se puede concluir que la necesidad es general, es decir, en todos los estratos de dichos municipios existe deficiencia de conectividad.

Después de revisar los aspectos más relevantes de las tecnologías de acceso fijo a internet, más utilizadas en Colombia, de conocer la generalidad de las viviendas 100% subsidiadas y de evidenciar la necesidad que en materia de acceso a internet se tiene en todas las poblaciones donde se ubican los proyectos de interés del presente trabajo, en el numeral 4 se abordan los criterios que se deben tener en cuenta para la evaluación de la implementación de la tecnología BPL en el segmento objetivo.

4 CRITERIOS PARA LA EVALUACIÓN DE LA IMPLEMENTACIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS DE ÚLTIMA MILLA

Con el fin reducir la brecha digital e incrementar la inclusión social digital de los residentes en los proyectos 100% subsidiados ubicados en zonas apartadas y de baja densidad poblacional, es importante contar con una infraestructura de telecomunicaciones adecuada, que permita suministrar un servicio de acceso a internet de buena calidad, que apalanque el desarrollo económico y social. Sin embargo, este desafío implica inversiones importantes, que sumado a las múltiples tecnologías existentes y emergentes, hacen que la decisión sea una tarea crítica [80], y mucho más cuando se trata de zonas apartadas y rurales de países en desarrollo, donde la consecución de recursos y la ejecución de proyectos de infraestructura no son precisamente parte del diario vivir.

Por lo anterior, y teniendo en cuenta que ya se tienen determinadas las alternativas tecnológicas a considerar (xDSL, HFC, FTTX y BPL) para establecer la viabilidad planteada objeto del trabajo, en el presente capítulo se busca definir la lista de criterios que sirvan como elemento esencial para el análisis y toma de decisiones.

4.1 IDENTIFICACIÓN DE CRITERIOS GENERALES MEDIANTE REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Como punto de partida para definir los criterios relevantes para el análisis, se efectuó una revisión bibliográfica, identificando cinco documentos, [80] [81] [41] [82] [83], cuyo objetivo está relacionado con la escogencia de tecnologías de última milla para atender usuarios que requieren del servicio de acceso a Internet, resaltando que cuatro de los cinco documentos están orientados específicamente a infraestructura de última milla en zonas rurales o apartadas. En la *Tabla 14* se presentan los principales criterios de cada una de las fuentes consultadas.

Con base en los criterios identificados en cada una de las referencias bibliográficas revisadas, se efectúa una lista unificada de 61 criterios generales, *Tabla 15*, que se consideran importantes para evaluar la viabilidad de la implementación de tecnologías de última milla en zonas rurales o apartadas.

Tabla 14. Relación de criterios por fuente bibliográfica,

Criterios [80] [81]	Criterios [41]	Criterios [82]	Criterios [83]
Fiabilidad	Interoperabilidad	Fiabilidad (robustez)	Energía (acceso a energía)
Facilidad de mantenimiento	Escalabilidad	Escalabilidad	Seguridad de la infraestructura
Gestión remota de red	Ancho de banda	Ancho de banda (Velocidad Tx)	Costo de operación
Compatibilidad	Interferencia	Flexibilidad	Costo de despliegue (Capex)
Fácil instalación	Caracterización de red	Energía	Retorno de la inversión (sostenibilidad)
Escalabilidad	Potencial futuro	Interferencia	Desarrollo económico del área
Ancho de banda	Madurez tecnológica	Facilidad de uso	Costo de suscripción mensual (tarifas)
Flexibilidad	Vida útil de los equipos utilizados	Rango de cobertura	Demanda
Latencia	Cobertura	Aprovechamiento de infraestructura existente	Asequibilidad
Rango de cobertura	Seguridad física	Costo de operación (Opex)	Densidad poblacional
Seguridad de infraestructura física	Tiempo de instalación / Activación	Costo de capital (Capex) bajo	Conocimiento de la tecnología (conciencia de la tecnología)
Uso propuesto	Mantenimiento	Retorno de la inversión (sostenibilidad)	Alfabetismo
Disponibilidad de habilidades técnicas	Vida útil de la red	Desarrollo económico del área	Vandalismo
Acceso a infraestructura de telco existente	Costo instalación / suscripción (usuario)	Asequibilidad	Desplazamiento poblacional
Lejanía del área	Costo adicionales (usuario)	Densidad poblacional (dispersión)	Dificultad de regular (alta fragmentación del mercado / desregulación)
Tiempo de despliegue	Costos de suscripción mensual	Conocimiento de la tecnología (resistencia al cambio)	Compartición de infraestructura
Infraestructura paralela	Obsolescencia Tecnológica	Licenciamiento	Localización geográfica
Costo de operación (Opex)	Posibilidad de masificación a mediano plazo	Compartición de infraestructura	Políticas gubernamentales
Fuente de financiamiento	Vida útil de la red	Localización geográfica	Fuentes de recursos
Costo de capital (Capex)	Conocimiento de la tecnología		
Retorno de la inversión (ROI)	Disponibilidad por Estrato		
Desarrollo económico del área	Impacto		
Demanda	Aspectos Limitantes (problemas regulatorios)		
Asequibilidad	No duplicidad de instalaciones		
Densidad poblacional	Uso de la red		
Intereses comunes	Longevidad de la red		
Disponibilidad de espectro	Impacto Social de Sectores		
Restricciones de licenciamiento	Autonomía Nacional		
Derechos de paso			

Criterios [80] [81]	Criterios [41]	Criterios [82]	Criterios [83]
Topografía del terreno			
Condiciones climáticas			

Elaboración propia, Fuente: [80] [81] [41] [82] [83]

Tabla 15. Lista unificada de criterios generales (según fuentes bibliográficas)

Lista de Criterios	
Fiabilidad	Costo instalación / suscripción (usuario)
Facilidad de mantenimiento	Costos adicionales (usuario)
Gestión remota de red	Costos de suscripción mensual
Compatibilidad	Obsolescencia tecnológica
Fácil instalación	Posibilidad de masificación a mediano plazo
Escalabilidad	Demanda
Ancho de banda	Asequibilidad
Flexibilidad	Densidad poblacional
Latencia	Intereses comunes
Energía	Conocimiento de la tecnología
Interferencia	Disponibilidad por estrato
Caracterización de red	Impacto
Potencial futuro	Alfabetismo
Madurez tecnológica	Vandalismo
Vida útil de los equipos utilizados	Desplazamiento poblacional
Facilidad de uso	Disponibilidad de espectro
Rango de cobertura	Derechos de paso
Seguridad de infraestructura física	Aspectos Limitantes (problemas regulatorios)
Uso propuesto	Licenciamiento
Disponibilidad de habilidades técnicas	Compartición de infraestructura
Acceso a infraestructura de telco existente	Topografía del terreno
Lejanía del área	Condiciones climáticas
Tiempo de despliegue	No duplicidad de instalaciones
Infraestructura paralela	Uso de la red
Mantenimiento	Longevidad de la red
Vida útil de la red	Localización geográfica
Costo de operación (Opex)	Impacto social de sectores
Fuente de financiamiento	Autonomía Nacional
Costo de capital (Capex)	Políticas gubernamentales
Retorno de la inversión (ROI)	Fuentes de recursos
Desarrollo económico del área	

Elaboración propia, Fuente: [80] [81] [41] [82] [83]

Teniendo en cuenta la extensa lista de criterios obtenida en la revisión bibliográfica, se hace importante recurrir a una herramienta de prospectiva estratégica, en este caso un método de expertos, denominado método Delphi, con el fin de explorar subjetivamente las posibilidades, reducir la incertidumbre y definir así las variables claves [84], es decir, identificar los criterios más importantes o relevantes, que reduzcan la incertidumbre y aporten el mayor valor al análisis objeto del presente trabajo, conservando el alcance fijado en el mismo. Adicionalmente, reducir el número de criterios permite que sea más manejable la aplicación del proceso analítico jerárquico (AHP – por sus siglas en inglés) que se explica en el capítulo siguiente.

4.2 IDENTIFICACIÓN DE CRITERIOS CLAVES MEDIANTE METODO DELPHI

El método Delphi, es una técnica diseñada por Olaf Helmer y Norman Dalkey, utilizada desde inicios de los años 50's en proyectos de defensa militar en los Estados Unidos, que fue publicada en 1963 para su uso abierto, y desde entonces ha tenido un gran impacto ya que ha sido utilizada en miles de estudios en múltiples campos de la investigación. De manera general, el método Delphi se podría definir como un proceso estructurado, organizado e iterativo que busca obtener y correlacionar opiniones de un grupo de personas (generalmente expertas) en torno a temas precisos [85], en otras palabras, el objetivo del método Delphi es identificar convergencias de opinión y consensos respecto a temas específicos, a través de preguntas a expertos por medio de cuestionarios sucesivos [84].

En [86] se define el método Delphi como un proceso, en el cual existe una comunicación grupal para tratar un determinado problema.

Ya que una de las ventajas del método Delphi es recurrir a la experiencia e intuición de los expertos, estos se deben someter a una serie de cuestionarios intensivos, los cuales se intercalan con una retroalimentación controlada, hasta llegar a un consenso confiable [85].

Teniendo en cuenta que el término “experto” no es preciso, es importante que el grupo de expertos seleccionado sea escogido más por su visión y forma de encarar el futuro, relacionado con el tema en cuestión, que por sus títulos o nivel jerárquico. Adicionalmente, con el fin de mantener la independencia en el criterio de cada uno de estos expertos, es

decir, que no se tengan sesgos por procesos de grupo, es conveniente que los cuestionarios se les practique de manera aislada y anónima [84].

Al ser un método para efectuar pronósticos, Delphi se considerada una técnica cualitativa, la cual se puede dividir en cuatro fases, que se muestran en la *Figura 29*.

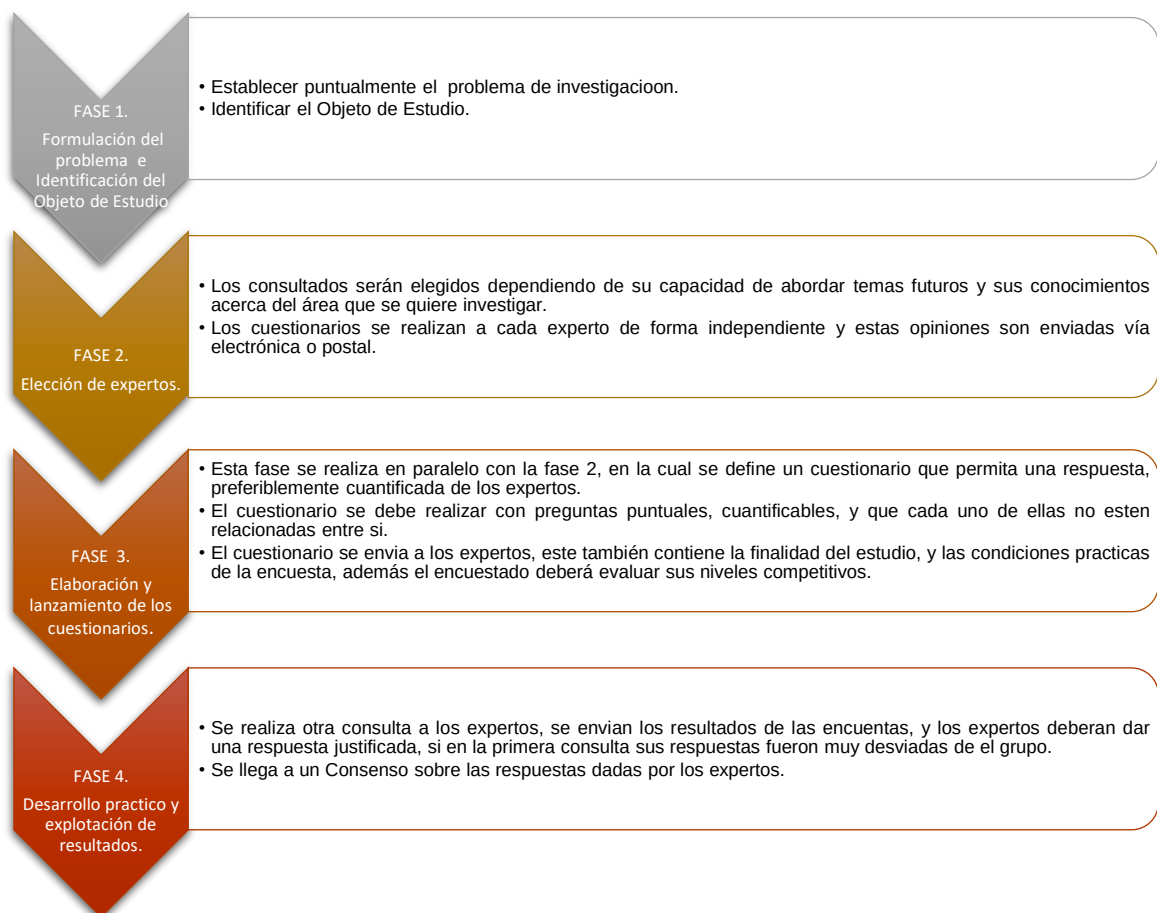


Figura 29. Fases del Método Delphi

Fuente: [87]

En los siguientes sub-numerales se expone el desarrollo de cada una de las fases del método Delphi descritas en la *Figura 29*.

4.2.1 Método Delphi – Fase 1

Teniendo en cuenta que es fundamental la claridad con que se haga la formulación del problema e identificación del objetivo del estudio, se plantea lo siguiente:

- a) El “problema” es que se cuenta con una lista bastante extensa de criterios, 61 criterios generales, obtenidos de fuentes bibliográficas, que podrían ser tenidos en cuenta para definir el tipo de tecnología de última milla a implementar en zonas rurales. Sin embargo, no todos los criterios listados podrían considerarse claves para establecer la viabilidad objeto del presente documento. Adicionalmente, podrían existir otros criterios claves, que solo con el conocimiento del entorno nacional, el conocimiento y experiencia específica en la materia y la visión a futuro de los expertos, podrían ser identificados.
- b) El objetivo del estudio es identificar los criterios claves para ser utilizados en la aplicación del AHP, y lograr establecer la viabilidad de la implementación de la tecnología de red de acceso BPL para masificar el servicio de acceso a internet en los proyectos de viviendas 100% subsidiadas ubicadas en zonas apartadas y de baja densidad demográfica en Colombia. Para identificar los criterios claves, es indispensable poner en conocimiento de los expertos que, para establecer la viabilidad mencionada, mediante AHP, se tendrán en consideración 4 alternativas tecnológicas, así: BPL y las tres tecnologías de última milla fija más usadas actualmente en Colombia, que son, xDSL, HFC y FTTx.

Un aspecto importante para lograr la identificación de los criterios claves es la experiencia, visión a futuro y conocimiento del contexto nacional por parte de los expertos.

4.2.2 *Método Delphi – Fase 2*

Para la selección de los expertos, se partió de una lista de cerca de 20 profesionales vinculados al sector TIC, con gran visión a futuro y amplia experiencia en diferentes aspectos como gerencia, estructuración, despliegue, operación y mantenimiento, tecnologías de transporte de datos, regulación, entre otros, de proyectos de redes de infraestructura de última milla, con especial conocimiento en infraestructura para zonas rurales.

Una vez revisados los perfiles, se escogió un grupo de 5 expertos (1 ingeniero de telecomunicaciones, 2 ingenieros electrónicos, 2 ingenieros eléctricos) con quienes, dada

su idoneidad, se puede garantizar la existencia de fundamentos sólidos para sus juicios,, y con quienes se puede abarcar diferentes visiones importantes para el ejercicio, ya que han hecho parte del grupo directivos de grandes operadores (PRST e ISP), empresas privadas reconocidas en la construcción, operación y mantenimiento de redes de última milla, entidades estatales del sector TIC en Colombia, han participado en la academia y grupos de investigación de TIC, regulación, planes y despliegues de infraestructura de telecomunicaciones urbanas y rurales, entre otras.

Los perfiles con los aspectos más relevantes, de los 5 expertos seleccionados, son los que se presentan a continuación:

- Ingeniero de telecomunicaciones de universidad extranjera, especialista en sistemas ópticos, con estudios en dirección de empresas y alta dirección empresarial, con más de 35 años de experiencia internacional en diversas áreas de las TIC, experiencia profesional que incluye múltiples cargos de nivel C en operadores de servicios móviles y fijos, conocedor de la evolución del mercado colombiano de las telecomunicaciones, incluyendo proyectos piloto de BPL.
- Ingeniero electrónico de la Universidad Nacional de Colombia, especialización en redes de datos, maestría en telecomunicaciones y estudios de doctorado en ingeniería eléctrica, con amplia experiencia en la academia, investigación TIC y manejo de la tecnología BPL durante más de 10 años.
- Ingeniero eléctrico de la Universidad de los Andes, especialista en gerencia de proyectos de ingeniería, especialista en administración y gerencia de sistemas de la calidad. Experiencia de 19 años en el sector eléctrico, consultoría e ingeniería en proyectos de redes eléctricas y medición de energía. Experiencia de 17 años en el Sector TIC, supervisor de múltiples proyectos de telecomunicaciones sociales a través de los cuales se han implementado estrategias en cumplimiento de la política pública del sector TIC.
- Ingeniero Electrónico de la Universidad Pontificia Bolivariana, especialista en gerencia de proyectos en ingeniería de telecomunicaciones y maestría en

administración de empresas. Más de 10 años de experiencia en proyectos de infraestructura que incluyen redes de transporte, redes de última milla tanto en el área urbana como el área rural, conocimiento de política pública e iniciativas estatales en el sector de telecomunicaciones.

- Ingeniero electricista de la Universidad Industrial de Santander, con 28 años de experiencia en infraestructura de telecomunicaciones. Ha participado en la estructuración, diseño, implementación y operación y mantenimiento de grandes proyectos de redes de transporte de fibra óptica y redes de última milla alrededor de todo el país, especialmente con tecnologías xDSL, HFC y FTTH.

4.2.3 *Método Delphi – Fase 3*

Para el desarrollo de esta fase, y como punto de partida de la encuesta, se envió a los expertos la lista de 61 criterios generales incluidos en la *Tabla 15*, solicitando que, basados en su conocimiento y experiencia, conceptuaran sobre la pertinencia de cada uno de los criterios para la realización del estudio. Para esto, simplemente debían marcar la casilla Pertinente o No Pertinente, frente a cada uno de los criterios. Adicionalmente, se les solicitó escribir cualquier criterio adicional que consideraran importante para establecer la viabilidad objeto del estudio.

En una segunda ronda, se compartió a los expertos el resultado general de todas las encuestas iniciales, indicando cuantos de los 5 expertos consideraban pertinente o no cada criterio, e incluyendo los pocos criterios adicionales que surgieron, y se solicitó de nuevo conceptuar sobre la pertinencia de cada criterio, incluyendo las observaciones que consideraran. En esta segunda ronda se llegó a un consenso casi total, haciendo que la tercera ronda se realizara solo sobre un par de criterios.

4.2.4 *Método Delphi – Fase 4*

Con el fin de realizar la selección final de los criterios claves, requeridos para realizar el análisis de la viabilidad objeto del presente documento, se realizó una revisión a partir de los diferentes aspectos presentados en los capítulos anteriores (numerales 2 y 3), pero especialmente a partir de la comparación de las tecnologías de acceso más utilizadas en

Colombia, presentada en la *Tabla 6*, y de las respuestas dadas por los expertos a la pertinencia de los criterios generales presentados en la *Tabla 15*.

Con el fin de agrupar los criterios en clústeres llamados “Condicionantes”, con el apoyo de los expertos, se utilizó la metodología BOCR (Benefit, Opportunity, Cost and Risk), por medio de la cual se hace la agrupación teniendo en cuenta los beneficios, las oportunidades, los costos y los riesgos asociados en la toma de decisión objeto de estudio.

El método BOCR permite brindar una mejor estructuración al proceso de obtención de los criterios para el cumplimiento de un determinado objetivo y para una alternativa considerada. Este método inicia observando cuales son los objetivos que debe cumplir esa decisión y teniendo en cuenta esas metas se identifican los atributos para las alternativas tecnológicas que se tienen [87], tal y como se observa en *Figura 30*.

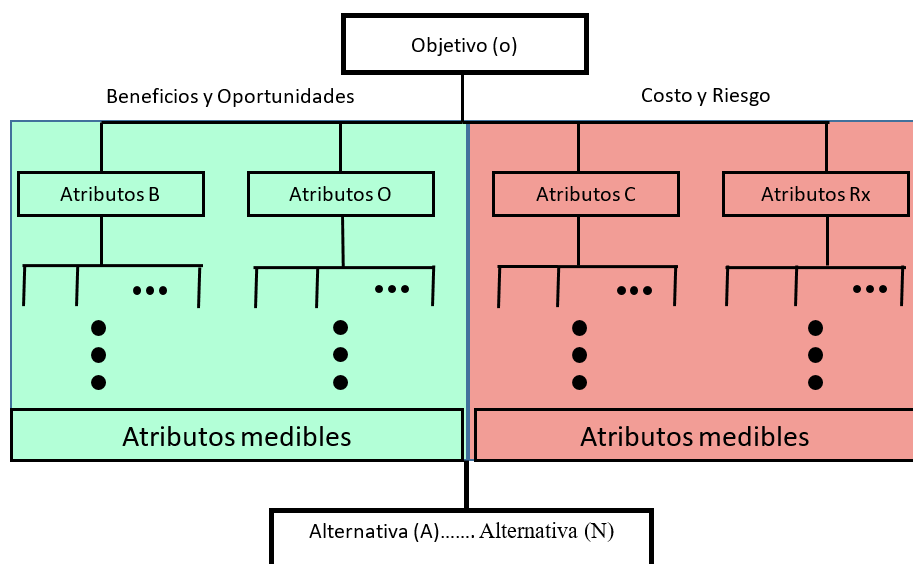


Figura 30. Descomposición de atributos (diferenciando niveles - condicionantes)

Fuente: [87]

4.3 CRITERIOS CLAVES PARA LA EVALUACIÓN

Finalmente, después de ejecutar las 4 fases del método Delphi, expuestas anteriormente, se identificaron 30 criterios claves, que corresponden a los más relevantes y pertinentes, y teniendo en cuenta el panorama que brinda el método BOCR, se agruparon en

condicionantes (clústeres), *Tabla 16*, lo cual permite enfocar y adelantar el estudio de una forma más adecuada, manteniendo la cantidad de criterios claves en un nivel manejable y dentro del alcance establecido.

Tabla 16. Lista de criterios claves por condicionante

Condicionante	Criterio
Técnico	Fiabilidad
	Facilidad de mantenimiento
	Interoperabilidad
	Fácil instalación
	Escalabilidad
	Ancho de banda
	Uso de energía
	Interferencia
	Caracterización de red
	Potencial futuro
	Madurez tecnológica
Infraestructura	Seguridad de infraestructura física
	Uso propuesto
	Acceso a infraestructura telco existente
	Tiempo de despliegue
	Mantenimiento
	Vida útil de la red
Económico	Costo de operación (Opex)
	Costo de capital (Capex)
	Costo de instalación (para el usuario)
	Costos adicionales (para el usuario)
	Costos de suscripción mensual
Socio / Cultural	Asequibilidad
	Conocimiento de la tecnología
Regulatorio / Político	Derechos de paso
	Compartición de infraestructura
Ambiental	Impacto ambiental
	Condiciones climáticas
	Uso de la red
	Vida útil de la red

Ya identificados los criterios claves, agrupados por condicionantes, se procede a explicar cada uno de ellos en los siguientes numerales.

4.3.1 *Condicionante técnico*

Este condicionante incluye los criterios o variables técnicas más relevantes y que tendrían un mayor impacto para establecer la viabilidad de la implementación de la tecnología BPL de acuerdo con el objetivo del trabajo. Los siguientes son los criterios incluidos en este condicionante:

- **Fiabilidad:** Este criterio considera y evalúa el suministro permanente del servicio, incluyendo una velocidad constante (downstream / upstream), es decir, considera el tiempo medio entre fallas, lo cual para una red ubicada en una zona apartada es fundamental.
- **Facilidad de mantenimiento:** Este criterio evalúa la facilidad del manejo y adaptabilidad de la tecnología al cambio. Las dificultades para un mantenimiento eficiente implican una mala calidad servicio, por tal razón es importante que de manera remota se logren identificar fallas y reconfigurar circuitos para garantizar los servicios.
- **Interoperabilidad:** Es una variable con la cual se busca evaluar la capacidad de una tecnología para coexistir u operar con otras tecnologías existentes, inclusive al momento en que se haga uso de la escalabilidad para adaptarse a nuevos requerimientos o necesidades futuras.
- **Fácil instalación:** Es un criterio con el cual se pretende evaluar la facilidad para instalar una tecnología en zonas apartadas o rurales, incluyendo que la instalación en campo no requiera de especificaciones técnicas complejas. De la misma manera, el criterio considera el grado de facilidad para transportar los elementos propios de la tecnología hacia el lugar de instalación.
- **Escalabilidad:** Este criterio evalúa la proyección que brinda la tecnología a través de la capacidad de adaptarse a nuevos requerimientos o necesidades, brindando la oportunidad de ampliarse de forma incremental y garantizando la calidad del servicio. Esta variable evalúa que la solución no esté limitada a solo cumplir con una necesidad local actual.

- Ancho de banda: Es un criterio relacionado con la cantidad de bits que se logra transmitir en la unidad de tiempo (bps), en otras palabras, evalúa la capacidad de transferencia de datos de la infraestructura tecnológica.
- Uso de Energía: Esta variable evalúa el requerimiento o consumo de energía de la tecnología de última milla, dependiendo de la cantidad de equipos utilizados para la implementación de la solución.
- Interferencia: Es un criterio que evalúa los posibles problemas generados por el uso de las frecuencias utilizadas para la transmisión de las señales en una infraestructura tecnológica. Los problemas pueden ser el resultado de una interferencia generada o recibida.
- Caracterización de red: Esta variable considera el grado o proporción en que se debe realizar la caracterización de la red sobre la cual se desplegará la solución tecnológica de última milla. Esto en la medida de la dependencia de infraestructura de terceros.
- Potencial futuro: Es un criterio que evalúa el grado de proyección o potencial de una tecnología a tener desarrollos importantes a futuro. Es decir, que no se prevea una obsolescencia tecnológica y por el contrario se tengan expectativas de desarrollos futuros.
- Madurez tecnológica: Es un criterio que intenta medir el grado actual de desarrollo de una tecnología, lo cual da luces para estimar el potencial futuro de la misma.

4.3.2 *Condicionante de infraestructura*

Este condicionante considera aspectos relacionados con la infraestructura y el conjunto de elementos que la componen, al igual que factores que inciden en el funcionamiento del servicio de telecomunicaciones.

- Seguridad de infraestructura física: Este criterio evalúa el grado de vulnerabilidad de la red, en el sentido de la posibilidad de acceso por parte de extraños que ocasionen robo de elementos o cortes mal intencionados.
- Uso propuesto: Esta variable evalúa los posibles problemas que se puedan presentar con otros servicios que operen por la misma infraestructura sobre la cual se instalará la solución tecnológica de última milla.
- Acceso a infraestructura de telecomunicaciones existente: Este criterio evalúa el grado de aprovechamiento que se puede dar a la infraestructura existente, bien sea de telecomunicaciones o de otro tipo, en el sitio donde se instalará la solución tecnológica de última milla.
- Tiempo de despliegue: Esta variable evalúa el tiempo que se requiere para la construcción o implementación de la solución tecnológica de última milla en el sitio objeto de estudio.
- Mantenimiento: Este criterio considera la cantidad y complejidad de las rutinas de mantenimiento que se requerirían hacer a la infraestructura para garantizar una calidad de servicio adecuada para los usuarios atendidos por la tecnología de última milla desplegada.
- Vida útil de la red: Este criterio busca evaluar el tiempo de vida que tiene la red, sobre la cual se despliega la tecnología de última milla, y durante el cual dicha red es apta para la prestación del servicio en cumplimiento de los niveles de calidad ofrecidos a los usuarios.

4.3.3 *Condicionante económico*

Este condicionante está relacionado con aquellos factores que afectan las inversiones y gastos que deben realizar los operadores cuando despliegan la infraestructura tecnológica de última milla, y a su vez, con las variables que afectan el precio del servicio al usuario final.

- Costo de operación (Opex): Este criterio considera todos aquellos gastos, diferentes a inversión, que el operador asume durante la vida útil de la infraestructura tecnológica de última milla, a través de la cual se presta el servicio al usuario final, en cumplimiento de los niveles de calidad ofrecidos. Entre otros, se incluye administración, mantenimiento, repuestos, actualizaciones, depreciación, vandalismo, robos, capacitación.
- Costo de capital (Capex): Esta variable evalúa el monto de la inversión que el operador debe realizar para efectuar el despliegue de la infraestructura tecnológica de última milla.
- Costo instalación / suscripción (usuario): Este aspecto está relacionado con el valor que se debe pagar por primera y única vez para convertirse en un usuario del servicio que el operador ofrece a través de la infraestructura de última milla instalada.
- Costos adicionales (usuario): Este criterio considera el valor que un usuario debe pagar por aquellos servicios o elementos no incluidos en el plan de internet ofrecido a través de la infraestructura tecnológica desplegada por el operador. Un ejemplo sería el valor adicional para contar con servicio banda ancha, servicio de televisión, o un equipo repetidor en el hogar.
- Costos de suscripción mensual: Esta variable evalúa el valor mensual que debe ser asumido por el usuario con el fin de contar con el servicio de internet ofrecido por el operador a través de la tecnología de última milla desplegada.

4.3.4 *Condicionante social / cultural*

Este condicionante agrupa los criterios que desde el punto de vista social y cultural pueden intervenir en la implementación de una determinada tecnología de última milla en las zonas de estudio.

- Asequibilidad: Esta variable evalúa el valor de instalación y el valor mensual del servicio que prestaría el operador, a través de una tecnología de última milla

específica, contra la capacidad de pago de los habitantes, posibles usuarios, de las zonas consideradas en el estudio.

- Conocimiento de la tecnología: Este criterio considera el conocimiento que se tenga sobre la tecnología y su influencia en el uso de la misma.

4.3.5 *Condicionante regulatorio*

En este condicionante se agrupan los aspectos que a nivel regulatorio influyen cuando se evalúa la posibilidad de implementación de las tecnologías de última milla consideradas en el presente estudio.

- Derechos de paso: Es una variable que considera la cantidad y dificultad de los derechos que se deben adquirir para la instalación o despliegue, en un predio determinado, de la infraestructura externa de una tecnología de última milla.
- Compartición de infraestructura: Este criterio evalúa la necesidad, que tiene una tecnología de última milla, de hacer uso de infraestructura existente para lograr su despliegue.

4.3.6 *Condicionante ambiental*

Este condicionante evalúa tanto el beneficio o perjuicio que una tecnología de última milla tiene sobre el medio ambiente, como la afectación que el medio ambiente puede ejercer en la calidad del servicio prestado a través de una tecnología de última milla implementada.

- Impacto ambiental: Esta variable considera el nivel de afectación ambiental ocasionado, durante las diferentes etapas del ciclo de vida (adquisición de materia prima, producción, uso y finalización de la vida útil), por los bienes y redes de la tecnología de última milla a desplegar.
- Condiciones climáticas: Este criterio considera el nivel de afectación que las condiciones climáticas pueden ocasionar en la calidad del servicio a suministrar a través de la tecnología de última milla a desplegar.

- Uso de la red: Este criterio evalúa en qué grado el uso una tecnología de última milla específica reduce los daños ambientales.
- Vida útil de la red: Esta variable considera el tiempo de vida útil de la red de última milla como una forma de identificar el mayor o menor grado de impacto que se puede llegar a ocasionar al medio ambiente.

Después de identificados y definidos cada uno de los criterios claves, agrupados por condicionantes, se da paso al análisis de la viabilidad de la implementación de la tecnología BPL en proyectos de viviendas 100% subsidiadas ubicadas en zonas apartadas y de baja densidad demográfica de Colombia, mediante la aplicación del método AHP.

5 ANÁLISIS DE VIABILIDAD DE LA IMPLEMENTACIÓN DE LA TECNOLOGÍA BPL EN PROYECTOS DE VIVIENDAS 100% SUBSIDIADAS UBICADOS EN ZONAS APARTADAS Y DE BAJA DENSIDAD DEMOGRÁFICA EN COLOMBIA

Para entrar al análisis de la viabilidad objeto del trabajo, ha sido necesario abordar aspectos esenciales como son: i) en numeral 2, panorama mundial y nacional de las tecnologías de última milla para acceso fijo a Internet, incluyendo las generalidades de las diferentes tecnologías, consideraciones ambientales y la comparación de algunos de los aspectos más relevantes de dichas tecnologías para el caso de estudio (*Tabla 6*), ii) en numeral 3, las generalidades de los proyectos de vivienda 100% subsidiadas del gobierno nacional, la cantidad que se encuentran ubicados en zonas apartadas y de baja densidad poblacional, y una breve radiografía del servicio de acceso a internet en los municipios, y iii) en numeral 4, los criterios, agrupados por condicionantes, que se consideran claves para establecer la viabilidad de la implementación de la tecnología BPL en los proyectos de viviendas 100% subsidiadas, ubicados en zonas apartadas y de baja densidad demográfica en Colombia.

Ahora, debido a que la selección de una tecnología a ser implementada en una zona específica no solo depende de factores económicos, se requiere obtener la visión de expertos conocedores en implementación de tecnologías de redes de última milla para el servicio de acceso Internet, de tal forma que se pueda establecer, apoyados en un proceso de toma de decisiones multicriterio, en este caso AHP, la viabilidad de la implementación de la tecnología BPL en los proyectos de vivienda mencionados.

5.1 LA TOMA DE DECISIONES

Lo primero que se debe hacer para hablar de toma de decisiones, tanto en el ser humano como en las organizaciones, es definir el concepto *decisión*, y para esto es necesario conocer que “la palabra *decisión* proviene de la raíz latina *decido* que significa cortar, es decir; corte entre el pasado y el futuro”. Por lo tanto, “*decisión*, es la respuesta adecuada de un ser inteligente ante una situación que requiere acción. Cada decisión es el resultado de un proceso dinámico que recibe influencia de muchas fuerzas por lo que la toma de decisiones es el proceso de pensamiento y deliberación” [88].

De acuerdo con [80], para tomar una buena decisión se debe tener la capacidad de mirar al futuro, hacer predicciones y apoyarse en información del pasado y del presente.

Todos los seres humanos, de manera inherente, poseen diferentes capacidades y habilidades para la toma de decisiones, lo cual refleja su grado de evolución, conocimiento y libertad [89]. Dichas habilidades y capacidades de decisión son usadas permanentemente, en la vida cotidiana, para enfrentar situaciones a corto, mediano y largo plazo, y requieren de un proceso racional que depende de la cantidad y calidad de la información que se posee, de la capacidad para procesarla y de la racionalidad de cada persona, cuyas consecuencias, generalmente, son inciertas y en muchos casos desembocan en escenarios caóticos, dado los altos volúmenes de información, las altas tasas de intercambio y la dudosa procedencia de la misma, que generan procesos de decisión más complejos [90].

Tal como se expone en [41], se debe tener en cuenta que cuando se realiza un buen proceso para la toma de una decisión, se puede decir que esta es buena, por el contrario, no se puede decir lo mismo de una decisión que, aunque tenga buenos resultados, se desconoce el proceso previo a ser acogida. Esto muestra que es muy importante efectuar un proceso adecuado para poder sustentar que la decisión tomada fue la mejor posible dentro de las opciones y los recursos disponibles en ese momento. Por lo anterior, es fundamental para la obtención de una buena decisión, que esta tenga en cuenta:

- El objetivo que se persigue.
- Toda la información relevante.
- Las preferencias del decisor.

De la misma manera, de acuerdo con [41], las siguientes son las principales razones por las cuales es importante implementar procesos de toma de decisiones en los proyectos de ingeniería:

- El tamaño y complejidad de los proyectos actuales es proporcional a la magnitud de los problemas de decisión.
- El ambiente competitivo de los negocios exige tomar las mejores decisiones posibles.

- Las limitadas capacidades de memoria y atención en los seres humanos, sumados a la tendencia de cambiar las metas, los valores y a ser selectivos en la adquisición y procesamiento de información.
- Las grandes exigencias en los procesos y la dirección de los proyectos, como resultado de estrictas legislaciones que obligan altos estándares en calidad y seguridad de bienes y servicios.

Según [88], teniendo en cuenta que el proceso de toma de decisiones en las organizaciones no es fácil, se debe recurrir a la solución creativa de los problemas, lo cual se puede alcanzar cuando la decisión se toma de manera grupal y se recurre a personas de alto grado de experiencia y dominio de la actividad (expertos), quienes tienen la capacidad de liberar su potencial creativo y combinar los procesos subjetivos y objetivos.

5.2 LA TOMA DE DECISIONES MULTICRITERIO

Hasta entrados los años 70's, el proceso de toma de decisiones científicas solo consideraba los aspectos objetivos de la realidad, dejando fuera la parte subjetiva, intangible y los factores emocionales, lo cual con el paso de los años se empezó a ajustar, contemplando el comportamiento de los individuos y el entorno en el cual se desenvuelven. El principal desafío que enfrenta la ciencia de la decisión, es el de considerar en la metodología científica dos características fundamentales del factor humano y de la sociedad del conocimiento: la razón y la emoción. Sin embargo, el conocimiento técnico para incluir múltiples criterios y aspectos subjetivos, sumado a la disponibilidad de herramientas y tecnología, hacen que en la actualidad el error de no considerar tales factores no pueda ser cometido [89] .

La comunidad científica ha realizado importantes esfuerzos en el desarrollo de métodos y técnicas que permiten considerar mayor cantidad de información y criterios, mejorando así el proceso de toma de decisiones. Vale la pena mencionar que, tal como se muestra en la *Figura 31*, las investigaciones indexadas en la WoS (Web of Science¹⁰) relacionadas con la

¹⁰Web of Science, es una plataforma de la empresa Clarivate Analytics, formada por una amplia colección de bases de datos bibliográficas, citas y referencias de publicaciones científicas de cualquier disciplina del conocimiento, en ciencia, tecnología,

ciencia de la decisión, fueron bastante significativas entre 1975 y 2019, con un total de 13.101 publicaciones, con un pico importante entre 1996 y 2004, de las cuales 401 corresponden a Latinoamérica, donde la investigación inició en 1994, y 43 a Colombia, que inició la investigación en 2009. Se resalta que, las tres áreas en las cuales se produce mayor cantidad de investigación en ciencias de decisión, a nivel mundial, son economía empresarial (30,4%), ciencias de la computación (26,2%) e ingeniería (22%), respectivamente. Sin embargo, en Colombia, el área más productiva en la materia es ingeniería con 48,2% de las investigaciones [90].

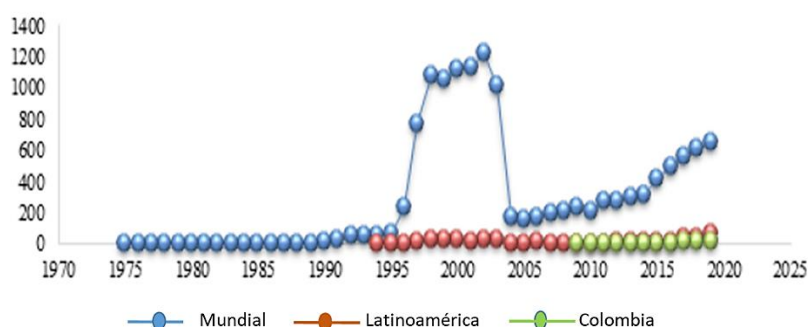


Figura 31. Evolución de la ciencia de la decisión

Fuente: [90]

Lo anterior muestra la gran importancia que ha tomado, en el método científico, los procesos de toma de decisiones que incluyen múltiples criterios objetivos y subjetivos, es decir, la importancia de considerar la razón y la emoción al momento de tomar decisiones.

El proceso de toma de decisiones, en su concepto básico puede considerarse como la elección por parte del decisor de lo mejor entre lo posible, donde lo mejor y lo posible depende del contexto decisional y requiere de un proceso de análisis. Todo problema tiene restricciones, ocasionadas por la falta de disponibilidad de recursos, que pueden ser satisfechas por un conjunto factible o alcanzable de variables de decisión (“lo posible”), cada una de las cuales tiene su propio valor y surgen de información técnica no preferencial; una vez determinado lo posible, teniendo claro que el conjunto factible de soluciones puede ser continuo (infinito) o discreto (finito), se entra en la determinación de “lo mejor”, lo cual

ciencias sociales, artes y humanidades. WoS, además de proporcionar información bibliográfica, permite evaluar, analizar el rendimiento y la calidad científica de la investigación [102].

es definido por los juicios preferenciales del centro decisor. Finalmente, se puede decir que, la mejor entre las alternativas posibles, de acuerdo con los criterios de elección de quien toma la decisión, se considera la solución óptima [91].

El análisis de decisiones multicriterio (MCDA – por sus siglas en inglés), que hace parte del área de toma de decisiones multicriterio (MCDM – por sus siglas en inglés), es una metodología que incluye una variedad de conceptos, métodos y técnicas que permite tomar decisiones en escenarios con múltiples puntos de vista e interesados. Esta metodología, a través de la utilización de la matemática aplicada, la investigación operativa y las ciencias de la administración, sirve de apoyo para determinar la mejor solución entre un grupo diverso de alternativas [41].

El objetivo de las metodologías MCDM, es guiar a los encargados de tomar las decisiones para determinar la alternativa que mejor logre los objetivos establecidos, dándoles a su vez una medida de consistencia [80], es decir, tener un soporte adecuado para una decisión compleja que surge del análisis de una gran cantidad de información [41].

En [80] se expone que no hay una clasificación uniforme de los métodos MCDM, por ejemplo podrían clasificarse por la forma del modelo (lineal, no lineal, estocástico), características del espacio de decisión (finito o infinito), o proceso de solución (especificación previa de preferencias).

La clasificación de los métodos también varía dependiendo de los autores, por ejemplo, Lai and Hwang (1994), Henig y Buchanan (1996) y Zimmermann (1996), los clasifican en 2 categorías [80]:

- Toma de decisiones multi-objetivo (MODM - por sus siglas en inglés), donde el espacio de decisión es continuo.
- Toma de decisión multi-atributo, (MADM - por sus siglas en inglés), donde el espacio de decisión es discreto.

Por su parte, Saaty (1990) y Lootsma (1996), clasifican los métodos en tres grupos [80]:

- Teoría de utilidad multi-atributo (MAUT - por sus siglas en inglés), también conocida como teoría del valor multi-atributo (MAVT - por sus siglas en inglés).

- Proceso analítico jerárquico (AHP - por sus siglas en inglés), que descompone el problema en un sistema de jerarquías.
- Outranking, que constituye una clase de algoritmos de clasificación ordinal para la toma de decisiones multicriterio.

De los métodos señalados anteriormente, según [80], después de diferentes revisiones, varios autores señalan a AHP como el de mayor aceptación, por ser más fácil de usar, entender y generar mayor confiabilidad; de la misma forma, en lo relacionado con la escogencia de tecnologías de telecomunicaciones para zonas rurales, también se presenta un análisis que muestra la conveniencia del uso de AHP.

Lo anterior coincide con lo expuesto en [41], donde se señala a AHP como el método más usado para la escogencia de tecnologías, referenciando diferentes estudios que lo utilizaron para seleccionar la mejor tecnología para zonas particulares, y donde adicionalmente es usado para identificar la mejor tecnología de conectividad de última milla en Colombia, gracias a su solidez al momento de ponderar criterios subjetivos y poder trasladar la realidad percibida por un individuo a la escala de la razón.

5.3 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO ANALÍTICO JERÁRQUICO - AHP

El proceso analítico jerárquico (PAJ o AHP por sus siglas en inglés), introducido a finales de los años 70's, es un método discreto estructurado por Thomas Saaty para la toma de decisiones multicriterio [91], que puede manejar atributos tangibles e intangibles, a través de la descomposición de un problema complejo en una jerarquía que consta de elementos específicos, descomposición que a su vez facilita el entendimiento y la discusión de los problemas. El fácil uso e implementación del método, ha hecho que sea utilizado en múltiples áreas donde se presentan problemas complejos de decisión [80].

Adicionalmente, en [89] se expone que, el método AHP tiene un carácter intuitivo y realista para la toma de decisiones científicas y puede combinar atributos tangibles e intangibles de problemas por medio de comparaciones absolutas por pares que producen escalas de medida relativa de prioridades; igualmente, se presenta un análisis de los tres problemas fundamentales que, al momento de concebir AHP, Saaty consideró que debían ser tratados:

i) la toma de decisiones en grupo, ii) resolución de conflictos y iii) comparaciones por pares y actividad neuronal.

De acuerdo con [92], el método AHP ha sido evaluado e implementado en prácticamente todas las áreas relacionadas con MCDM (ingeniería, educación, industria, gobierno, política, logística, medioambiente, medicina, social, etc) ya que es de gran aplicabilidad por su simplicidad, facilidad de uso, flexibilidad para combinarlo con otras técnicas MCDM, adaptabilidad a diferentes escenarios reales para selección multicriterio entre alternativas, posibilidad de ejecutar valoraciones individuales o grupales y la oportunidad de aplicarlo mediante software intuitivo, como Expert Choice.

Las principales características de AHP son las siguientes [92]:

- El problema de decisión se descompone en una jerarquía compuesta de varios niveles, donde el nivel superior corresponde al principal objetivo del problema y en el nivel inferior se encuentran las posibles alternativas a evaluar. En los niveles intermedios se ubican los criterios considerados para la toma de la decisión (que también pueden descomponerse en jerarquías). Para lograr lo anterior, es fundamental contar con experiencia y conocimiento específico del problema y se hace indispensable contar con la mayor cantidad de información relevante [92].
- En cada nivel de la jerarquía, se realizan comparaciones entre pares de elementos de ese nivel, en base a la importancia o contribución de cada uno de ellos al elemento de nivel superior al que están ligados. Aquí se logran incorporar las preferencias, gustos y deseos de los expertos, mediante los juicios plasmados en las matrices correspondientes, mostrando la dominancia relativa de un elemento frente a otro. Este proceso de comparación permite generar una escala de medida relativa de prioridades o pesos de dichos elementos. Las comparaciones por pares se realizan por medio de ratios de preferencia (si se comparan alternativas) o ratios de importancia (si se comparan criterios), que se evalúan según una escala numérica propuesta, teniendo presente que los pesos o prioridades relativas deben sumar la unidad [92].

- La información obtenida es generalmente redundante y más o menos inconsistente, esto debido a que las matrices de comparaciones por pares contienen juicios redundantes en el sentido de que en una matriz de tamaño $n \times n$ se suelen emitir $n * (n - 1)/2$ juicios (por la propiedad de reciprocidad). Sin embargo, esta redundancia resulta útil para mejorar la exactitud de los juicios y se aprovecha para, mediante la técnica matemática, reducir los errores y mejorar la consistencia de la matriz [92].
- Una vez evaluada la contribución de cada elemento a los elementos del nivel inmediatamente superior, se calcula la contribución global de cada alternativa al objetivo principal mediante una agregación de tipo aditivo [92].

El método AHP representa ventajas para la toma de decisiones cuando los elementos fundamentales, que inciden en esta, son de difícil comparación o cuantificación, o cuando se trabaja en equipos multidisciplinarios en los cuales la terminología o perspectivas particulares dificulta la comunicación [41].

En conclusión, según [92], Saaty considera que “el método AHP es un modelo de toma de decisiones que interpreta los datos y la información directamente mediante la realización de juicios y medidas en una escala de razón dentro de una estructura jerárquica establecida. Es un método de selección de alternativas (estrategias, inversiones, etc.) en función de una serie de criterios o variables, las cuales suelen estar en conflicto”.

A continuación, de acuerdo con la teoría de toma de decisiones de Saaty, se describen los pasos a seguir para desarrollar el método AHP.

5.3.1 PASO 1: Descomposición del problema en una jerarquía.

El modelamiento del problema como una jerarquía es una de las principales características del método, de ahí el nombre. En el vértice superior se sitúa el objetivo que se busca, pues precisamente el problema de decisión consiste en elegir la alternativa con la cual se logre atender de mejor manera dicho objetivo. En el siguiente nivel, en orden descendente, se ubican los criterios, que son aspectos fundamentales en los cuales se basa el decisor para justificar, transformar y argumentar sus preferencias; estos criterios pueden a su vez

descomponerse en otros subcriterios generando otra jerarquía descendente. Por último, en el nivel más bajo de la jerarquía se ubican las alternativas, que son las posibles opciones que tiene el decisor [92].

De lo anterior se puede obtener una imagen de la jerarquía general del problema, similar a lo mostrado en la *Figura 32*.

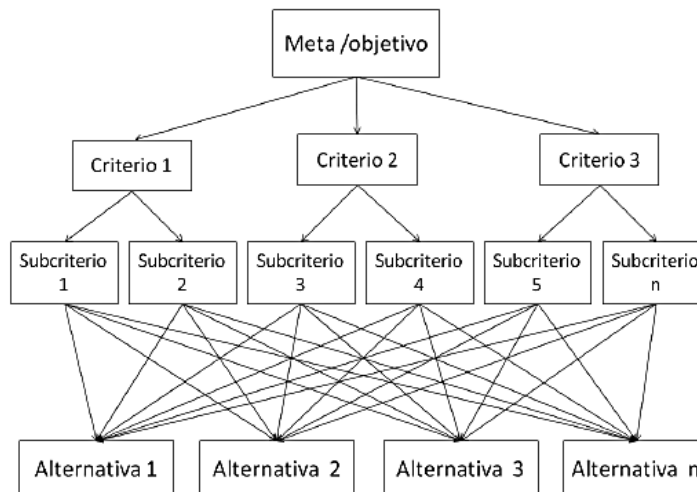


Figura 32. Jerarquía en AHP

Fuente: Adaptado de [41] [92]

5.3.2 PASO 2: Establecer las prioridades de los criterios.

Ya con un modelo jerárquico estructurado, se procede a establecer las prioridades de todos los niveles. En este paso se construye un vector de prioridades o pesos que evalúa la importancia relativa que la unidad decidora otorga a cada criterio. Se debe tener en cuenta que la suma de las ponderaciones (vector prioridad) finales por cada nivel deben dar 1 (la unidad) [92].

Para asignar un valor numérico a cada criterio, de tal forma que represente la preferencia del decisor de un criterio frente a otro, se puede hacer mediante [92]:

- Asignación directa, utilizando una escala definida previamente que correlaciona valores cualitativos con valores numéricos. Esta asignación es sencilla ya que el decisor solo tiene que realizar una valoración sobre la importancia del criterio

verbalizada en términos cualitativos y después acudir a la escala. En la *Tabla 17* se presentan las escalas más utilizadas para la asignación directa [92].

Tabla 17. Propuesta de escalas de asignación directa

Valoración cualitativa	Valoración cuantitativa	
	Escala simple	Escala de Saaty
Muy débil	1	1
Débil	2	3
Moderada	3	5
Fuerte	4	7
Muy Fuerte	5	9

Fuente: Adaptado de [87]

- Asignación indirecta, que utiliza técnicas de comparación entre criterios. Cuando el decisor establece las prioridades mediante comparación entre pares para determinar los pesos relativos de los criterios, se recurre a escalas previamente establecidas para determinar la importancia o prioridad relativa entre dos criterios respecto al elemento del nivel inmediatamente superior en la jerarquía del problema. En la *Tabla 18* se presenta la “escala fundamental de comparación pareada” propuesta por Saaty, la cual es una de las escalas más utilizadas [92].

Tabla 18. Escala fundamental de comparación pareada de Saaty

Escala fundamental de comparación pareada		
Escala numérica	Escala verbal	Explicación
1	Igual importancia	Dos actividades contribuyen por igual al objeto
3	Importancia moderada de un elemento sobre otro	La experiencia y el juicio están a favor de un elemento sobre el otro
5	Importancia fuerte de un elemento sobre otro	Un elemento es fuertemente favorecido
7	Importancia muy fuerte de un elemento sobre otro	Un elemento es muy dominante
9	Extrema importancia de un elemento sobre otro	Un elemento es favorecido por al menos un orden de magnitud de diferencia

Nota: 2,4,6,8 Valores intermedios entre dos juicios adyacentes (se usan como compromiso entre dos juicios).
0,1 Las décimas pueden ser usadas para graduación más fina de los juicios

Fuente: Adaptado de [87]

5.3.3 PASO 3: Revisar la consistencia de los juicios.

En el proceso de comparación por pares es muy importante que el decisor haya sido cuidadoso con las valoraciones, pues una incoherencia generaría una matriz de la que se obtendría un autovalor poco representativo [92]. Por ejemplo, si se han hecho unas valoraciones en las que $C1 > C2$ y $C2 > C3$, es obvio entonces que $C1 > C3$, y si se observa que en la práctica se le asignó un valor a $C3 > C2$, se dice que la matriz es inconsistente, en caso contrario se diría que la matriz es consistente [41].

Puede darse que el grado de consistencia de una matriz no sea perfecto, debido tanto al propio decisor como a la escala de valoración, cuando esto sucede es necesario construir una función para medir la consistencia de los juicios. Este proceso se puede medir mediante el índice de consistencia (CI), que se obtiene de acuerdo con la ecuación (5.3 -1) [92].

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n-1} \quad (5.3 - 1)$$

El $\lambda_{\max}$ se obtiene de hacer la suma ponderada de cada celda por el vector prioridad evaluado para cada criterio, este resultado se divide por el valor del vector prioridad y el resultado se suma con los demás resultados evaluados en los demás criterios. Finalmente, al resultado de esta suma se le saca la media aritmética [41].

Este índice de consistencia puede utilizarse para mejorar la consistencia de los juicios si se compara con el número apropiado de la *Tabla 19*, que muestra el índice de consistencia aleatorio (RI) dependiendo del tamaño de la matriz [92].

Tabla 19. Índice de consistencia aleatorio (RI) en función de la dimensión de la matriz (n)

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
RI	0	0	0,525	0,882	1,115	1,252	1,341	1,404	1,452	1,484	1,513	1,535	1,555	1,57	1,583	1,595

Fuente: [92]

El índice de consistencia aleatorio (RI) se obtiene mediante la simulación de 100.000 matrices recíprocas generadas aleatoriamente utilizando la escala de Saaty (1/9, 1/8,...,1,...,8,9) [92].

Una vez calculados (CI) y (RI) se calcula la ratio de consistencia (CR) mediante el cociente entre ellos, como se muestra en la ecuación (5.3 - 2) [92].

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (5.3 - 2)$$

Si CR vale 0,10 o menos, entonces se acepta la consistencia de la matriz y por tanto el autovector de pesos se admite como válido. Para $n=3$ el umbral se fija en 0,05 y para $n=4$ en 0,08. Para $n \geq 5$, si CR es mayor que 0,10 se debe estudiar el de nuevo el problema y revisar los juicios emitidos [92].

5.3.4 PASO 4: Llegar a una decisión final.

Como último paso, después de analizar y llevar a cabo los pasos anteriores, se procede a realizar la ponderación final para cada una de las alternativas, obteniendo matemáticamente la respuesta, al encontrar la alternativa con mayor ponderación [41]. Es importante señalar que, aunque Saaty propone utilizar el método de la suma ponderada, también se podrían emplear métodos de sobreclasificación, como ELECTRE y PROMETHEE, pero la propuesta de Saaty es más sencilla [92].

5.3.5 PASO 5: Análisis de sensibilidad

Como último paso, y otras de las ventajas del método AHP, es posible realizar un análisis de sensibilidad con el fin de confirmar que los resultados son fiables y no son frutos del azar. Al trabajar con un software especializado se facilita este tipo de análisis, como por ejemplo el Expert Choice, con el cual se podría efectuar el análisis de sensibilidad de cinco formas diferentes: sensibilidad de valoración, sensibilidad dinámica, sensibilidad de gradiente, gráfico en dos dimensiones y sensibilidad de diferencias ponderadas. La idea de este análisis es variar el valor de alguno de los pesos y observar numérica y gráficamente cómo este cambio afecta al resto de pesos del problema y a la priorización de alternativas.

5.4 APLICACIÓN DEL MÉTODO AHP PARA DETERMINAR LA VIABILIDAD DE LA IMPLEMENTACIÓN DE BPL EN LA ZONA OBJETIVO

De acuerdo con los numerales anteriores, para el caso de estudio se aplica el método AHP, ya que es fácil de entender y usar, parte de una estructura jerárquica del problema que facilita su entendimiento, permitiendo trabajar con mucha información y multicriterios difíciles de comparar o cuantificar, integra las opiniones y juicios de los expertos participantes, haciendo verificación de la consistencia de dichos juicios, para finalmente obtener una priorización de alternativas que permite tomar una decisión.

El proceso de aplicación del método es el siguiente:

- Objeto de estudio.
- Selección de las alternativas.
- Selección de expertos.
- Selección de los criterios de decisión.
- Preguntas a expertos.
- Análisis de dominancia.
- Ponderación de los criterios.
- Valoración de las alternativas según cada criterio.
- Cálculo de la prioridad global en el conjunto de alternativas.
- Análisis de resultados.
- Análisis de sensibilidad

5.4.1 *Objeto del estudio*

Determinar la viabilidad de la implementación de la tecnología Broadband Power Line (BPL) en proyectos de viviendas 100% subsidiadas, ubicados en zonas apartadas y de baja densidad demográfica en Colombia, mediante la aplicación del método analítico jerárquico (AHP).

5.4.2 *Selección de alternativas*

De acuerdo con los objetivos específicos del presente documento, las alternativas tecnológicas que se deben tener en cuenta son BPL y las tres tecnologías más utilizadas a nivel nacional para dar conectividad de última milla.

Por lo anterior, y teniendo en cuenta la razón expuesta en el numeral 2.1.2, donde se indica que para el presente estudio se toma como base las tecnologías cableadas para acceso fijo más usadas en el mercado colombiano, las cuatro alternativas (tecnologías de última milla para el servicio de acceso fijo a internet) consideradas para ejecutar el modelo AHP son las siguientes:

1. xDSL, descrita en el numeral 2.2.1 *Redes xDSL en redes de cobre*.
2. HFC, descrita en el numeral 2.2.2 *Redes por cable (HFC – HÍBRIDAS FIBRA / COAXIAL)*.
3. FTTx, descrita en el numeral 2.2.3 *Redes de fibra óptica (FTTx)*.
4. BPL, descrita en el numeral 2.3 *DESCRIPCIÓN DE LA TECNOLOGÍA BPL*.

5.4.3 Selección de expertos

Tal como se señaló anteriormente, para la selección de los expertos se partió de una lista de cerca de 20 profesionales vinculados al sector TIC, con gran visión a futuro y amplia experiencia en diferentes aspectos como gerencia, estructuración, despliegue, operación y mantenimiento, tecnologías de transporte de datos, regulación, entre otros, de proyectos de redes de infraestructura de última milla, con especial conocimiento en infraestructura para zonas rurales.

Una vez revisados los perfiles, se escogió un grupo de 5 expertos (1 ingeniero de telecomunicaciones, 2 ingenieros electrónicos, 2 ingenieros eléctricos) con quienes, dada su idoneidad, se puede garantizar la existencia de fundamentos sólidos para sus juicios, y con quienes pueden abarcar diferentes visiones importantes para el ejercicio. Mayor detalle de los perfiles de los expertos se encuentran en el numeral 4.2.2.

5.4.4 Selección de los criterios de decisión

Para definir la lista de criterios que sirven como elemento esencial para el análisis y toma de decisiones, se partió de una revisión bibliográfica, relacionada con la escogencia de tecnologías de última milla para atender usuarios que requieren del servicio de acceso a Internet, resaltando que la mayoría de los documentos escogidos están orientados específicamente a infraestructura de última milla en zonas rurales o apartadas. De este ejercicio se obtuvo una lista unificada de 61 criterios generales (ver numeral 4.1).

Seguidamente, para reducir la extensa lista de criterios obtenida en la revisión bibliográfica, y hacer más manejable la aplicación del AHP, se recurrió al método Delphi, con el fin de identificar los criterios más relevantes, que disminuyan la incertidumbre y aporten el mayor valor al análisis objeto del presente trabajo, conservando el alcance fijado en el mismo (ver numeral 4.2). De la misma manera, se utilizó el método BOCR para agrupar los criterios por clústeres de condicionantes, (ver numeral 4.2.4). Finalmente, se obtuvo una lista definitiva de 30 criterios claves, agrupados en 6 condicionantes (ver numeral 4.3), los cuales se presentan en la *Tabla 16*. Lista de criterios claves por condicionante.

5.4.5 Preguntas a los expertos

Antes de proceder a las preguntas, se indicó a los expertos que cuando se hace referencia a una tecnología de última milla, se debe tener en cuenta el total de la infraestructura, tanto física como tecnológica, necesaria para prestar el servicio de acceso a Internet en los proyectos de viviendas 100% subsidiadas, ubicados en zonas apartadas y de baja densidad demográfica en Colombia. De la misma manera, se compartió con los expertos la explicación de los seis condicionantes y sus correspondientes criterios, para unificar el punto de partida, de tal forma que se tenga claridad de lo que se busca con cada uno de ellos (ver numeral 4.3).

El primer requerimiento a los expertos consistió en efectuar la valoración de cada una de las cuatro tecnologías de última milla objeto de análisis, respecto a cada uno de los 30 criterios establecidos, tomando como base la escala de valoración directa de Likert que se presenta en la *Tabla 20*.

Tabla 20. Escala de valoración directa de Likert

Valoración	Escala Verbal	Explicación
1	Extra Bajo	El aporte de la alternativa al criterio de análisis es Extra Bajo
3	Bajo	El aporte de la alternativa al criterio de análisis es Bajo
5	Medio	El aporte de la alternativa al criterio de análisis es Medio
7	Alto	El aporte de la alternativa al criterio de análisis es Alto
9	Extra Alto	El aporte de la alternativa al criterio de análisis es Extra Alto

Nota: En caso de considerar necesario una mayor precisión, los valores 2,4,6 y 8 pueden ser utilizados para casos intermedios.

Fuente: Adaptado de [92]

A los expertos se les aclaró que, para efectos de la valoración, todos los criterios se consideran a “maximizar”, es decir que, de acuerdo con la escala de Likert, una tecnología obtiene una mayor valoración en la medida que su aporte al criterio sujeto de calificación sea más alto. Dos ejemplos son los siguientes:

- Criterio: Fácil instalación.

Definición: Facilidad para instalar en zonas apartadas.

Valoración: De acuerdo con la escala de Likert, y teniendo en cuenta que el criterio se considera a “maximizar”, se debe asignar una mayor valoración en la medida que la tecnología de última milla se considere (por parte del experto) tiene una mayor facilidad de instalación en los proyectos de viviendas 100% subsidiadas, ubicados en zonas apartadas y de baja densidad demográfica en Colombia.

- Criterio: Tiempo de despliegue.

Definición: Menor tiempo para la construcción o implementación de la solución en zonas apartadas.

Valoración: De acuerdo con la escala de Likert, y teniendo en cuenta que el criterio se considera a “maximizar”, se debe asignar una mayor valoración en la medida que la tecnología de última milla se considere (por parte del experto) requiere de un menor tiempo para la construcción o implementación en los proyectos de viviendas 100% subsidiadas, ubicados en zonas apartadas y de baja densidad demográfica en Colombia.

El segundo requerimiento a los expertos consistió en, emitir un juicio en el sentido de establecer que tan importante se considera un criterio frente a otro, teniendo en cuenta que esta es la forma en que opera el método AHP.

Para lo anterior, se presentó a los expertos la “escala fundamental de comparación pareada” propuesta por Saaty (*Tabla 18*).

5.4.6 *Análisis de dominancia*

La matriz de dominancia es una matriz cuadrada cuya cantidad de filas y columnas es igual al número de alternativas que se tienen, en este caso las cuatro alternativas tecnológicas de última milla. Después se compara cada alternativa de las filas con cada una de las

alternativas de las columnas, y en cada una de las intercepciones se escribe el número de criterios en los cuales la alternativa de la fila es igual o mejor a la alternativa de la columna. Esta comparación se realiza a partir de la *Tabla 31. Valoración de alternativas tecnológicas de última milla*.

Una vez se tiene la matriz de dominancia, se calcula el índice de dominancia de cada alternativa, el cual se obtiene dividiendo para cada alternativa tecnológica, el valor de la sumatoria de la fila (DI) entre el valor de la sumatoria de la columna (di).

(DI) representa la cantidad de criterios en que una tecnología domina a las otras, y (di) representa la cantidad de criterios en que una tecnología es dominada por las otras. El resultado de este proceso se puede ver en la *Tabla 21*.

Se puede ver que las tecnologías FTTH y BPL tienen un índice de dominancia mayor que las tecnologías xDSL y HFC, sin embargo, ninguna de las tecnologías de última milla domina ni es dominada completamente, lo cual significa que depende el criterio que se evalúe, alguna tecnología tiene mayores ventajas o beneficios que las otras.

Tabla 21. Matriz de dominancia e índice de dominancia

	xDSL	HFC	FTTH	BPL	DI	DI/di
xDSL	0	12	4	8	24	0,36
HFC	18	0	3	12	33	0,58
FTTH	26	27	0	16	69	3,29
BPL	22	18	14	0	54	1,50
di	66	57	21	36		

En la *Tabla 22* se presenta la matriz de porcentajes de dominancia de las tecnologías de última milla, la cual muestra el porcentaje de criterios en que una tecnología (filas) domina a otra (columnas), observando, para el caso de FTTH vs BPL que, pese al alto índice de dominancia de FTTH (3,29) sobre BPL (1,50) que se aprecia en la *Tabla 21*, FTTH supera en el 53,3% de los criterios a BPL, pero a su vez es dominada por BPL en el 46,7% de ellos.

Lo anterior muestra que no existe hasta este punto una clara dominancia de ninguna de las tecnologías.

Tabla 22. Porcentajes de dominancia de las alternativas tecnológicas

	xDSL	HFC	FTTH	BPL
xDSL	0,0%	40,0%	13,3%	26,7%
HFC	60,0%	0%	10,0%	40,0%
FTTH	86,7%	90,0%	0%	53,3%
BPL	73,3%	60,0%	46,7%	0%

5.4.7 Ponderación de los criterios

La ponderación de los criterios corresponde a la media geométrica de la comparación por pares realizada por los diferentes expertos, esto en la medida que cada experto ha valorado la comparación de manera diferente, resultado de la subjetividad que le brindan sus conocimientos y experiencia en tecnologías de redes de última milla para zonas apartadas, y es aquí donde la aplicación de la media geométrica permite tener una valoración bastante objetiva en términos de discrepancias entre expertos.

Lo importante del método AHP es que permite recoger diferentes visiones y juicios de expertos, cada uno de los cuales seguramente conoce y tiene mayor experiencia en aspectos particulares de cada tecnología, condicionante y criterio, pero que, al integrar los resultados, asegura que no exista una posición dominante en particular y se tenga un consenso.

En la Tabla 23 se aprecia la ponderación final de los criterios según los condicionantes establecidos para la evaluación. De igual manera, después de aplicar el procedimiento matemático del AHP, se presenta, en la última columna, el vector prioridad, el cual muestra el peso o prioridad que cada condicionante tiene dentro del grupo de condicionantes, razón por la cual, la sumatoria de dicha columna es “1”.

Lo anterior significa que, por ejemplo, el condicionante técnico cuyo vector prioridad es de 0,192, tiene un peso o prioridad del 19,2% dentro del grupo de condicionantes.

Tabla 23. Ponderación final de los criterios según condicionantes

Condicionantes	Técnico	Infraestructura	Económico	Socio / Cultural	Regulatorio / Político	Ambiental	Vector Prioridad
Técnico	1,00	0,84	0,71	1,00	2,06	3,81	0,192
Infraestructura	1,19	1,00	0,69	1,32	2,78	2,63	0,210
Económico	1,41	1,46	1,00	1,68	2,99	2,99	0,265
Socio / Cultural	1,00	0,76	0,59	1,00	1,86	3,13	0,174
Regulatorio / Político	0,49	0,36	0,33	0,54	1,00	2,06	0,095
Ambiental	0,26	0,38	0,33	0,32	0,49	1,00	0,064
Suma	5,35	4,80	3,66	5,85	11,18	15,62	1,00

De la misma forma como se hizo anteriormente con los condicionantes, se procedió con la ponderación de los criterios que se agrupan dentro de cada uno de los condicionante, y sus resultados se presentan en:

Tabla 24. Ponderación final de los criterios técnicos,

Tabla 25. Ponderación final de los criterios de infraestructura,

Tabla 26. Ponderación final de los criterios económicos,

Tabla 27. Ponderación final de los criterios socio / culturales,

Tabla 28. Ponderación final de los criterios regulatorios / políticos,

Tabla 29. Ponderación final de los criterios ambientales.

Tabla 24. Ponderación final de los criterios técnicos

Condicionantes	Fiabilidad	Fácil mantenimiento	Interoperabilidad	Fácil instalación	Escalabilidad	Ancho de banda	Uso de Energía	Interferencia	Caracterización de red	Potencial futuro	Madurez tecnológica	Vector Prioridad
Fiabilidad	1,00	2,66	2,14	3,98	3,00	3,64	3,08	2,78	3,66	2,51	3,31	0,22
Fácil mantenimiento	0,38	1,00	1,37	1,57	2,93	2,69	1,24	1,50	3,48	2,43	3,20	0,13
Interoperabilidad	0,47	0,73	1,00	1,05	1,97	1,32	1,41	0,88	2,34	1,35	1,78	0,09
Fácil instalación	0,25	0,64	0,96	1,00	2,43	2,37	2,14	1,32	2,43	1,73	2,59	0,11
Escalabilidad	0,33	0,34	0,51	0,41	1,00	0,88	1,11	0,53	1,19	1,41	1,19	0,06
Ancho de banda	0,27	0,37	0,76	0,42	1,14	1,00	1,19	1,05	1,03	1,14	1,37	0,06
Uso de Energía	0,32	0,81	0,71	0,47	0,90	0,84	1,00	0,58	1,64	1,32	1,73	0,07
Interferencia	0,36	0,67	1,14	0,76	1,88	0,96	1,73	1,00	3,41	3,00	2,06	0,10
Caracterización de red	0,27	0,29	0,43	0,41	0,84	0,97	0,61	0,29	1,00	0,45	0,78	0,04
Potencial futuro	0,40	0,41	0,74	0,58	0,71	0,88	0,76	0,33	2,21	1,00	1,32	0,06
Madurez tecnológica	0,30	0,31	0,56	0,39	0,84	0,73	0,58	0,49	1,28	0,76	1,00	0,05
Suma	4,36	8,23	10,30	11,02	17,64	16,28	14,85	10,74	23,67	17,11	20,33	1,00

Tabla 25. Ponderación final de los criterios de infraestructura

Condicionantes	Seguridad de infraestructura física	Uso propuesto	Acceso a infraestructura existente	Tiempo de despliegue	Mantenimiento	Vida útil de la red	Vector Prioridad
Seguridad de infraestructura física	1,00	2,47	1,26	2,08	1,44	2,47	0,26
Uso propuesto	0,41	1,00	0,55	1,44	0,48	1,00	0,11
Acceso a infraestructura existente	0,79	1,82	1,00	2,47	0,87	1,44	0,20
Tiempo de despliegue	0,48	0,69	0,41	1,00	0,41	0,48	0,09
Mantenimiento	0,69	2,08	1,14	2,47	1,00	1,44	0,21
Vida útil de la red	0,41	1,00	0,69	2,09	0,69	1,00	0,13
Suma	3,78	9,06	5,05	11,54	4,90	7,83	1

Tabla 26. Ponderación final de los criterios económicos

Condicionantes	Costo de operación (Opex)	Costo de capital (Capex)	Costo de instalación (para el usuario)	Costos adicionales (para el usuario)	Costos de suscripción mensual	Vector Prioridad
Costo de operación (Opex)	1,00	2,28	2,34	3,20	0,58	0,26

Condicionantes	Costo de operación (Opex)	Costo de capital (Capex)	Costo de instalación (para el usuario)	Costos adicionales (para el usuario)	Costos de suscripción mensual	Vector Prioridad
Costo de capital (Capex)	0,44	1,00	2,06	3,16	0,43	0,18
Costo de instalación (para el usuario)	0,43	0,49	1,00	2,78	0,31	0,12
Costos adicionales (para el usuario)	0,31	0,32	0,36	1,00	0,25	0,07
Costos de suscripción mensual	1,73	2,34	3,20	3,98	1,00	0,37
Suma	3,91	6,42	8,96	14,13	2,57	1,00

Tabla 27. Ponderación final de los criterios socio / culturales

Condicionantes	Asequibilidad	Conocimiento de la tecnología	Vector Prioridad
Asequibilidad	1,00	3,76	0,7898
Conocimiento de la tecnología	0,27	1,00	0,2102
Suma	1,27	4,76	1,00

Tabla 28. Ponderación final de los criterios regulatorios / políticos

Condicionantes	Derechos de paso	Compartición de infraestructura	Vector Prioridad
Derechos de paso	1,00	0,28	0,22
Compartición de infraestructura	3,55	1,00	0,78
Suma	4,55	1,28	1,00

Tabla 29. Ponderación final de los criterios ambientales

Condicionantes	Impacto ambiental	Condiciones climáticas	Uso de la red	Vida útil de la red	Vector Prioridad
Impacto ambiental	1,00	0,52	0,58	0,46	0,15
Condiciones climáticas	1,91	1,00	2,47	2,15	0,41
Uso de la red	1,71	0,41	1,00	0,79	0,20
Vida útil de la red	2,15	0,46	1,26	1,00	0,24
Suma	6,78	2,39	5,31	4,41	1

Es necesario anotar que, tal como se indicó en el numeral 5.3.3, se efectuó la revisión del ratio de consistencia (CR – por sus siglas en inglés) de cada una de las matrices de comparación por pares realizada por los diferentes expertos, encontrando inicialmente inconsistencias en varias matrices, pues para algunas matrices de 4 criterios se superó el umbral de 0,8 (es decir más del 8% de inconsistencia) y para algunas matrices de 5 o más criterios se superó el umbral del 0,1 (es decir más del 10% de inconsistencia).

Lo anterior obligó a realizar una nueva ronda con varios de los expertos, corrigiendo la consistencia en varias de las matrices, sin embargo, se mantuvieron ciertas inconsistencias que hicieron necesario descartar algunas de ellas, para posteriormente, mediante la media geométrica, obtener las matrices de ponderación final de los diferentes condicionantes y criterios, *Tablas 23, 24, 25, 26, 27, 28 y 29*.

Como prueba final, se calculó la ratio de consistencia a las matrices pareadas resultantes, presentadas en las *Tablas 23, 24, 25, 26, 27, 28 y 29*, y los resultados arrojados estuvieron por debajo de los umbrales requeridos, tal como se muestra en la *Tabla 30*.

Tabla 30. Ratios de consistencia de las matrices pareada

	Condicionantes	Técnicos	Infraestructura	Económico	Social / Cultural	Regulatorio / Político	Ambiental
Número de criterios (n)	6	11	6	5	2	2	4
λ máx.	6,083	11,328	6,064	5,149	2,000	2,000	4,090
Índice de consistencia (CI)	0,017	0,033	0,013	0,037	0,000	0,000	0,030
Índice de consistencia aleatorio (RI)	1,252	1,513	1,252	1,115	0	0	0,882
Ratio de consistencia (CR)	1,32%	2,17%	1,03%	3,33%	0,00%	0,00%	3,41%

5.4.8 Valoración de las alternativas según cada criterio

Para la valoración de las cuatro alternativas tecnológicas de última milla, se calculó la media geométrica de las valoraciones efectuadas por los expertos a cada una de las alternativas tecnológicas de última milla, respecto a cada uno de los 30 criterios. En la *Tabla 31* se presentan las valoraciones de las alternativas frente a cada criterio.

Tabla 31. Valoración de alternativas tecnológicas de última milla

Condicionante	Criterios	Solicitud al Experto	Media Geométrica Valoración Alternativas Tecnológicas de Última Milla			
		Valorar las 4 alternativa tecnológicas (utilizando la escala Likert), para cada uno de los criterios de la lista. *Tener en cuenta la zona objetivo	xDSL	HFC	FTTH	BPL
Técnico	Fiabilidad	Disponibilidad del servicio de Internet básico (Down-Up Stream)	3,7279	6,6939	9	6,1278
	Fácil mantenimiento	Facilidad de rutinas de mantenimiento (preventivo y correctivo)	3,7585	3,5195	5,7059	6,1531
	Interoperabilidad	Capacidad/facilidad para operar con otras tecnologías existentes	4,7894	5,2614	6,2738	5,7708
	Fácil instalación	Facilidad para instalar en zonas apartadas	3,3145	3,6801	5,008	7,3305
	Escalabilidad	Capacidad/proyección para ampliarse de forma incremental garantizando calidad de servicio	2,8252	6,2841	8,5588	4,7429

		Solicitud al Experto	Media Geométrica Valoración Alternativas Tecnológicas de Última Milla			
Condicionante	Criterios	Valorar las 4 alternativa tecnológicas (utilizando la escala Likert), para cada uno de los criterios de la lista. *Tener en cuenta la zona objetivo	xDSL	HFC	FTTH	BPL
	Ancho de banda	Capacidad de transferencia de datos (Mbps)	2,0477	5,4038	9	4,7818
	Uso de Energía	Menor requerimiento de uso de energía, por la cantidad de equipos, para su funcionamiento	5,194	2,9542	5,9088	5,5555
	Interferencia	Menor Interferencia generada o recibida (problemas generados por las frecuencias en que transmite las señales)	2,9926	5,6738	8,0018	2,3522
	Caracterización de red	Menor dependencia de la red física de terceros para su operación	6,2386	5	6,9035	2,2206
	Potencial futuro	Mayor potencial para seguirse desarrollando tecnológicamente	2,1689	4,3174	8,5588	5,1146
	Madurez tecnológica	Mayor estado actual de avance tecnológico	3,347	5,3566	9	2,9926
Infraestructura	Seguridad de infraestructura física	Menor grado de vulnerabilidad de la red, por acceso de extraños que ocasionen robo de elementos o cortes mal intencionados	2,7663	4,9593	6,9712	6,6729
	Uso propuesto	Menor posibilidad de problemas con otros servicios que operen por la misma infraestructura	4,7818	5,9328	6,8535	2,2679
	Acceso a infraestructura existente	Aprovechamiento de la infraestructura existente (telco, eléctrica, otras)	4,1694	4,8559	4,9673	8,5588
	Tiempo de despliegue	Menor tiempo para la construcción o implementación de la solución en zonas apartadas	3,5944	3,554	5,3566	7,1599
	Mantenimiento	Menor cantidad y complejidad de las rutinas de mantenimiento para garantizar una calidad de servicio adecuada	2,9302	3,8168	5,3868	5,7203
	Vida útil de la red	Tiempo de vida de la red sobre la cual se despliega la tecnología de última milla	3,4657	4,6821	6,8818	7,1895
Económico	Costo de operación (Opex)	Menor gasto durante la vida útil de la infraestructura (adm, mant, repuestos, actualizaciones, depreciación, vandalismo, capacitación, etc.)	4,7894	3,5195	4,9673	8,1649
	Costo de capital (Capex)	Menor monto de la inversión para efectuar el despliegue de la infraestructura	3,554	2,8252	4,1289	6,6939
	Costo de instalación (para el usuario)	Menor valor que debe pagar el usuario por la instalación del servicio	4,3174	3,8981	4,4163	5,6968
	Costos adicionales (para el usuario)	Menor valor que debe pagar el usuario por servicios o elementos no incluidos en el plan de internet básico	3,6502	5,7203	5,1228	4,6179

		Solicitud al Experto	Media Geométrica Valoración Alternativas Tecnológicas de Última Milla			
Condicionante	Criterios	Valorar las 4 alternativa tecnológicas (utilizando la escala Likert), para cada uno de los criterios de la lista. *Tener en cuenta la zona objetivo	xDSL	HFC	FTTH	BPL
	Costos de suscripción mensual	Menor valor mensual que debe pagar el usuario por el servicio de internet básico	4,7894	5,5016	4,7238	6,0933
Socio Cultural /	Asequibilidad	Menor valor de (instalación + mensualidad) que debe pagar el usuario por el servicio de internet básico	4,4777	5,1435	4,4163	5,6968
	Conocimiento de la tecnología	Conocimiento que pueden tener los potenciales usuarios respecto a la tecnología y que puede influenciar el uso de la misma.	6,6289	6,3458	7	1,6438
Regulatorio / Político	Derechos de paso	Menor cantidad y dificultad de los derechos que se deben adquirir para la instalación o despliegue de la red externa	5,7203	5,1146	5,4707	4,241
	Compartición de infraestructura	Menor grado de necesidad del uso de infraestructura existente o de terceros para lograr su despliegue	6,2841	5,2319	6,3196	1,431
Ambiental	Impacto ambiental	Menor nivel de afectación ambiental ocasionado por la totalidad de la infraestructura tecnológica durante su ciclo de vida (adquisición de materia prima, proceso de producción, instalación & servicio, y disposición a la finalización de la vida útil)	3,5195	3,4657	4,0201	7,8155
	Condiciones climáticas	Menor nivel de afectación que las condiciones climáticas puedan ocasionar en la calidad del servicio	3,5195	4,3843	7,4324	1,7826
	Uso de la red	Menor daño ambiental por el USO de la redes existentes	3,4375	3,7585	4,2823	8,5588
	Vida útil de la red	Menor daño ambiental por la mayor vida útil de la red externa sobre la cual opera	4,5731	3,7585	4,1289	7,4324

5.4.9 Cálculo de la prioridad global en el conjunto de alternativas

Hasta el momento, de acuerdo con los numerales anteriores, se tienen los pesos (vectores prioridad) de cada uno de los condicionantes y de los criterios que los componen, y se tienen las valoraciones de cada alternativa con relación a cada criterio, con lo cual se genera la matriz de decisión, tal como se muestra en *Tabla 32*.

Tabla 32. Matriz de decisión

CONDICIONANTE	CRITERIO	PESO CONDICIONANTE	PESO CRITERIO	Media Geométrica Valoración de Expertos (Alternativas)			
				xDSL	HFC	FTTH	BPL
Técnico	Fiabilidad	0,1924	0,2223	3,7279	6,6939	9,0000	6,1278
	Fácil mantenimiento		0,1348	3,7585	3,5195	5,7059	6,1531
	Interoperabilidad		0,0930	4,7894	5,2614	6,2738	5,7708
	Fácil instalación		0,1091	3,3145	3,6801	5,0080	7,3305
	Escalabilidad		0,0573	2,8252	6,2841	8,5588	4,7429
	Ancho de banda		0,0637	2,0477	5,4038	9,0000	4,7818
	Uso de Energía		0,0672	5,1940	2,9542	5,9088	5,5555
	Interferencia		0,1035	2,9926	5,6738	8,0018	2,3522
	Caracterización de red		0,0418	6,2386	5,0000	6,9035	2,2206
	Potencial futuro		0,0599	2,1689	4,3174	8,5588	5,1146
	Madurez tecnológica		0,0474	3,3470	5,3566	9,0000	2,9926
Infraestructura	Seguridad de infraestructura física	0,2101	0,2627	2,7663	4,9593	6,9712	6,6729
	Uso propuesto		0,1129	4,7818	5,9328	6,8535	2,2679
	Acceso a infraestructura existente		0,1975	4,1694	4,8559	4,9673	8,5588
	Tiempo de despliegue		0,0858	3,5944	3,5540	5,3566	7,1599
	Mantenimiento		0,2070	2,9302	3,8168	5,3868	5,7203
	Vida útil de la red		0,1342	3,4657	4,6821	6,8818	7,1895
Económico	Costo de operación (Opex)	0,2646	0,2646	4,7894	3,5195	4,9673	8,1649
	Costo de capital (Capex)		0,1776	3,5540	2,8252	4,1289	6,6939
	Costo de instalación (para el usuario)		0,1230	4,3174	3,8981	4,4163	5,6968
	Costos adicionales (para el usuario)		0,0675	3,6502	5,7203	5,1228	4,6179
	Costos de suscripción mensual		0,3672	4,7894	5,5016	4,7238	6,0933
Socio / Cultural	Asequibilidad	0,1743	0,7898	4,4777	5,1435	4,4163	5,6968
	Conocimiento de la tecnología		0,2102	6,6289	6,3458	7,0000	1,6438
Regulatorio / Político	Derechos de paso	0,0950	0,2200	5,7203	5,1146	5,4707	4,2410
	Compartición de infraestructura		0,7800	6,2841	5,2319	6,3196	1,4310

				Media Geométrica Valoración de Expertos (Alternativas)			
CONDICIONANTE	CRITERIO	PESO CONDICIONANTE	PESO CRITERIO	xDSL	HFC	FTTH	BPL
Ambiental	Impacto ambiental	0,0636	0,1453	3,5195	3,4657	4,0201	7,8155
	Condiciones climáticas		0,4132	3,5195	4,3843	7,4324	1,7826
	Uso de la red		0,1975	3,4375	3,7585	4,2823	8,5588
	Vida útil de la red		0,2439	4,5731	3,7585	4,1289	7,4324

El siguiente paso es realizar la normalización de los valores de las alternativas para cada uno de los criterios (tomando como base la matriz de decisión, *Tabla 32*), lo cual se hace por dos métodos de normalización, método distributivo y método ideal, con el fin de obtener la confirmación de la respuesta.

El proceso de normalización mediante el método distributivo consiste en hacer normalización por la suma, es decir, se hace la sumatoria, para cada criterio, de los valores obtenidos en las diferentes alternativas, y posteriormente se divide el valor de cada alternativa, en dicho criterio, entre la suma antes obtenida.

Por ejemplo, para el primer criterio del condicionante técnico, “Fiabilidad”, la suma de los valores de las cuatro alternativas es 25,5496, seguidamente se divide cada valor en este total, obteniendo los valores (xDSL: 0,1459), (HFC:0,26,20), (FTTH: 0,3523), (BPL: 0,2398). La suma de los valores resultantes es siempre 1.

Al efectuar este proceso con cada uno de los criterios de la matriz de decisión, *Tabla 32*, se obtienen los datos que se presentan en las últimas 4 columnas de la *Tabla 33*.

Tabla 33. Matriz de decisión normalizada - método distributivo

				Método Distributivo (normalización por la suma)			
CONDICIONANTE	CRITERIO	PESO CONDICIONANTE	PESO CRITERIO	xDSL	HFC	FTTH	BPL
Técnico	Fiabilidad	0,1924	0,2223	0,1459	0,2620	0,3523	0,2398
	Fácil mantenimiento		0,1348	0,1964	0,1839	0,2982	0,3215

				Método Distributivo (normalización por la suma)			
CONDICIONANTE	CRITERIO	PESO CONDICIONANTE	PESO CRITERIO	xDSL	HFC	FTTH	BPL
	Interoperabilidad		0,0930	0,2168	0,2381	0,2839	0,2612
	Fácil instalación		0,1091	0,1714	0,1904	0,2590	0,3792
	Escalabilidad		0,0573	0,1261	0,2804	0,3819	0,2116
	Ancho de banda		0,0637	0,0964	0,2545	0,4239	0,2252
	Uso de Energía		0,0672	0,2648	0,1506	0,3013	0,2833
	Interferencia		0,1035	0,1573	0,2983	0,4207	0,1237
	Caracterización de red		0,0418	0,3064	0,2455	0,3390	0,1091
	Potencial futuro		0,0599	0,1076	0,2142	0,4245	0,2537
	Madurez tecnológica		0,0474	0,1617	0,2588	0,4349	0,1446
Infraestructura	Seguridad de infraestructura física	0,2101	0,2627	0,1295	0,2321	0,3262	0,3123
	Uso propuesto		0,1129	0,2411	0,2991	0,3455	0,1143
	Acceso a infraestructura existente		0,1975	0,1849	0,2153	0,2203	0,3795
	Tiempo de despliegue		0,0858	0,1828	0,1807	0,2724	0,3641
	Mantenimiento		0,2070	0,1641	0,2138	0,3017	0,3204
	Vida útil de la red		0,1342	0,1560	0,2107	0,3097	0,3236
Económico	Costo de operación (Opex)	0,2646	0,2646	0,2234	0,1641	0,2317	0,3808
	Costo de capital (Capex)		0,1776	0,2066	0,1642	0,2400	0,3891
	Costo de instalación (para el usuario)		0,1230	0,2356	0,2127	0,2410	0,3108
	Costos adicionales (para el usuario)		0,0675	0,1910	0,2993	0,2681	0,2416
	Costos de suscripción mensual		0,3672	0,2269	0,2606	0,2238	0,2887
Socio / Cultural	Asequibilidad	0,1743	0,7898	0,2269	0,2606	0,2238	0,2887
	Conocimiento de la tecnología		0,2102	0,3066	0,2935	0,3238	0,0760
Regulatorio / Político	Derechos de paso	0,0950	0,2200	0,2784	0,2489	0,2663	0,2064
	Compartición de infraestructura		0,7800	0,3262	0,2716	0,3280	0,0743
Ambiental	Impacto ambiental	0,0636	0,1453	0,1870	0,1841	0,2136	0,4153
	Condiciones climáticas		0,4132	0,2056	0,2561	0,4342	0,1041
	Uso de la red		0,1975	0,1716	0,1876	0,2137	0,4271
	Vida útil de la red		0,2439	0,2299	0,1889	0,2076	0,3736

El proceso de normalización mediante el método ideal parte de la *Tabla 33*, y consiste en hacer normalización por el mayor, es decir, se divide cada uno de los valores de las alternativas, normalizados por el método distributivo, para cada criterio, entre el mayor valor de las alternativas para dicho criterio.

Por ejemplo, para el primer criterio del condicionante técnico, “Fiabilidad”, los valores de las cuatro alternativas son (xDSL: 0,1459), (HFC:0,2620), (FTTH: 0,3523), (BPL: 0,2398), de tal manera que cada uno se debe dividir entre el mayor valor entre ellos, que es 0,3523, obteniendo unos valores normalizados de (xDSL: 0,4142), (HFC: 0,7438), (FTTH: 1,00), (BPL: 0,6809).

Al efectuar este proceso con cada uno de los criterios de la matriz de la *Tabla 33*, se obtienen los datos que se presentan en las últimas 4 columnas de la *Tabla 34*.

Tabla 34. Matriz de decisión normalizada - método ideal

				Método Ideal (normalización por el mayor)			
CONDICIONANTE	CRITERIO	PESO CONDICIONANTE	PESO CRITERIO	xDSL	HFC	FTTH	BPL
Técnico	Fiabilidad	0,1924	0,2223	0,4142	0,7438	1,0000	0,6809
	Fácil mantenimiento		0,1348	0,6108	0,5720	0,9273	1,0000
	Interoperabilidad		0,0930	0,7634	0,8386	1,0000	0,9198
	Fácil instalación		0,1091	0,4521	0,5020	0,6832	1,0000
	Escalabilidad		0,0573	0,3301	0,7342	1,0000	0,5542
	Ancho de banda		0,0637	0,2275	0,6004	1,0000	0,5313
	Uso de Energía		0,0672	0,8790	0,5000	1,0000	0,9402
	Interferencia		0,1035	0,3740	0,7091	1,0000	0,2940
	Caracterización de red		0,0418	0,9037	0,7243	1,0000	0,3217
	Potencial futuro		0,0599	0,2534	0,5044	1,0000	0,5976
	Madurez tecnológica		0,0474	0,3719	0,5952	1,0000	0,3325
Infraestructura	Seguridad de infraestructura física	0,2101	0,2627	0,3968	0,7114	1,0000	0,9572
	Uso propuesto		0,1129	0,6977	0,8657	1,0000	0,3309
	Acceso a infraestructura existente		0,1975	0,4871	0,5674	0,5804	1,0000

				Método Ideal (normalización por el mayor)			
CONDICIONANTE	CRITERIO	PESO CONDICIONANTE	PESO CRITERIO	xDSL	HFC	FTTH	BPL
	Tiempo de despliegue		0,0858	0,5020	0,4964	0,7481	1,0000
	Mantenimiento		0,2070	0,5122	0,6672	0,9417	1,0000
	Vida útil de la red		0,1342	0,4821	0,6512	0,9572	1,0000
Económico	Costo de operación (Opex)	0,2646	0,2646	0,5866	0,4310	0,6084	1,0000
	Costo de capital (Capex)		0,1776	0,5309	0,4221	0,6168	1,0000
	Costo de instalación (para el usuario)		0,1230	0,7579	0,6843	0,7752	1,0000
	Costos adicionales (para el usuario)		0,0675	0,6381	1,0000	0,8955	0,8073
	Costos de suscripción mensual		0,3672	0,7860	0,9029	0,7752	1,0000
Socio / Cultural	Asequibilidad	0,1743	0,7898	0,7860	0,9029	0,7752	1,0000
	Conocimiento de la tecnología		0,2102	0,9470	0,9065	1,0000	0,2348
Regulatorio / Político	Derechos de paso	0,0950	0,2200	1,0000	0,8941	0,9564	0,7414
	Compartición de infraestructura		0,7800	0,9944	0,8279	1,0000	0,2264
Ambiental	Impacto ambiental	0,0636	0,1453	0,4503	0,4434	0,5144	1,0000
	Condiciones climáticas		0,4132	0,4735	0,5899	1,0000	0,2398
	Uso de la red		0,1975	0,4016	0,4391	0,5003	1,0000
	Vida útil de la red		0,2439	0,6153	0,5057	0,5555	1,0000

Después de normalizar los valores de las alternativas, para los 30 criterios, se procede al paso final, para obtener cual es la alternativa tecnología elegida para instalar en la zona objetivo, el cual consiste en generar una matriz que resulta de multiplicar el peso de cada criterio, por el peso del condicionante al que corresponde dicho criterio, por el valor normalizado de la alternativa que se quiere calcular. Debido a que se tienen dos métodos de normalización, se genera una nueva matriz para los resultados de cada una de las normalizaciones, es decir, se obtiene una nueva matriz por el método distributivo y otra por el método ideal.

A manera de ejemplo:

Para el método distributivo se parte de la *Tabla 33*, y para obtener el valor del primer criterio del condicionante técnico, “Fiabilidad”, y la primera alternativa “xDSL”, se multiplica el peso del condicionante técnico (0,1924) por el peso del criterio fiabilidad (0,2223) y finalmente por el valor de la alternativa xDSL (0,1459), obteniendo un valor de (0,0062) en la nueva matriz.

Para el método ideal se parte de la *Tabla 34*, y para obtener el valor del primer criterio del condicionante técnico, “Fiabilidad”, y la primera alternativa “xDSL”, se multiplica el peso del condicionante técnico (0,1924) por el peso del criterio fiabilidad (0,2223) y finalmente por el valor de la alternativa xDSL (0,4142), obteniendo un valor de (0,0177) en la nueva matriz.

Al efectuar el proceso anterior, para cada uno de los condicionantes, criterios y alternativas tecnológicas de última milla, se obtienen las matrices que se presentan en: *Tabla 35. Matriz final - método distributivo* y *Tabla 36. Matriz final - método ideal*.

Tabla 35. Matriz final - método distributivo

		Matriz Final (método distributivo)			
CONDICIONANTE	CRITERIO	xDSL	HFC	FTTH	BPL
Técnico	Fiabilidad	0,0062	0,0112	0,0151	0,0103
	Fácil mantenimiento	0,0051	0,0048	0,0077	0,0083
	Interoperabilidad	0,0039	0,0043	0,0051	0,0047
	Fácil instalación	0,0036	0,0040	0,0054	0,0080
	Escalabilidad	0,0014	0,0031	0,0042	0,0023
	Ancho de banda	0,0012	0,0031	0,0052	0,0028
	Uso de Energía	0,0034	0,0019	0,0039	0,0037
	Interferencia	0,0031	0,0059	0,0084	0,0025
	Caracterización de red	0,0025	0,0020	0,0027	0,0009
	Potencial futuro	0,0012	0,0025	0,0049	0,0029
	Madurez tecnológica	0,0015	0,0024	0,0040	0,0013
Infraestructura	Seguridad de infraestructura física	0,0071	0,0128	0,0180	0,0172
	Uso propuesto	0,0057	0,0071	0,0082	0,0027
	Acceso a infraestructura existente	0,0077	0,0089	0,0091	0,0157
	Tiempo de despliegue	0,0033	0,0033	0,0049	0,0066
	Mantenimiento	0,0071	0,0093	0,0131	0,0139
	Vida útil de la red	0,0044	0,0059	0,0087	0,0091

		Matriz Final (método distributivo)			
CONDICIONANTE	CRITERIO	xDSL	HFC	FTTH	BPL
Económico	Costo de operación (Opex)	0,0156	0,0115	0,0162	0,0267
	Costo de capital (Capex)	0,0097	0,0077	0,0113	0,0183
	Costo de instalación (para el usuario)	0,0077	0,0069	0,0078	0,0101
	Costos adicionales (para el usuario)	0,0034	0,0053	0,0048	0,0043
	Costos de suscripción mensual	0,0220	0,0253	0,0217	0,0280
Socio / Cultural	Asequibilidad	0,0312	0,0359	0,0308	0,0397
	Conocimiento de la tecnología	0,0112	0,0107	0,0119	0,0028
Regulatorio / Político	Derechos de paso	0,0058	0,0052	0,0056	0,0043
	Compartición de infraestructura	0,0242	0,0201	0,0243	0,0055
Ambiental	Impacto ambiental	0,0017	0,0017	0,0020	0,0038
	Condiciones climáticas	0,0054	0,0067	0,0114	0,0027
	Uso de la red	0,0022	0,0024	0,0027	0,0054
	Vida útil de la red	0,0036	0,0029	0,0032	0,0058
Resultado Global Suma		0,212	0,235	0,282	0,270

1,00

Al sumar la totalidad de los valores de cada alternativa tecnológica (cuatro últimas columnas) en la *Tabla 35. Matriz final - método distributivo*, se obtiene el porcentaje o peso (prioridad) que cada alternativa tiene dentro del conjunto de alternativas, después de ejecutar el método AHP. Los porcentajes o pesos de las tecnologías de última milla son:

xDSL: 21,2 %

HFC: 23,5 %

FTTH: 28,2 %

BPL: 27,0 %

Tabla 36. Matriz final - método ideal

		Matriz Final (método ideal)			
CONDICIONANTE	CRITERIO	xDSL	HFC	FTTH	BPL
Técnico	Fiabilidad	0,0177	0,0318	0,0428	0,0291
	Fácil mantenimiento	0,0158	0,0148	0,0241	0,0259
	Interoperabilidad	0,0137	0,0150	0,0179	0,0165
	Fácil instalación	0,0095	0,0105	0,0143	0,0210
	Escalabilidad	0,0036	0,0081	0,0110	0,0061
	Ancho de banda	0,0028	0,0074	0,0123	0,0065

		Matriz Final (método ideal)				
CONDICIONANTE	CRITERIO	xDSL	HFC	FTTH	BPL	
	Uso de Energía	0,0114	0,0065	0,0129	0,0122	
	Interferencia	0,0074	0,0141	0,0199	0,0059	
	Caracterización de red	0,0073	0,0058	0,0080	0,0026	
	Potencial futuro	0,0029	0,0058	0,0115	0,0069	
	Madurez tecnológica	0,0034	0,0054	0,0091	0,0030	
Infraestructura	Seguridad de infraestructura física	0,0219	0,0393	0,0552	0,0528	
	Uso propuesto	0,0166	0,0205	0,0237	0,0079	
	Acceso a infraestructura existente	0,0202	0,0235	0,0241	0,0415	
	Tiempo de despliegue	0,0090	0,0089	0,0135	0,0180	
	Mantenimiento	0,0223	0,0290	0,0410	0,0435	
	Vida útil de la red	0,0136	0,0184	0,0270	0,0282	
Económico	Costo de operación (Opex)	0,0411	0,0302	0,0426	0,0700	
	Costo de capital (Capex)	0,0249	0,0198	0,0290	0,0470	
	Costo de instalación (para el usuario)	0,0247	0,0223	0,0252	0,0325	
	Costos adicionales (para el usuario)	0,0114	0,0179	0,0160	0,0144	
	Costos de suscripción mensual	0,0764	0,0877	0,0753	0,0972	
Socio / Cultural	Asequibilidad	0,1082	0,1243	0,1067	0,1376	
	Conocimiento de la tecnología	0,0347	0,0332	0,0366	0,0086	
Regulatorio Político	Derechos de paso	0,0209	0,0187	0,0200	0,0155	
	Compartición de infraestructura	0,0737	0,0614	0,0741	0,0168	
Ambiental	Impacto ambiental	0,0042	0,0041	0,0048	0,0092	
	Condiciones climáticas	0,0124	0,0155	0,0263	0,0063	
	Uso de la red	0,0050	0,0055	0,0063	0,0126	
	Vida útil de la red	0,0095	0,0078	0,0086	0,0155	
Suma		0,646	0,713	0,840	0,811	3,010
Resultado Global		0,215	0,237	0,279	0,269	1,00

Los resultados de la suma de la totalidad de los valores de cada alternativa tecnológica (cuatro últimas columnas) en la *Tabla 36. Matriz final - método idea*, se deben normalizar por la suma, es decir, cada total se debe dividir entre la sumatoria de los cuatro totales.

Ejemplo: Para xDSL, $0,646 / 3,010 = 0,215$

De esta manera, se obtiene el porcentaje o peso (prioridad) que cada alternativa tiene dentro del conjunto de alternativas, después de ejecutar el método AHP. Los porcentajes o pesos de las tecnologías de última milla son:

xDSL: 21,5 %

HFC: 23,7 %

FTTH: 27,9 %

BPL: 26,9 %

5.4.10 *Análisis de resultados*

Antes de efectuar el análisis de los resultados obtenidos mediante la aplicación del método AHP, es conveniente resaltar que, para llegar a este punto, tal como se indicó en los objetivos del estudio, fue necesario hacer una revisión del panorama mundial y local para establecer que las tecnologías de última milla fija más utilizadas en la actualidad son xDSL, HFC, FTTx, para las cuales, junto a BPL, se les hizo la revisión de su actualidad tecnológica y se realizó un cuadro comparativo de los aspectos más relevantes.

Teniendo en cuenta que la zona objetivo para establecer la viabilidad de la implementación de BPL, son los proyectos de vivienda 100% subsidiada ubicados en zonas apartadas y de baja densidad demográfica en Colombia, se efectuó la revisión de esta iniciativa estatal, encontrando que existen 31 proyectos (2.188 viviendas) con estas características. Estos proyectos se encuentran ubicados en 27 municipios de 8 departamentos, para los cuales se pudo verificar que la penetración del servicio de acceso fijo a internet está por debajo el 1.5%, reflejando la gran deficiencia a nivel de conectividad.

Con la información antes mencionada, más una revisión bibliográfica de los aspectos o criterios tenidos en cuenta para determinar las tecnologías de última milla para brindar servicio de acceso a internet en diferentes zonas rurales en el mundo, se procedió a consultar a un grupo de expertos y se determinaron 30 criterios claves para evaluar la viabilidad objeto de análisis.

Con la participación de 5 expertos se procedió a realizar una comparación entre pares de criterios, condicionantes y a su vez la valoración de las alternativas (todas a maximizar) respecto a cada uno de los 30 criterios, información con la cual se ejecutó el método AHP.

Dentro del desarrollo del método se efectuaron las verificaciones correspondientes a la consistencia de las comparaciones y valoraciones efectuadas por los expertos, haciendo necesario una segunda ronda con dichos expertos con el fin de subsanar la mayor cantidad

de inconsistencias, de tal manera que se contara con la máxima información posible para el análisis.

Una vez verificados los ratios de consistencia de cada una de las matrices tramitadas, se procedió a realizar la media geométrica de aquellas que cumplieron los umbrales establecidos, aclarando que la gran mayoría de las matrices cumplieron dichos umbrales, obteniendo así un promedio de las preferencias u opiniones de los expertos, con lo cual se minimiza el impacto de opiniones o valores extremos y se obtuvieron los vectores prioridad, o peso de cada criterio.

Con los pesos de cada criterio y la media geométrica de la valoración de las alternativas, respecto a cada criterio, se obtuvo la matriz de decisión.

Finalmente, se normalizó la matriz de decisión, mediante dos metodologías de normalización que conservan proporcionalidad, *Tabla 35* y *Tabla 36*, encontrando que los porcentajes de cada tecnología son prácticamente iguales por ambos métodos, ver *Tabla 37*.

Tabla 37. Resultados del Método AHP

	Normalización por método distributivo	Normalización por método Ideal
xDSL	21,23%	21,47%
HFC	23,50%	23,70%
FTTH	28,24%	27,90%
BPL	27,04%	26,94%

Respecto a los resultados se puede decir que:

Aunque la tecnología FTTH obtuvo el mayor porcentaje por los dos métodos de normalización, no supera a BPL en más de 10%, por lo cual se podría considerar un empate técnico entre estas dos tecnologías:

FTTH (28,24) vs BPL (27,04) = 4,24 %, de diferencia de FTTH sobre BPL (Met Distributivo).

FTTH (27,90) vs BPL (26,94) = 3,44 %, de diferencia de FTTH sobre BPL (Met Ideal).

Sin embargo, BPL, que es la segunda tecnología en porcentaje, supera en más de 10% a HFC, que es la tercera alternativa tecnológica en porcentaje:

BPL (27,04) vs HFC (23,50) = 13,09 % de diferencia de BPL sobre HFC (Met Distributivo).

BPL (26,94) vs HFC (23,70) = 12,02 % de diferencia de BPL sobre HFC (Met Ideal).

El estudio muestra una tendencia en preferir las tecnologías de última milla FTTH y BPL, sobre las tecnologías xDSL y HFC, para ser instaladas en los proyectos de vivienda 100% subsidiada ubicados en zonas apartadas y de baja densidad demográfica en Colombia.

5.4.11 Análisis de sensibilidad

Con el fin de confirmar la confiabilidad de los resultados obtenidos mediante la aplicación del método AHP, es importante realizar un análisis de la sensibilidad, lo cual se facilita y agiliza utilizando el software Expert Choice.

El Expert Choice es uno de los softwares líderes para la toma de decisiones multicriterio, que a través de la analítica basada en la ciencia permite traducir el conocimiento, la experiencia y la intuición del equipo (expertos) en medidas cuantitativas [93], y permite, entre otras, realizar análisis de sensibilidad, como son, de desempeño, dinámica, de gradiente, de diferencias ponderadas y gráfico de dos dimensión (ver *Figura 33*).

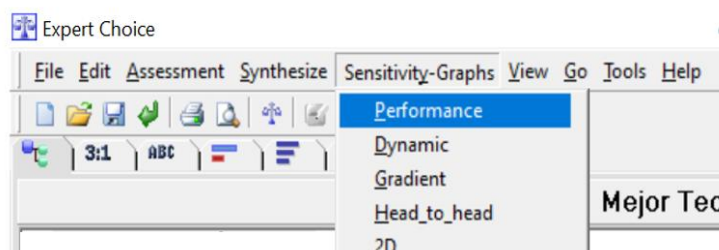


Figura 33. Opciones de análisis de sensibilidad

Fuente: Expert Choice

Para realizar el análisis de sensibilidad se varía el peso o valor de uno de los criterios, en este caso el peso de uno de los condicionantes, sin superar el 10% del valor, y seguidamente se revisa como son afectados los demás condicionantes y la priorización de las alternativas. Esto se puede hacer con cada uno de los condicionantes, de tal forma que se puedan revisar sus efectos.

A través del Expert Choice, y sus comparaciones por pares, se puede evaluar y visualizar la importancia de los criterios, las prioridades o preferencias de las alternativas, las probabilidades de los escenarios y sintetizar sus comparaciones para tomar la mejor decisión posible.

Este software ha sido utilizado para múltiples tipos de aplicaciones como evaluación de proyectos, planeación estratégica, análisis costo/beneficio, negociación y solución de conflictos, administración de calidad total, evaluación y promoción de empleados, satisfacción del cliente, etc, y ha servido de apoyo para grandes compañías como IBM, Good Year, Ford Motor Co, Texaco, GM, 3M, AT&T, T/Bell Labs, NASA, MIT, entre muchas otras [41].

Como primer paso para llegar al análisis a través del software Expert Choice, se introdujo la jerarquía o estructuración del caso en estudio, tal como se describió en el numeral 5.3.1 *PASO 1: Descomposición del problema en una jerarquía.*, donde en el vértice superior se sitúa el objetivo que se busca, en el siguiente nivel, en orden descendente, se ubican los condicionantes, los cuales a su vez se descomponen en otros subcriterios generando otra jerarquía descendente. Por último, en el nivel más bajo de la jerarquía se ubican las alternativas, que son las posibles opciones tecnológicas que se tienen.

En este paso es importante indicar que, debido a que la versión utilizada del Expert Choice para el presente análisis no acepta más de 9 criterios para un nodo, el condicionante “Técnico” que posee 11 criterios se hace necesario dividirlo en dos condicionantes, así, “Técnico1” con 6 criterios y “Técnico2” con 5 criterios, por lo cual, a la matriz de decisión presentada en la *Tabla 32* se le realizó un ajuste, exclusivamente en los pesos del condicionante “Técnico” y sus criterios, sin que esto altere el ejercicio. Los resultados se presentan en la *Tabla 38. Matriz de decisión ajustada para Expert Choice.*

En la *Tabla 32* el condicionante “Técnico” tiene un peso de 0,1924 (19,24%), y la sumatoria del peso de sus criterios es de 1 (100%), por lo tanto se efectuaron los cálculos necesarios para agrupar los primeros 6 criterios, que pesan 68,03%, y los últimos 5 que pesan 31,97%, sin que se alteren los pesos en la globalidad del ejercicio. Para un mejor entendimiento se presenta el siguiente análisis:

Los primeros 6 criterios del condicionante “Técnico” pesan 68,03%, por lo cual el peso del condicionante “Tecnico1” es:

$$19,24\% \times 68,03\% = \mathbf{13,09\%}$$

Los últimos 5 criterios del condicionante “Técnico” pesan 31,97%, por lo cual el peso del condicionante “Tecnico2” es:

$$19,24\% \times 31,97\% = \mathbf{6,15\%}$$

La suma de “Técnico1” + “Técnico2” debe ser igual al condicionante “Técnico”:

$$13,09\% + 6,15\% = \mathbf{19,24\%}$$

De la misma manera, a los criterios que ahora componen a “Técnico1” y “Técnico2” se les calcula el nuevo peso de manera proporcional. Un ejemplo sería el siguiente:

El criterio “Fiabilidad” pesa 0,2223 (22,23%) dentro del total (100%) de los 11 criterios del Condicionante “Técnico” en la *Tabla 32*, lo cual significa que ahora dentro del condicionante “Técio1”, que agrupa solo 6 criterios, se le debe calcular la correspondiente proporcionalidad. Se debe tener en cuenta que los 6 criterios pesan 0,6803 (68,03%) en la *Tabla 32*, por lo cual, el peso para el criterio “Fiabilidad” de la *Tabla 38* se calcula así:

$$0,2223 / 0,6803 = 0,3268 \text{ (32,68\%)}$$

Para comprobar que el ajuste es adecuado, se calcula el peso total que dentro del ejercicio tienen el criterio “Fiabilidad”, tanto de la *Tabla 32. Matriz de decisión*, como de la *Tabla 38. Matriz de decisión ajustada para Expert Choice*, verificando que se obtiene el mismo valor final, así:

$$\text{De la } \textit{Tabla 32} \quad 0,1924 \times 0,2223 = 0,0427 \text{ (4,27\%)}$$

$$\text{De la } \textit{Tabla 38} \quad 0,1309 \times 0,3268 = 0,0427 \text{ (4,27\%)}$$

Lo anterior significa que, cada uno de los criterios que componen el condicionante “Técnico1” toman el valor que tenían en la *Tabla 32. Matriz de decisión* dividido en 0,6803, y los criterios que componen el condicionante “Técnico2” toman el valor que tenían en la *Tabla 32. Matriz de decisión* dividido en 0,3197.

Tabla 38. Matriz de decisión ajustada para Expert Choice

CONDICIONANTE	CRITERIO	PESO CONDICIONANTE	PESO CRITERIO	Media Geométrica Valoración de Expertos (Alternativas)			
				xDSL	HFC	FTTH	BPL
Técnico 1	Fiabilidad	0,1309	0,3268	3,7279	6,6939	9,0000	6,1278
	Fácil mantenimiento		0,1982	3,7585	3,5195	5,7059	6,1531
	Interoperabilidad		0,1367	4,7894	5,2614	6,2738	5,7708
	Fácil instalación		0,1604	3,3145	3,6801	5,0080	7,3305
	Escalabilidad		0,0843	2,8252	6,2841	8,5588	4,7429
	Ancho de banda		0,0936	2,0477	5,4038	9,0000	4,7818
Técnico 2	Uso de Energía	0,0615	0,2102	5,1940	2,9542	5,9088	5,5555
	Interferencia		0,3238	2,9926	5,6738	8,0018	2,3522
	Caracterización de red		0,1306	6,2386	5,0000	6,9035	2,2206
	Potencial futuro		0,1872	2,1689	4,3174	8,5588	5,1146
	Madurez tecnológica		0,1482	3,3470	5,3566	9,0000	2,9926
Infraestructura	Seguridad de infraestructura física	0,2101	0,2627	2,7663	4,9593	6,9712	6,6729
	Uso propuesto		0,1129	4,7818	5,9328	6,8535	2,2679
	Acceso a infraestructura existente		0,1975	4,1694	4,8559	4,9673	8,5588
	Tiempo de despliegue		0,0858	3,5944	3,5540	5,3566	7,1599
	Mantenimiento		0,2070	2,9302	3,8168	5,3868	5,7203
	Vida útil de la red		0,1342	3,4657	4,6821	6,8818	7,1895
Económico	Costo de operación (Opex)	0,2646	0,2646	4,7894	3,5195	4,9673	8,1649
	Costo de capital (Capex)		0,1776	3,5540	2,8252	4,1289	6,6939
	Costo de instalación (para el usuario)		0,1230	4,3174	3,8981	4,4163	5,6968
	Costos adicionales (para el usuario)		0,0675	3,6502	5,7203	5,1228	4,6179
	Costos de suscripción mensual		0,3672	4,7894	5,5016	4,7238	6,0933
Socio / Cultural	Asequibilidad	0,1743	0,7898	4,4777	5,1435	4,4163	5,6968
	Conocimiento de la tecnología		0,2102	6,6289	6,3458	7,0000	1,6438
Regulatorio / Político	Derechos de paso	0,0950	0,2200	5,7203	5,1146	5,4707	4,2410
	Compartición de infraestructura		0,7800	6,2841	5,2319	6,3196	1,4310
Ambiental	Impacto ambiental	0,0636	0,1453	3,5195	3,4657	4,0201	7,8155

				Media Geométrica Valoración de Expertos (Alternativas)			
CONDICIONANTE	CRITERIO	PESO CONDICIONANTE	PESO CRITERIO	xDSL	HFC	FTTH	BPL
	Condiciones climáticas		0,4132	3,5195	4,3843	7,4324	1,7826
	Uso de la red		0,1975	3,4375	3,7585	4,2823	8,5588
	Vida útil de la red		0,2439	4,5731	3,7585	4,1289	7,4324

Después de tener la matriz de decisión ajustada, para trabajar en el software, en la *Figura 34* se presenta la imagen del Expert Choice con la jerarquía del caso en estudio, mostrando en la parte superior el objeto de la decisión que se quiere tomar, y hacia abajo los diferentes niveles jerárquicos, por tanto, en el segundo nivel de jerarquía se tienen los condicionantes, en el tercer nivel los criterios que componen cada condicionante y finalmente, en la parte inferior, las alternativas tecnológicas que se contemplan. Se aclara que, con el fin de facilitar la presentación en este documento, para el nivel 3 solo se muestran los criterios contenidos en el condicionante “Económico”.

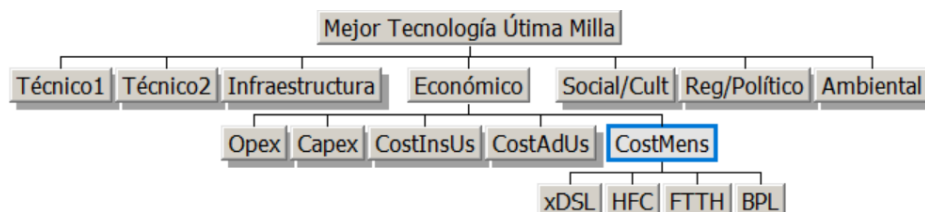


Figura 34. Árbol de jerarquía

Fuente: Expert Choice

Posterior a tener la estructura jerárquica, se alimenta el Expert Choice con los datos de los pesos (vectores prioridad) de condicionantes y criterios, y adicionalmente con la información de las valoraciones (normalizadas) que los expertos dieron a cada una de las alternativas tecnológicas respecto a cada uno de los 30 criterios considerados. En seguida, se procede a revisar que los datos presentados por el Expert Choice, *Figura 35*, sean iguales, o presentan variaciones mínimas (como resultado de la cantidad de decimales usados para las operaciones matemáticas) a los que se calcularon en el AHP anteriormente, esto con el fin de asegurar la fiabilidad del análisis de sensibilidad a realizar.

En la *Figura 35* se aprecia la estructura jerárquica de los condicionantes y sus criterios, acompañada de los pesos local (L) y global (G).

Para el caso de los condicionantes, los pesos Locales (L) representan el peso (prioridad) de cada uno de los condicionantes, donde la sumatoria de los pesos locales de todos los condicionantes es 1. Para el caso de los criterios, los pesos Locales (L) representan el peso (prioridad) de cada uno de los criterios dentro de su correspondiente condicionante, donde la sumatoria es de 1. Respecto a los pesos globales (G), para el caso de los condicionantes, este peso es igual al peso local (L), para el caso de los criterios, el peso global (G) es el resultado del peso local (L) del criterio por el peso global del condicionante al que pertenece.

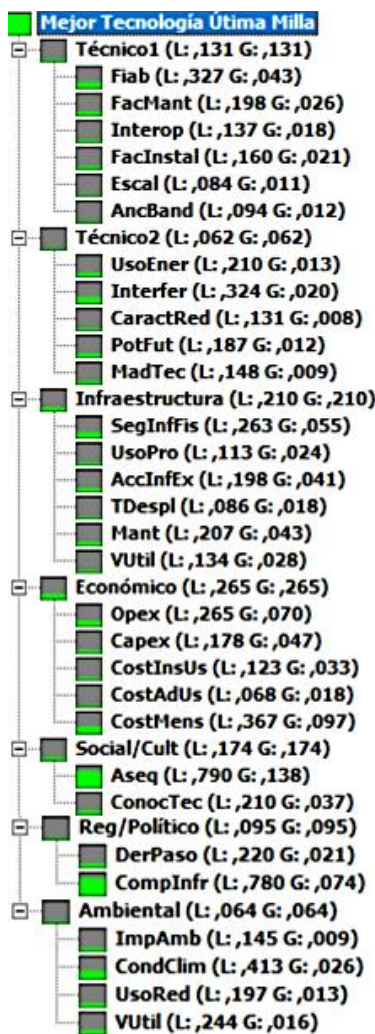


Figura 35. Pesos de condicionantes y criterios

Fuente: Expert Choice

En la *Figura 36* se presentan los pesos de los diferentes condicionantes, ordenados de mayor a menor.



Figura 36. Pesos de los condicionantes

Fuente: Expert Choice

El Expert Choice también arroja el resultado de cada una de las alternativas tecnológicas en evaluación, resultado que es calculado por los dos métodos de normalización, distributivo (*Figura 37*) e ideal (*Figura 38*). Estos resultados coinciden con los resultados presentados anteriormente en la *Tabla 37. Resultados del Método AHP*.

Cabe recordar que las normalizaciones son efectuadas tal como se explicó en el numeral 5.4.9.

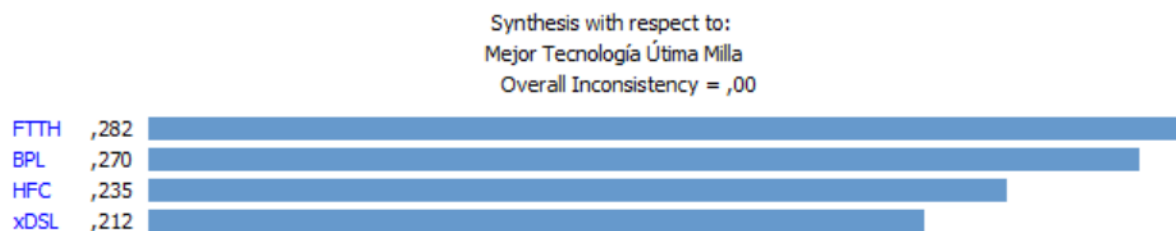


Figura 37. Resultado mejor tecnología, método distributivo

Fuente: Expert Choice

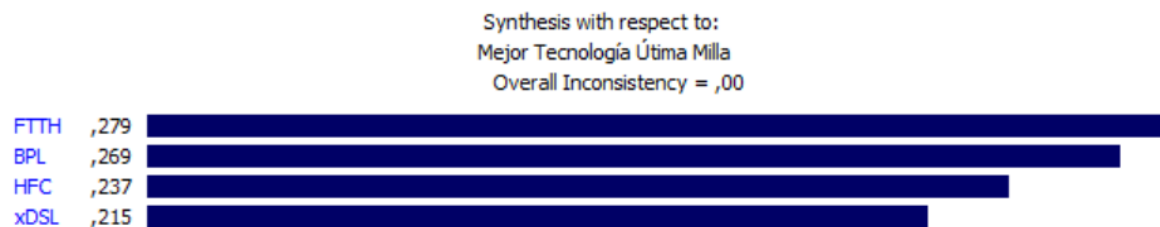


Figura 38. Resultado mejor tecnología, método ideal

Fuente: Expert Choice

Finalmente, antes de iniciar el análisis de sensibilidad mediante la variación del peso de los diferentes condicionantes, se presenta la gráfica efectuada por el Expert Choice para el método distributivo, *Figura 39*, la cual permite una mejor visualización del comportamiento de cada alternativa tecnológica respecto a cada uno de los condicionantes y su resultado final.

En la *Figura 39* cada alternativa tecnológica es representada por una línea de diferente color, facilitando conocer en que condicionantes tiene ventajas o fortalezas que pueden ser potencializadas o, por el contrario, en cuáles de ellos está en desventaja y tiene retos que afrontar respecto a las otras tecnologías.

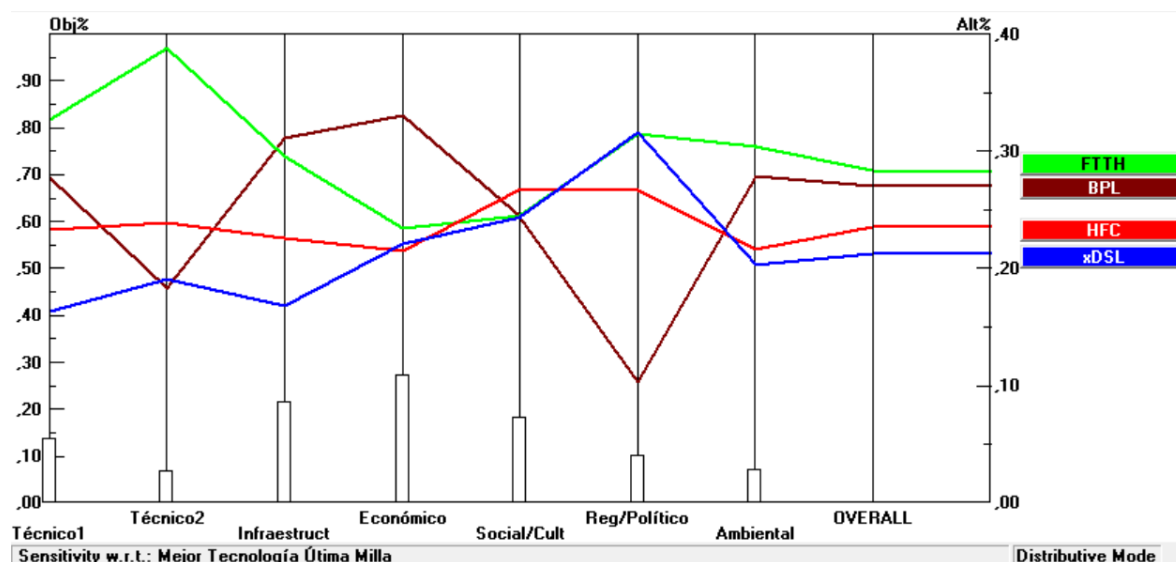


Figura 39. Comportamiento de Alternativas Vs Condicionantes

Fuente: Expert Choice

En la *Figura 39* se puede apreciar que, las dos tecnologías que presentan ventaja en el resultado final, FTTH y BPL, tienen aspectos que revisar especialmente en lo relacionado con temas socio/culturales, y para el caso de BPL en temas técnicos y regulatorio/políticos. A su vez, para FTTH se identifican grandes fortalezas en aspectos técnicos, regulatorio/político y ambientales, mientras que BPL muestra fortalezas en los aspectos de infraestructura y económicos.

5.4.11.1 Sensibilidad a variaciones menores al 10%

En este numeral se muestra el comportamiento que tienen las alternativas tecnológicas cuando se efectúan variaciones menores al 10% en el peso de alguno de los condicionantes, lo cual se hace con el fin de establecer si los resultados previamente obtenido son consistentes y si se mantienen las tendencias o preferencias encontradas.

En *Figura 40*, *Figura 41* y *Figura 42*, se presentan gráficamente algunos de los resultados del análisis de sensibilidad dinámico del Expert Choice, obtenidos al realizar variaciones menores al 10% en los condicionantes de infraestructura, económico y socio/cultural.

En la *Figura 40* se presenta el resultado gráfico de variar el peso del condicionante de infraestructura pasando de 21% a 18,9%.

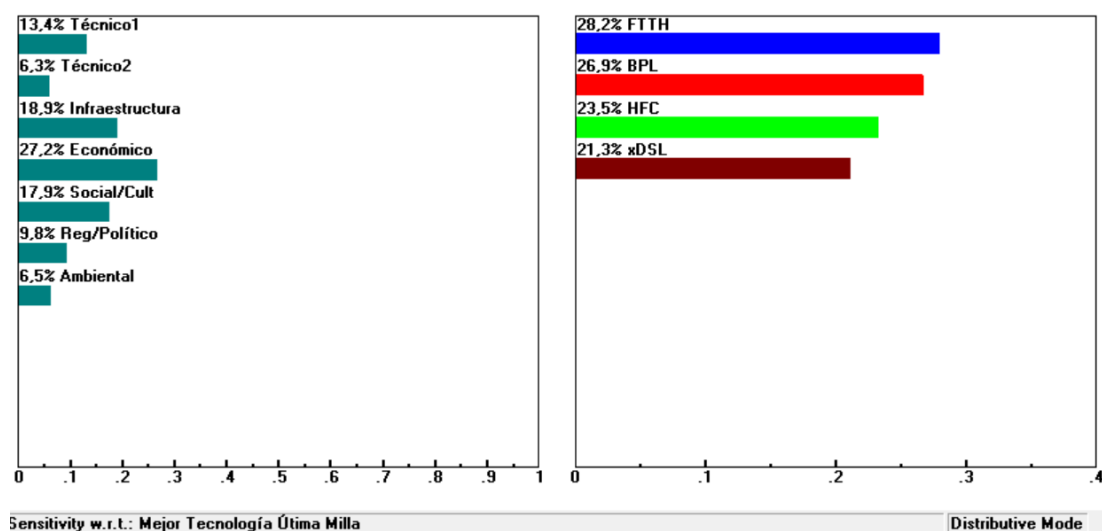


Figura 40. Análisis de sensibilidad dinámico – variación en condicionante “Infraestructura”

Fuente: Expert Choice

En la *Figura 41* se presenta el resultado gráfico de variar el peso del condicionante económico pasando de 26,5% a 24%.

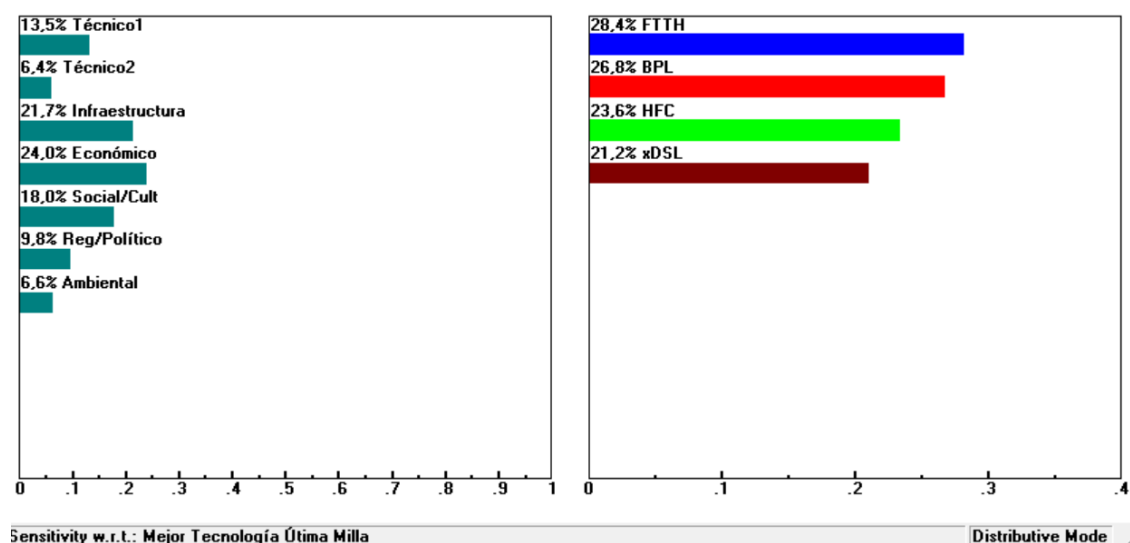


Figura 41. Análisis de sensibilidad dinámico – variación en condicionante “Económico”

Fuente: Expert Choice

En la *Figura 42* se presenta el resultado gráfico de variar el peso del condicionante socio/cultural pasando de 17,4% a 18,9%.

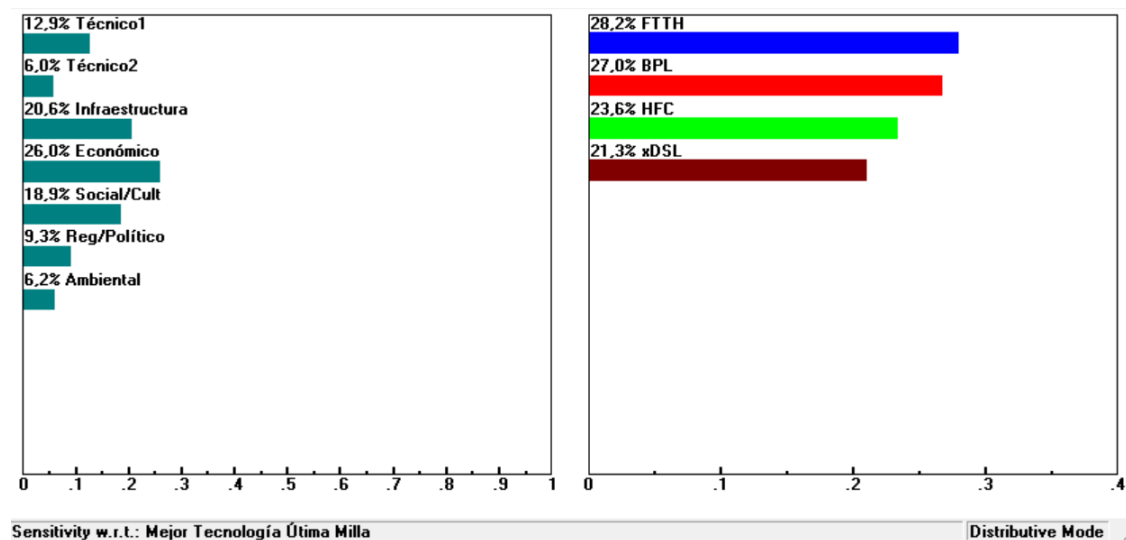


Figura 42. Análisis de sensibilidad dinámico – variación en condicionante “Socio/Cultural”

Fuente: Expert Choice

El total de las simulaciones efectuadas para establecer la sensibilidad, con variaciones menores al 10%, se presentan en la *Tabla 39*, donde en la primera línea se muestran los pesos iniciales de los condicionantes y el resultado de las alternativas tecnológicas por el método distributivo. En cada una de las siguientes líneas se resalta y sombrea el condicionante modificado, y se presentan los datos obtenidos para los demás condicionantes y las alternativas tecnológicas.

Tabla 39. Análisis de sensibilidad con variaciones menores al 10% (modo distributivo)

Condicionantes							Alternativas tecnológicas			
Técnico1	Técnico2	Infraestructura	Económico	Social / Cultural	Regulatorio / Político	Ambiental	xDSL	HFC	FTTH	BPL
13,1	6,2	21	26,5	17,4	9,5	6,4	21,2	23,5	28,2	27
14,5	6	20,7	26	17,1	9,3	6,3	21,1	23,5	28,3	27,1
12	6,2	21,3	26,8	17,7	9,6	6,4	21,3	23,5	28,2	27
13	6,8	20,9	26,3	17,3	9,4	6,3	21,2	23,5	28,3	27
13,2	5,6	21,1	26,6	17,5	9,6	6,4	21,2	23,5	28,2	27,1
13,4	6,3	18,9	27,2	19,9	9,8	6,5	21,3	23,5	28,2	26,9
12,8	6	23	25,8	17	9,3	6,2	21,1	23,5	28,3	27,1
13,5	6,4	21,7	24	18	9,8	6,6	21,2	23,6	28,4	26,8
12,7	5,9	20,3	28,9	16,9	9,2	6,1	21,3	23,4	28,1	27,2
12,9	6	20,6	26	18,9	9,3	6,2	21,3	23,6	28,2	27
13,3	6,3	21,4	27	15,8	9,7	6,5	21,2	23,4	28,3	27,1
13	6,1	20,8	26,2	17,3	10,4	6,3	21,3	23,5	28,3	26,9
13,2	6,2	21,2	26,7	17,6	8,6	6,4	21,1	23,5	28,2	27,2
13	6,1	20,8	26,3	17,3	9,4	7,1	21,2	23,5	28,3	27
13,2	6,2	21,1	26,6	17,5	9,6	5,8	21,2	23,5	28,2	27

Revisados los datos obtenidos en la *Tabla 39*, se confirma que los datos obtenidos son consistentes, pues al efectuarse una variación de hasta el 10% en los valores de los condicionantes, los valores de las alternativas sufren variaciones mínimas, manteniéndose prácticamente los mismos resultados en todas las simulaciones, concluyendo que la sensibilidad de los resultados es mínima ante este tipo de variaciones.

Dado lo anterior, se procede a realizar variaciones más significativas, mayores al 10% en los condicionantes, con el fin de establecer cómo se afectarían los resultados ante escenarios hipotéticos con altas variaciones en los valores.

5.4.11.2 Sensibilidad a variación mayores al 10%

En la *Tabla 40* se registran las simulaciones efectuadas, por el método distributivo, con variaciones cercanas al 50%, y en algunos casos cercanas al 100%, con el fin de revisar la sensibilidad que tendrían los resultados ante tales asunciones.

Tabla 40. Análisis de sensibilidad con variaciones mayores al 10% (modo distributivo)

Condicionantes							Alternativas tecnológicas			
Técnico1	Técnico2	Infraestructura	Económico	Social / Cultural	Regulatorio / Político	Ambiental	xDSL	HFC	FTTH	BPL
13,1	6,2	21	26,5	17,4	9,5	6,4	21,2	23,5	28,2	27
23,5	5,4	18,5	23,3	15,3	8,4	5,6	20,6	23,5	28,8	27,1
4	6,8	23,2	29,2	19,2	10,5	7	21,7	23,5	27,8	27
12,5	10,4	20,1	25,3	16,6	9,1	6,1	21,1	23,5	28,7	26,6
13,5	3	21,7	27,4	18	9,8	6,6	21,3	23,5	27,9	27,3
11,4	5,4	31,2	23	15,2	8,3	5,5	20,7	23,4	28,4	27,6
14,9	7	9,9	30,2	19,9	10,8	7,3	21,8	23,6	28,1	26,5
10,8	5,1	17,4	39,2	14,4	7,9	5,3	21,4	23,1	27,4	28,1
14,9	7	23,9	16,3	19,8	10,8	7,2	21,1	23,8	28,9	26,2
11,7	5,5	18,7	23,6	26,3	8,5	5,7	21,6	23,8	27,8	26,8
14,5	6,8	23,2	29,3	8,6	10,5	7	20,9	23,1	28,6	27,3
12,4	5,8	20	25,1	16,6	14	6	21,7	23,7	28,4	26,2
13,8	6,5	22,1	27,8	18,3	4,8	6,7	20,7	23,3	28,1	27,9
11,8	5,5	18,9	23,9	15,7	8,6	15,6	21,1	23,3	28,4	27,1
13,6	6,4	21,8	27,4	18,1	9,8	3	21,3	23,6	28,2	27

De acuerdo con los datos de la *Tabla 40*, se puede evidenciar que los valores de las alternativas tecnológicas sufren cambios mayores a los sufridos cuando las variaciones fueron inferiores al 10%, sin embargo, estos cambios en general están por debajo del 3%. Adicionalmente, el orden de las preferencias tecnológicas se conserva, manteniéndose en primer lugar FTTH, seguida de BPL, HFC y xDSL respectivamente. Solo cuando se incrementa en cerca del 50% o más el condicionante económico, BPL supera a FTTH (datos en rojo en la *Tabla 40*), sin embargo, al igual que en todas las demás simulaciones, la diferencia entre estas tecnologías no es superior al 10%, manteniéndose el empate técnico que se había registrado con los datos iniciales. Cabe señalar que, el comportamiento de las valoraciones de las tecnologías FTTH y BPL, al incrementar el peso del condicionante

económico, tiene sentido, pues tal como se aprecia en la *Figura 39*, BPL domina de manera importante en el condicionante económico, lo cual hace que al incrementar sustancialmente el peso de dicho condicionante, BPL se acerque y hasta supere a FTTH.

Para reconfirmar los resultados anteriores, se realizó el análisis de sensibilidad por el método ideal, conservando las mismas variaciones a los condicionantes, ver *Tabla 41*, obteniendo resultados similares, evidenciando que, pese a la gran variación porcentual en los condicionantes, los datos siguen siendo consistentes, por lo cual, los resultados del método AHP ejecutado son confiables.

Tabla 41. Análisis de sensibilidad con variaciones mayores al 10% (modo ideal)

Condicionantes							Alternativas tecnológicas			
Técnico1	Técnico2	Infraestructura	Económico	Social / Cultural	Regulatorio / Político	Ambiental	xDSL	HFC	FTTH	BPL
13,1	6,2	21	26,5	17,4	9,5	6,4	21,2	23,5	28,2	27
23,5	5,4	18,5	23,3	15,3	8,4	5,6	20,9	23,6	28,4	27
4	6,8	23,2	29,2	19,2	10,5	7	22	23,8	27,4	26,8
12,5	10,4	20,1	25,3	16,6	9,1	6,1	21,4	23,7	28,4	26,6
13,5	3	21,7	27,4	18	9,8	6,6	21,5	23,7	27,6	27,2
11,4	5,4	31,2	23	15,2	8,3	5,5	20,9	23,5	28,1	27,5
14,9	7	9,9	30,2	19,9	10,8	7,3	22,1	23,9	27,6	26,4
10,8	5,1	17,4	39,2	14,4	7,9	5,3	21,6	23,4	27,1	27,9
14,9	7	23,9	16,3	19,8	10,8	7,2	21,4	23,9	28,5	26,2
11,7	5,5	18,7	23,6	26,3	8,5	5,7	21,8	24	27,5	26,7
14,5	6,8	23,2	29,3	8,6	10,5	7	21,2	23,4	28,3	27,2
12,4	5,8	20	25,1	16,6	14	6	22	23,8	28,1	26,1
13,9	6,5	22,3	28,1	18,5	3,8	6,8	20,9	23,5	27,7	27,9
11,8	5,5	18,9	23,9	15,7	8,6	15,6	21,4	23,5	28,1	27,1
13,6	6,4	21,8	27,4	18,1	9,8	3	21,5	23,8	27,8	26,9

5.4.11.3 Comparación entre tecnologías

Es importante dar un vistazo a las ventajas (fortalezas) y desventajas (retos o debilidades) que cada una de las tecnologías dominantes en el ejercicio, FTTH y BPL, tienen respecto a cada una de las otras tecnologías, lo cual es fundamental para sacar conclusiones.

En Figura 43, Figura 44, Figura 45, obtenidas del Expert Choice, se muestra el cara a cara entre la tecnología FTTH y las otras tecnologías consideradas en el estudio, tomando como base la información del método distributivo. Se Evidencia que FTTH, respecto a las otras 3 tecnologías, tiene ventajas en los aspectos técnicos y ambientales, sin embargo, respecto a su principal competidor BPL tiene retos importantes a considerar, relacionados con los aspectos de infraestructura y económicos.

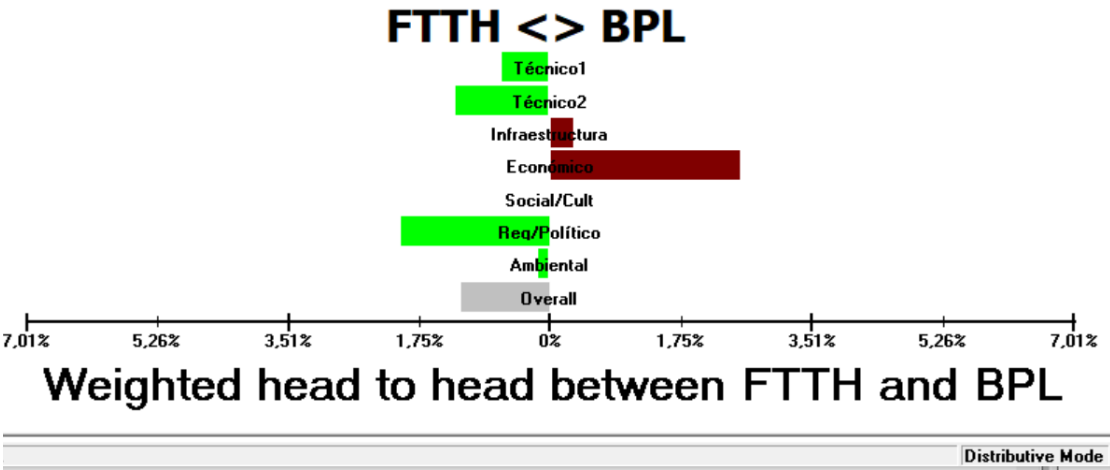


Figura 43. FTTH vs BPL
Fuente: Expert Choice

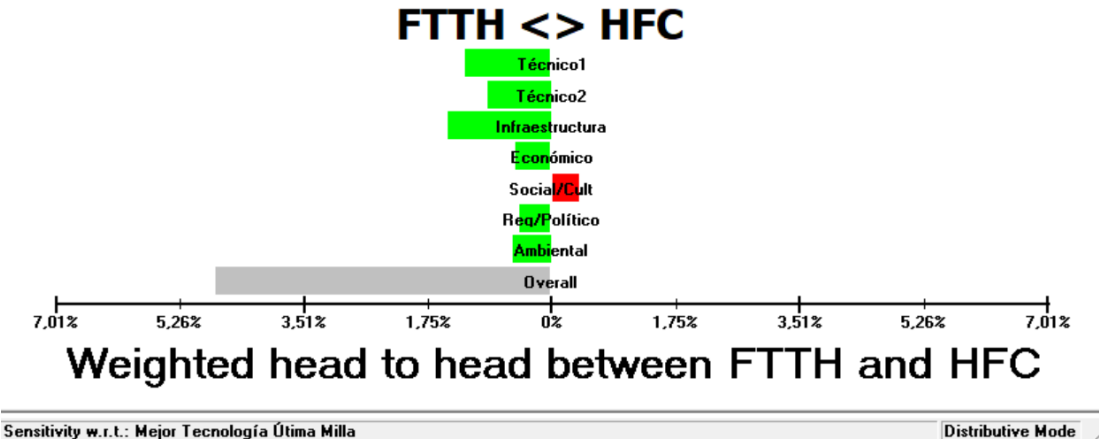


Figura 44. FTTH vs HFC
Fuente: Expert Choice

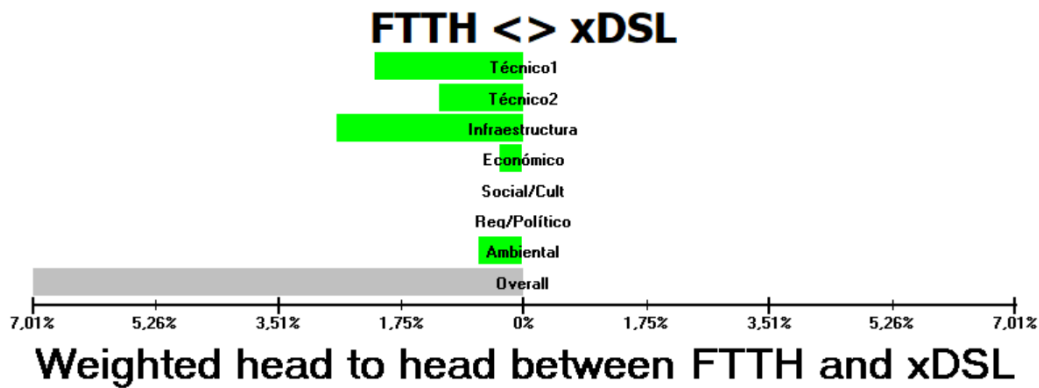


Figura 45. FTTH vs xDSL

Fuente: Expert Choice

En Figura 43, Figura 46 y Figura 47, obtenidas del Expert Choice, se muestra el cara a cara entre la tecnología BPL y las otras tecnologías consideradas en el estudio, tomando como base la información del método distributivo. Se aprecia que BPL, respecto a las otras 3 tecnologías, tiene ventajas importantes en los aspectos de infraestructura y económicos, sin embargo, respecto a su principal competidor FTTH tiene retos importantes a considerar en los aspectos técnicos, regulatorio político y ambiental.

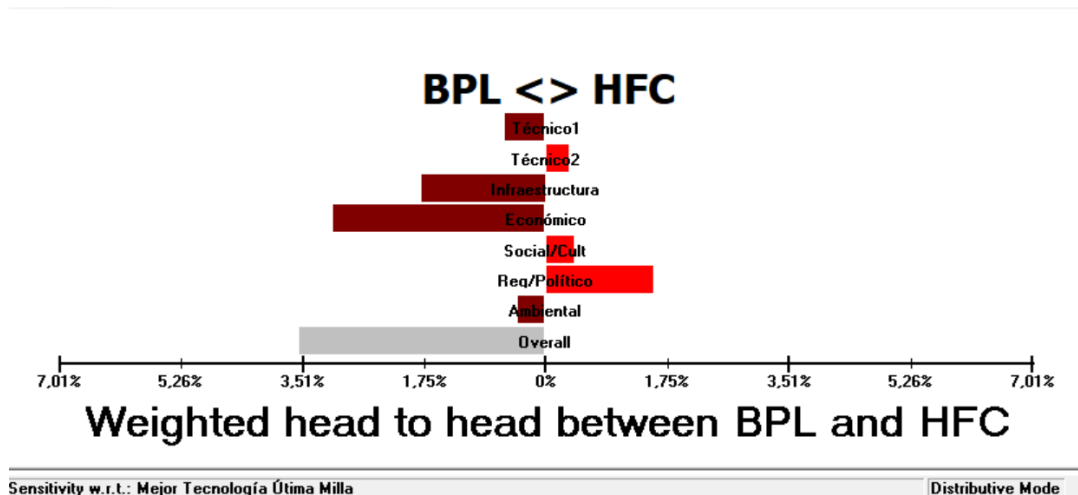


Figura 46. BPL vs HFC

Fuente: Expert Choice

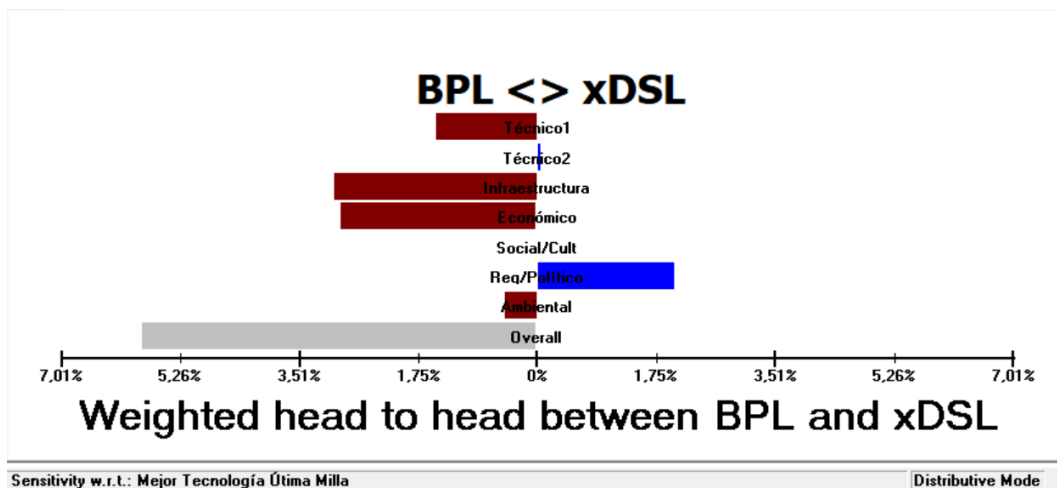


Figura 47. BPL vs xDSL

Fuente: Expert Choice

6 CONDICIONES NECESARIAS PARA VIABILIZAR LA IMPLEMENTACIÓN DE LA TECNOLOGÍA BPL EN PROYECTOS DE VIVIENDAS 100% SUBSIDIADAS, UBICADOS EN ZONAS APARTADAS Y DE BAJA DENSIDAD DEMOGRÁFICA EN COLOMBIA

Después de aplicado el método AHP y determinar que, de las cuatro tecnologías de última milla evaluadas, las tecnologías FTTH y BPL presentan un empate técnico para ser escogidas como la mejor opción para prestar el servicio de acceso fijo a internet en la zona objetivo del presente estudio, es claro que existe viabilidad para la implementación de la tecnología BPL en dicha zona, sin embargo, es importante entrar a revisar cuales son los condicionantes en los cuales, según el criterio de los expertos, BPL cede ante FTTH, de tal forma que se puedan determinar los aspectos necesarios para hacer de BPL la mejor opción tecnológica a ser implementada en la zona objetivo.

De acuerdo con la *Figura 39. Comportamiento de Alternativas Vs Condicionantes*, los aspectos o condicionantes en los cuales FTTH aventaja a BPL son: Técnico, Regulatorio/Político y Ambiental. De manera más específica, los condicionantes que favorecen a cada una de estas tecnologías se puede visualizar en la *Figura 43. FTTH vs BPL*.

En los siguientes numerales se abordan cada uno de los condicionantes que, de acuerdo con los resultados del AHP, favorecen a la tecnología FTTH, con el fin de realizar el análisis correspondiente en búsqueda de los aspectos que inclinarían la balanza a favor de BPL.

6.1 ASPECTOS TÉCNICOS

Al revisar el condicionante técnico en la *Tabla 35. Matriz final - método distributivo* (los valores de esta matriz ya considera los pesos de los condicionantes, criterios y las valoraciones dadas por los expertos a las alternativas) e identificar las diferencias de valor entre la tecnología FTTH y BPL, como se muestra en la *Tabla 42*, se puede ver que FTTH supera a BPL en 9 de los 11 criterios evaluados, siendo los más significativos, a su favor, los criterios de fiabilidad, ancho de banda, interferencia y madurez tecnológica.

Respecto a los criterios de fiabilidad y ancho de banda, los expertos manifestaron que pese a que el servicio de internet a suministrar en la zona objetivo, no es banda ancha,

consideran que la disponibilidad del servicio y el potencial de ancho de banda que brindan los sistemas ópticos son superiores a las otras tecnologías, y a mediano plazo, cuando la apropiación del servicio se dé por parte de las comunidades atendidas, es mejor tener una red lista para prestar servicios más avanzados.

Tabla 42. Diferencia FTTH vs BPL - Condicionante técnico

CONDICIONANTE	CRITERIO	Matriz Final (método distributivo)				Diferencia FTTH vs BPL	%
		xDSL	HFC	FTTH	BPL		
Técnico	Fiabilidad	0,0062	0,0112	0,0151	0,0103	0,0048	25%
	Fácil mantenimiento	0,0051	0,0048	0,0077	0,0083	- 0,0006	-3%
	Interoperabilidad	0,0039	0,0043	0,0051	0,0047	0,0004	2%
	Fácil instalación	0,0036	0,0040	0,0054	0,0080	- 0,0025	-13%
	Escalabilidad	0,0014	0,0031	0,0042	0,0023	0,0019	10%
	Ancho de banda	0,0012	0,0031	0,0052	0,0028	0,0024	13%
	Uso de Energía	0,0034	0,0019	0,0039	0,0037	0,0002	1%
	Interferencia	0,0031	0,0059	0,0084	0,0025	0,0059	31%
	Caracterización de red	0,0025	0,0020	0,0027	0,0009	0,0018	10%
	Potencial futuro	0,0012	0,0025	0,0049	0,0029	0,0020	10%
	Madurez tecnológica	0,0015	0,0024	0,0040	0,0013	0,0026	14%
Suma						0,0190	

Respecto al criterio de interferencia electromagnética, es claro que los sistemas ópticos por ser dieléctricos no están sujetos a este tipo de afectaciones que sí pueden ser un inconveniente en los sistemas BPL, pues estos pueden recibir o generar diversos tipos de interferencias en su trayectoria, un ejemplo podrían ser las interferencias generadas hacia o desde los servicios de telecomunicaciones inalámbricas existentes en la zona objetivo y que operen en el mismo rango de frecuencias.

Respecto al criterio de madurez tecnológica, los expertos manifestaron que, para la prestación del servicio de acceso a internet, la tecnología FTTH tiene un grado de avance y madurez muy alto respecto a los sistemas BPL, siendo este uno de los principales factores que favorecen al rápido incremento de la penetración de dicha tecnología. Pese a lo

anterior, los expertos reconocen que los sistemas BPL han dado pasos importantes en los sistemas de Smart Grid, para la medición y control en redes de energía, donde está ganando penetración, que sumado al potencial que se avizora de BPL para servicios de IoT en general, harán que en el mediano plazo muy seguramente se recobre el interés de la tecnología BPL para la prestación masiva del servicio de acceso a internet.

Por lo anterior, se podría concluir, respecto al condicionante técnico, que para potencializar el uso de la tecnología BPL en la zona objetivo, se requeriría:

- Realizar estudios, en la zona objetivo, respecto de la verdadera necesidad que se tendrían en ancho de banda, a mediano plazo, con el fin de establecer si realmente requieren de tecnologías ópticas de última milla, cuando los sistemas BPL, como se muestra en la *Tabla 6. Comparación tecnologías de última milla más utilizadas en Colombia*, pueden brindar cientos de Mbps de tasa de transmisión, lo cual podría ser suficiente para atender las necesidades particulares de dichas zonas. Esto con el fin de que los PRST opten por soluciones ajustadas a las necesidades reales de los sitios a atender.
- Realizar estudios de interferencia puntuales en las zonas objetivo, especialmente en lo relacionado con servicios de telecomunicaciones inalámbricas existentes en el área, que operen en las bandas HF y VHF, para establecer si realmente puedan afectar o verse afectados por los sistemas BPL. Esto con el fin de demostrar, muy seguramente, el bajo riesgo de interferencia y hacer más atractiva la tecnología. Lo anterior, obviamente, sumado a avances en el desarrollo de la tecnología BPL, que propendan por menores efectos de interferencia electromagnética.
- Continuar avanzando en la implementación de redes inteligentes de energía en Colombia, de acuerdo con el mapa de ruta publicado por la UPME [94], para promover el avance en la penetración de los sistemas BPL como tecnología para Smart Grids, facilitando que los PRST y operadores eléctricos impulsen esta tecnología como soporte fundamental para el IoT, de tal manera que esta masificación de servicios sobre BPL, redunde en el retorno del interés para la prestación de servicios masivos de Internet sobre las redes de energía.

6.2 ASPECTOS REGULATORIO / POLÍTICOS

Cuando se revisa el condicionante Regulatorio/Político, en la *Tabla 35. Matriz final - método distributivo*, y se identifican las diferencias de valor entre la tecnología FTTH y BPL, como se muestra en la *Tabla 43*, se aprecia que FTTH supera a BPL en los 2 criterios evaluados, siendo el criterio de compartición de infraestructura, que se refiere al menor grado de necesidad de uso de infraestructura existente para lograr el despliegue, el que marca la gran diferencia con BPL.

Tabla 43. Diferencia FTTH vs BPL - Condicionante regulatorio/político

CONDICIONANTE	CRITERIO	Matriz Final (método distributivo)				Diferencia FTTH vs BPL	%
		xDSL	HFC	FTTH	BPL		
Regulatorio / Político	Derechos de paso	0,0058	0,0052	0,0056	0,0043	0,0013	6%
	Compartición de infraestructura	0,0242	0,0201	0,0243	0,0055	0,0188	94%
Suma						0,0201	

De acuerdo con lo expresado por los expertos, la compartición de infraestructura, desde el punto de vista de negociar el uso de los cables eléctricos para la instalación de la tecnología BPL, es percibida como una barrera, pues si bien existe regulación para el uso o compartición de infraestructura, las negociaciones con los operadores eléctricos usualmente son dispendiosas y demoradas, lo cual hace que los PRST traten de depender lo mínimo posible de este tipo de situaciones. Los expertos manifiestan que la sola negociación del uso de los postes de energía para el apoyo de los cables de telecomunicaciones, frecuentemente resulta ser complicada, razón por la cual consideran que negociar el uso del cable de energía sería mucho más dispendioso.

Pese a lo anterior, se espera que esta situación mejore con la aplicación de lo enunciado en la ley de modernización del sector TIC (Ley 1978 de 2019), la cual, en su Artículo 19, señala que la Comisión de Regulación de Comunicaciones (CRC) es el órgano encargado de, entre otros, promover la competencia en los mercados, regular los mercados de las redes y los servicios de comunicaciones, con el fin de que la prestación de los servicios sea

económicamente eficiente y refleje altos niveles de calidad de las redes y de los servicios de comunicaciones, y adicionalmente indica que la nueva CRC adoptará una regulación que, entre otras, promueva la inversión, la calidad de los servicios, la simplificación regulatoria, la neutralidad de la red, e incentive la construcción de un mercado competitivo [95].

Es importante indicar que desde la promulgación de la ley de modernización, la CRC es autónoma para definir las condiciones en las cuales podría ser utilizada o remunerada la infraestructura eléctrica en la prestación de servicios de telecomunicaciones, ya que no requiere coordinar tales aspectos con la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG), como se exigía anteriormente [96], redundando en una eficiencia administrativa que favorece al sector TIC.

En aras de un cierre efectivo de la brecha digital en Colombia, la CRC, como regulador único del sector TIC, y según la función que le fue asignada en la ley de modernización, en el sentido de definir lo relacionado con las condiciones de uso de redes de otros servicios para el despliegue de redes o prestación de servicios de telecomunicaciones, ha dejado claro que es necesario, vía regulatoria, eliminar las barreras que se puedan presentar para la ampliación de la cobertura de comunicaciones, especialmente para las zonas de difícil acceso o rurales del país, de tal forma que los PRST se vean incentivados a prestar servicios en ellas. Un buen ejemplo del cumplimiento de la función por parte de la CRC, fue la expedición de la Resolución 5890 de 2020, con la cual se reducen hasta un 74% los topes tarifarios del uso de infraestructura eléctrica pasiva (postes, torres y canalizaciones), motivando así que los operadores locales (generalmente medianos y pequeños) y comunitarios, desplieguen redes de última milla y logren así ampliar su cobertura en las zonas apartadas y rurales [97].

La Resolución CRC 5890 de 2020, expone un gran avance en la forma como se realiza el cálculo de los topes tarifarios, para el despliegue de redes o prestación de servicios de telecomunicación sobre infraestructura de energía, en la medida que se optó por establecer una metodología gana-gana, en la cual las dos partes se benefician económicamente de la compartición, fijando un rango de tarifas eficientes que está definido en su límite inferior por el costo incremental de la compartición (CIC), es decir, los costos que se le generan al propietario de la infraestructura si acepta compartir, y en el límite superior por el costo de

oportunidad del entrante (COE), es decir, el costo que tendría el PRST de montar y operar la infraestructura por su cuenta, pero aplicado como un costo distribuido, lo cual significa que el límite superior tiene en cuenta los valores de reposición de los elementos de la infraestructura eléctrica (inversión) así como los sobrecostos de administración, operación y mantenimiento de la red por efectos de la compartición (AOM) y todo esto distribuido en el número de operadores que pueden hacer uso de los elementos de la infraestructura eléctrica, de acuerdo con la capacidad técnica de los mismos. Es importante agregar que la CRC, como regla de remuneración por compartición, prioriza la libre negociación entre el PRST y los propietarios de la red de energía, sujeta a los topes tarifarios [96].

Aunque la Resolución CRC 5890 de 2020 solo aborda lo relacionado con la compartición de postes, torres y canalizaciones del operador eléctrico, y no regula lo relacionado con la compartición de los cable de energía y los transformadores, entre otros, que serían elementos fundamentales requeridos para la instalación y puesta en servicio de la tecnología de última milla BPL, objeto del presente documento, los PRST interesados en esta tecnología deben realizar la negociación directa con el operador eléctrico dueño de la infraestructura, y en caso de no llegar a un acuerdo sobre las condiciones que han de regir la utilización de la infraestructura solicitada, cualquiera de las partes podrá solicitar a la CRC, una vez vencido el plazo de 30 días calendario desde la fecha de presentación de la respectiva solicitud de compartición, que inicie el trámite administrativo correspondiente para dirimir la controversia surgida, tal como lo establece el artículo 42 de la ley 1341 de 2009 [96].

Es muy importante mencionar, de acuerdo con lo señalado en las consideraciones de la resolución CRC 5890 de 2020, que en las mesas de trabajo realizadas para la estructuración de dicho proyecto regulatorio, se identificó la necesidad de adelantar en futuras fases del proyecto, previstas en la Agenda Regulatoria 2020-2021 de la CRC, lo relacionado con la implementación de la Infraestructura de Medición Avanzada (AMI) [96], lo cual permite prever que en el corto plazo se estará abordando, desde el punto de vista regulatorio, las oportunidades o barreras existentes respecto a los elementos de los sistemas y redes de energía para el desarrollo de redes inteligentes (Smart Grid), recordando que, al ser BPL una de las tecnologías para el desarrollo de Smart Grid, todos los elementos físicos de la red de energía serán, de una u otro manera, objeto de análisis

para la compartición con los servicios de telecomunicaciones que llevarán la información de medición avanzada.

Por lo anterior, se podría concluir, respecto al condicionante regulatorio/político, que para potencializar el uso de la tecnología BPL en la zona objetivo, se requeriría:

- Que se facilite por parte de los operadores eléctricos los procesos de negociación para el uso de los cables y elementos de la infraestructura eléctrica para los servicios ofrecidos por los PRST, y que adicionalmente se cuente con el apoyo de los entes territoriales para asegurar el éxito de dicha gestión.
- En caso que la CRC tenga que intervenir para dirimir diferencias del uso de infraestructura eléctrica, se requiere que haya eficiencia administrativa para lograr procesos expeditos.
- Que la CRC, en virtud de lo establecido en la ley de modernización del sector TIC, y del compromiso incluido en la agenda regulatoria 2020-2021, elimine, vía regulatoria, las barreras que se puedan presentar para la ampliación de la cobertura de comunicaciones, especialmente para las zonas de difícil acceso o rurales del país, motivando así que los PRST, incluidos operadores medianos y pequeños, desplieguen redes de última milla.
- Que los operadores eléctricos, como resultado de la visión hacia redes inteligentes y la convergencia con las TIC, estructuren nuevos negocios y retomen el interés en la prestación del servicio de acceso a Internet, aprovechando que poseen, en las redes de baja tensión, la infraestructura de última milla necesaria para llegar a cada uno de los usuarios, y se dé especial importancia a los proyectos de viviendas 100% subsidiadas, proyectos que debido a las exigencias en los procesos públicos que se adelantaron para su construcción, poseen redes eléctricas certificadas, es decir, que cumplen con unos parámetros mínimos de calidad al dar cumplimiento a lo establecido en el RETIE, favoreciendo la implementación de BPL.

Lo anterior asegura que no se tenga que invertir dinero ni tiempo en negociaciones para el uso de la infraestructura, por ser propia, y que seguramente se supere con éxito la etapa de caracterización de la red, que previamente se debe realizar para establecer la viabilidad de instalar la tecnología BPL, y que ha sido una de las grandes barreras para el despliegue de esta tecnología en varios lugares del mundo, especialmente en países latinoamericanos.

6.3 ASPECTOS AMBIENTALES

Respecto al condicionante ambiental, partiendo de la *Tabla 35. Matriz final - método distributivo*, e identificando las diferencias de valor entre la tecnología FTTH y BPL, como se muestra en la *Tabla 44*, se aprecia que FTTH solo supera a BPL en 1 de los 4 criterios, pero la diferencia en este criterio, condiciones climáticas, es tan alta a favor de FTTH, que termina siendo suficiente para superar a BPL en la valoración total del condicionante ambiental.

Para el análisis del aspecto ambiental, es importante recordar cómo están definidos los 4 criterios de este condicionante, tal como se presentó en la *Tabla 31*:

Tabla 44. Diferencia FTTH vs BPL - Condicionante ambiental

CONDICIONANTE	CRITERIO	Matriz Final (método distributivo)				Diferencia FTTH vs BPL	%
		xDSL	HFC	FTTH	BPL		
Ambiental	Impacto ambiental	0,0017	0,0017	0,0020	0,0038	-0,0019	-120%
	Condiciones climáticas	0,0054	0,0067	0,0114	0,0027	0,0087	559%
	Uso de la red	0,0022	0,0024	0,0027	0,0054	-0,0027	-173%
	Vida útil de la red	0,0036	0,0029	0,0032	0,0058	-0,0026	-166%
Suma		0,002					

Impacto ambiental: Menor nivel de afectación ambiental ocasionado por la totalidad de la infraestructura tecnológica durante su ciclo de vida (adquisición de materia prima, proceso de producción, instalación & servicio, y disposición a la finalización de la vida útil).

Condiciones climáticas: Menor nivel de afectación que las condiciones climáticas puedan ocasionar en la calidad del servicio.

Uso de la red: Menor daño ambiental por el uso de las redes existentes.

Vida útil de la red: Menor daño ambiental por la mayor vida útil de la red externa sobre la cual opera.

De la misma manera, es importante revisar los valores del condicionante ambiental relacionados en la matriz de decisión, *Tabla 32*, y que se presentan de manera particular en la *Tabla 45*.

Se puede apreciar que el peso del condicionante ambiental es de 6,36%, siendo el de menor asignación dentro del grupo de 6 condicionantes, precedido en su orden por los condicionantes económico (26,46%), infraestructura (21,01%), técnico (19,24%), socio-cultural (17,43%) y regulatorio político (9,5%), valores correspondientes al vector prioridad producto de la evaluación pareada de condicionantes, efectuada por los expertos.

Tabla 45. Pesos de condicionante ambiental y criterios - Valoración FTTH y BPL

CONDICIONANTE	CRITERIO	PESO CONDICIONANTE	PESO CRITERIO	Media Geométrica Valoración de Expertos	
				FTTH	BPL
Ambiental	Impacto ambiental	0,0636	0,1453	4,0201	7,8155
	Condiciones climáticas		0,4132	7,4324	1,7826
	Uso de la red		0,1975	4,2823	8,5588
	Vida útil de la red		0,2439	4,1289	7,4324

Lo anterior significa que los expertos consideran que los aspectos más importante a tener en cuenta, para la toma de la decisión, son los económicos, de infraestructura y técnicos, y que el menos relevante es el ambiental, reflejando así la realidad que infortunadamente se tiene en la planeación de muchas de las obras de ingeniería, en el sentido de que son los factores económicos los que priman, seguidos de múltiples factores de infraestructura y funcionamiento técnico, relegando a los últimos lugares los aspectos ambientales, que terminan teniendo una mínima influencia al momento de la toma de decisiones.

Ahora, si se revisa el peso de cada uno de los criterios que componen el condicionante ambiental, la situación es similar, pues el criterio “condiciones climáticas”, que es el único que no está relacionado con el impacto o daño ambiental, tiene el mayor peso (41,32%), con una diferencia de valoración tan alta, respecto a BPL, que, pese a que BPL es mejor valorada por su menor afectación ambiental en los otros 3 criterios, hace que FTTH se imponga en el total del condicionante ambiental.

En conclusión, podría decirse que, sin ser esto extraño, en la evaluación de proyectos de infraestructura se le da una mayor relevancia a todos aquellos aspectos que conllevan a una sostenibilidad económica de los proyectos y a soluciones técnicas de vanguardia, pero no se da una importancia significativa a los aspectos que propenden por soluciones ambientalmente sostenibles o que al menos redunden en una menor afectación al medio ambiente. Esto no significa, que los desarrolladores de la tecnología BPL no deban seguir buscando avances tecnológicos para la prestación del servicio de acceso a internet, y, entre otras, cómo asegurar la prestación del servicio bajo altos estándares de calidad, que, en este caso, según los expertos, puede deteriorarse por condiciones climáticas que afectan el medio (cable de energía) por el cual se realiza la transmisión de la señal.

Por todo lo anterior, se podría concluir, respecto al condicionante ambiental, que para potencializar el uso de la tecnología BPL en la zona objetivo, se requeriría:

- En esta época en la que se habla de la importancia de reducir las emisiones de carbono, debido a los efectos adversos del calentamiento global, es necesario que los actores del sector de telecomunicaciones, tanto públicos como privados, trabajen en generar mayor conciencia en la importancia de la búsqueda e implementación de soluciones tecnológicas que sean ambientalmente sostenibles o que al menos generen, durante su ciclo de vida, el menor impacto negativo posible al medio ambiente.
- Que se promueva e incentive económicamente la implementación de soluciones sostenibles ambientalmente o lo más amigables posible con el medio ambiente, con las cuales se aproveche al máximo la infraestructura existente, especialmente para zonas apartadas y de baja densidad demográfica, donde, por tener usualmente mejores condiciones ambientales a las presentes en los grandes centros urbanos, deben ser protegidas, como una forma de resarcir o equilibrar el daño ocasionado

por la modernidad, pero sin dejar de atenderlas con soluciones eficientes de conectividad, que son completamente indispensables para su desarrollo económico e inclusión social y digital.

- Que se promueva y exija la realización de evaluaciones ambientales al ciclo de vida de cada una de las tecnologías de última milla implementadas en Colombia, pues pese a que se podría creer que el balance del impacto ambiental resultante de las TIC es positivo, por los grandes beneficios y eficiencias que se pueden percibir de primera mano con su uso, los beneficios netos no están asegurados.
- Que a través de los avances tecnológicos de BPL, se continúen reduciendo los posibles efectos que las condiciones climáticas pueden tener en la calidad del servicio.

6.4 RESUMEN DE CONDICIONES VIABILIZANTES

Basado en lo descrito en los anteriores numerales, en la *Tabla 46* se presenta el resumen de los aspectos que podrían potencializar la implementación de la tecnología BPL en los proyectos de viviendas 100% subsidiadas, ubicados en zonas apartadas y de baja densidad demográfica en Colombia, incluyendo el responsable de la acción.

Tabla 46. Aspectos que potencializarían la implementación de la tecnología BPL en la zona objetivo

Aspectos	Responsable					
	ESTADO	CRC	UPME	PRST	OPER. ELÉCTRICO	FABRICANTES

Aspectos Técnicos

o Realizar estudios, en la zona objetivo, respecto de la verdadera necesidad que se tendrían en ancho de banda, a mediano plazo, con el fin de que los PRST opten por X soluciones ajustadas a las necesidades reales de los sitios a atender.

Aspectos	Responsable					
	ESTADO	CRC	UPME	PRST	OPER. ELÉCTRICO	FABRICANTES
o Realizar estudios de interferencia puntuales en las zonas objetivo, especialmente en lo relacionado con servicios de telecomunicaciones inalámbricas existentes en el área, que operen en las bandas HF y VHF, para establecer si realmente puedan afectar o verse afectados por los sistemas BPL. Esto con el fin de demostrar, muy seguramente, el bajo riesgo de interferencia y hacer más atractiva la tecnología. Lo anterior, obviamente, sumado a avances en el desarrollo de la tecnología BPL, que propendan por menores efectos de interferencia electromagnética	X					X
o Continuar avanzando en la implementación de redes inteligentes de energía en Colombia, de acuerdo con el mapa de ruta publicado por la UPME [94], para promover el avance en la penetración de los sistemas BPL como tecnología para Smart Grids, facilitando que los PRST y operadores eléctricos impulsen esta tecnología como soporte fundamental para el IoT, de tal manera que esta masificación de servicios sobre BPL, redunde en el retorno del interés para la prestación de servicios masivos de Internet sobre las redes de energía.	X	X	X	X	X	
Aspectos Regulatorios / Políticos						
o Que se facilite por parte de los operadores eléctricos los procesos de negociación para el uso de los cables y elementos de la infraestructura eléctrica para los servicios ofrecidos por los PRST, y que adicionalmente se cuente con el apoyo de los entes territoriales para asegurar el éxito de dicha gestión.	X				X	
o En caso que la CRC tenga que intervenir para dirimir diferencias del uso de infraestructura eléctrica, se requiere que haya eficiencia administrativa para lograr procesos expeditos.	X	X				
o Que la CRC, en virtud de lo establecido en la ley de modernización del sector TIC, y del compromiso incluido en la agenda regulatoria 2020-2021, elimine, vía regulatoria, las barreras que se puedan presentar para la ampliación de la cobertura de comunicaciones, especialmente para las zonas de difícil acceso o rurales del país, motivando así que los PRST, incluidos operadores medianos y pequeños, desplieguen redes de última milla.	X	X				
o Que los operadores eléctricos, como resultado de la visión hacia redes inteligentes y la convergencia con las TIC, estructuren nuevos negocios y retomen el interés en la prestación del servicio de acceso a Internet, aprovechando que poseen, en las redes de baja tensión, la infraestructura de última milla necesaria para llegar a cada uno de los usuarios, y se dé especial importancia a los proyectos de viviendas 100% subsidiadas.					X	
Aspectos Ambientales						
o que los actores del sector de telecomunicaciones, tanto públicos como privados, trabajen en generar mayor conciencia en la importancia de la búsqueda e implementación de soluciones tecnológicas que sean ambientalmente sostenibles o que al menos generen, durante su ciclo de vida, el menor impacto negativo posible al medio ambiente.	X	X		X		

Aspectos	Responsable					
	ESTADO	CRC	UPME	PRST	OPER. ELÉCTRICO	FABRICANTES
o Que se promueva e incentive económicamente la implementación de soluciones sostenibles ambientalmente o lo más amigables posible con el medio ambiente, con las cuales se aproveche al máximo la infraestructura existente, especialmente para zonas apartadas y de baja densidad demográfica, donde, por tener usualmente mejores condiciones ambientales a las presentes en los grandes centros urbanos, deben ser protegidas, como una forma de resarcir o equilibrar el daño ocasionado por la modernidad, pero sin dejar de atenderlas con soluciones eficientes de conectividad, que son completamente indispensables para su desarrollo económico e inclusión social y digital.	X	X				
o Que se promueva y exija la realización de evaluaciones ambientales al ciclo de vida de cada una de las tecnologías de última milla implementadas en Colombia, pues pese a que se podría creer que el balance del impacto ambiental resultante de las TIC es positivo, por los grandes beneficios y eficiencias que se pueden percibir de primera mano con su uso, los beneficios netos no están asegurados.						
o Que a través de los avances tecnológicos de BPL, se continúen reduciendo los posibles efectos que las condiciones climáticas pueden tener en la calidad del servicio				X		X

7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 CONCLUSIONES

1. Efectuada la evaluación de las tecnologías de última milla mediante el método AHP, se determinó que es viable la implementación de la tecnología BPL en proyectos de viviendas 100% subsidiadas, ubicados en zonas apartadas y de baja densidad demográfica en Colombia. Lo anterior, dadas las ventajas que brinda esta tecnología al usar la infraestructura existente de energía y su efecto en los aspectos económicos.

Aunque el resultado de la evaluación con el método AHP arrojó una preferencia ligeramente superior de la tecnología FTTH sobre BPL, lo cual se considera un empate técnico, estas tecnologías superan ampliamente a HFC y xDSL como solución de última milla para el servicio de acceso a Internet en la zona objetivo.

2. De manera similar a lo que ocurre en el panorama internacional de las telecomunicaciones, las 3 tecnologías de última milla más utilizadas para la prestación del servicio de acceso fijo a Internet en Colombia son, en su orden para el caso nacional, HFC, xDSL y FTTx.

Aunque HFC no hace presencia en los municipios apartados y de baja densidad demográfica, por su condición de red activa, mantiene el dominio nacional debido a los avances en capacidad de transmisión de datos. Caso contrario ocurre con xDSL, que ha ido perdiendo terreno por sus tasas de transmisión y calidad de servicio, pero que los operadores han ido compensando con el recorte de bucle y el salto a tecnologías FTTx, donde cada día tienen mayor penetración.

La tecnología BPL ha aumentado su capacidad de transmisión de datos a cientos de Mbps y tiene importantes desarrollos para soluciones Smart Grid, lo cual indica una

creciente participación en la integración TIC-Energía y un pronto retorno para la prestación de servicios masivos de acceso a Internet.

3. Mediante la utilización de los 30 criterios clave identificados en el estudio, agrupados en los condicionantes: Técnico, Infraestructura, Económico, Socio/Cultural, Regulatorio/Político y Ambiental, y con el apoyo del método AHP, se puede efectuar una evaluación adecuada y confiable de las tecnologías de última milla fija que podrían ser instaladas en zonas apartadas y de baja densidad demográfica.
4. BPL podría seguir aumentando sus ventajas para su implementación, si en el mediano plazo, el ancho de banda requerido para atender los hogares de los proyectos objetivo, se sigue manteniendo por debajo de los servicios banda ancha, y, por otro lado, al establecerse la verdadera afectación que por efectos de interferencia podrían ocasionar los pocos servicios existentes en bandas HF y VHF.

De la misma manera, BPL se vería favorecido por aspectos como la posible eliminación de barreras para el uso de la infraestructura de energía, la convergencia TIC – Energía resultante de la ejecución de los planes de Smart Grid, que facilitaría la masificación de servicios BPL, y el incremento de la conciencia ambiental que conlleve al aprovechamiento de la infraestructura instalada.

7.2 RECOMENDACIONES

1. En línea con lo señalado por la UIT, es indispensable promover la instalación del servicio de acceso a Internet para hogares, especialmente para zonas apartadas, siendo este uno de los caminos más efectivos para lograr una sociedad de la información incluyente.
2. Es indispensable que el gobierno continúe apalancando económicamente el despliegue de infraestructura tecnológica de última milla para hogares de zonas apartadas y de baja densidad demográfica, de tal forma que se generen soluciones sostenibles, económica y ambientalmente, a largo plazo.

3. Sería importante que como parte de los proyectos de viviendas 100% subsidiadas o similares, se incluya, desde su concepción, soluciones para el servicio de acceso a Internet, como aspecto fundamental para lograr el desarrollo económico y social de sus habitantes.
4. Es fundamental que dentro de los modelos que se planteen por parte del estado para brindar soluciones de conectividad para zonas apartadas y de baja densidad demográfica, se contemple la ejecución de planes de apropiación, con el fin de asegurar el buen uso del Internet, generando nuevas oportunidades a los usuarios, apalancando un verdadero desarrollo social y económico de sus habitantes, e incrementando la posibilidad de éxito de los proyectos una vez se retire el apoyo económico estatal, en la medida que el usuario se esfuerce por realizar un pago por el servicio.
5. Es muy importante hacer seguimiento al comportamiento de los nuevos proyectos de incentivos a la oferta, que a partir de inicios de 2020 se están adelantando por parte de MinTIC, con el fin de establecer si los modelos de negocio, públicos y privados, están ajustados para garantizar la sostenibilidad económica a largo plazo.
6. Es necesario que el estado implemente acciones para asegurar el cumplimiento del mapa de ruta para la implementación de redes inteligentes de energía, y se garantice la integración de las TIC con los sistemas eléctricos.
7. Es importante que los PRST, motivados por la neutralidad tecnológica existente en los contratos estatales, exploren diversas alternativas tecnológicas para favorecer la sostenibilidad económica y ambiental de los proyectos de telecomunicaciones sociales.
8. Es fundamental que el estado promueva estudios profundos del impacto ambiental resultante del uso de las TIC en Colombia, con el fin de identificar las acciones que se deben tomar para la reducción de la huella de carbono generada por el sector.

REFERENCIAS

- [1] N. Negroponte, *El mundo digital*, Edición, 1. Barcelona (España): Alfred A. Knopf, Inc, 1995.
- [2] International Telecommunication Union - ITU., "Measuring the Information Society Report 2017 Volume 1," Geneve, 2017. [Online]. Available: https://www.itu.int/en/ITU-D/Statistics/Documents/publications/misr2017/MISR2017_Volume1.pdf.
- [3] F. Polo and V. Magalhães, "Transformación Digital. Reinventando Organizaciones ante la Nueva Revolución Industrial," *Whitepaper #Transformación Digital*, p. 51, 2016.
- [4] E. Griffith, "The Way Axxis. Charting the Top Tech Trends of the Day.," *Every Minute Online Is a Battle for Consumer Attention.*, 2019. <https://www.pcmag.com/news/367289/every-minute-online-is-a-battle-for-consumer-attention> (accessed Oct. 25, 2019).
- [5] Banco Mundial, "Personas que usan Internet (% de la población)," *Unión Internacional de Telecomunicaciones, Informe sobre el Desarrollo Mundial de las Telecomunicaciones/TIC y base de datos.*, 2018. <https://datos.bancomundial.org/indicador/IT.NET.USER.ZS> (accessed Oct. 25, 2019).
- [6] Banco Mundial, "Población, total," 2018. .
- [7] Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, "Plan TIC 2018 - 2022 El Futuro Digital es de Todos." 2018, [Online]. Available: https://www.mintic.gov.co/portal/604/articles-8247_plan_tic_2018_2022_20200107.pdf.
- [8] International Telecommunication Union - ITU., "SERIE Y: Infraestructura Mundial de la Información y Aspectos del Protocolo de Internet. Infraestructura mundial de la información – Generalidades. Terminología de la infraestructura mundial de la información: Términos y definiciones." 2000, [Online]. Available: <https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.101-200003-I/es>.
- [9] International Telecommunication Union - ITU, "Measuring the Information Society Report. Volume 1.," Geneva., 2018. [Online]. Available: <https://www.itu.int/en/ITU-D/Statistics/Documents/publications/misr2018/MISR-2018-Vol-1-E.pdf>.
- [10] International Telecommunication Union - ITU., "Cuestión 2/1 Tecnologías de acceso a la banda ancha, Telecomunicaciones Móviles Internacionales (IMT) inclusive, para los países en desarrollo 6o Periodo de Estudios 2014-2017." Ginebra, 2017, [Online]. Available: https://www.itu.int/dms_pub/itu-d/opb/stg/D-STG-SG01.02.1-2017-PDF-S.pdf.
- [11] Broadband Forum, "Fiber and cable account for three-quarters of global fixed broadband subscriptions." California, 2018, [Online]. Available:

https://www.broadband-forum.org/marketing/download/PR07_BBF_PointTopicReport_FINAL.pdf.

- [12] B. Forum, “2018.05.29 – Fiber and cable account for three-quarters of global fixed broadband subscriptions,” 2018. .
- [13] OECD, “Where: Global reach.” <http://www.oecd.org/about/members-and-partners/> (accessed Oct. 27, 2019).
- [14] OECD, “Fixed and mobile broadband subscriptions per 100 inhabitants (Dec. 2018),” 2018. <http://www.oecd.org/sti/broadband/broadband-statistics/> (accessed Oct. 30, 2019).
- [15] Comisión de Regulación de Teecomunicaciones., *Resolución 5161*. Colombia, 2017.
- [16] Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, “BOLETÍN TRIMESTRAL DE LAS TIC. Cifras primer trimestre 2019.,” Bogotá D.C., 2019. [Online]. Available: https://colombiatic.mintic.gov.co/679/articles-103108_archivo_pdf.pdf.
- [17] Dirección de Infraestructura. Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, “Proyecto Nacional de Fibra Óptica,” *Construir una red nacional de fibra óptica que llegue al menos a 700 municipios.*, 2019. <https://mintic.gov.co/portal/inicio/5319:Proyecto-Nacional-de-Fibra-Optica> (accessed Oct. 30, 2019).
- [18] Dirección de Infraestructura. Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones., “Proyecto Nacional de Conectividad de Alta Velocidad,” 2019. <https://mintic.gov.co/portal/inicio/5352:Proyecto-Nacional-de-Conectividad-de-Alta-Velocidad> (accessed Oct. 31, 2019).
- [19] Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones., “Ecosistema Digital,” 2019. <https://mintic.gov.co/portal/inicio/5319:Proyecto-Nacional-de-Fibra-Optica> (accessed Nov. 01, 2019).
- [20] Comisión de Regulación de Telecomunicaciones., “Resolución 5076.” Colombia, 2016, [Online]. Available: <https://www.crcom.gov.co/resoluciones/00005076.pdf>.
- [21] Ministerio de Tecnologías de la Información y las comunicaciones., “Boletín Servicio Acceso Fijo a Internet en Colombia Enero de 2019.,” Bogotá D.C., 2019. Accessed: Jul. 30, 2019. [Online]. Available: https://colombiatic.mintic.gov.co/679/articles-82143_archivo_pdf.pdf.
- [22] Comisión de Regulación de Telecomunicaciones., “Resolución 5050 de 2016.” Bogotá D.C., 2016, [Online]. Available: https://normograma.info/crc/docs/pdf/resolucion_crc_5050_2016.pdf.
- [23] Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones., “BOLETÍN TRIMESTRAL DE LAS TIC Marzo de 2019,” 2019. [Online]. Available: https://colombiatic.mintic.gov.co/679/articles-82350_archivo_pdf.pdf.
- [24] S. Gorshe, A. R. Raghavan, T. Starr, and S. Galli, Eds., *Broadband Access*. Chichester, United Kingdom: John Wiley & Sons, Ltd, 2014.

- [25] M. Peden, G. Young, and A. Sokol, "From voice-band modems to DSL technologies," *Int. J. Netw. Manag.*, vol. 11, no. 5, pp. 265–276, 2001, doi: 10.1002/nem.423.
- [26] International Telecommunication Union - ITU., "Informe sobre tecnología DSL." [Online]. Available: https://www.itu.int/dms_pub/itu-d/opb/stg/D-STG-SG02.12-2002-OAS-PDF-S.pdf.
- [27] S. Sector and O. F. ITU, "L.19 Multi-pair copper network cable supporting shared multiple services such as POTS, ISDN and xDSL," 2010.
- [28] P. Tungsakul, K. Songwatana, and P. Moungnuol, "A quality analysis of DOCSIS cable modem," *20th Int. Comput. Sci. Eng. Conf. Smart Ubiquitous Comput. Knowledge, ICSEC 2016*, pp. 1–6, 2017, doi: 10.1109/ICSEC.2016.7859932.
- [29] B. Berscheid and C. Howlett, "Full Duplex DOCSIS: Opportunities and Challenges," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 57, no. 8, pp. 28–33, 2019, doi: 10.1109/MCOM.2019.1800851.
- [30] B. Hamzeh, M. Toy, Y. Fu, and J. Martin, "DOCSIS 3.1: Scaling broadband cable to Gigabit speeds," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 53, no. 3, pp. 108–113, 2015, doi: 10.1109/MCOM.2015.7060490.
- [31] W. Coomans, H. Chow, and J. Maes, "Introducing Full Duplex in Hybrid Fiber Coaxial Networks," *IEEE Commun. Stand. Mag.*, vol. 2, no. 1, pp. 74–79, 2018, doi: 10.1109/MCOMSTD.2018.1700011.
- [32] CableLabs, "DOCSIS® 4.0 Technology." <https://www.cablelabs.com/technologies/docsis-4-0-technology> (accessed May 29, 2020).
- [33] M. Robuck, "CableLabs sticks a fork into DOCSIS 4.0 specification." <https://www.fiercetelecom.com/telecom/cablelabs-sticks-a-fork-into-docsis-4-0-specification> (accessed May 29, 2020).
- [34] Research and Markets, "□ Hybrid fiber coaxial market by technology (DOCSIS 3.0 & below and DOCSIS 3.1), component (CMTS/CCAP, fiber optic cable, amplifier, optical node, optical transceiver, splitter, and CPE), and geography - global forecast to 2023," 2018. https://www.researchandmarkets.com/reports/4745823/hybrid-fiber-coaxial-market-by-technology-docsis?utm_code=3dgfn5&utm_medium=CI.
- [35] ADSLZone, "FTTH, FTTN, HFC... poniendo en orden las siglas de la banda ancha," 2016. <https://www.adslzone.net/2016/03/15/ftth-fftn-hfc-poniendo-en-orden-las-siglas-de-la-banda-ancha/> (accessed Nov. 02, 2019).
- [36] EXFO, "Pruebas de redes CWDm." <https://www.exfo.com/es/soluciones/proveedores-servicios-comunicacion/soluciones-con-cable/redes-cwdm/> (accessed May 11, 2020).
- [37] Halid Hrasnica; Abdelfatteh Haidini; Ralf Lehnert, *Broadband Powerline Communications : Network Design*. Chichester, UK, 2004.
- [38] E. Lutz Lampe, E. Andrea M. Tonello, and E. Theo G. Swart, *Power Line Communications : Principles, Standards and Applications from Multimedia to Smart*

Grid, Secong. Willey, 2016.

- [39] W. R. S. Osman, K. Nisar, and A. M. M. Altrad, "Demonstrate broadband over Power Line Network in Malaysia," *Proc. 2014 IEEE Int. Conf. Consum. Electron. - China, ICCE-C 2014*, pp. 0–5, 2015, doi: 10.1109/ICCE-China.2014.7029864.
- [40] B. S. Sushma, R. Roopesh, S. Gurugopinath, and R. Muralishankar, "Performance characterization of broadband powerline communication for internet-of-things," *2019 Int. Conf. Wirel. Commun. Signal Process. Networking, WiSPNET 2019*, pp. 146–151, 2019, doi: 10.1109/WiSPNET45539.2019.9032857.
- [41] G. A. Chica Pedraza, "Estudio y análisis de la viabilidad de la implementación de la tecnología PLT (Power Line Telecommunications) en Colombia en el ámbito de la transmisión de datos sobre redes de baja tensión," Universidad Nacional de Colombia, 2012.
- [42] Y. B. Cañon de Antonio, "Estudio de la factibilidad técnica de la implementación de PLC (Power Line Communication) en la red de distribución eléctrica de Bogotá," Universidad Nacional de Colombia, 2016.
- [43] Xavier Carcelle, *Power Line Communications in Practice*. Boston / London: Artech House, 2006.
- [44] Tony Durham, "Is Big Brother Reading your Meter," *New Sci.*, vol. 98, no. 1354, p. 168/171, 1983, [Online]. Available: <https://books.google.com.co/books?id=uYf6sbOhYP0C&pg=PA171&dq=Joseph+Routin+y+C.E.L.+Brown&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwjUuvn4tbpbAhWMZd8KHb7nDhsSQ6AEIJzAA#v=onepage&q=Joseph Routin y C.E.L. Brown&f=false>.
- [45] L. A. Motta *et al.*, "Tecnologías de Comunicaciones de Línea de Alimentación para Redes Inteligentes: Una Evaluación del Estado de La Técnica," *Rev. Ing. Matemáticas y Ciencias la Inf.*, vol. 6, no. 11, pp. 35–44, 2019, doi: <http://dx.doi.org/10.21017/rimci.2019.v6.n11.a55>.
- [46] M. Schwartz, "Carrier-Wave Telephony Over Power Lines: Early History," *IEEE Communications Magazine*, 2009.
- [47] IEEE, "IEEE Power Line Communications Technical Committee." <https://plc.committees.comsoc.org/> (accessed May 16, 2020).
- [48] J. Glove Duncan, M. S. Sarma, and T. J. Overbye, *Power System Analysis and Desing*, Fifth Edit. Stamford, USA: Global Engineering: Christopher M. Shortt, 2012.
- [49] K. Choomon and N. Leeprechano, *A literature review on technology road-mapping: A case of power-line communication*. 2011.
- [50] S. H. Mahmood, A. M. Salih, and M. I. Khalil, "Broadband services on power line communication systems: A review," *Proc. - 2019 22nd Int. Conf. Control Syst. Comput. Sci. CSCS 2019*, pp. 465–470, 2019, doi: 10.1109/CSCS.2019.00085.
- [51] A. G. Peralta Sevilla and F. Amata Fernández, "Evolución de las Redes Eléctricas hacia Smart Grid en Países de la Región Andina," *Rev. Educ. en Ing.*, vol. 8, pp. 1–14, 2013.

- [52] Ministerio de Minas y Energía and UPME, “Plan de acción indicativo de eficiencia energética 2017-2022.” p. 14, 2016, [Online]. Available: http://www1.upme.gov.co/Documents/PAI_PROURE_2017_2022.pdf.
- [53] UPME, Ministerio de Minas y Energía, and Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, “Parte I Antecedentes y Marco Conceptual del Análisis, Evaluación y Recomendaciones para la Implementación de Redes Inteligentes en Colombia,” *Smart Grids Colombia Vision 2030*. p. 81, 2016, [Online]. Available: <https://www1.upme.gov.co/Paginas/Smart-Grids-Colombia-Visión-2030.aspx>.
- [54] Corinex, “Corinex: IoT, Software, Smart Grid.” <https://www.corinex.com/> (accessed Aug. 28, 2020).
- [55] Corinex, “Prime Alliance.” https://www.prime-alliance.org/?page_id=6026 (accessed Aug. 28, 2020).
- [56] K. Khalil, “Contributions to indoor broadband power-line communications : channel modeling and data rate optimization Contributions à l ’ étude des communications numériques sur le réseau électrique à l ’ intérieur des bâtiments : modélisation du canal et optimisatio,” 2016.
- [57] C. Cano, A. Pittolo, D. Malone, L. Lampe, A. M. Tonello, and A. G. Dabak, “State of the Art in Power Line Communications: From the Applications to the Medium,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 34, no. 7, pp. 1935–1952, 2016, doi: 10.1109/JSAC.2016.2566018.
- [58] ITU-T L.1400, “L.1400:Overview and general principles of methodologies for assessing the environmental impact of information and communication technologies,” 2011, [Online]. Available: <https://www.itu.int/rec/T-REC-L.1400>.
- [59] ITU-T, “L.1410 - Methodology for environmental life cycle assessments of information and communication technology goods, networks and services,” 2014.
- [60] J. Pohl, L. M. Hilty, and M. Finkbeiner, “How LCA contributes to the environmental assessment of higher order effects of ICT application: A review of different approaches,” *J. Clean. Prod.*, vol. 219, pp. 698–712, doi: doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.018.
- [61] Greenpace, “Covid-19, clima y medio ambiente: las 5 respuestas que tienes que saber,” 2020. <https://www.greenpeace.org/colombia/blog/2886/covid-19-clima-y-medio-ambiente-las-5-respuestas-que-tienes-que-saber/> (accessed Jun. 09, 2020).
- [62] M. A. Gendler, “Globalización y tecnologías digitales: un estado de situación,” *Unidad Sociológica*, 2016, [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/11336/105689>.
- [63] F. Bonaglia, S. Nieto-Parra, and J. Vázquez-Zamora, “Una mirada al futuro Post-COVID-19: hacia un nuevo pacto social en América Latina y el Caribe.” Madrid - España, pp. 1–15, 2020, doi: https://doi.org/10.33960/AC_21.2020.
- [64] ITU-D Study Group 1, *Question 5/1:Telecommunications / ICTs for rural and remote areas. 6th Study Period 2014-2017*. Geneva.: International Telecommunication Union, 2017.

- [65] Gloria Amparo Alonso, “Plan Nacional de Desarrollo 2018-2022 Pacto por Colombia Pacto por la Equidad.” pp. 1–36, 2018, [Online]. Available: [https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Prensa/Bases del Plan Nacional de Desarrollo Presentaciòn Final \(Fasecolda\).pdf](https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Prensa/Bases%20del%20Plan%20Nacional%20de%20Desarrollo%20Presentaci%C3%B3n%20Final%20(Fasecolda).pdf).
- [66] Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, “Proyecto Nacional de fibra óptica,” 2019. <https://colombiatic.mintic.gov.co/679/w3-propertyvalue-36367.html> (accessed May 15, 2019).
- [67] Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, “Conectividad de Alta Velocidad,” 2018. .
- [68] DNP, “Evaluación De Los Programas Del Plan Vive Digital Para La Gente De La Información Y Las Comunicaciones (Fontic).,” 2018.
- [69] Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio., “Programa de Viviendas 100% Subsidiadas,” 2015. <http://www.minvivienda.gov.co/viviendas-100-por-ciento-subsidiadas/abc> (accessed Apr. 02, 2020).
- [70] Jonathan Malagón, “Noticias Sala de Prensa,” *Minvivienda continuará con el programa de las viviendas gratuitas*, 2018. <http://www.minvivienda.gov.co/sala-de-prensa/noticias/2018/septiembre/minvivienda-continuar%C3%A1-con-el-programa-de-las-viviendas-gratuitas> (accessed Apr. 02, 2020).
- [71] Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio., “Programa de Viviendas 100% Subsidiadas,” *Listado de proyectos*. <http://www.minvivienda.gov.co/viviendas-100-por-ciento-subsidiadas/proyectos> (accessed Apr. 03, 2020).
- [72] Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio., “Convocatoria para revisión de la viabilidad de proyectos en el marco del programa de vivienda gratuita segunda etapa – PVG-II.” 2015, Accessed: May 08, 2020. [Online]. Available: [http://www.minvivienda.gov.co/Documents/ViceministerioVivienda/Convocatoria a Entidades para la presentacion de proyectos VIP en el marco del Programa PVG II.pdf#search=términos selección vivienda gratuita](http://www.minvivienda.gov.co/Documents/ViceministerioVivienda/Convocatoria%20a%20Entidades%20para%20la%20presentaci%C3%B3n%20de%20proyectos%20VIP%20en%20el%20marco%20del%20Programa%20PVG%20II.pdf#search=t%C3%A9rminos%20selecci%C3%B3n%20vivienda%20gratuita).
- [73] Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio., “Plan de Ordenamiento Territorial,” 2020. <http://www.minvivienda.gov.co/viceministerios/viceministerio-de-vivienda/espacio-urbano-y-territorial/plan-de-ordenamiento-territorial> (accessed May 08, 2020).
- [74] Consorcio Alianza Colpatria, “Convocatoria/Listado General.” <http://www.programadeviviendagratis2.com/general.php?ids=37> (accessed May 20, 2020).
- [75] Departamento Administrativo Nacional de Estadística, “Serie de proyecciones de población con desagregación nacional, departamental, municipal, y cabecera – resto (centros poblados y rural disperso).,” Bogotá D.C., 2020. [Online]. Available: <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/proyecciones-de-poblacion>.
- [76] UNIDAD ADMINISTRATIVA ESPECIAL CONTADURÍA GENERAL DE LA NACIÓN, *Resolución 400 del 29 de noviembre de 2019*. 2019.
- [77] C. DE COLOMBIA, *LEY 617 DE 2000*. 2000.

- [78] Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, “BOLETÍN TRIMESTRAL DE LAS TIC. Cifras cuarto trimestre 2019.,” 2019. [Online]. Available: <https://colombiatic.mintic.gov.co/679/w3-article-135691.html>.
- [79] Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, “Conexiones digitales de última milla.” <https://www.mintic.gov.co/portal/inicio/Iniciativas/Infraestructura/Conexiones-Digitales-de-Ultima-Milla/> (accessed May 25, 2020).
- [80] Y. A. Gasiea, “An analytical decision approach to rural telecommunication infrastructure selection,” University of Manchester, 2010.
- [81] Y. Gasiea, M. Emsley, and L. Mikhailov, “Rural Telecommunications Infrastructure Selection Using the Analytic Network Process,” *J. Telecommun. Inf. Technol.*, vol. nr 2, pp. 28–42, 2010, [Online]. Available: <http://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-article-BAT8-0019-0013>.
- [82] S. Nandi *et al.*, “Computing for rural empowerment: Enabled by last-mile telecommunications,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 54, no. 6, pp. 102–109, 2016, doi: 10.1109/MCOM.2016.7498095.
- [83] Y. A. Adediran, J. F. Opadiji, N. Faruk, and O. W. Bello, “On Issues and Challenges of Rural Telecommunications Access in Nigeria,” *African J. Educ. Sci. Technol.*, vol. 3, no. 2, pp. 16–26, 2016, [Online]. Available: https://www.cooou.edu.ng/journals/ajest/vol_3_iss_2/on_issues_and_challenges_of_rural_telecom.pdf.
- [84] M. Godet, R. Monti, F. Meunier, and F. Roubelat, *La caja de herramientas de la prospectiva estratégica*, Cuarta Edi. Paris: Librairie des Arts et Métiers, 2000.
- [85] A. Alarabiat and I. Ramos, “The delphi method in information systems research (2004-2017),” *Electron. J. Bus. Res. Methods*, vol. 17, no. 2, pp. 86–99, 2019, doi: 10.34190/JBRM.17.2.04.
- [86] H. A. Linstone and M. Turoff, *The Delphi method: Techniques and Applications*. 2002.
- [87] A. Jaramillo Córdoba, “Propuesta para la armonización de las redes de transmisión de televisión digital terrestre pública y privada en Colombia, usando técnicas de toma de decisiones multicriterio,” Universidad Santo Tomas, 2019.
- [88] R. Garza Rios, C. Gonzalez Sánchez, and E. Salinas Gómez, “Toma de Decisiones Empresariales: Un Enfoque Multicriterio Multiexperto,” *Ing. Ind.*, vol. 28, no. 1, pp. 29–36, 2007.
- [89] J. M. Moreno-Jiménez and L. G. Vargas, “Cognitive Multiple Criteria Decision Making and the Legacy of the Analytic Hierarchy Process,” *Estud. Econ. Apl.*, vol. 36, no. 1, p. 67, 2019, doi: 10.25115/eea.v36i1.2516.
- [90] F. Blanco-Mesa, “La ciencia de la decisión,” *Rev. UIS Ing.*, vol. 19, no. 2, pp. 4–9, 2020, doi: 10.18273/revuin.v19n2-2020020.
- [91] C. Romero, *Análisis de las decisiones multicriterio*, 1ra ed. Madrid: Isdefe, 1996.

- [92] M. del S. García Cascales, "Métodos para la comparación de alternativas mediante un Sistema de Ayuda a la Decisión (S.A.D.) y 'Soft Computing,'" Universidad Politécnica de Cartagena, 2009.
- [93] "Expertchoice." <http://iosa.com.pe/expert-choice/> (accessed Jul. 31, 2020).
- [94] UPME, Banco Interamericano de Desarrollo - BID, Ministerio de Minas y Energía, and Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, "Estudio: Smart Grids Colombia Visión 2030 - Mapa de ruta para la implementación de redes inteligentes en Colombia." <https://www1.upme.gov.co/Paginas/Smart-Grids-Colombia-Visión-2030.aspx> (accessed May 16, 2020).
- [95] Congreso de la República, *Ley 1978 de 2019*. 2019.
- [96] Comisión de Regulación de Comunicaciones., *Resolución 5890 de 2020*. 2020.
- [97] "MinTIC," *La CRC actualiza las condiciones de compartición de infraestructura eléctrica, para incentivar el despliegue de redes y la ampliación de cobertura de los servicios de telecomunicaciones en el país*, 2020. <https://www.mintic.gov.co/portal/inicio/Sala-de-Prensa/Noticias/125651:La-CRC-actualiza-las-condiciones-de-comparticion-de-infraestructura-electrica-para-incentivar-el-despliegue-de-redes-y-la-ampliacion-de-cobertura-de-los-servicios-de-telecomunicaciones>.
- [98] C. W. Gellings, *The Smart Grid : Enabling Energy Efficiency and Demand Response*. The Fairmont Press, Inc., 2009.
- [99] M. Vadari, *Smart Grid Redefined: Transformation of the Electric Utility*. Boston / London: Artechhouse, 2018.
- [100] IEEE, "IEEE International Symposium on Power Line Communications and its Applications," 2020. <https://isplc2020.ieee-isplc.org/> (accessed May 13, 2020).
- [101] N. Gerdari and R. S. Vatananan, "Dynamics of Technology Roadmapping (TRM) Implementation." IEEE, Portland, OR, USA, 2007, doi: 10.1109/PICMET.2007.4349482.
- [102] U. A. de Madrid, "Web of Science (WOS): Inicio - Tutorial sobre el uso de Web of Science." <https://biblioguias.uam.es/tutoriales/WOS> (accessed Jun. 27, 2020).

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Cronograma de actividades de ejecución del estudio de viabilidad de BPL	7
Figura 2. Lo que pasa en 1 minuto en Internet.....	9
Figura 3. Desarrollo mundial de las TIC, 2005-2018*	11
Figura 4. Suscripciones banda ancha fija x 100 habitantes y por nivel de desarrollo, 2005–2018*	13
Figura 5. Suscriptores banda ancha fija por tecnología - OCDE, diciembre 2018	15
Figura 6. Acceso fijo a Internet (Millones) - 1T / 2019	17
Figura 7. Velocidad de descarga promedio nacional (Mbps) - acceso fijo a Internet 1T/ 2019	17
Figura 8. Velocidad de descarga promedio por segmento (Mbps)- acceso fijo a Internet -1T/ 2019	17
Figura 9. Velocidad de descarga promedio por estrato (Mbps) - acceso fijo a Internet - 1T / 2019	18
Figura 10. Velocidad de descarga promedio en el segmento residencial por departamento (Mbps) - acceso fijo a Internet - 1T / 2019.....	19
Figura 11. Accesos fijos a Internet por tipo de tecnología (millones) - 1T / 2019.....	20
Figura 12. Vel. descarga promedio por tipo de tecnología (Mbps) Acceso fijo Internet - 1T/2019	20
Figura 13. Estructura general de un sistema típico DSL	23
Figura 14. Velocidad promedio por tipo de tecnología (Mbps)	25
Figura 15. Diagrama típico Red HFC	28
Figura 16. Espectro usado por DOCSIS	30
Figura 17. Asignación de espectro y densidad espectral de potencia en un puerto de un nodo en DOCSIS 3.1 y FDX DOCSIS.....	33
Figura 18. Evolución velocidad de datos tecnologías xDSL y HFC (DOCSIS)	34
Figura 19. Tipologías de acceso por fibra óptica.....	35
Figura 20. Diagrama típico red PON	36
Figura 21. Technology Road-mapping PLC	45
Figura 22. Diagrama de flujo general de la tecnología BPL.....	45
Figura 23. PLC en el tiempo	46
Figura 24. Bandas de frecuencia para las tecnologías PLC	49
Figura 25. Estándares y especificaciones de las tecnologías PLC.....	50
Figura 26. Evolución de especificaciones y estándares de la tecnología BPL.....	51
Figura 27. Topología redes eléctricas y última milla en BPL	55
Figura 28. Modelo esquemático para análisis medioambiental de bienes, redes y servicios TIC.....	57
Figura 29. Fases del Método Delphi	81

Figura 30. Descomposición de atributos (diferenciando niveles - condicionantes)	85
Figura 31. Evolución de la ciencia de la decisión	96
Figura 32. Jerarquía en AHP	101
Figura 33. Opciones de análisis de sensibilidad.....	129
Figura 34. Árbol de jerarquía	133
Figura 35. Pesos de condicionantes y criterios	134
Figura 36. Pesos de los condicionantes.....	135
Figura 37. Resultado mejor tecnología, método distributivo	135
Figura 38. Resultado mejor tecnología, método ideal	135
Figura 39. Comportamiento de Alternativas Vs Condicionantes.....	136
Figura 40. Análisis de sensibilidad dinámico – variación en condicionante “Infraestructura”	137
Figura 41. Análisis de sensibilidad dinámico – variación en condicionante “Económico”	138
Figura 42. Análisis de sensibilidad dinámico – variación en condicionante “Socio/Cultural”	138
Figura 43. FTTH vs BPL	142
Figura 44. FTTH vs HFC.....	142
Figura 45. FTTH vs xDSL	143
Figura 46. BPL vs HFC	143
Figura 47. BPL vs xDSL.....	144

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Comparación de sistemas DSL	26
Tabla 2. Velocidades de transmisión y recomendaciones UIT para Tecnologías xDSL ...	26
Tabla 3. Características de tecnologías PON	37
Tabla 4. Componentes de las TIC.....	58
Tabla 5. Etapas del ciclo de vida	58
Tabla 6. Comparación tecnologías de última milla más utilizadas en Colombia.....	62
Tabla 7. Cantidad de municipios con menos de 2.500 habitantes y su categoría - por departamento	68
Tabla 8. Municipios con menos de 2.500 habitantes.....	68
Tabla 9. Viviendas 100% subsidiadas ubicadas en municipios con menos de 2.500 habitantes	70
Tabla 10. Cantidad de municipios con cabecera municipal menor a 2.500 habitantes y su categoría - por departamento.....	70
Tabla 11. Viviendas 100% subsidiadas ubicadas en cabeceras municipales menores a 2.500 hab.....	71
Tabla 12. Cantidad de accesos fijos del servicio de Internet en los municipios objetivo ...	73
Tabla 13. Cantidad de accesos fijos a internet en estrato 1 residencial	74
Tabla 14. Relación de criterios por fuente bibliográfica, ...	78
Tabla 15. Lista unificada de criterios generales (según fuentes bibliográficas)	79
Tabla 16. Lista de criterios claves por condicionante	86
Tabla 17. Propuesta de escalas de asignación directa	102
Tabla 18. Escala fundamental de comparación pareada de Saaty.....	102
Tabla 19. Índice de consistencia aleatorio (RI) en función de la dimensión de la matriz (n)	103
Tabla 20. Escala de valoración directa de Likert	107
Tabla 21. Matriz de dominancia e índice de dominancia.....	109
Tabla 22. Porcentajes de dominancia de las alternativas tecnológicas	110
Tabla 23. Ponderación final de los criterios según condicionantes.....	111
Tabla 24. Ponderación final de los criterios técnicos.....	112
Tabla 25. Ponderación final de los criterios de infraestructura	113
Tabla 26. Ponderación final de los criterios económicos.....	113
Tabla 27. Ponderación final de los criterios socio / culturales	114
Tabla 28. Ponderación final de los criterios regulatorios / políticos	114
Tabla 29. Ponderación final de los criterios ambientales.....	115
Tabla 30. Ratios de consistencia de las matrices pareada.....	116
Tabla 31. Valoración de alternativas tecnológicas de última milla.....	116
Tabla 32. Matriz de decisión	119

Tabla 33. Matriz de decisión normalizada - método distributivo	120
Tabla 34. Matriz de decisión normalizada - método ideal.....	122
Tabla 35. Matriz final - método distributivo.....	124
Tabla 36. Matriz final - método ideal	125
Tabla 37. Resultados del Método AHP	128
Tabla 38. Matriz de decisión ajustada para Expert Choice.....	132
Tabla 39. Análisis de sensibilidad con variaciones menores al 10% (modo distributivo)	139
Tabla 40. Análisis de sensibilidad con variaciones mayores al 10% (modo distributivo)	140
Tabla 41. Análisis de sensibilidad con variaciones mayores al 10% (modo ideal).....	141
Tabla 42. Diferencia FTTH vs BPL - Condicionante técnico.....	146
Tabla 43. Diferencia FTTH vs BPL - Condicionante regulatorio/político	148
Tabla 44. Diferencia FTTH vs BPL - Condicionante ambiental.....	152
Tabla 45. Pesos de condicionante ambiental y criterios - Valoración FTTH y BPL.....	153
Tabla 46. Aspectos que potencializarían la implementación de la tecnología BPL en la zona objetivo	155