

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍA DE
TELECOMUNICACIÓN

TRABAJO FIN DE GRADO

*ANÁLISIS DEL RENDIMIENTO DEL
ESTÁNDAR BPL OPERA CON DATOS
EMPÍRICOS*

Alumno: Díaz Moral, Gorka

Director: Angueira Buceta, Pablo

Curso: 2017-2018

Fecha: 11/07/2018

ÍNDICE

ÍNDICE	3
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	5
ÍNDICE DE TABLAS	6
RESUMEN TRILINGÜE.....	7
Resumen	7
Abstract.....	7
Laburpena	7
ABREVIATURAS Y ACRÓNIMOS.....	8
1. INTRODUCCIÓN.....	10
2. CONTEXTO.....	12
3. OBJETIVOS Y ALCANCE DEL TRABAJO	13
3.1. WBS (Work Breakdown Structure)	14
4. BENEFICIOS QUE APORTA EL TRABAJO	16
4.1. Beneficios técnicos	16
4.2. Beneficios económicos	16
4.3. Beneficios sociales.....	16
5. ANÁLISIS DEL ESTADO DEL ARTE.....	18
5.1. Tecnología BPL	18
5.2. Estándar BPL OPERA.....	20
5.3. Arquitectura BPL	31
5.3. Criterios de diseño de la red PLC Iberdrola.....	32
5.4. Particularidades de la red PLC Iberdrola	35
6. ANÁLISIS DE RIESGOS.....	39
7. METODOLOGÍA SEGUIDA	40
7.1. Descripción de los datos contenidos en la foto de la red	40
7.2. Descripción de datos obtenidos de GADIP	42
7.3. Definir métrica de evaluación (KPI)	43
7.4. Proponer lista de factores candidatos	44

7.5. Seleccionar factores de estudio	46
7.6. Diagrama Gantt	48
7.7. Forma de cálculo de los algoritmos	49
7.8. Descripción de los resultados	52
8. DESCARGO DE GASTOS	72
CONCLUSIONES	74
BIBLIOGRAFÍA	75
ANEXO 1. MANUAL DEL CÓDIGO	76
1. Cargas los BPL Repeater	76
2. Cargar total equipos	76
3. Cargar datos Tx-Rx	77
Procesamiento manual de los datos	78
4. Histograma Bandas – Tx – Rx – Tx+Rx	79
5. Fechas Banda 11 – 12	80
6. Correlación Banda 11 – 12	82
Libro Excel resultado de cada apartado	84
Estadísticos calculados	85

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Ejemplo de arquitectura PLC.	11
Ilustración 2.- WBS del proyecto.	15
Ilustración 3.- Ejemplo de modulaciones en el dominio del tiempo.	19
Ilustración 4.- Ejemplo de modulación OFDM en el dominio de la frecuencia.	20
Ilustración 5.- Arquitectura en células de OPERA.	21
Ilustración 6.- Modelo de referencia en capas OPERA.	22
Ilustración 7.- Ejemplo de SNR y el BPC aplicado a cada subportadora.....	23
Ilustración 8.- Mapeo genérico de tramas Ethernet en ráfagas PLC.....	28
Ilustración 9.- Ejemplo de esquema de ACK.....	29
Ilustración 10.- Comparativa entre una implementación con una única VLAN, y una VLAN de dos niveles.....	30
Ilustración 11.- Grafica de BPC sobre cada frecuencia de un equipo que trabaja en banda 11. 37	37
Ilustración 12.- Grafica de SNR sobre cada frecuencia de un equipo que trabaja en Banda 11. 37	37
Ilustración 13.- Ejemplo de dos células PLC cercanas.....	39
Ilustración 14.- Diagrama Gantt del proyecto.	48
Ilustración 15.- Resultados del apartado Histograma bandas de frecuencia de la Banda 11.	54
Ilustración 16.- Resultados del apartado Histograma bandas de frecuencia de la Banda 11.	55
Ilustración 17.- Resultados de la Evolución temporal de la media de la velocidad de la Banda 11.	58
Ilustración 18.- Resultados de la Evolución temporal de la desviación típica de la velocidad de la Banda 11.....	59
Ilustración 19.- Resultados de la Evolución temporal de la media de la velocidad de la Banda 12.	60
Ilustración 20.- Resultados de la Evolución temporal de la desviación típica de la velocidad de la Banda 12.....	61
Ilustración 21.- Comparativa velocidad media del enlace - Distancia de la Banda 11.	64
Ilustración 22.- Comparativa desviación típica de la velocidad del enlace - Distancia de la Banda 11.	65
Ilustración 23.- Comparativa velocidad media del enlace - Distancia de la Banda 12.	66
Ilustración 24.- Comparativa desviación típica de la velocidad del enlace - Distancia de la Banda 12.	67
Ilustración 25.- Histograma de longitudes 3PA - Banda 12.....	68
Ilustración 26.- Histograma de longitudes 3PA - Banda 11.....	69
Ilustración 27.- Histograma de longitudes 1SA - Banda 12.....	69
Ilustración 28.- Histograma de longitudes 1SA- Banda 11.....	70
Ilustración 29.- Fragmento de la hoja REPEATERS.....	76
Ilustración 30.- Fragmento ejemplo de la hoja "Historico Tx-Rx".....	78
Ilustración 31.- Ejemplo de alcance del límite de filas.....	79
Ilustración 32.- Fragmento ejemplo de hoja Hist Rx.....	80
Ilustración 33.- Fragmento ejemplo de hoja Hist Tx+Rx.....	80
Ilustración 34.- Muestra de los datos obtenidos con el comando Fechas Banda 11.	81

Ilustración 35.- Ejemplo de hoja B.11 Tx+Rx.	82
Ilustración 36.- Ejemplo de datos obtenidos con Correlación Banda 11.	83
Ilustración 37.- Nombres de las hojas Excel resultantes del apartado 1.	84
Ilustración 38.- Nombres de las hojas Excel resultantes del apartado 2.	84
Ilustración 39.- Nombres de las hojas Excel resultantes del apartado 3.	84

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.- Tabla resumen de la cantidad de equipos por tipo de cable y tipo de equipo.	45
Tabla 2.- Tabla resumen de los grupos de estudio.	46
Tabla 3.- Cantidad de equipos por banda de frecuencia.	46
Tabla 4.- Desglose de los parámetros típicos de las funciones de distribución de las velocidades de la Banda 11.	56
Tabla 5.- Desglose de los parámetros típicos de las funciones de distribución de las velocidades de la Banda 12.	56
Tabla 6.- Correlación velocidad-distancia de los equipos que trabajan en Banda 11.	62
Tabla 7.- Correlación velocidad-distancia de los equipos que trabajan en Banda 12.	62
Tabla 8.- Comparativa de los valores de correlación de la banda 11.	71
Tabla 9.- Comparativa de los valores de correlación de la banda 12.	71
Tabla 10.- Desglose de los gastos producidos por las horas internas.	72
Tabla 11.- Desglose de gastos producidos por las amortizaciones.	72
Tabla 12.- Desglose de gastos producidos por el concepto de gastos.	72
Tabla 13.- Desglose de gastos producidos por los costes indirectos.	72
Tabla 14.- Descargo de gastos completo del proyecto.	73

RESUMEN TRILINGÜE

Resumen

Durante la última década, las compañías eléctricas se han comprometido con una gran evolución en su infraestructura de telecomunicaciones, para proveer soluciones de conectividad por medio de la infraestructura eléctrica, haciendo uso de la tecnología *Powerline Communications* (PLC). La vasta diversidad de cables de media tensión que se utilizan para este propósito, las diferentes distancias cubiertas, e incluso las diferencias entre tipos de cable viejo (con protección electromagnética,...), y los tipos de cable nuevos, han condicionado el rendimiento real de la red. El propósito principal de este trabajo es estudiar la correlación entre las distancias y el tipo de cable utilizado en este tipo de comunicaciones, y el rendimiento obtenido, con lo que se puedan lograr mejoras en futuras implementaciones.

Palabras clave: *Powerline Communication, PLC, BPL, OPERA, Iberdrola.*

Abstract

Electric companies have engaged with a great evolution in their telecommunications capabilities during the present decade to improve their telecommunications infrastructure to provide connectivity solutions via the electric infrastructure with the *Powerline Communications* Technology (PLC). The vast variety of diverse medium voltage cables that are being used for these purpose, the different distances covered, and also the difference between old cables types (electromagnetic shielding, ...), and the new cable types, have conditioned the real performance of the network. The main goal of this work is to study the correlation between the distances and cable types being used in this kind of communications, and the performance obtained, so that improvements can be achieved for future deployments.

Key words: *Powerline Communication, PLC, BPL, OPERA, Iberdrola.*

Laburpena

Azken hamarkadan, konpainia elektrikoek telekomunikazio azpiegituran bilakaera handia izan dute konpromisoa, konektibitatearen konponbideak eskaintzeko azpiegitura elektrikoaren bidez, *Powerline Communications* (PLC) teknologia erabiliz. Horretarako erabiltzen diren tentsio ertaineko kable aniztasun zabala, estaldura desberdinen artean, eta baita kable mota zaharren (babes elektromagnetikoarekin ...) eta kable mota berrien arteko desberdintasunak ere, baldintza egokiak izan dituzte. sarea Lan honen helburu nagusia distantzia eta mota horretako komunikazioen arteko korrelazioa aztertzea da, eta lortu den errendimendua, etorkizuneko inplementazioetan hobekuntza lortzeko.

Hitz gakoak: *Powerline Communication, PLC, BPL, OPERA, Iberdrola.*

ABREVIATURAS Y ACRÓNIMOS

4D-TCM	Four dimensional - Trellis Coded Modulation
ACK	Acknowledgement
ADO	Microsoft ActiveX Data Objects
ADTDM	Advanced Dynamic Time Division Multiplexing
AM	Amplitude Modulation
ASK	Amplitude Shift Keying
BBDD	Base de Datos
BER	Bit Error Rate
BPC	Bits Per Carrier
BPL	Broadband over Powerline
CAC	Connection Admission Control
CPE	Customer Premises Equipment
CRC	Cyclic Redundancy Check
CSMA	Carrier sense multiple access
CT	Centro de Transformación
DSSSM	Direct Sequence Spread Spectrum Modulation
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplexing
EMC	Electro-Magnetic Compatibility
EPR	caucho etileno-propileno
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FDR	Frequency Repeater Equipment
FEC	Forward Error Correction
FM	Frequency Modulation
FSK	Frequency Shift Keying
GMSK	Gaussian Minimum Shift Keying
HE	Head End Equipment
HFC	Hibrido Fibra-Coaxial
HURTO	High Ultra Reliable Transmission for OFDM
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IP	Internet Protocol
ITU	International Telecommunication Union
KPI	Key Performance Indicator
LAN	Local Area Network
LLC	Logical Link Control
LV	Low Voltage
MAC	Medium Access Control
MB	Master Backbone
MV	Medium Voltage
NB	Narrow Band
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OPERA	Open PLC Research Alliance
OSI	Open System Interconnection
OVLAN	Optimized VLAN
PHY	Physical Layer
PLC	Powerline Communications

PLT	Powerline Telecommunications
PPC	Power Plus Communications
PRIME	Powerline Intelligent Metering Evolution
PSK	Phase Shift Keying
PVC	Policloruro de Vinilo
QoS	Quality of Service
R	Repeater
RADIUS	Remote Authentication Dial-In User Service
RB	Repeater Backbone
SCP	Sub Celula PLC
SDH	Synchronous Digital Hierarchy
SNAP	Sub Network Access Protocol
SNR	Signal-To-Noise Ratio
TACACS	Terminal Access Controller Access Control System
TDMA	Time Division Multiple Access
TDR	Time Repeater Equipment
UTD	Unidad Territorial de Distribución
VBA	Visual Basic for Applications
VLAN	Virtual LAN
WBS	Work Breakdown Structure
xDSL	x-Digital Subscriber Line
XLPE	Polietileno Reticulado

1. INTRODUCCIÓN

El despliegue e implantación de sistemas de telegestión eléctrica en España ha sido masivo en los últimos años. Estos sistemas permiten comunicar de un modo bidireccional los contadores eléctricos y las distribuidoras eléctricas. Además de ello, también permiten la gestión remota del equipamiento de la red eléctrica, como por ejemplo aislar secciones de la red, o detectar el lugar de las fallas de un modo remoto.

El aspecto que más perceptible por el cliente de este despliegue masivo es el de la telegestión eléctrica, con el que es posible la gestión total de los contadores eléctricos remotamente; la lectura de los contadores no requiere de un operario presencial, se puede controlar la potencia contratada remotamente, se puede regir la conexión o desconexión del suministro eléctrico, etc.

La razón de este despliegue obedece a la disposición adicional primera de la Orden ITC/3860/2007 de 28 de diciembre de 2007, por la cual se exige que todos los contadores de energía eléctrica asociados a suministros, con una potencia contratada de hasta 15 kW, debían ser sustituidos por equipamiento que permitiera la discriminación horaria, y la telegestión antes del 31 de diciembre de 2018. Este tipo de regulación también se ha dado en varios países europeos, tales como Italia y Francia, y proviene de un paquete de medidas de energía limpia promovido por la Unión Europea.

Ante tal reto, las compañías de distribución eléctricas tenían dos opciones: Por un lado hacer uso de los operadores públicos de telecomunicaciones, o por otro lado extender sus redes de telecomunicaciones que hasta ahora solo alcanzaban subestaciones eléctricas primarias y grandes centros de transformación, hasta centros de transformación de media y baja tensión cercanos a los contadores de los clientes, haciendo uso de los cables de potencia, mediante el estándar PLC.

La solución que se adoptó es intermedia. Por un lado se hace uso de la red de telecomunicaciones desplegada, denominado backbone o tronco de la red, la cual principalmente trabaja sobre fibra óptica. Esta parte central de la red que parte de estaciones primarias se comunica mediante diversas soluciones a cada CT o estación secundaria, haciendo uso de radioenlaces, 3G, fibra óptica, etc. en función de la idoneidad en cada caso. Estos CT se comunican entre sí utilizando la tecnología PLC OPERA formando pequeñas células, y desde cada CT, hasta los contadores de telemedida se utiliza el estándar PLC PRIME.

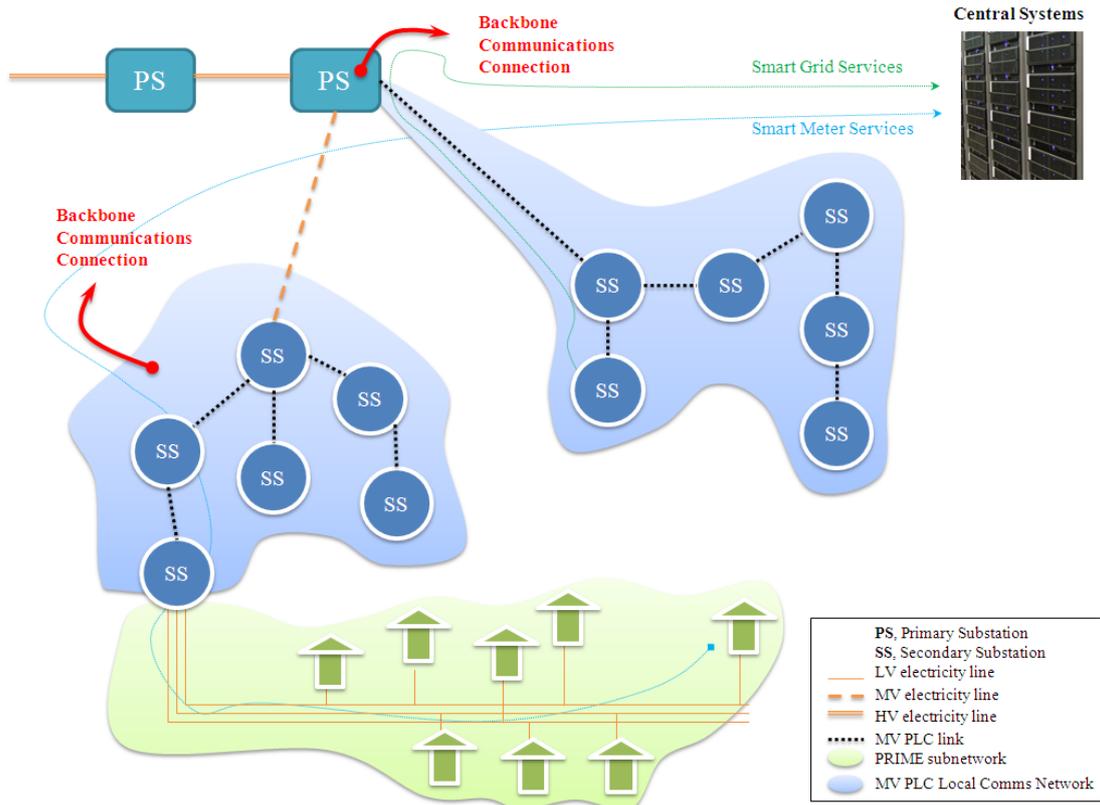


Ilustración 1. Ejemplo de arquitectura PLC.

El presente documento trata sobre la tecnología utilizada en la interconexión de CT, denominada PLC OPERA.

2. CONTEXTO

Las tecnologías PLC resultan muy interesantes para las utilities (compañías que ofrecen servicios públicos como electricidad, gas, agua o autopistas), ya que les permiten maximizar los recursos existentes de la red con inversiones relativamente pequeñas. Puede que su penetración sea relativamente pequeña en el mercado de las telecomunicaciones, donde tecnologías como xDSL, híbrido Fibra-Coaxial (HFC), DWDM, e incluso la caduca SDH dominan el mercado, pero las tecnologías PLC resultan de interés puesto que resultan idóneas para las compañías de distribución eléctrica.

Este pequeño impacto de PLC en el dominio de las telecomunicaciones de banda ancha, puede considerarse incluso una ventaja, puesto que la tecnología ha crecido para adaptarse perfectamente a los requerimientos de las utilities, con lo cual estas últimas influyen en su desarrollo, en contraposición a otras tecnologías, en las que son un usuario más.

Esta tecnología se encuentra en un punto intermedio entre el mundo de las telecomunicaciones, y el mundo de la ingeniería eléctrica. La complejidad añadida de combinar el conocimiento del estado del arte de ambos mundos, resulta un factor limitante a la hora de la estandarización. La iniciativa de varios órganos de estandarización a nivel mundial como: International Electrotechnical Commission (IEC), Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), International Telecommunication Union (ITU), European Telecommunications Standards Institute (ETSI), ha sido limitada, y no mantenida en el tiempo.

Todo esto, hasta la llegada del foro de investigación conjunta europea OPERA (Open PLC European Research Alliance), con el cual se desarrolla finalmente un estándar de PLC a nivel global. Con este proyecto, se consiguen estandarizar equipos PLC de baja y media tensión, analizar el ancho de banda, alcance y facilidad de operación, además de la compatibilidad electromagnética, la gestión de la red y el modelado de canales. También se acondiciona las redes eléctricas, mediante acopladores y filtros. Con todo esto, se logra que los fabricantes sean capaces de desarrollar equipamientos interoperable, y reducir costos.

Este estudio se basa en análisis realizados sobre el equipamiento PLC OPERA desplegado por la utility Iberdrola, la cual colaboro activamente en la investigación.

3. OBJETIVOS Y ALCANCE DEL TRABAJO

Este proyecto tiene como objetivo el análisis del rendimiento en términos de velocidad lograda en los enlaces, de la red PLC Iberdrola instalada sobre cable subterráneo.

El alcance del proyecto se centra en el desarrollo de varios programas desarrollados mediante VBA trabajando conjuntamente con Excel, que a raíz de información obtenida mediante llamadas a una base de datos, logran obtener gráficos, y datos cuantitativos de diversos parámetros de la red. Para ello, se harán distinciones de los diferentes equipos PLC de la red, y del tipo de cableado sobre el que operan. Entre los estudios que se harán, encontramos los siguientes:

- Función de distribución de los datos de velocidad brutos, por cada agrupación tipo de cable-equipamiento PLC.
- Evolución histórica de la velocidad, para cada agrupación.
- Histograma de la velocidad frente a la distancia del enlace a la que pertenece por cada grupo.

Para conseguir alcanzar el objetivo del estudio, en primer lugar debemos conseguir los siguientes objetivos parciales:

- Adquisición de conocimientos sobre el estándar PLC OPERA.

Es necesario alcanzar un mínimo grado de conocimiento del equipamiento al que se somete a estudio, para poder comprender los resultados que se obtengan, y lograr extraer conclusiones de los análisis posteriores.

- Familiarización con la herramienta de programación VBA.

Resulta imprescindible obtener unos conocimientos mínimos considerables de esta herramienta, y del programa Microsoft Excel, para realizar los estudios anteriores, además de poder detectar errores, y poder procesar la información de un modo óptimo, y que no resulte excesivamente lento, lo que redundaría en costes añadidos al proyecto.

- Comprensión de las fuentes de datos.

Además de conocer los datos contenidos en la base de datos, estos no van a ser los únicos datos de partida, si no que se proporcionarán datos de una “foto” del estado de la red, la cual contiene innumerables datos, que habrá que casar con las otras fuentes de datos, por lo que será indispensable comprender correctamente los datos de las fuentes de datos.

- Diseño del algoritmo para recoger los datos de la base de datos.

Para ello, será necesario adquirir unos conocimientos mínimos de la herramienta ADO (Microsoft ActiveX Data Objects), e incluso conocer los parámetros de interés para nuestro estudio contenidos en la base de datos externa.

- Diseño del algoritmo para realizar cada uno de los 3 estudios.

Una vez adquiridos los conocimientos de los pasos previos, ya nos podemos meter en materia y comenzar a desarrollar el código. Como ya se ha comentado, resulta de especial interés realizar el código de modo óptimo con los recursos computacionales disponibles, puesto que los datos que se manejan serán de un tamaño considerable, y esto podría provocar que la aplicación del algoritmo a cada grupo de estudio tome largos periodos de tiempo, alargando en el tiempo el proyecto.

- Aplicación del algoritmo a cada grupo de estudio.

Esto comprenderá tanto la extracción de los datos de cada grupo de estudio, como la aplicación de los 3 grandes estudios de los datos. Cabe resaltar que cada estudio tiene varios procesos, y conforme avanza el proyecto se fueron añadiendo más y más opciones, de acuerdo a las conclusiones que se iban alcanzando.

- Síntesis de los resultados obtenidos.

De cada grupo de estudio se obtienen numerosas graficas, y datos, de modo que una comparativa con esos datos resulta impensable. Por lo tanto, se hace necesario buscar un modo de poder comparar los datos con el menor número de graficas y datos posibles.

- Fabricación de un manual del código utilizado.

Este proyecto ha de ser el comienzo de un estudio de mayor envergadura, por lo que resulta interesante crear un manual del código, e incluso añadir comentarios sobre los algoritmos creados, para que terceros puedan retomar el estudio y sigan trabajando.

3.1. WBS (Work Breackdown Structure)

Una vez tenemos bien definidos los requisitos y el alcance que tiene el proyecto, podemos subdividir las tareas necesarias. Para ello, formamos un diagrama WBS, el cual nos permite visualizar el conjunto del trabajo en tareas más pequeñas, y controlar la duración de las tareas, y el coste de recursos necesarios. La Ilustración 2 que representa el WBS ha sido realizada mediante el add-in WBS Modeler para Visio 2007.

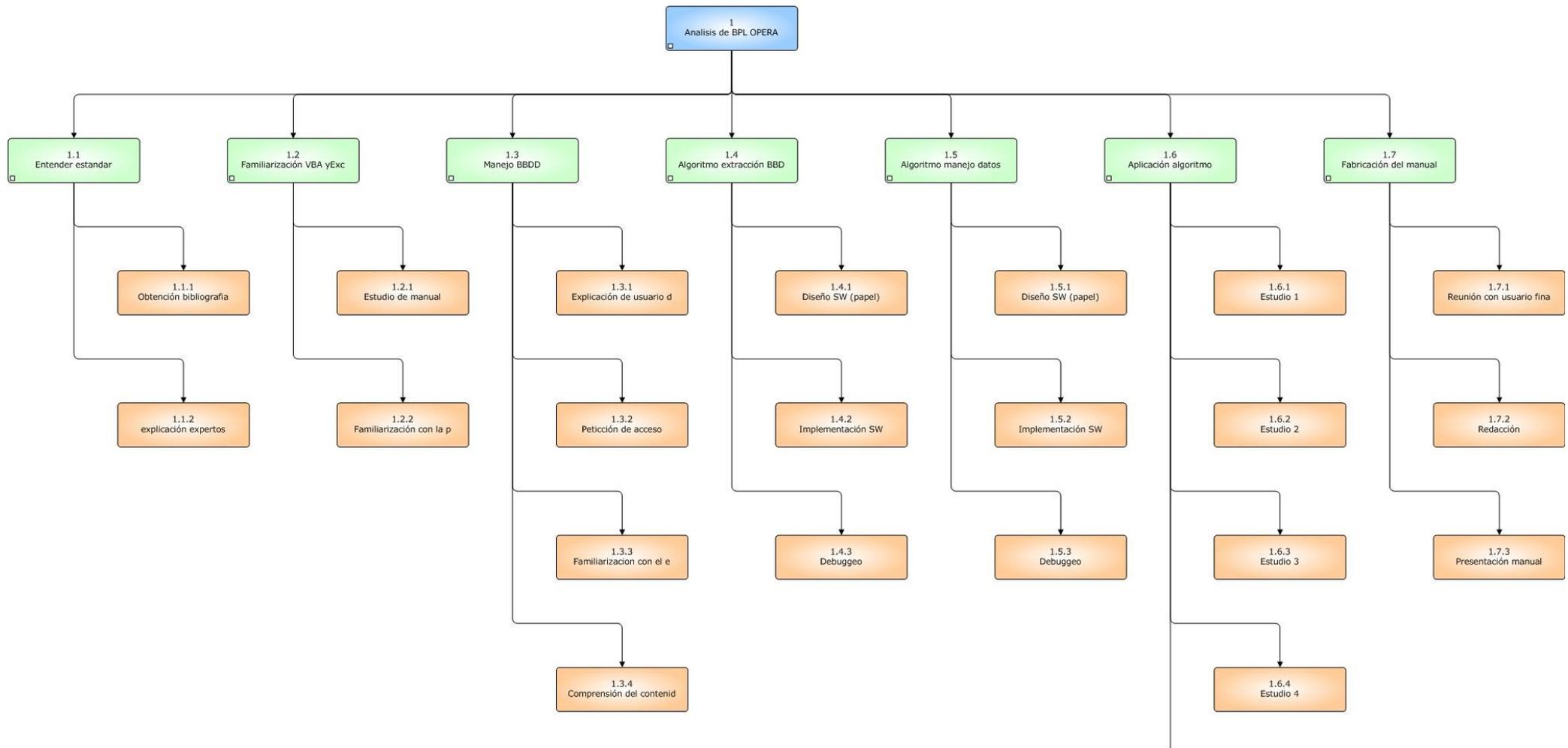


Ilustración 2.- WBS del proyecto.

4. BENEFICIOS QUE APORTA EL TRABAJO

Los beneficios del proyecto pueden dividirse en tres grupos: beneficios técnicos, beneficios económicos y beneficios sociales.

4.1. Beneficios técnicos

Mediante el desarrollo de este trabajo, se pretende medir cuantitativamente la bondad de la red PLC desplegada por Iberdrola, y poder detectar como afectan las diferentes variables (tipo de cableado, longitud del enlace, época del año, etc.) a la velocidad de las transmisiones. Esto hará que sea posible la identificación de las condiciones idóneas para el equipamiento, y las condiciones a evitar en futuras implementaciones de equipamiento BPL, todo ello aplicado a diferente tipo de cableado, longitud, y equipamiento. El hecho de realizar un código genérico, permite que se pueda implementar sobre futuros equipos, y sea aplicable a mayores grupos de datos. Esto resulta interesante, puesto que la base de datos no descarta la información más vieja, si no que crece en profundidad con el tiempo, con lo que, por ejemplo en un año habrá disponible un año más de datos, lo que finalmente redundará, en más datos, y más fiabilidad de los mismos.

Además, al manejar los datos, se pueden detectar errores en la planificación e implementación de los equipos de la red.

La herramienta creada para la extracción de datos resulta de ayuda para poder extraer datos de un solo equipo, y poder ver gráficamente y cualitativamente su comportamiento temporal, y poder identificar caídas y comportamientos anómalos.

4.2. Beneficios económicos

Poder identificar el escenario idóneo para cada equipamiento, y los casos en los que se producen funcionamientos no deseados, desemboca en la optimización de las reglas de diseño establecidas hasta ahora para el equipamiento BPL.

A largo plazo esto influirá en un descenso en costes de mantenimiento, y reducirá el número de caídas en los equipos, e incluso puede hacer que los fabricantes mejoren sus equipos en cuanto a firmware de los mismos, mejorando la fiabilidad y rendimiento de los mismos. Esto es posible gracias a que Iberdrola pertenece al foro de estudio sobre PLC OPERA. También puede evitar malas planificaciones de red, que provoquen el establecimiento de una red PLC que no resulte operativa, lo cual conlleva un gasto.

4.3. Beneficios sociales

El estudio del rendimiento de la red PLC, está relacionado con la mejora de las condiciones de la red, que como ya se ha explicado anteriormente, constituye parte de la red que alcanzan los contadores electrónicos. Esto acarrea que los usuarios de la red eléctrica (el público en general), tengan más facilidad y comodidad para hacer gestiones sobre la potencia contratada,

comprobar el consumo, e incluso pagar la electricidad en función de la hora a la que se realiza el consumo, esto último hasta hace poco prácticamente imposible.

Además de ello, las caídas en la red de distribución eléctrica resultan más fácilmente detectables, no solo en tiempo si no en su ubicación, y las gestiones remotas, a las que antes tenía que acudir un operario a acometer, ahora se agilizan mediante la gestión remota. Esto hace que las caídas por averías, por obras, o comprobaciones resulten más rápidas, lo que redundará en una mejora de la calidad del suministro eléctrico que el usuario de la red percibe.

Este estudio tratará de mejorar la calidad de la red, estudiando cómo afectan los diversos parámetros.

5. ANÁLISIS DEL ESTADO DEL ARTE

5.1. Tecnología BPL

PLC se refiere a la tecnología necesaria para la transmisión de voz y datos a través de la red eléctrica, específicamente utilizando las redes de distribución eléctrica de media y baja tensión. El tramo de media tensión se encuentra entre la subestación de distribución hasta el centro de distribución, mientras que la parte de baja tensión (220 V y 380 V) es la que distribuye la energía dentro de los centros urbanos para uso doméstico, comercial e industrial.

Esta tecnología, ha tomado diversos nombres y acrónimos a lo largo de sus 100 años de historia, dependiendo de la aplicación, y su rendimiento: Carrier Current, Power line Carrier, PLC, Power Line Telecommunications (PLT), Broadband over Power Line (BPL), Power Line Modem, Power Plus Communications (PPC), y un largo etc.

Una de las mayores pegas para la adopción de esta tecnología es la falta de protocolos estandarizados. Hasta la llegada del proyecto OPERA, había dos estándares internacionales relevantes:

- El estándar del IEEE 1901 “Standards for Broadband over Power Line Networks: Medium Access Control and Physical Layer Specification”, publicado en el año 2010, el cual define dos posibles protocolos de la capa física, y una capa de enlace basada en balizas.
- Las Recomendaciones de la ITU-T G.9960 y G.9961 (denominadas comúnmente como G.hn y publicadas en 2009 y 2010), las cuales especifican un nivel físico y una capa de enlace para redes dentro del hogar, utilizando la línea telefónica, cable coaxial o líneas de potencia.

Aunque existen fabricantes que ofrecen sistemas PLC basados en estos estándares, son sistemas que no están muy probados sobre campo, por tanto Iberdrola utiliza las soluciones pertenecientes al estándar OPERA, que si han sido probadas extensamente.

El principio de funcionamiento de PLC, consiste en la superposición de una señal de alta frecuencia (por ejemplo de 2 a 7 MHz) con bajos niveles de energía moduladora, sobre la señal de la red eléctrica de 50 Hz (portadora). Esta señal denominada modulada, se transmite a través de la infraestructura de la red eléctrica, y se puede recibir y decodificar de forma remota. Un acoplador integrado en la entrada del receptor PLC elimina las componentes de baja frecuencia antes de que la señal sea tratada.

Las redes eléctricas son un medio hostil para la transmisión. Entre otros, causan atenuación con la frecuencia, variaciones de la señal con la impedancia, ruido impulsional, multitrayectos, etc. En soluciones de banda estrecha se utilizan modulaciones sencillas, como por ejemplo ASK, FSK, PKS.

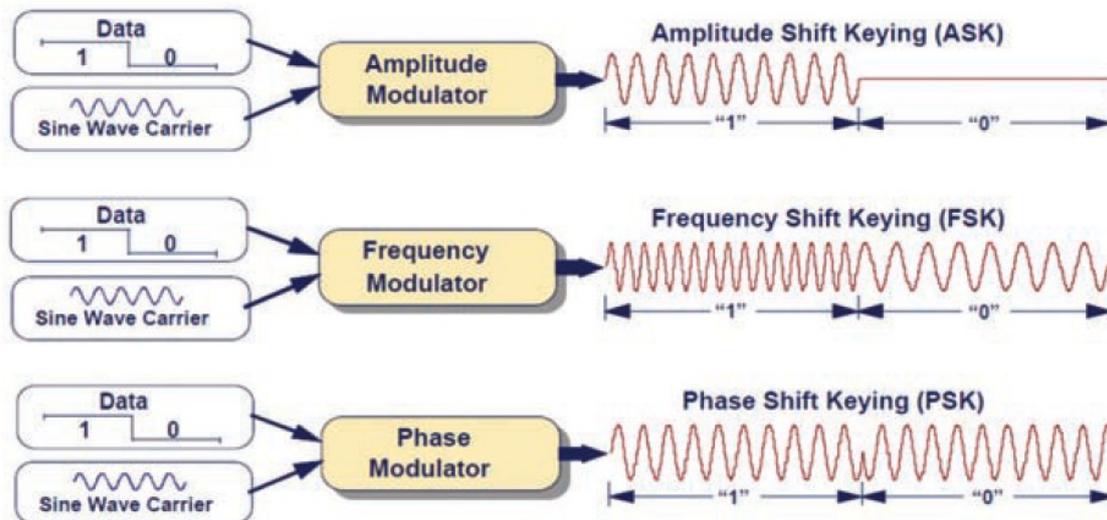


Ilustración 3.- Ejemplo de modulaciones en el dominio del tiempo.

En el caso de las comunicaciones por banda ancha (el caso que nos ocupa), se utilizan modulaciones más complejas, pero más eficientes con el espectro. Principalmente se utilizan tres tipos de modulación:

- DSSSM (Direct Sequence Spread Spectrum Modulation): Su principal característica es que puede operar con niveles bajos de densidad espectral de potencia, lo que provoca que tenga baja radiación electromagnética afectando en menor medida a otros sistemas adyacentes, respecto a otros tipos de modulaciones. Esto hace que tenga mayor inmunidad a interferencias y distorsiones. Aunque, tiene la pega de que aprovecha muy poco la capacidad del canal. Además, el nivel de interferencia entre usuarios crece con el número de clientes del canal, lo cual no es muy deseable.
- GMSK (Gaussian Minimun Shift Keying): Realiza un filtrado previo a la modulación que reduce los lóbulos secundarios que aparecen en el espectro de la señal FSK, limitando el ancho espectral de la modulación.
- OFDM (Ortogonal Frequency Division Multiplexing): Es la modulación que se utiliza en el caso del estándar PLC OPERA. Esta modulación, divide el espectro frecuencia en múltiples subportadoras, con menor espectro cada una, lo que resulta en un mayor aprovechamiento del espectro. En el mismo ancho de banda que las modulaciones anteriores, puede introducir múltiples portadoras, multiplicando efectivamente el ancho de banda disponible. Como ya veremos más adelante, esta modulación se utiliza conjuntamente con una asignación dinámica de la cantidad de bits que se transmiten mediante cada portadora, en función de la señal a ruido presente en el rango de frecuencia que ocupa cada portadora.

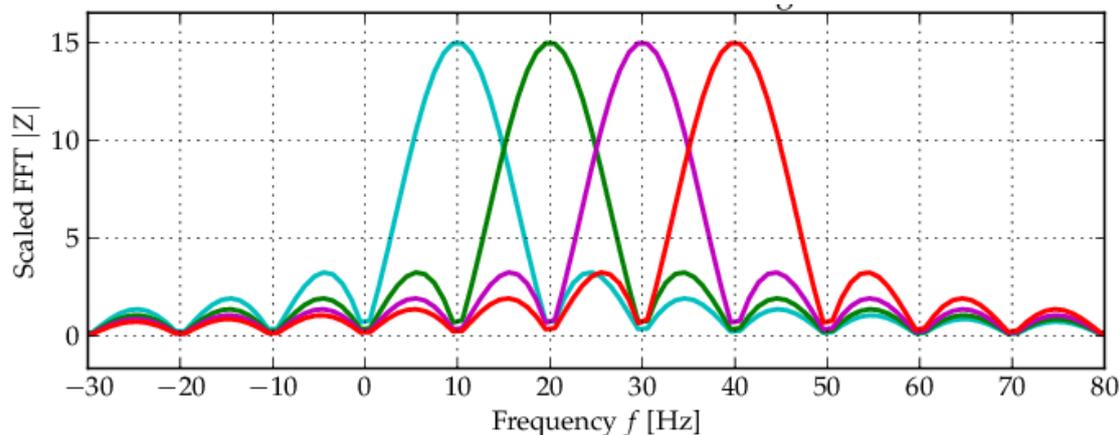


Ilustración 4.- Ejemplo de modulación OFDM en el dominio de la frecuencia.

Además de esa técnica, junto a OFDM se utilizan códigos de detección y corrección de errores como Viterbi y Reed-Solomon, con lo que se consigue mayor protección frente al ruido.

La transmisión de la energía eléctrica y la transmisión de datos sobre el mismo conductor eléctrico son posibles gracias a que ambas transmisiones operan en rangos de frecuencia muy separados entre sí. Las redes PLC originalmente eran diseñadas para operar con frecuencias de unas pocas decenas de kilohercios, con lo que ofrecían pequeños anchos de banda. Con el tiempo el ancho de banda que ofrecían crecía, pero existía una barrera a esto, y es que la radio AM ocupaba parte del espectro (530 a 1.700 kHz) en el que el PLC operaba, y este rango de frecuencias hace de frontera para los sistemas PLC de banda estrecha (hasta 530 kHz). El tope de frecuencias de el PLC de banda ancha es la banda de radio FM, que trabaja desde 87,5 MHz, lo que resulta en otra frontera para las frecuencias de PLC, con lo que, el PLC de banda ancha trabaja desde los 2 MHz hasta los 87,5 MHz.

5.2. Estándar BPL OPERA

5.2.1. Arquitectura de red OPERA

La red típica PLC OPERA se compone de tres tipos de nodos diferenciados:

- Equipamiento de cabecera (Head End Equipment, **HE**), el cual une la red PLC propiamente dicha con el tronco de la red de telecomunicaciones.
- Equipo repetidor, ya sea de frecuencia o de tiempo (Frequency/Time Repeater Equipment, **TDR/FDR**). Permite extender la cobertura de la red PLC.
- Equipos en las dependencias cliente (Customer Premises Equipment, **CPE**). Estos equipos unen al usuario final de la red PLC, con la red de acceso PLC.

La arquitectura de la red PLC se distribuye en diversas células, como se muestra en la Ilustración 5. Cada una de dichas células opera a una frecuencia diferente de las directamente adyacentes, y a esta banda de frecuencia se le denomina modo. Cada célula se compone de un equipo de cabecera (HE), y puede tener equipos repetidores

(TDR/FDR), y también puede tener o no equipos en las dependencias cliente (CPE). Los repetidores, son nodos especiales que pueden transmitir y recibir en diferentes modos. Se comportan como un CPE para uno de los modos, y como un HE para el otro modo.

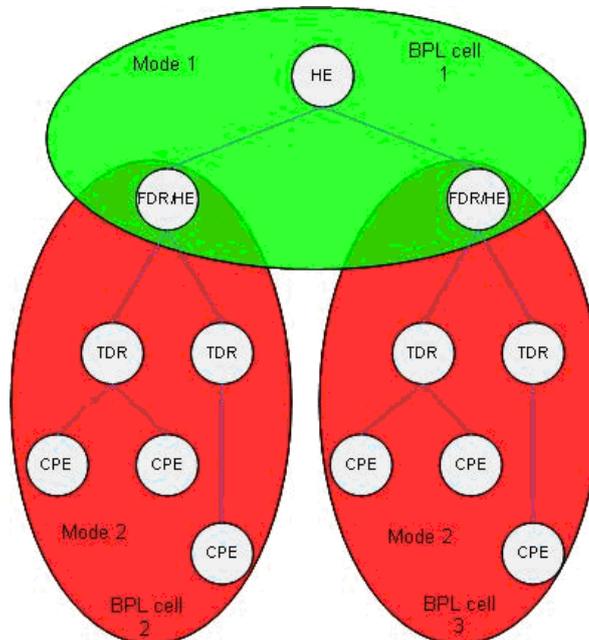


Ilustración 5.- Arquitectura en células de OPERA.

La especificación OPERA utiliza un modelo de referencia en capas, para describir los diversos niveles de su pila de protocolos. Las capas están definidas como:

- La **Capa física** define el formato de transmisión física de datos a través del medio.
- La **capa MAC** define como se asignan las oportunidades de transmisión a los diferentes nodos.
- La **capa LLC**, define como se logra una comunicación libre de errores entre nodos.
- La **capa de convergencia**, define como se mapean protocolos estándar como Ethernet 802.3 al protocolo OPERA, y como se realiza la encapsulación.
- La **capa de administración de capas**, define como se configura cada una de las capas, y como se adaptan a las condiciones cambiantes de la red.

Además, aparte de estas capas, también se suministran mecanismos para aplicar ciberseguridad y encriptación.

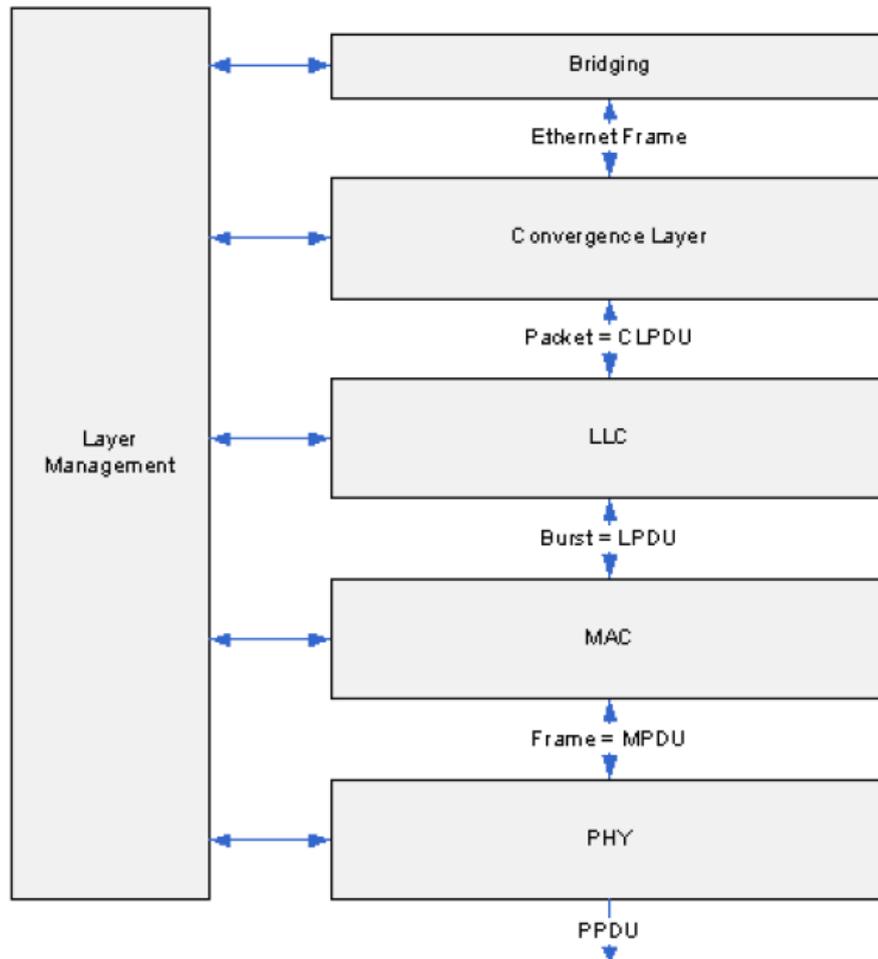


Ilustración 6.- Modelo de referencia en capas OPERA.

5.2.2. Capa física

Como se ha comentado anteriormente, la capa física se basa en la técnica de multiplexación por división ortogonal en frecuencia (OFDM). Se ha elegido esta modulación debido a su inherente capacidad de adaptación en presencia de canales selectivos de frecuencia, su resistencia a señales interferentes, su robustez al ruido impulsivo, y su gran eficiencia espectral.

También se ha señalado previamente que conjuntamente a la modulación se utilizan códigos de corrección de errores para dotar a la modulación de más robustez. En el caso de este estándar, se utiliza la concatenación cuatro-dimensional de modulación por codificación Trellis (4D-TCM), y el código corrector de errores hacia adelante Reed-Solomon, adecuado para el uso en el entorno PLC. Incluso, se añaden mecanismos de interlineado de las ráfagas, para lograr un mecanismo de transmisión potente, manteniendo la complejidad de implementación relativamente baja.

La capa física, permite configurar la frecuencia de trabajo, denominada banda, y lograr anchos de banda de 10, 20 o 30 MHz. Los parámetros de la modulación se adaptan entre cada par de nodos (transmisor y receptor) en tiempo real, para adaptarse en los parámetros de calidad del canal para cada subportadora. Como se aprecia en la Ilustración 7, para cada nivel de ratio señal a ruido (señal negra de la figura), el equipo transmisor adapta los bits por portadora (BPC, señal azul de la figura). Esto lo realiza sondeando la señal a ruido, y eligiendo el BPC óptimo en cada frecuencia. Con este mecanismo, logra mantener el BER (Bit Error Rate), utilizando la máxima velocidad de transmisión posible.

Hay que tener en cuenta también, que las frecuencias que utiliza esta tecnología, pueden estar licenciadas para servicios de radio diferentes en algunas ubicaciones geográficas. Por ello, legalmente pueden existir limitaciones del uso de determinadas frecuencias, las cuales marquen que frecuencias pueden ser utilizadas, y cuáles han de ser evitadas (Bandas de exclusión).

Por tanto, se da la necesidad de una técnica para evitar esas frecuencias de exclusión, y esto se realiza mediante la técnica del corte espectral (Spectral notching). Mediante esta técnica se “apagan” las frecuencias OFDM que entran en el rango de esas frecuencias, por lo que se elimina la energía emitida en esas frecuencias. La tecnología OPERA permite a los fabricantes de equipos crear configuraciones de corte, que no requieran ningún tipo de cambio de hardware. Esto permite que si se dan cambios en la regulación de cualquier país no se requiera de una inversión significativa para adecuarse al nuevo modelo.

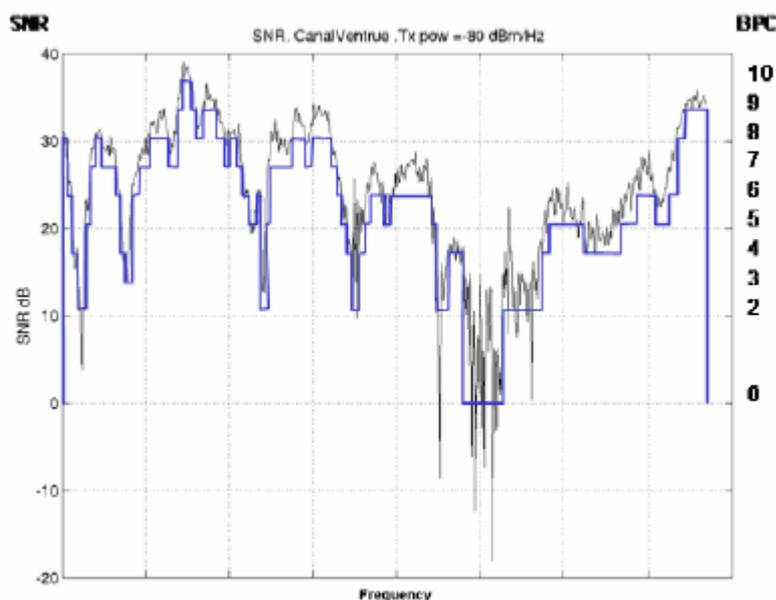


Ilustración 7.- Ejemplo de SNR y el BPC aplicado a cada subportadora.

Los anchos de banda que utiliza el estándar cubren rangos de 10, 20 o 30 MHz, y si se utiliza ese máximo de ancho de banda de 30 MHz, se logra un throughput máximo de aproximadamente 204,93 Mbps. Como máximo, el símbolo OFDM utiliza 1.536 subportadoras,

con una densidad cada una de ellas de 1 a 10 bits por portadora. Esta densidad de portadora se aplica independientemente a cada portadora. La razón para elegir este gran número de subportadoras es que por un lado se logra una gran precisión al estimar como afecta a cada nivel frecuencial el ruido, de modo que la adaptación es mejor.

El nivel físico de este estándar tiene dos niveles de fiabilidad. El modo más fiable es el modo HURTO (High Ultra Reliable Transmission for OFDM), el cual está reservado para información crítica, la cual sirve para la correcta funcionalidad del conjunto del sistema PLC, tales como ráfagas de cabecera, e información de control. Para alcanzar esta gran fiabilidad, se aplica un FEC especial, con técnicas de interlineado y redundancia frecuencial, y todo ello operando conjuntamente con una modulación robusta, para asegurar la correcta demodulación en el lado receptor, aun en las peores condiciones de canal.

El otro modo de transmisión, que es menos robusto, se utiliza para transmitir información corriente. Para ello se utiliza un mapeo adaptativo a las condiciones de canal, con el que se obtiene el máximo throughput posible para cada caso. Esta adaptación no solo incluye los bits por portadora para adaptarse a un nivel de BER previamente fijado, sino también una configuración de Reed-Solomon dinámica para cada una de las ráfagas transmitidas, en función del estado del canal. En ambos modos de transmisión, una vez se ha constituido el símbolo OFDM, se realiza un truncado de la codificación Trellis cuatri-dimensional, aumentando aun más la fiabilidad de la señal transmitida.

También podemos comentar en este apartado que la especificación OPERA incluye mecanismos de ciberseguridad basados en encriptación AES-128 CCM, y mecanismos de integridad que garantizan la privacidad de cada comunicación entre nodos. Esta capacidad es similar al estándar 802.11i recomendado por el IEEE. De hecho, se puede elegir una llave en particular para cada una de las posibles comunicaciones, de manera que la protección de los datos se incrementa. Además, también se puede encriptar cada trama utilizando “sub-llaves” que varían con el tiempo en cuestión de microsegundos. La distribución de la llave de encriptación utiliza el estándar 802.1X. La autenticación de cada nodo se realiza a través del uso de un servidor RADIUS (Remote Authentication Dial-In User Service), que incluye la lista de nodos permitidos a conectarse en una red dada, e incluso si ha de haber enlaces con comunicación encriptada.

5.2.3. Capa de control de acceso al medio (MAC)

Vamos a hablar en primer lugar del formato y tipo de las tramas, para después pasar a explicar ligeramente los mecanismos de contienda al medio como tal. Hay dos tipos principales de tramas: Las tramas normales, y las tramas de estimación de canal. Las tramas normales se utilizan para transportar información entre nodos, y finalizan con un token. La carga útil que portan son ráfagas PLC, las cuales pueden pertenecer a diferentes destinatarios, y son portadas en la misma trama para maximizar la eficiencia. Dependiendo del tipo de token, las tramas normales se pueden clasificar en diversos tipos:

- **Tramas de datos**, las cuales contienen un token que le brinda acceso al uso del canal a otro nodo.
- Las **tramas de silencio**, son similares a las tramas de datos, pero no contienen token, debido a que el token se lo queda el nodo transmisor.
- Las **tramas de sondeo** son utilizadas por los equipos de cabecera y los nodos repetidores para actualizar el estado de las conexiones. Periódicamente los nodos que están libres son consultados para comprobar si tienen datos para transmitir, de modo que pueden ser añadidos a una lista de nodos activos. Al recibir la trama de sondeo, el nodo responde con una trama más corta de lo normal sin modular, en caso de tener información para transmitir. Los nodos que tienen información para transmitir (están notificados como libres previamente) no reciben tokens, de modo que no se desaprovechan recursos de la red.
- Las **tramas de acceso** son utilizadas por los equipos de cabecera y repetidores para invitar a nuevos nodos a unirse a la red PLC. A la recepción de una trama de acceso, los nodos nuevos en la red pugnan por el acceso al medio mediante un algoritmo de back off. Tras ganar la contienda por el acceso, tanto el nodo que pidió el acceso, como el nodo de cabecera comienzan la conexión, estableciendo los parámetros de la misma (QoS, parámetros de modulación, etc).
- Las **tramas de respuesta de acceso**, se envían como contestación a las tramas de acceso.
- Las **tramas de datos no retornables** se utilizan para dar acceso al canal a varios nodos simultáneamente, en consecuencia proporcionan un mayor aprovechamiento de las capacidades del medio. Esta nueva capacidad, mejora el rendimiento de la red, maximizando la capacidad agregada del conjunto de la célula PLC.
- Las **tramas de reloj** se utilizan para sincronizar todos los nodos de la célula PLC. Todos los nodos tienen una deriva de reloj a raíz de un reloj que opera a 312,5 kHz. La información transmitida en la trama del reloj representan los ciclos restantes para llegar al final del periodo del timer. Esta información se utiliza en el nodo receptor para calcular el retraso entre su propio timer, y el timer del transmisor. Este retraso con su master se utiliza para compensar su propio reloj.
- **Trama CSMA**. El objetivo de esta trama es proveer a los nodos que no tienen acceso al canal, una oportunidad de ganar un acceso al canal. Este tipo de tramas están dirigidas a los nodos libres que tienen tramas para transmitir, para cambiar su estado a nodo activo. Estos nodos pugnarán por el canal mediante un mecanismo de back off. Si el nodo logra el acceso, comenzará a transmitir.
- Las **tramas repartidoras** se utilizan para dar acceso al canal a una lista específica de nodos (Lista de Repartición). La trama indica el orden de transmisión de los nodos y el tiempo de transmisión asignado a cada uno de ellos. El nodo maestro puede configurar la lista de distribución con hasta 5 nodos.

Las **tramas de estimación del canal** por su parte, son enviadas periódicamente por cada nodo, de modo que dichos nodos son capaces de estimar el estado del canal, y ajustar el número de bits por portadora que mejor se ajuste a dicho canal.

Cada trama de datos normal está compuesta por una serie de ráfagas de datos, las cuales contienen datos de transmisión entre nodos. Dentro de cada ráfaga, existe una cabecera que indica a que enlace lógico pertenece el nodo origen y el nodo destino, seguido de la carga útil formateada como una serie de palabras código. Estas palabras código, son secuencias de datos de transmisión formadas por carga útil seguidas de un número de bits de redundancia. Estas palabras código no necesariamente tienen que encajar con el símbolo de transmisión de la capa física, el cual está determinado por los parámetros de la capa física subyacente.

El estándar tiene definidas técnicas de acceso al medio para permitir niveles de QoS, optimizadas para aplicaciones de audio y video, como por ejemplo ADTDM (Advanced Dynamic Time Division Multiplexing), pero como este no es el caso del estudio presente, no vamos a profundizar en esa casuística.

En nuestro caso (aplicaciones de bajo ratio de transmisión), el requerimiento de QoS es mas laxo, y la tasa de transmisión es menor. En este escenario, el nodo normalmente está inactivo, y transmite paquetes de datos en un modo no determinista, sin ningún tipo de latencia o necesidades de ratio de velocidad específico. El esquema que aporta ADTDM no es el más adaptado para estas situaciones, por lo que se utiliza la técnica CSMA, la cual se basa en colisiones y mecanismos de back off para que los nodos logren el acceso al medio. Los nodos que no están registrados en la red se pueden ver beneficiados de este esquema, y los nodos que están esperando a transmitir. Para lograr un acceso justo al canal para estos nodos, todos los equipos maestros (HE / TDR) de la red envían una trama CSMA periódicamente, permitiendo periodos de contienda.

Además de esta técnica, OPERA suministra dos mecanismos para mejorar el acceso al canal en topologías del tipo árbol, permitiendo una reutilización espacial efectiva del token. Estos mecanismos complementarios son:

- Token no retornable: Se transmite de un nodo maestro a varios (hasta 8) de sus esclavos. Este token indica cuales son los nodos destino y por cuánto tiempo se les permite transmitir. La longitud de dicho tiempo es conocida, y esta expresada en un número de símbolos.
- Token de distribuidor: Este token asigna al canal una lista de nodos, indicando el orden de los nodos, y el tiempo asignado a cada uno de ellos.

Mediante este mecanismo, dos ramas de una topología en árbol, que cuelgan de dos repetidores diferentes, pueden operar en paralelo.

A nivel de enlace, por tanto, los nodos de la red OPERA pueden actuar como uno de varios roles diferenciados:

- **Nodo de Cabecera:** Estos nodos controlan el acceso al medio del resto de dispositivos, y se aseguran que los recursos de la red se asignan para satisfacer los niveles de QoS previamente asignados. Estos equipos se encargan de generar el token del canal, y distribuirlo al resto de nodos cuando corresponda.

- **Repetidor** (puede ser tanto frecuencial como temporal): Es un dispositivo que recibe el token del nodo de cabecera, y lo retransmite a los otros dispositivos que están fuera de alcance del nodo de cabecera.

- **CPE:** El resto de nodos que no son ni HE ni repetidores.

Además de estos mecanismos, el nivel MAC de OPERA también incluye varios protocolos auxiliares para el correcto funcionamiento de la red:

- Sub-protocolo para manejar a los nuevos equipos que se unen a la red.

- Sub-protocolo para el auto descubrimiento de la topología de la red, permitiendo que nodos con visibilidad incompleta se comuniquen con otros nodos que están fuera de su alcance, utilizando repetidores intermedios.

- Sub-protocolo para que los nodos aprendan que dispositivos están accesibles mediante cada dispositivo PLC, basado en un modelo de aprendizaje 802.1d.

- Sub-protocolo para manejar los dispositivos que se desconectan de la red.

- Sub-protocolo para recuperación del token en caso de que el nodo que lo retenía se haya caído.

- Sub-protocolo para ahorro energético, cuando una rama de la red se establece como inactiva.

5.2.4. Capa “control de capa de enlace” (LLC)

Esta capa, se asegura de la transmisión de información sin errores entre nodos. Esto se logra mediante un esquema de uso de tramas de reconocimiento (Acknowledgements, comúnmente conocidos como ACK). Vamos a hablar primero del formato de encapsulación, para después versar sobre el mecanismo de uso de los ACK. En la Ilustración 8, vemos como se realiza el mapeo de una trama Ethernet en ráfagas PLC OPERA:

- La trama Ethernet se divide para ocupar la sección de carga útil de las palabras código, a las cuales se les añade los datos de redundancia del código Reed-Solomon.

- Se le añade una cabecera a cada palabra código, la cual porta la información requerida para que más tarde sea posible la reunificación de todos los trozos de la trama Ethernet original.

- Se concatenan grupos de palabras código para formar las ráfagas PLC.

4. El nodo de la izquierda retira el paquete 1 y 2 del buffer de transmisión, puesto que han sido recibidos correctamente, y retransmite el paquete 3.
5. Esta vez el paquete 3 se recibe correctamente, de modo que el nodo de la derecha envía un mensaje de reconocimiento (ACK) sobre la correcta transmisión del paquete 3.
6. Tras recibir el ACK, el nodo de la izquierda retira el paquete 3 del buffer de transmisión.

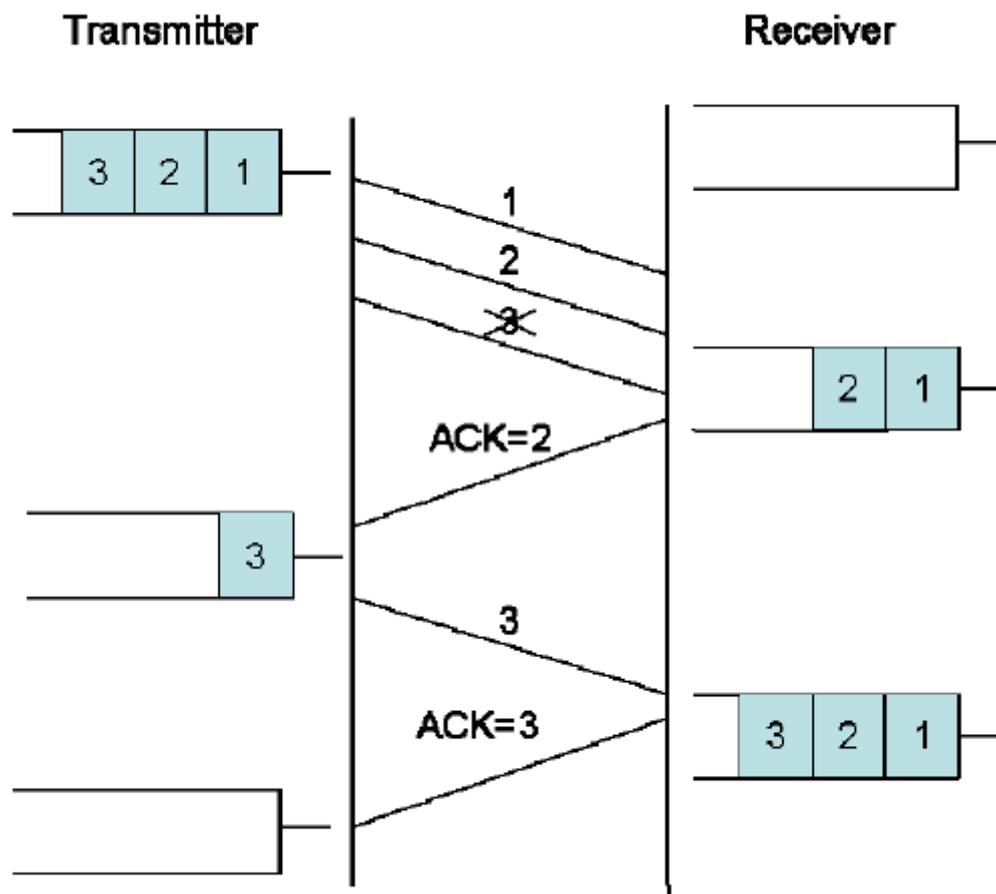


Ilustración 9.- Ejemplo de esquema de ACK.

Gracias a este protocolo de tramas ACK, un conjunto de paquetes pueden ser enviados a un nodo dado, sin esperar a que cada uno de los paquetes específicamente sea reconocido, lo cual resulta más eficiente con los recursos del canal, ya que las tramas disponibles se van enviando mientras el canal este libre, “desperdiándose” recursos únicamente cuando se dan errores.

5.2.5. Capa de convergencia

La función de la capa de convergencia es encapsular paquetes que provienen de aplicaciones externas, como por ejemplo tramas Ethernet 802.3, antes de pasárselas a la entidad LLC para su transmisión. En este caso la trama Ethernet se encapsula en un paquete PLC, el cual básicamente está formado por la trama original con una cabecera añadida PLC, la cual, incluye información tal como la prioridad de la trama PLC, la red Virtual LAN a la que pertenece (VLAN), información de control broadcast, etc.

Como se puede intuir, en esta capa cobran importancia las redes LAN virtuales. Estas redes virtuales permiten que la red PLC OPERA opere como pequeñas subredes que pueden ser manejadas independientes. El estándar que sigue es el 820.1q, pero con capacidades de etiquetado adicionales, de modo que puede estas capacidades pueden ser utilizadas independientemente a las etiquetas estándar de 802.1q. De este modo se puede lograr una estructura VLAN con 2 estructuras diferenciadas, pero trabajando conjuntamente, con lo que la separación entre dos tráficos de usuario resulta más sencilla.

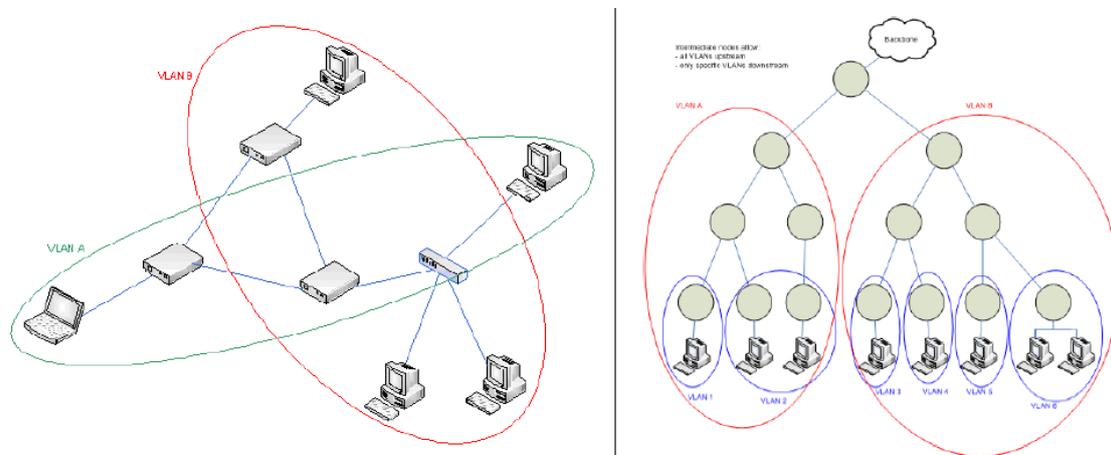


Ilustración 10.- Comparativa entre una implementación con una única VLAN, y una VLAN de dos niveles.

5.2.6. Capa de administración

El estándar OPERA define el formato de intercambio de información de control entre nodos que utilizan la encapsulación SNAP en tramas normales Ethernet. Los mecanismos principales de control son:

- Protocolo de carga de bit adaptativo: Se utiliza para intercambiar las tablas de carga de bit para adaptar las características de transmisión al canal.
- Protocolo de acceso: Utilizado para aceptar nuevos nodos a la red.
- Protocolo de resolución de puertos: Sirve a la red PLC para intercambiar información de direccionamiento entre nodos.

- Protocolo de descubrimiento de cluster: Funciona de modo que la red es capaz de descubrir los nodos que pueden transmitir simultáneamente sin interferir entre si, de modo que se logra un uso mucho más eficiente del canal.
- Protocolo de control de admisión de conexiones mejorada (CAC): Protocolo para reservar recursos para flujos de datos.
- Protocolo para administración automática de crosstalks entre dos sistemas sincronizados: Este mecanismo se usa cuando dos redes que deberían operar independientes interfieren entre sí.

También son perfectamente configurables los protocolos del árbol de expansión, incluyendo la versión mejorada Rapid STP. Estos protocolos sirven para evitar los bucles que pueden darse en las redes, evitando que los nodos no sean capaces de sobreponerse a dichos bucles, y evitar así inundar la red de tramas. Este algoritmo mejora no solo tiene en cuenta la estructura a nivel de red, sino que también tiene en cuenta parámetros físicos para obtener las mejoras rutas a través de la red.

5.2. Arquitectura BPL

Las arquitecturas PLC, están condicionadas por la estructura eléctrica y las características de la red en los diferentes segmentos: La estructura de la red, la topología, los tipos de cables, el tipo de equipamiento, niveles de tensión, las prácticas de implantación, son variables a lo largo y ancho del mundo.

La tecnología PLC, como tecnología de acceso, y de red local, puede ser implementada sobre segmentos de la red de media o baja tensión. Ambos tipos de segmentos tienden a crear topologías de tipo árbol desde la perspectiva del PLC.

En el caso de la red PLC de Iberdrola, se utiliza una combinación de PLC de banda ancha (BPL, mediante el estándar PLC OPERA), y PLC de banda estrecha (NB PLC, utilizando el estándar PRIME). EL BPL se utiliza como núcleo de la red de telecomunicaciones, cubriendo las estaciones secundarias unidas mediante líneas de potencia de media tensión. El NB PLC se utiliza para conectar los contadores inteligentes con las estaciones secundarias por medio de la red de media tensión.

Los contadores son dispositivos que se encuentran en las proximidades de los consumidores de la distribución eléctrica, los cuales llevan la cuenta del consumo eléctrico sobre un periodo de tiempo. Estos dispositivos tradicionalmente han sido electromecánicos, pero hoy en día la tendencia es hacia la sustitución completa de estos elementos por contadores electrónicos, los cuales permiten acceso remoto. Estos dispositivos están irremediablemente asociados con los consumidores, y por tanto, dependen en gran medida de la localización de los consumidores. Muchos contadores están relativamente aislados, por lo que pueden

encontrarse un único contador en un solo lugar, mientras que otros están instalados juntos dentro de habitaciones compartidas en el sótano de un edificio.

Esto plantea una complejidad añadida para la red de telecomunicaciones que tiene que soportar estos servicios. La tecnología PLC ofrece una solución costo-eficiente a este problema, puesto que se adapta perfectamente a la necesidad, ya que no requiere de grandes cambios al utilizar la infraestructura de la distribución eléctrica que existía previamente.

En este proyecto nos vamos a centrar en la parte de la red que va sobre el cableado de media tensión, que hemos llamado BPL, o Broadband PLC, aunque a lo largo de todo el documento nos referimos a ella, simplemente como PLC. Esta tecnología utiliza la red de distribución, que se apoya naturalmente sobre las estaciones secundarias o centros de transformación (CT), puesto que allí se encuentran los sensores de información de MV y LV, y se concentran de un modo natural las lecturas de los contadores y demás. Un punto de interés en las denominadas Smart Grids es la de conectar todos los CTs relevantes con sistemas de control centrales, y esto se puede lograr ya sea conectando individualmente los CTs con el núcleo de la red, o agrupando los CTs entre sí, y conectando uno de ellos al núcleo.

Estos CTs normalmente están cerca de las redes de baja tensión a las que sirven. Esto implica que estos CTs pueden ser de un rango de diferentes tipos, tamaños y consumos. Las grandes compañías de utilities operan con cientos de miles de estos centros, y aunque son de muy diversos tipos, todos presentan una infraestructura común: las líneas de media tensión que interconectan CTs entre ellos y a estaciones primarias. Las líneas de media tensión subterráneas presentan enlaces punto a punto con cargas e impedancias estables. Por el contrario, las líneas aéreas de media tensión pueden presentar derivaciones en una topología del estilo árbol.

El uso de las líneas de media tensión para propósitos de telecomunicaciones, sin interferir en el uso de la distribución eléctrica es prácticamente tan viejo como las redes eléctricas. Hay un rango considerablemente amplio de soluciones de acoplo para las inyección de señales PLC de banda ancha (tanto capacitivas como inductivas), las cuales permiten una inyección estable y segura de las señales PLC sobre conductores eléctricos. Estas soluciones tienen que estar bien adaptadas a la infraestructura existente, de cara a no interferir con ella.

5.3. Criterios de diseño de la red PLC Iberdrola

Hay dos factores principales que afectan al rendimiento de los PLC sobre líneas de media tensión. El primero es la atenuación, la cual aumenta con la frecuencia y la distancia, y por tanto los enlaces con mayor longitud tienen que utilizar frecuencias más pequeñas para garantizar un rendimiento mínimo.

El segundo factor está asociado con las técnicas de control de acceso al medio (MAC). La clásica técnica de Múltiple Acceso por División del Tiempo (TDMA), hace que sea viable la planificación y configuración de la red. Uno de los modos más comunes de planificar redes PLC

sobre líneas de medio voltaje es definir dominios TDMA, los cuales utilizan una cierta banda de frecuencias, y son capaces de coexistir con otros dominios TDMA adyacentes, que operan en otro modo de frecuencia. Estos modos de frecuencia pueden utilizarse, pero utilizando una cierta distancia de guarda definida sobre el cableado, para evitar interferencias.

Además, el material del que están constituidos los cables sobre los que funciona la red PLC, también ha de ser considerados. Cada tipo de cable ofrece unos niveles de atenuación e interferencia que han de ser tenidos en cuenta. No solo se ha de tener en cuenta el cableado subterráneo o aéreo, que han de ser considerados de un modo diferente, si no que aspectos internos del cableado se han de tener en cuenta.

Las especificaciones desarrolladas por el estándar OPERA permiten multitud de configuraciones. En el caso de la red desplegada por Iberdrola, se configura un sistema basado en TDMA, con dos modos de operación posibles en función de la banda de frecuencia que se utiliza:

- Modo 1, o **Banda 11**: En la que se opera de 2 a 7 MHz.
- Modo 2, o **Banda 12**: Que funciona de 8 a 18 MHz.

Tras diversos y extensos estudios de campo, se constituyeron unas reglas de planificación en el diseño de la red de medio voltaje. Estas reglas de diseño utilizan una simple clasificación del cableado, en concordancia a los resultados de rendimiento obtenidos sobre dichos cables, y por tanto clasifican el cableado en dos grandes grupos, tales como:

- El cableado aislado relleno de aceite, denominado “cable viejo”, el cual normalmente presenta mayor atenuación.
- El cableado que utiliza aislamiento de PVC, EPR, o XLPE, el cual se denomina “cable nuevo”, el cual permite que las señales PLC alcancen mayores distancias.

Los requisitos en base a los que se crearon estas reglas de diseño toman en cuenta que tienen que transmitir un mínimo de 100 kbps reales, en aplicaciones bidireccionales simultáneas. Las reglas de diseño como tal consisten en 7 parámetros:

- **Parámetro 1**: Número máximo de estaciones secundarias o CT por célula PLC.

Las células PLC, también denominadas SCP, son un grupo de CTs interconectados entre sí que utilizan el mismo modo de frecuencia. Este parámetro es definido para que se logre un mínimo de throughput en la célula. El valor propuesto es de 20 subestaciones por célula.

- **Parámetro 2**: Máximo número de saltos entre maestro y esclavo.

Este criterio, trata de limitar el delay, o retardo máximo, estableciendo una distancia máxima entre maestro y esclavo en cada célula. La métrica de este parámetro puede ser tanto metros, como saltos. El valor fijado es de 9 saltos máximos.

- **Parámetro 3:** Número máximo de estaciones consecutivas.

Criterio análogo al anterior, el número máximo de saltos entre dos CTs cualesquiera en una célula también debe estar limitado. El valor que toma es de 15 subestaciones consecutivas.

- **Parámetro 4:** Criterio de distancia.

En función del tipo de cable, y la banda de frecuencia utilizada, ha de respetarse una distancia máxima en cada salto. En el caso que nos ocupa (enlaces subterráneos), el límite de distancia son 1.000 metros. Este es el caso extremo de cable nuevo y modo 1.

- **Parámetro 5:** Criterio de distancia de guarda.

Se establece para que dos dominios disjuntos de células utilizando el mismo modo de frecuencia se interfieran entre sí. Este parámetro se fija en 2.000 metros, medidos sobre las líneas de medio voltaje que les unen.

- **Parámetro 6:** Máximo número de estaciones secundarias de terceros.

El objetivo es evitar las estaciones secundarias de terceros, por lo tanto se fija en 0.

- **Parámetro 7:** Número mínimo de estaciones secundarias por célula.

Este parámetro se establece por razones de coste y eficiencia. Las células han de tener un tamaño mínimo relevante. Se ha establecido un mínimo de 4 CTs por célula.

Otros parámetros a considerar en la planificación son:

- Viabilidad técnica: Normalmente los enlaces de menor longitud presentan mayores rendimientos, por lo que se tratara de favorecer los enlaces menores.

- Subestaciones cubiertas y células necesarias: Una planificación que da servicio a un número mayor de CTs ha de ser favorecida, y lo mismo una que utiliza menos CTs por célula.

- Conexión al tronco de la red o backbone: Un parámetro importante es considerar la disponibilidad de conexión al tronco de la red.

- Número total de usuarios: Cuantos más usuarios puedan ser atendidos, mejor se considera la planificación, por lo que una buena planificación PLC, maximiza los usuarios a los que se les da servicio.

Teniendo en cuenta todos estos parámetros, se puede definir un algoritmo con el que se pueden evaluar cualitativamente las opciones de planificación en base a estos criterios. En el caso de Iberdrola se desarrollo un software que facilita la elección de la arquitectura idónea de cada célula.

5.4. Particularidades de la red PLC Iberdrola

Tenemos disponibles tres bases de datos diferentes, dos de ellas son de los equipos propietarios de Ormazabal y Corinex, y una tercera que hace de “paraguas” de las dos y contiene datos comunes. Esta última se denomina GADIP y es de la que vamos a hacer un uso extensivo. Aunque el equipamiento de ambos fabricantes permite la interoperación entre sí, no se han mezclado en la arquitectura para que la información de los gestores sea limpia, ya que no pueden acceder a parámetros del equipamiento del otro fabricante, y de este modo se consigue que cada célula este bien definida en las bases de datos de cada fabricante.

Como ya se ha comentado las células de comunicación PLC tienen una jerarquía de maestro-esclavo, donde el maestro de la célula va conectado al backbone de la red mediante diversas tecnologías que habitualmente no es mediante PLC, como por ejemplo 3G, fibra óptica, xDSL, etc. El resto de nodos tienen una jerarquía de nodo hijo y nodo padre, todos en relación a el nodo maestro. Las comunicaciones son todas referidas en dirección al nodo padre, por lo que el nodo maestro no aparecerá explícitamente, pero si que tendremos los datos de su recepción y transmisión en los datos de sus hijos directos. De modo que si tenemos los datos de transmisión y recepción de un nodo, sabremos que son los datos de conexión con el nodo superior en la jerarquía. El nombre de cada equipo tiene el siguiente formato:

“Tipo de equipo”_CT-“Codigo Sigrid”

Donde el tipo de equipo puede ser:

- R: **Repeater**, Un equipo no maestro en la jerarquía.
- MB: **Master Backbone**, el equipo es maestro y está conectado al backbone.
- RB: **Repeater Backbone**, por condiciones de diseño algunas veces un equipo no maestro tiene que ser el que está conectado al backbone.

Hay un parámetro que denota a que zona pertenece. Hay cinco zonas, y esta regionalización obedece a zonas geográficas de mantenimiento diferentes. El equipo de la zona 1 no es el mismo equipo de mantenimiento de la zona 2.

Como ya se ha comentado, las células PLC trabajan en dos modos de frecuencia diferentes: Banda 11 o modo 11, la cual ocupa de 2 a 7 MHz, y la banda 12, que va de 8 a 18 MHz. Al tratar los datos de información me he topado con modo 17 en equipos de Corinex, la cual da un poco menos de velocidad, pero que a efectos prácticos se corresponde con la banda 11. Lo mismo sucede con el modo 18, que se corresponde con la banda 12.

El proceso de provisión de conectividad es diferente según fabricante. En el caso de Ormazabal aunque el equipo no haya enviado datos, y este establecido en la red, el equipo al arrancarse y estar debidamente conectado manda un mensaje al gestor, y aunque no esté dado de alta con la dirección IP asignada y demás, aparece en el gestor en estado de Burn-In (no está en producción). En el caso de Corinex no aparece en el gestor si no se ha configurado debidamente y está en servicio.

Las variaciones en el firmware son debidas a la necesidad de ciberseguridad de los equipos. Los que tienen las versiones actualizadas de firmware, tienen establecidas unas directivas de seguridad, por las que al realizar una petición de acceso sobre un equipo, el equipo BPL afectado lanza la consulta sobre el usuario y su dirección IP a un servidor de seguridad dedicado TACACS (el cual en el estándar se denomina RADIUS).

Hay dos equipos diferentes de Corinex, y su diferencia radica en el tipo de chasis que tienen. Los equipos que aparecen como meta_CXP, tienen un chasis metálico, la cual proporciona mayor inmunidad al ruido, frente a la versión anterior, denominada como plas_CXP, la cual tiene un chasis de plástico, y tiene peor respuesta al ruido. En el número de serie de estos equipos también podemos ver esta diferencia, ya que el número de serie de los equipos con chasis de plástico comienza con el número 11, y los de metal comienzan con 16 o 17.

En el caso de los equipos de Ormazabal, también hay dos modelos diferentes, y aunque ambos tienen el chasis metálico, la diferencia radica en el tamaño de la memoria interna, con la que se puede integrar capacidades de ciberseguridad. Los equipos API2000SA, son los modelos antiguos, no tienen suficiente memoria para ciberseguridad. Los equipos API2000SA2 son la versión moderna y si que tienen memoria suficiente para ciberseguridad.

Entrando en el gestor de Corinex, y accediendo a la parte pertinente de una célula, vemos que el parámetro **Adjustable Gain configuration** en recepción está habilitado. Este parámetro modifica la ganancia de receptor para ajustarse a las potencias que recibe. Esto es debido a que al estar conectado a diferentes equipos, situados a diferentes distancias y con los cables sometidos a diferentes condiciones de ruido y atenuación, las potencias que le van a llegar al equipo van a ser de diferentes magnitudes, por lo que el receptor tiene que ajustarse dinámicamente a esas potencias. Este parámetro va del valor 1 al 7, donde el 1 es que el equipo transmisor se encuentra cerca, con lo cual tiene una señal potente, y no requiere de una potencia añadida para llegar bien a su destino, mientras que en el caso de tener valor 7 significa que le llega una señal de potencia débil, con lo cual necesita aumentar la ganancia para poder recibir un valor suficiente de señal. En el caso de transmisión, este emite a máxima potencia siempre, por lo que este parámetro esta deshabilitado o asignado un valor 0.

También podemos ver que hay unas graficas de cada equipo con el parámetro BPC (Bit per Carrier), el cual vemos que no es constante a lo largo de la frecuencia. Las transmisiones en banda 11 tienen 768 portadoras, y las señales de banda 12 transmiten el doble: 1536 portadoras, de manera que ocupan el rango completo de frecuencia asignado a cada modo. Estas portadoras se sitúan lo mas juntas posibles, mediante técnicas FDMA. En el parámetro SNR vemos que el ruido no afecta por igual a todas las frecuencias, por lo que a cada portadora situada en un trozo del espectro no les afecta por igual. A más ruido en la banda más protección necesitara la portadora específica, resultando en que es capaz de transmitir menos bits por portadora. El equipo tiene que evaluar la SNR, y ajustar dinámicamente cada portadora a ese ruido.

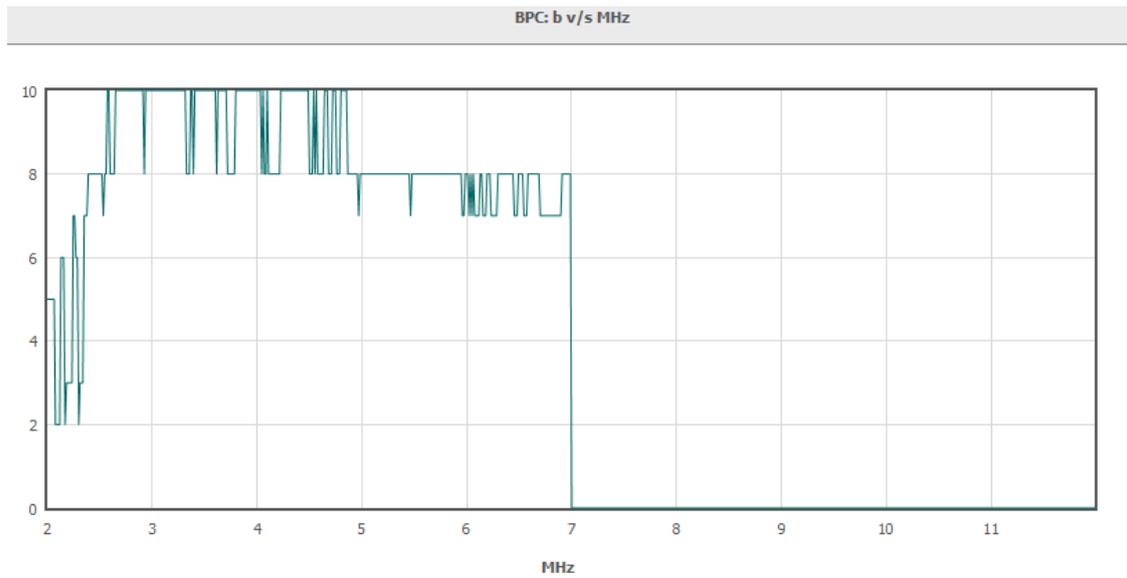


Ilustración 11.- Grafica de BPC sobre cada frecuencia de un equipo que trabaja en banda 11.

En la Ilustración 11, vemos como se los bits por portadora no son iguales en todo el espectro frecuencial. En realidad se ajustan al nivel de señal a ruido que existe en cada frecuencia, el cual podemos apreciar en la siguiente ilustración. Al ser un equipo de banda 11, solo trabaja de 0 a 7 MHz. Este mecanismo ya se comento en el apartado 5.2. Estándar BPL OPERA, pero esta vez se muestra con graficas de equipos reales.

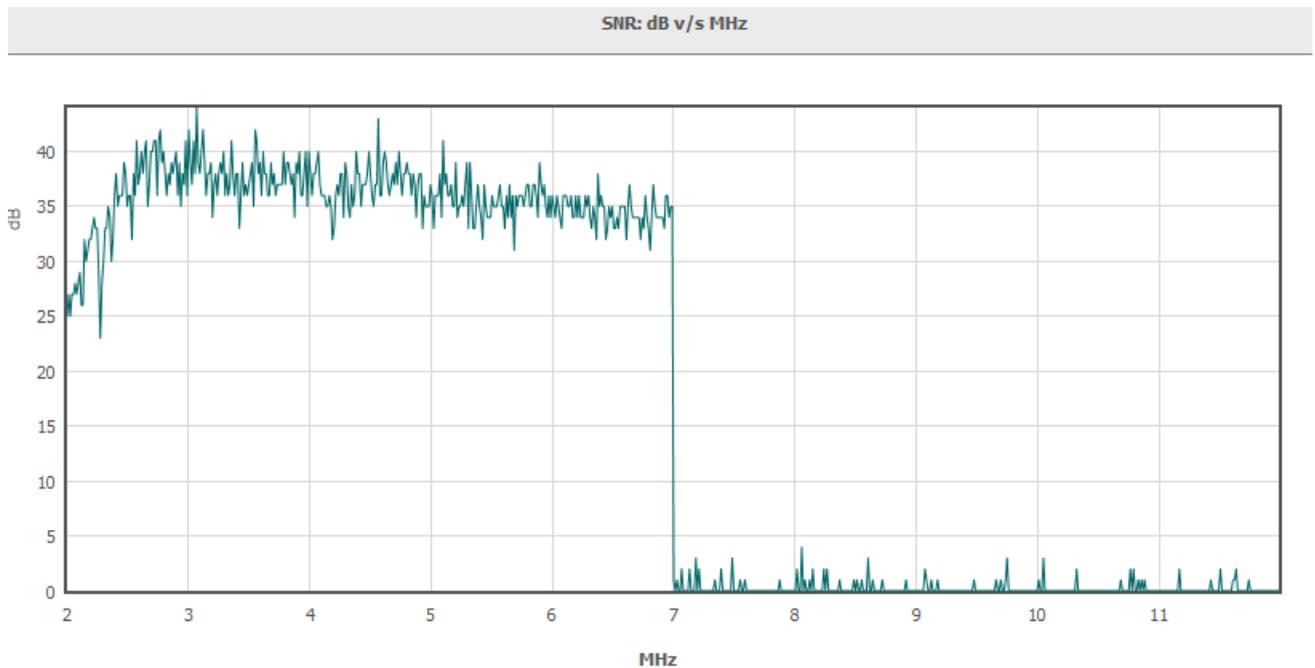


Ilustración 12.- Grafica de SNR sobre cada frecuencia de un equipo que trabaja en Banda 11.

Debido a estas diferencias de cantidad de portadoras, la banda 11 tiene un máximo de capacidad de transmisión de aproximadamente 42 Mbps, y la banda 12 aproximadamente 82 Mbps. El mínimo de capacidad de transmisión que resulta aceptable en la red de Iberdrola es de 10 Mbps. Si un equipo tiene una capacidad de transmisión estable por debajo de este umbral de aceptación, se considera que no funciona correctamente y se tomaran medidas.

Las medidas de velocidad se toman cada 2 horas en los equipos Corinex, y cada 4 horas en los equipos de Ormazabal. El sistema Gadip hace una foto de la velocidad en cada enlace, en una hora concreta cada día, y estos son los datos que manejaremos.

Un aspecto crucial para este trabajo es el método de obtención del parámetro de la velocidad. Para calcular dicha velocidad a la que funciona cada enlace, se tiene en cuenta cada una de las 1.536 portadoras (o 7), las cuales se modulan cada una con 0 a 10 bits (BPC), y teniendo en cuenta la velocidad de símbolo, se calcula la velocidad a la que puede operar en cada momento. Esto aclara que los datos de velocidad con los que trabajamos, no son datos reales de transmisión, los cuales pueden depender de la carga de la red, y sobre todo la hora a la que se realizan las transmisiones, sino que es una estimación.

Se considera una célula PLC, a un grupo de estaciones interconectadas mediante tecnología BPL, los cuales utilizan la misma banda de frecuencias para interconectarse. Las células PLC tienen unas condiciones de diseño establecidas en siete parámetros, como ya comentamos en el apartado anterior (5.3. Criterios de diseño de la red PLC Iberdrola).

Mencionar también, que los protocolos MAC comentados en el apartado 5.2. Estándar BPL OPERA, los cuales ayudan a tener dos células conjuntamente operando, pero cada una trabajando en un dominio diferente (una en frecuencia, y la otra en el tiempo) no se da en esta red, debido a que las células se diseñan de un tamaño moderado, y no se requieren de esos mecanismos. En cambio sí que se utilizan consistentemente la separación mediante los modos de frecuencia, tal y como aparecen en la Ilustración 13. En esta imagen, vemos como hay dos células muy cercanas, y la forma de que no interfieran entre si es utilizando un modo frecuencial diferente en cada una de ellas, y además la conexión al backbone de la red se hace desde nodos diferentes.

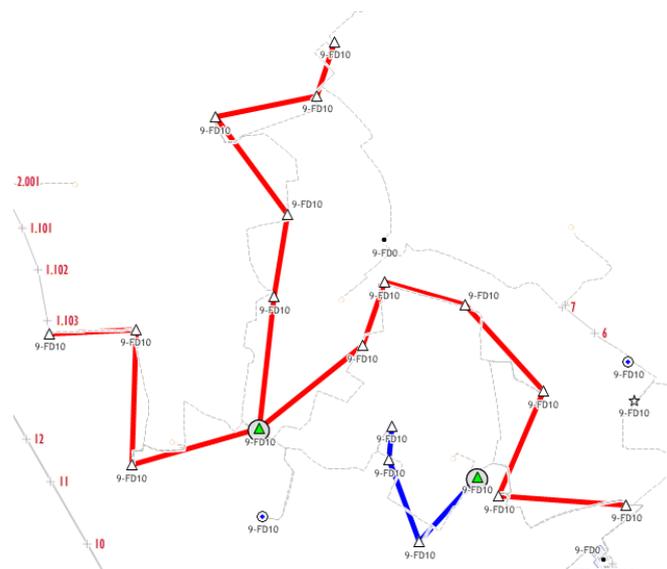


Ilustración 13.- Ejemplo de dos células PLC cercanas.

6. ANÁLISIS DE RIESGOS

Dada la multitud de variables que afectan a la tecnología que se somete a estudio en este proyecto, cabe la posibilidad de que el análisis cualitativo de los datos que se obtengan, y las conclusiones que se extraigan al ser aplicadas no validen las hipótesis, y esto acarree malas implementaciones de nuevas células PLC, estudios posteriores que no alcancen resultados positivos, o que el avance que conlleven no sea significativo, trayendo gastos innecesarios para Iberdrola. Aunque al ser uno de los pilares de la red de telecomunicaciones, cualquier punto de mejora sea algo relativamente positivo por pequeño que sea.

Paradójicamente, también podemos enumerar como fuente de riesgos, el carácter conservador de los parámetros de diseño de la red PLC de Iberdrola. Estos parámetros, aseguran el correcto funcionamiento de las células PLC en los peores casos posibles de interferencias externas, ruido de células adyacentes, cargas de la red de distribución eléctrica elevadas, y un largo etc. Al pecar estas condiciones de muy conservadoras, los resultados que se obtengan pueden no revelar nada, o alcanzar conclusiones que no aporten gran cosa a otros estudios previos, aunque en última instancia, si que validaran la bondad que las reglas de diseño aplicadas han traído consigo.

Aunque los datos que aquí se obtengan sean obviamente de un carácter objetivo, para aportar más información al respecto de las posibles mejoras de las reglas de diseño de la red, es requisito indispensable realizar más estudios sobre equipamiento real, en condiciones que no se den en equipos instalados previamente, si no que sería necesario establecer células PLC en condiciones no toleradas por las reglas de diseño, para poder proseguir la investigación, y poder despejar las dudas sobre los límites reales de la tecnología.

7. METODOLOGÍA SEGUIDA

Tras haber comprendido el estándar, el siguiente paso a realizar es entender las fuentes de datos. Tenemos dos Fuentes de datos.

Por un lado tenemos una hoja Excel que contiene una “foto” de la red en un momento dado, la cual contiene datos como el tipo de cableado de cada enlace, y la longitud del mismo. Al ser una foto de la red, habrá equipos y enlaces que no existían u operaban mediante PLC en el momento de la foto, pero ahora si estén funcionando, o por el contrario, que en el momento de la foto funcionaban correctamente, pero que fueron retirados o están caídos, por lo que habrá un pequeño mismatch con la siguiente fuente de datos.

Por otro lado, tenemos acceso a una base de datos denominada GADIP, que contiene numerosos parámetros, entre los cuales, podemos considerar el más relevante la velocidad de transmisión medida en Mbps, y la dirección IP de cada equipo.

7.1. Descripción de los datos contenidos en la foto de la red

La foto de la red es una hoja Excel con numerosas columnas, que identifica el tipo de cableado que tiene cada enlace PLC, e identifica a los extremos del enlace mediante la codificación pertinente interna de la red Iberdrola. Vamos a explicar brevemente el contenido de cada columna:

- **ID:** Es un identificador numérico unívoco que solo tiene sentido dentro de esta hoja Excel.
- **Conexión:** Identifica la conexión entre CT mediante los nombres que tienen asignados los CT. Son nombres representativos como una calle cercana, o un barrio cercano al CT. Tiene el formato <Nombre de CT 1>-<Nombre de CT 2>.
- **COD_INSTAL_A:** Es otro identificador unívoco, aunque no nos resulta útil para el estudio. En este caso identifica al equipo de menor jerarquía en la célula PLC, denominado A en este documento.
- **REGION_A:** Se refiere a la zona UTD (Unidad Territorial de Distribución, es un acrónimo característico de la red Iberdrola). Estas zonas representan la repartición geográfica de Iberdrola de los equipos de mantenimiento. No tiene interés para el estudio. De nuevo, se refiere al equipo de menor rango en la jerarquía.
- **ZONA_A:** Este parámetro es análogo al anterior, aunque algunas de las regiones Iberdrola se desglosan en varias zonas. Se refiere al equipo A en la conexión.
- **COD_USUARI_A:** Esta columna contiene el número SIGRID (Identificador numérico unívoco del CT perteneciente a Iberdrola). Este parámetro nos sirve para unir las fuentes de datos y poder casarlas. También se refiere al equipo de rango más bajo.

- **X_UTM_A y Y_UTM_A:** Son las coordenadas para geolocalizar el CT al que se refieren. Como en los anteriores parámetros, se refieren al equipo A.
- **COD_INSTAL_B, REGION_B, ZONA_B, COD_USUARI_B, X_UTM_B, Y_UTM_B:** Después de expresar todos los parámetros del equipo de menor rango en la jerarquía de la célula PLC, denominada también SCP, aparecen los mismos datos, pero del equipo de mayor rango en la jerarquía de la célula, denominado en este caso B.
- **CODIGO_LINEA:** Identificador numérico de la línea de media tensión a la que pertenece el enlace.
- **Nombre_Linea:** Este parámetro también identifica a la línea de media tensión, pero en este caso es un identificador alfanumérico.
- **Tension:** Parámetro referido a la línea de media tensión a la que pertenece el enlace. En este caso nos da la tensión que carga el enlace. Puede tomar los siguientes valores: 11 kV, 13,2 kV, 15 kV, 20 kV y 30 kV.
- **Nombre_STM:** Este identificador representa el identificador de la agrupación de células BPL, en agrupaciones geográficas. Los parámetros de ubicación geográfica no resultan de interés.
- **Longitud_Segmentos:** Este parámetro si que resulta clave en el estudio. Representa la longitud total del enlace que los une, sumando las longitudes de los enlaces en caso de que haya empalmes. El parámetro esta medido en metros.
- **Numero_Segmentos:** Representa el número de cables físicos diferentes por los que puede ir un enlace PLC. Como ya se ha comentado, puede haber CTs no serviables para dar servicio PLC, por no tener espacio para ubicar el equipo PLC, o no estar correctamente habituado para portarlo, por lo que se dan empalmes, los cuales introducen perdidas, y por ello en este estudio hemos filtrado esta casuística de la muestra. Este parámetro toma valores del 1 al 4, de los cuales hemos descartado todos los enlaces excepto los que tienen el valor 1.
- **Tip_cable:** Este parámetro es clave. Representa el tipo de cable con la codificación que hemos nombrado anteriormente. Puede tomar numerosos valores, puesto que cuando hay empalmes aparecen los tipos de cable en orden.
- **Longitud_cables:** Representa la longitud del cable, o cables que forman el enlace PLC. Si hay más de un cable, separa las longitudes por el carácter "/". Este parámetro también esta medido en metros.
- **COD_SICOID_A:** Este parámetro toma el mismo valor que la columna COD_USUARI_A, pero con un carácter "S" delante del número.
- **COD_SICOID_B:** Del mismo modo que el anterior, toma el mismo valor que la columna COD_USUARI_B, pero con un carácter "S" delante del numero.

- **Longitud_Aereo:** Este parámetro se refiere a la longitud de la parte del enlace que va sobre líneas aéreas de media tensión. Como en nuestro caso todos los enlaces son subterráneos, en todos los casos este parámetro toma el valor 0.

7.2. Descripción de datos obtenidos de GADIP

Esta base de datos contiene multitud de datos. Para el interés de este trabajo podemos considerar dos enfoques de los datos contenidos en GADIP: Un histórico de la velocidad de recepción y transmisión de cada equipo, e información detallada de cada uno de los equipos que están actualmente funcionando correctamente en la red. El histórico surge de la extracción de un dato de velocidad de transmisión y recepción en una hora exacta diaria de los gestores de los equipos de fabricantes. Normalmente toma el último dato de velocidad disponible de ese mismo día. Como ya veremos, los dos fabricantes de equipos que utiliza Iberdrola toman datos de velocidad, uno cada 4 horas, y el otro cada dos horas.

En el caso del detalle de cada equipo, contiene 25 parámetros, vamos a comentar los más interesantes y que nos resulten de interés:

- **IP_ADDRESS:** Dirección de red, o dirección de nivel 3 en el modelo OSI, o simplemente, dirección IP de cada equipo. Este parámetro es de gran utilidad para identificar a cada equipo.
- **COD_INSTALACION:** Número unívoco que representa al centro de transformación. A la hora de buscar el equipo en los gestores de los fabricantes resulta crucial este parámetro.
- **ID_ZONA:** Se refiere a la zona UTD (Unidad Territorial de Distribución). Estas zonas representan la repartición geográfica de Iberdrola de los equipos de mantenimiento.
- **NOMBRE:** Se refiere al nombre del equipo dentro de la red BPL. Este nombre sigue el siguiente formato:

<Tipo de equipo en función de la función dentro de la SCP: **R** de Repeater ó **MB** de Master Backbone> <CT (Centro de transformación) + 9 dígitos del código Sigrid (Este es el identificador unívoco referido a la instalación, que en este caso son centros de transformación, donde va el equipo BPL).> <Nombre del centro de transformación>

- **NODE_MODEL:** El tipo de modelo del equipamiento. Hay 4 modelos, 2 de cada fabricante:
 - API2000SA: Modelo original de Ormazabal.
 - API2000SA2: Modelo más actual de Ormazabal. La principal diferencia con el tipo de equipo anterior es que estos últimos tienen más memoria para integrar capacidades de Ciberseguridad.
 - plas_CXP-MVCI-GWYC: Equipo antiguo de Corinex. El chasis es de plástico, lo que ocasiona peor rendimiento.
 - meta_CXP-MVCI-GWYC: Equipo más reciente de Corinex. En este caso el chasis es metálico lo que le confiere de mayor resistencia al ruido, redundando en mejor rendimiento que los equipos de plástico.

- **TEL_PLC_BACKBONE:** Se refiere a la tecnología con la que están conectados los equipos Master al backbone de la red.
- **NODE_TYPE:** Se refiere al tipo de nodo BPL, en función del papel que desempeñan dentro de cada célula SCP. Puede ser un maestro o un repeater. Debido a que todos los datos que se manejan están referidos en dirección hacia el equipo jerárquicamente superior, no manejaremos los equipos maestros como tal, sino que las comunicaciones de dichos equipos vendrán dentro de los datos de los equipos que están justo por debajo en la jerarquía.
- **TOTAL_DEPENDIENTES:** Este parámetro nos dice cuántos equipos “cuelgan” en la jerarquía de cada célula del equipo al que se refiere este dato.
- **TOTAL_DEPENDIENTES_DIRECTOS:** En este caso, nos dicen cuantos equipos están directamente conectados al equipo al que se refiere este dato.
- **BANDA:** Se refiere al modo de frecuencia en el que opera cada equipo. Se utilizan dos bandas de frecuencias: Banda 11 (o modo 1), y Banda 12 (o modo 2). En los equipos de Corinex pueden encontrarse banda 17 y banda 18, pero en la práctica están operando en banda 11 y banda 12 respectivamente.

Un aspecto importante, es que todos los datos que aparecen en Gadip, son en base a la comunicación ascendente en cada célula; esto es, todos los enlaces que aparecen, son siempre referidos a una comunicación de un equipo hijo, o de menor orden en la jerarquía de la célula, transmitiendo a su padre, o equipo de jerarquía superior en la célula, en el caso del dato de transmisión.

El parámetro con el que unimos ambas bases de datos, no es la dirección IP, como cabría esperar, si no que es el código de instalación, o código de centro de transformación. Esto es así debido a que la dirección IP no aparece en el Excel que representa la foto de la red. Por lo que, una extracción de la lista de todos los equipos BPL de Gadip en un Excel, y utilizando la función buscarV mediante el parámetro del código de instalación A, o en otras palabras, el código de instalación del origen de la comunicación.

7.3. Definir métrica de evaluación (KPI)

El parámetro clave con el que vamos a medir la bondad de los equipos, respecto a otros parámetros es la velocidad de transmisión. Podemos considerar este parámetro como el Key Performance Indicator de este estudio. Esto es, es el indicador clave para poder evaluar el rendimiento o desempeño del equipamiento BPL.

Otros parámetros podrían haber sido la latencia, o el retardo de la red, pero en este contexto de la red PLC Iberdrola, no es una aplicación que no requiere de una actualización en tiempo estrictamente real, y suele ser un entorno permisivo con un retardo no despreciable, no los consideramos un parámetro tan clave como la velocidad de transmisión y recepción, ya que es más importante la capacidad de transportar un caudal de bits por segundo, o throughput.

7.4. Proponer lista de factores candidatos

En un entorno de enseñanza es típico pensar que un proceso únicamente puede verse afectado por un par de factores, o una lista considerablemente reducida de parámetros, pero en entornos reales, es normal que en realidad influyan un número insondable de factores. Este es el caso que nos ocupa. Vamos a citar varios parámetros que pueden a primera vista afectar al rendimiento:

- La longitud del enlace. El parámetro más típico, y es que la señal PLC se atenúa con la distancia que recorre. Este es un candidato firme para el estudio.
- El ruido impulsional. El ruido inherente a cualquier sistema afecta también al PLC. No podemos cuantificarlo de una manera inmediata para este trabajo.
- El tipo de cableado sobre el que viaja la señal afecta. En este caso el cable viejo provoca que la calidad de la señal que se recibe sea de peor calidad que en el caso de un cable nuevo. Este parámetro es uno de los pilares de este estudio.
- Los acoplos mediante los que se conectan los equipos OPERA a la red de media tensión provocan pérdidas, aunque la cantidad y tipo de acoplos que existen hagan inviable de momento tener en cuenta este parámetro en este estudio.
- La relativa proximidad de otros equipos PLC causan problemas de ruido entre ellos. A más equipos, y más cerca se sitúen más ruido se provocaran entre sí. Tendremos en cuenta este factor en uno de los últimos estudios.
- La estación del año: Puede parecer un parámetro trivial, pero con el aumento de la temperatura que suelen traer los meses veraniegos, los equipos tienden a bajar el rendimiento, e incluso a averiarse.
- Los empalmes PPLC. Cuando una señal PLC pasa por uno de estos empalmes, la lógica nos dice que se darán pérdidas de potencia, lo que conllevará un mayor ruido en la comunicación por ese enlace, lo que redundará finalmente en un empeoramiento de la señal. Este parámetro puede utilizarse, pero cuantificarlo es más complejo de lo que parece, puesto que al darse empalmes, el tipo de cable sobre el que va puede cambiar, dando lugar a diferentes grupos de estudio, en los que en este caso la muestra de cada uno de ellos es relativamente pequeña, además de que la longitud de los empalmes es diferente a su vez, por lo que es algo complejo de abordar; por ejemplo, tener en cuenta en el mismo grupo, un enlace que utiliza 3 metros de cable nuevo y 400 de cable viejo, y otro que usa 400 de cable nuevo, y 3 de cable viejo requiere de una abstracción y complejidad elevada.
- Interferencias frecuenciales externas. Aun siendo señales que viajan subterráneas, y deberían estar en mayor o menor medida de agentes externos, es inevitable que sufran interferencias externas. Este parámetro es tan abstracto como difícil de cuantificar.

- Hora de la medición de la velocidad. La carga de la red eléctrica no es igual a las 10 de la mañana de un lunes que la de un domingo a la noche, por tanto, la carga de la red BPL no debería ser la misma. Este parámetro debería afectar al estudio, pero debido a que los datos que manejamos se extraen a la misma hora todos los días, debería de verse relativamente anulado. Aunque hemos de tener en cuenta de que los datos se extraen de la última medida que existe del mismo día de los gestores de los equipos de los fabricantes, por lo que puede haber pequeños errores en la hora de la medición. Este parámetro resulta difícil de manejar.

Una vez enumerados los factores, pasamos a explicar los parámetros que se han utilizado. Para no trabajar con un volumen excesivo de datos, y poder comparar y medir en qué grado afectan varios factores a la velocidad, diferenciamos el tipo de cable, y el modelo del equipamiento BPL.

El tipo de cable que se utiliza en este trabajo sigue una nomenclatura simplificada. Hay alrededor de 280 tipos de cable, los cuales no voy a nombrar uno por uno aquí, ya que no tiene sentido; el cableado puede ser de muchos tipos, de un sinfín de fabricantes, así que, para facilitar las cosas se han agrupado en dos grandes grupos: Cable nuevo, denominado como 1SA (la "S" viene de cable seco) que resulta mas adecuado para la aplicación PLC, y cable viejo, denotado como 3PA, o 3PC (la "P" viene de plomo). En un mismo enlace puede haber empalmes con otro tipo de cableado, pero se han excluidos esos equipos. Esos equipos son los que en la siguiente tabla aparecen con combinaciones de esta nomenclatura, como por ejemplo 1SA/3PA.

Hay dos grandes fabricantes de equipamiento BPL OPERA, con los que trabaja Iberdrola: Corinex y Ormazabal. Los equipos APISA2000SA Y APISA2000SA2 son los equipos de Ormazabal, y los equipos denominados Meta_CXP y Plas_CXP son de Corinex.

Como se observa en la Tabla 1, si descartamos los datos que contienen empalmes (1SA/3PA, 1SA/3PC y 3PC/3PA), nos quedan 3 agrupaciones por tipo de cable (1SA, 3PA y 3PC). Debemos de tener en cuenta que los estudios que se realizaran discriminaran el tipo de equipamiento, por lo que, de esas 3 agrupaciones, la agrupación 3PC apenas tiene datos (un grupo de estudio 3PC - Meta_CXP contendría 78 enlaces de datos), por lo que la descartamos al no aportar una gran cantidad de datos.

Tabla 1.- Tabla resumen de la cantidad de equipos por tipo de cable y tipo de equipo.

	APISA2000SA	API2000SA2	Meta_CXP-...	Plas_CXP-...	Total
1SA	3.501	1.969	2.974	2.630	11.074
1SA/3PA	955	483	779	799	3.016
1SA/3PC	360	125	119	317	921
3PA	1.078	403	528	725	2.734
3PC	377	53	78	232	740
3PC/3PA	193	43	32	120	388
Total	6.464	3.076	4.510	4.823	18.873

Por tanto, al descartar los grupos que se han comentado, pasamos de tener 24 grupos de estudio con unos 18.000 enlaces (entre los cuales hay grupos que carecen de interés por aportar un número reducido de datos, o por contener empalmes que ensucian la muestra), a tener 8 grupos de estudio con aproximadamente 14.000 enlaces. Estos grupos se muestran en la Tabla 2. Todos los estudios que se hagan serán aplicados por separado a cada uno de estos grupos, de modo que se puedan comparar y extraer conclusiones.

Tabla 2.- Tabla resumen de los grupos de estudio.

	APISA2000SA	API2000SA2	Meta_CXP-...	Plas_CXP-...	Total
1SA	3.501	1.969	2.974	2.630	11.074
3PA	1.078	403	528	725	2.734
Total	4.579	2.372	3.502	3.355	14.808

La distribución equipos por banda de frecuencias de cada tipo de equipamiento no es pareja, pero en los grupos de estudio en ambas bandas tenemos una buena cantidad de datos, por lo que podemos considerar que hay una muestra suficientemente amplia como para no tener que descartar datos. En la Tabla 3 vemos el desglose, aunque aparece algo que nos puede chocar, y es que aparece la banda 17 y 18, las cuales consideramos banda 11 y banda 12.

Tabla 3.- Cantidad de equipos por banda de frecuencia.

NODE_MODEL	BANDA	Cantidad
API2000SA	11	3.769
API2000SA	12	3.057
API2000SA2	11	1.906
API2000SA2	12	1.331
meta_CXP-MVCI-GWYC	11	2.881
meta_CXP-MVCI-GWYC	12	1.790
meta_CXP-MVCI-GWYC	18	11
meta_CXP-MVCI-GWYC	17	1
plas_CXP-MVCI-GWYC	12	2.326
plas_CXP-MVCI-GWYC	11	2.692
plas_CXP-MVCI-GWYC	17	73
plas_CXP-MVCI-GWYC	18	80

7.5. Seleccionar factores de estudio

Para seleccionar los factores de estudio, tenemos que tener en cuenta la multitud de factores que afectan al rendimiento de la red PLC, que hemos abordado en el punto anterior. Descartando los que son sumamente complejos, o de los que no tenemos datos cuantificables, podemos enumerar, y ya marcar como puntos o hitos del estudio los siguientes apartados:

a) Obtener un histograma de la frecuencia con la que se da cada dato de la velocidad, y expresar el resultado en valores normalizados (%), con objetivo de poder comparar los diferentes grupos entre sí. En la misma grafica mostraremos los datos de banda 11 y banda 12

conjuntamente. En primer lugar se mostraran diferenciados transmisión y recepción, por lo que por cada agrupación tendremos dos histogramas.

b) Mostrar la evolución temporal del promedio y la desviación típica de la velocidad de todos los equipos de una agrupación. Se agruparan los datos por día, y se calcularan los estadísticos de cada uno de esos días. De modo que tendremos 8 gráficos por agrupación:

- Velocidad media de transmisión de banda 11.

- Desviación típica de transmisión de banda 11.

- Velocidad media de recepción de banda 11.

- Desviación típica de recepción de banda 11.

- Velocidad media de transmisión de banda 12.

- Desviación típica de transmisión de banda 12.

- Velocidad media de recepción de banda 12.

- Desviación típica de recepción de banda 12.

c) Obtener la correlación entre los datos de velocidad, y la distancia del enlace asociado a cada dato, por cada grupo de estudio.

d) Graficar en diagramas de dispersión la media, y la desviación típica de la velocidad, agrupados los datos por longitud del enlace.

e) Estudiar con datos de un marco temporal menor (dato de velocidad cada dos horas), la evolución de la velocidad de los enlaces de una sola célula SCP, de un tamaño medio (alrededor de 8 enlaces).

d) Tratar de agrupar los resultados de todos los grupos en una sola hoja Excel, para facilitar la extracción de conclusiones.

7.6. Diagrama Gantt

Ya hemos definido en apartados anteriores las diferentes fases del proyecto (En el apartado 3. OBJETIVOS Y ALCANCE DEL TRABAJO). Con este diagrama queremos mostrar la planificación temporal de las tareas, además de la dependencia de las mismas entre si. Este diagrama ha sido confeccionado mediante el programa GanttProject.

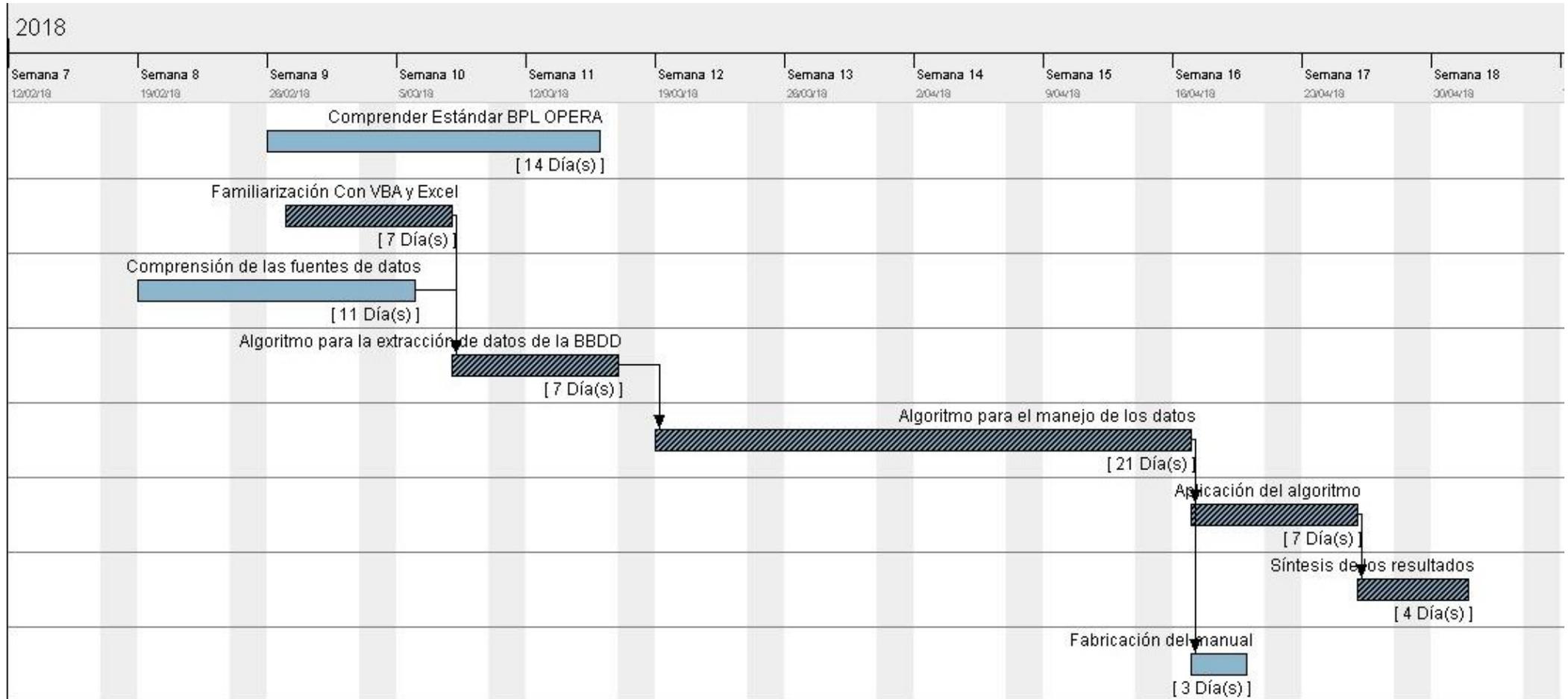


Ilustración 14.- Diagrama Gantt del proyecto.

7.7. Forma de cálculo de los algoritmos

7.7.1. Histograma bandas de frecuencia

El primer paso que se ha seguido para obtener estos resultados ha sido obtener una lista de las direcciones IP que pertenecen a cada grupo. Para ello, resulta necesario casar las dos fuentes de datos que tenemos: Por un lado, tenemos una foto del estado de la red que entre otros datos, asociado a cada dirección IP contiene el tipo de cable y la longitud del segmento. Y por otro lado, tenemos la lista de todos los equipos *repeaters* de la red, con el tipo de equipamiento que tiene cada IP. Al mezclar los datos de interés de ambas hojas Excel, tenemos una lista con la que podemos filtrar al tipo de equipamiento y tipo de cable de cada grupo (contenido en el libro Excel **IP origen**). Una vez aplicado este filtro (Tipo de equipo – tipo de cable), realizamos llamadas a la BBDD Gadip con cada dirección IP para extraer los datos históricos disponibles de cada equipo de dicha lista. Una vez tenemos estos datos, los separamos por el modo de trabajo (Banda de frecuencia, 11 o 12 principalmente) en dos hojas diferentes. Con este último paso ya tenemos los datos de partida, y ahora los vamos a procesar.

Los datos en este punto están separados en dos hojas Excel (**Banda 11** y **Banda 12**), y en cada una de ellas, los datos están dispuestos como: A: Fecha del dato, B: Velocidad de recepción (Rx), C: Velocidad de transmisión (Tx), D: diferencia entre B y C, y E: Dirección IP.

El primer paso que hacemos es volcar a memoria todos los datos de recepción de la banda 11, y ordenarlos de forma ascendente. Esos datos ahora forman un array, y los vamos recorriendo y calculando cuantos valores hay en cada rango especificado en el paso (por defecto el paso es uno), y ese resultado va en otro array en memoria. Copiamos esos valores obtenidos en la parte izquierda de una hoja nueva (**Hist Rx**), y entonces calculamos el valor porcentual que tiene cada rango, y lo pegamos también en esta nueva hoja. Con esto tenemos todas las muestras en la hoja, y podemos calcular varios estadísticos de la función de distribución que representan los datos. Lo mismo se hace para los datos de recepción de la banda 12, y se vuelcan en la parte derecha de la hoja Excel. Con esto podemos graficar los resultados de recepción de banda 11 y banda 12 en una sola gráfica. Lo mismo se hace para los datos de transmisión, en otra hoja (**Hist Tx**).

Con esto, tenemos los valores por cada rango normalizados (valores porcentuales), pero separados en transmisión y recepción. Copiamos todos los valores porcentuales en una hoja nueva (**Hist Tx+Rx**), y como los datos de transmisión y recepción de una misma banda tienen el mismo número de datos, calculamos la media de cada dato porcentual por rango, y con ello obtenemos los datos porcentuales de la media de transmisión y recepción, y lo graficamos. Esa es la gráfica que se visualiza en la comparativa final.

7.7.2. Evolución temporal de la media y desviación típica de la velocidad

En este apartado, se parte de los datos históricos de cada grupo, divididos por el modo de trabajo, de modo que, primero procesamos los datos de una banda, y luego los de otra. El formato de las fechas de los datos históricos presenta un error, por el cual las fechas a partir del día 13 de cada mes tienen formato de cadena de caracteres, lo cual dificulta el procesamiento que realizamos. Por tanto, el primer paso consiste en reparar este formato de todas las fechas de las hojas **Banda 11** y **Banda 12**.

Lo siguiente es ordenar todos los datos por fechas en formato ascendente. Después filtramos las fechas únicas, de modo que tenemos una lista de todas las fechas posibles que tenemos en el histórico. Ahora vamos recorriendo la columna de los datos históricos, y por cada fecha única vamos calculando el rango de datos de cada una de esas fechas. En este punto diferenciamos entre transmisión y recepción. Con el rango calculado, volcamos a memoria todos los datos de ese rango (1º con los datos de recepción, y después de transmisión), y calculamos la media y desviación típica de cada rango. Finalmente, graficamos los datos en 4 graficas:

- Evolución temporal de la media de recepción.
- Evolución temporal de la media de transmisión.
- Evolución temporal de la desviación típica de recepción.
- Evolución temporal de la desviación típica de transmisión.

Para poder comparar transmisión y recepción adecuadamente, los resultados de cada banda se copian y pegan en una nueva hoja (**Comparativa B. 11** y **Comparativa B. 12**) y se grafican conjuntamente con lo que pasamos a tener dos graficas:

- Evolución temporal de la media de transmisión y recepción.
- Evolución temporal de la desviación típica de transmisión y recepción.

Al observar estas gráficas, nos damos cuenta de que el comportamiento de ambas graficas es relativamente parecido (transmisión por norma general suele tener un poco más de velocidad, pero la “forma de onda” es la misma), por lo que como paso final calculamos de nuevo la media entre cada valor de transmisión y recepción. Como en la misma banda los datos de transmisión y recepción son simétricos en cantidad, es posible realizar este cálculo. De nuevo, quedan dos gráficas, y junto a los resultados y los cálculos se depositan todos sobre las hojas **B.11 Tx+Rx** y **B.12 Tx+Rx**. Los resultados de este último paso son los que se observan sobre la comparativa de los 8 grupos.

7.7.3. Correlación velocidad-distancia y comparativa velocidad-distancia

De nuevo, en este caso, necesitamos las hojas con los datos históricos **Banda 11** y **Banda 12**. Además, también necesitamos la hoja Excel con las direcciones IP, y el tipo de cable, en el que se almacena la longitud del cable (Libro Excel **IP Origen**). El primer paso consiste en realizar un *buscarV* de la longitud de cada dato histórico. Una vez cada dato tiene asignado la longitud de su segmento, ordenamos los datos por la longitud de manera ascendente.

Ahora, vamos recorriendo los datos, fijándonos en las longitudes, y extrayendo el inicio y fin de cada rango. Una vez tenemos el rango definido, volcamos a memoria el rango de celdas, y calculamos la media, desviación típica, y el número de datos que tiene el rango, y el valor porcentual de dicho rango. Si un rango solo tiene un dato, o ninguno, la media y la desviación típica de ese rango toman valor 0. Una vez calculados los datos de todos los rangos, se calcula la correlación entre todos los datos de velocidad del histórico y cada una de sus longitudes, para los datos de transmisión, y los datos de recepción. Finalmente, se grafica la media de cada rango, y se activa un filtro, con el que se filtran los rangos que no tienen un valor fijado de muestras. Se ha considerado que los rangos que tengan menos de 3 000 datos no se consideran fiables, ya que no son datos representativos, y eso afecta a los datos que se ven a la gráfica.

De modo parecido a los apartados anteriores, calculamos la media de los datos de transmisión y recepción de cada banda, graficamos los resultados, y de nuevo aplicamos el filtro de muestra representativa de 3 000 enlaces (B. 11 TxRx y B. 12 TxRx). Estos son los resultados que se aprecian en la comparativa de los 8 grupos.

7.7.4. Histograma longitudes

En este apartado, se han utilizado los datos de los rangos que se han calculado en el apartado anterior. En este caso los datos del número de enlaces que hay en cada rango. De modo que los datos de cada rango provienen del histórico. Cada enlace no está representado por un solo dato en este histograma, sino que tiene tanta representación como datos históricos tiene.

7.7.5. Correlación velocidad-distancia con 0 dependientes

Este último apartado, utiliza los datos del apartado 3. Utilizando los datos de partida con la foto de la red, necesitamos tener el listado de los enlaces que no tienen equipos dependientes en la red; que sean los últimos equipos en la jerarquía en su SCP. Esto está recogido en el libro Excel IP origen, en la hoja 0 dependientes. Una vez tenemos esto, filtramos en esta hoja el tipo de equipos que queremos, junto al tipo de cable, y conseguimos la hoja 0 dependientes de cada grupo.

Una vez tenemos los datos de partida, quitamos el filtro de la muestra representativa en los datos históricos (Banda 11 y Banda 12) que teníamos activado, filtramos y nos quedamos con los datos que pertenecen a direcciones IP con 0 dependientes (a partir de las direcciones de la

hoja con el mismo nombre). Copiamos el histórico con esos datos en otra hoja (Banda 11-dep y Banda 12-dep), y aplicamos los mismos pasos que aplicamos en el apartado 3.

En este caso, en los grupos pequeños el filtro de muestra representativa deja sin muestra la gráfica, por lo que esta desactivado.

7.8. Descripción de los resultados

En este apartado vamos a presentar los resultados de los diferentes apartados realizados, y tratar de analizarlos. Cabe destacar que tras las primeras aplicaciones del código, nos percatamos de que los datos de velocidad de transmisión y recepción se comportaban de un modo relativamente parejo, siendo la velocidad de transmisión ligeramente superior a la de transmisión con un máximo de diferencia entre ambos de 1 Mbps. Por lo que, finalmente en los resultados presentados están en su mayoría calculados mediante el promedio entre los datos de velocidad de transmisión y recepción.

7.8.1. Histograma bandas de frecuencia

He separado los resultados por banda de frecuencias para ayudar en su visualización. Como cabría esperar, con el uso de la banda 12, la cual tiene el doble de ancho de banda (de 8 a 18 MHz) respecto a la banda 11 (de 0 a 7 MHz), se obtienen resultados de velocidad mucho mayores. Aunque, surgen equipos que no se comportan como cabría esperar: Por un lado hay equipos de la banda 12 que tienen un rendimiento relativamente malo, puesto que con todo el ancho de banda que tienen la velocidad que alcanzan esta en el rango de los equipos de la banda 11 (< 42 Mbps aproximadamente), y hay equipos de la banda 11 que alcanzan velocidades de la banda 12, (> 42 Mbps aprox.), aunque estos últimos se han considerado una *rara abyss*, y se han filtrado de él gráfico aquí presentado. Estudiar estos casos extremos podría dar pie a un posterior estudio para comprender más fielmente los factores que influyen en el rendimiento.

También podemos resaltar que en los resultados de la banda 11, los equipos de Corinex con chasis plástico tienen una función de distribución bimodal, con la primera moda (y de mayor peso) centrada a un rango menor de velocidad, por lo que podemos aseverar que tienen un rendimiento peor que el resto de equipos. En los resultados de la banda 12 podemos observar el mismo comportamiento para los equipos de plástico, aunque en este caso la función de distribución que siguen en la mayoría de los casos es bastante extendida a lo largo del rango, y aunque siguen concentrándose los resultados, no es tan clara la moda como en los resultados de la banda 11.

En los resultados de la banda 12, podemos ver también que relativamente los equipos de chasis metálico de Corinex tienen un comportamiento mejor, ya que son los equipos que más velocidad alcanzan de todos, teniendo su moda centrada en valores mayores de velocidad.

Para ayudar en la visualización, se adjunta a este documento los Excels, con botones ActiveX con los que se puede filtrar del gráfico aquellos grupos de estudio que no queremos visualizar. En este caso, el libro Excel se llama **1. Histograma velocidades**.

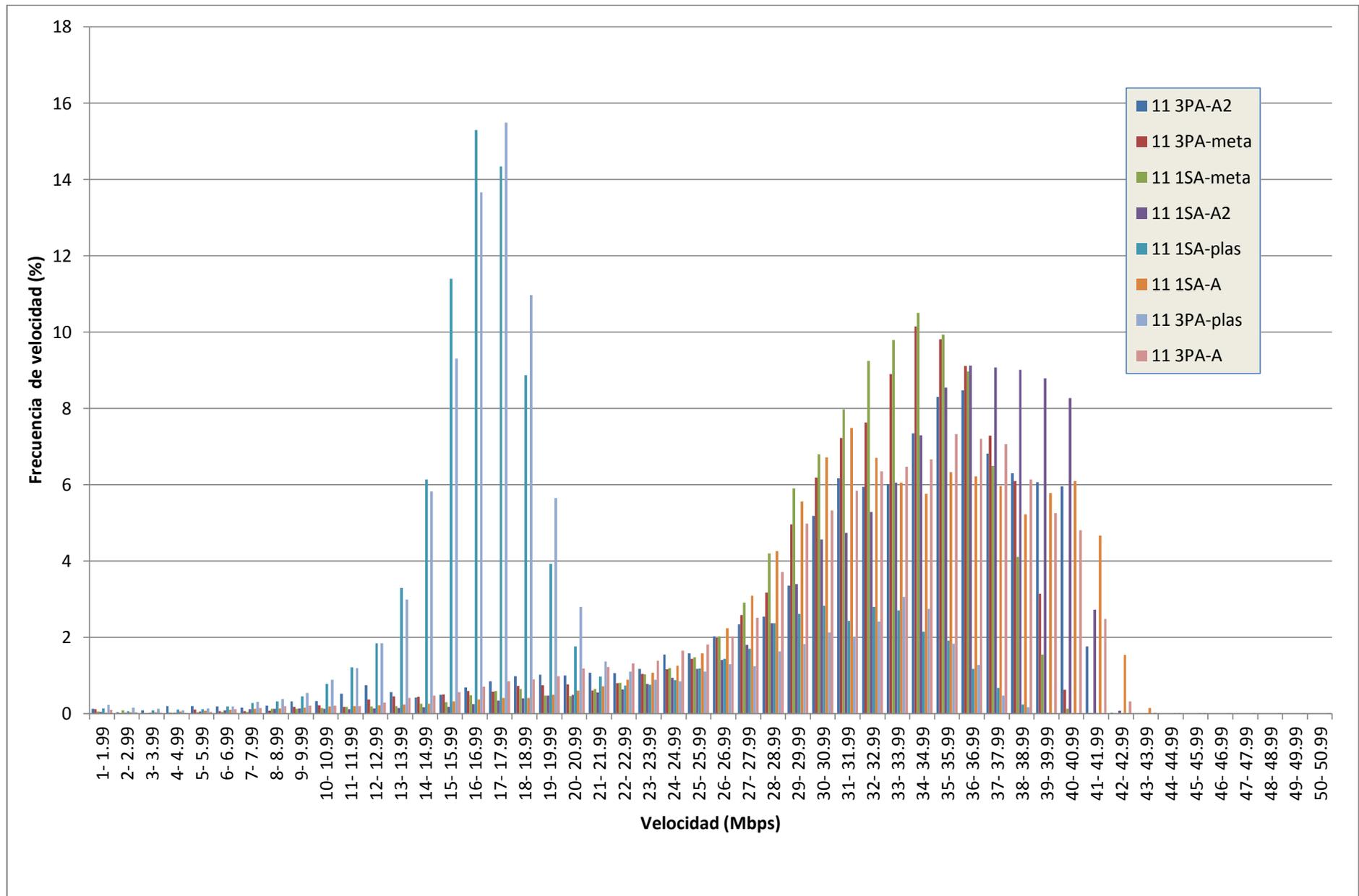


Ilustración 15.- Resultados del apartado Histograma bandas de frecuencia de la Banda 11.

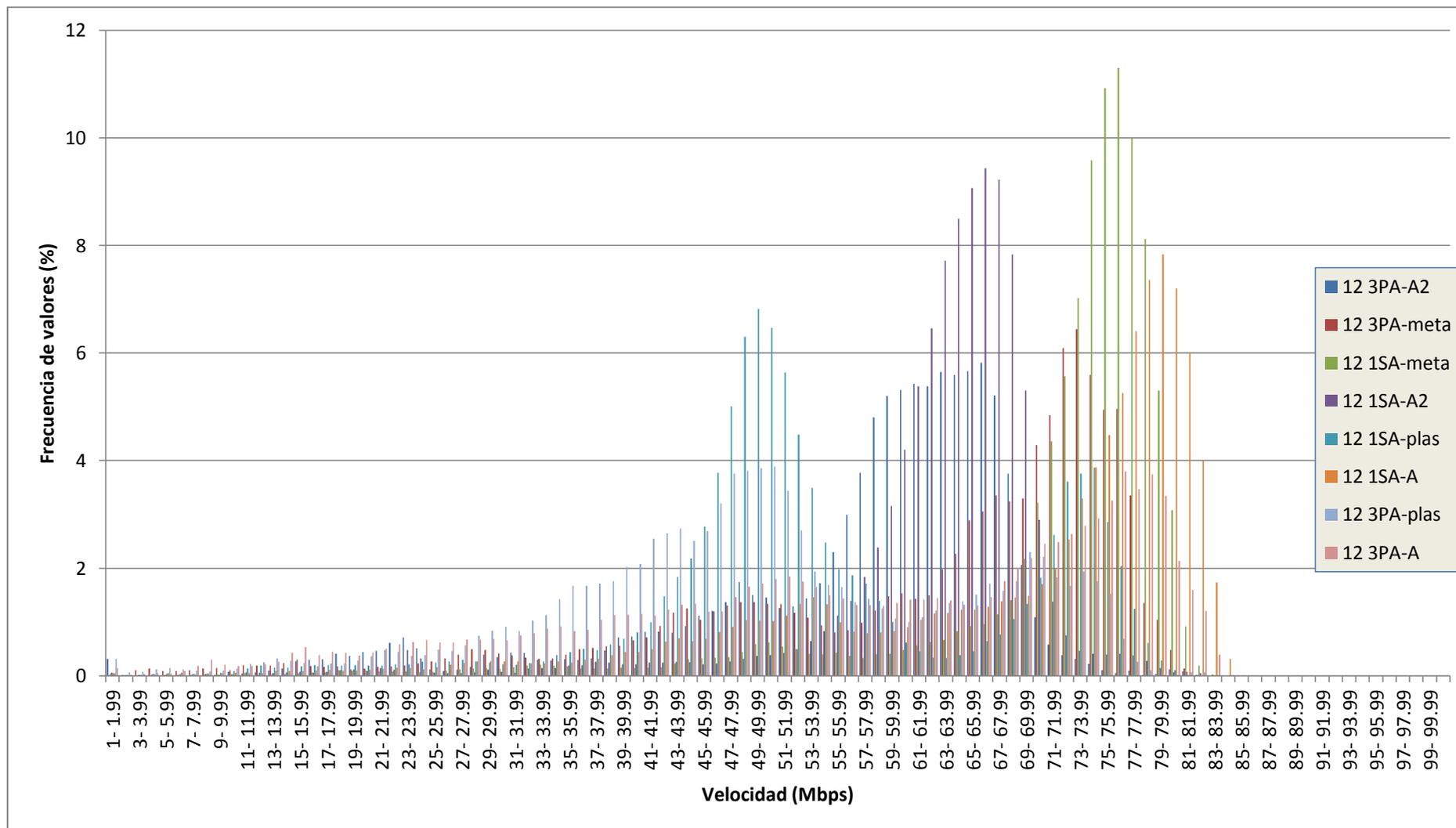


Ilustración 16.- Resultados del apartado Histograma bandas de frecuencia de la Banda 11.

Además de gráficamente, en este estudio hemos tratado de obtener datos objetivos que traten de describir las funciones de distribución que siguen las velocidades. Estos datos están recogidos en las siguientes tablas, y poder confirmar las diferencias que se han visualizado gráficamente.

Tabla 4.- Desglose de los parámetros típicos de las funciones de distribución de las velocidades de la Banda 11.

Banda 11	Prome dio	Desviación Típica	Max	Min	Simet ría	Kurto sis	Percentil 80	Coef. Var.
1SA- APISA	32,282	6,668	83,0 00	0,00 0	-0,111	7,189	38,000	0,207
1SA- APISA2	33,931	5,743	66,0 00	1,00 0	-1,576	4,620	38,500	0,169
1SA- META	31,646	5,202	77,0 00	1,00 0	-1,723	4,956	36,000	0,164
1SA- PLAS	19,950	7,147	40,0 00	1,00 0	0,855	-0,317	28,000	0,358
3PA- APISA	32,062	7,307	83,0 00	1,00 0	-0,088	5,770	37,000	0,228
3PA- APISA2	31,804	7,237	42,0 00	1,00 0	-1,454	2,168	37,500	0,228
3PA- META	31,762	5,803	41,0 00	1,00 0	-1,682	3,610	36,000	0,183
3PA- PLAS	19,749	7,005	39,0 00	1,00 0	0,894	0,020	27,000	0,355

Tabla 5.- Desglose de los parámetros típicos de las funciones de distribución de las velocidades de la Banda 12.

Banda 12	Promed io	Desviación Típica	Max	Min	Simetr ía	Kurtos is	Percentil 80	Coef. Var.
1SA- APISA	68,140	15,006	85,00 0	1,00 0	-1,497	1,864	79,500	0,220
1SA- APISA2	62,277	9,312	84,00 0	1,00 0	-2,889	10,773	67,500	0,149
1SA- META	71,025	10,952	83,00 0	1,00 0	-2,779	8,655	77,000	0,154
1SA-PLAS	54,158	13,706	82,00 0	1,00 0	-0,257	0,443	71,000	0,253
3PA- APISA	57,109	18,975	84,00 0	1,00 0	-0,675	-0,465	75,500	0,332
3PA- APISA2	56,372	12,565	82,00 0	1,00 0	-1,681	2,867	65,500	0,223
3PA- META	62,714	15,494	83,00 0	1,00 0	-1,376	1,422	74,500	0,247
3PA-PLAS	49,536	15,122	83,00 0	1,00 0	-0,315	0,027	65,000	0,305

7.8.2. Evolución temporal de la media y desviación típica de la velocidad

Con este estudio, se pretendía comprobar si la velocidad de los cables empeoraba con el tiempo. A la luz de los resultados se puede constatar que no es así en la mayoría de los casos, si no que la velocidad aumenta ligeramente. Aunque, el marco temporal quizá sea reducido para poder afirmar que la velocidad aumenta. También hay que tener presente que las velocidades pueden variar en función del ruido en el enlace, o las cargas en las líneas, y ambos parámetros pueden variar con la época del año, del día de la semana, o las horas del día. Con el conjunto de los enlaces puede pensarse que con el tiempo se ha ido mejorando las instalaciones, y los fabricantes de los equipos han ido mejorando el firmware, provocando que la velocidad promedio mejore con el tiempo.

De nuevo en los resultados de la Banda 11, vistos en la Ilustración 17, vemos que los equipos con chasis metálico destacan por tener la velocidad media más reducida, mientras que los equipos de Ormazabal APISA2000SA2, por tener la mayor media de velocidad. El comportamiento de las formas de onda que se ve en esta grafica es relativamente parejo obviando la velocidad, y vemos una cierta estabilidad de valores.

En el grafico de la desviación típica de la velocidad de la Banda 11 (Ilustración 18), vemos que hay bastante ruido en esta grafica, y aunque puede apreciarse que las formas de onda también son similares, no es tan clara como en el caso de la media de la velocidad. En este caso también se podría realizar un “ranking” de los equipos, en cuyo caso los equipos de chasis metálico de Corinex son los que menor desviación tienen, lo que puede verse como que varían menos los datos de la velocidad a lo largo del tiempo, lo cual puede ser positivo, ya que no tienen comportamientos inestables de velocidad, ya sea a la alza, o a la baja.

En el grafico de la Ilustración 19, vemos que los equipos de plástico también son los que menos media de velocidad tienen, pero en este caso no tienen una diferencia tan abismal respecto al resto de equipos como en el caso de la Ilustración 17. La evolución de la media en este caso tampoco muestra un claro aumento de la media en ningún caso, no siendo el aumento o descenso de la media de la velocidad mayor a 1 Mbps en ningún caso.

Por último, en la Ilustración 20, vemos que aparentemente la distribución de la desviación típica es menos ruido que en el caso de su homologo de la banda 11, pero debemos tener en cuenta la diferencia en la escala de las graficas. Si aplicamos una escala similar veríamos que son semejantes en cuanto a “ruido”. Los equipos que tienen mayor variación en la velocidad de sus enlaces en este caso son los Equipos APISA2000SA, lo cual podría entenderse como que se comportan peor, ya que los valores de velocidad se desvían en mayor grado al resto de equipos, mientras que, sus hermanos APISA2000SA2 son los que menor variación tienen en la velocidad.

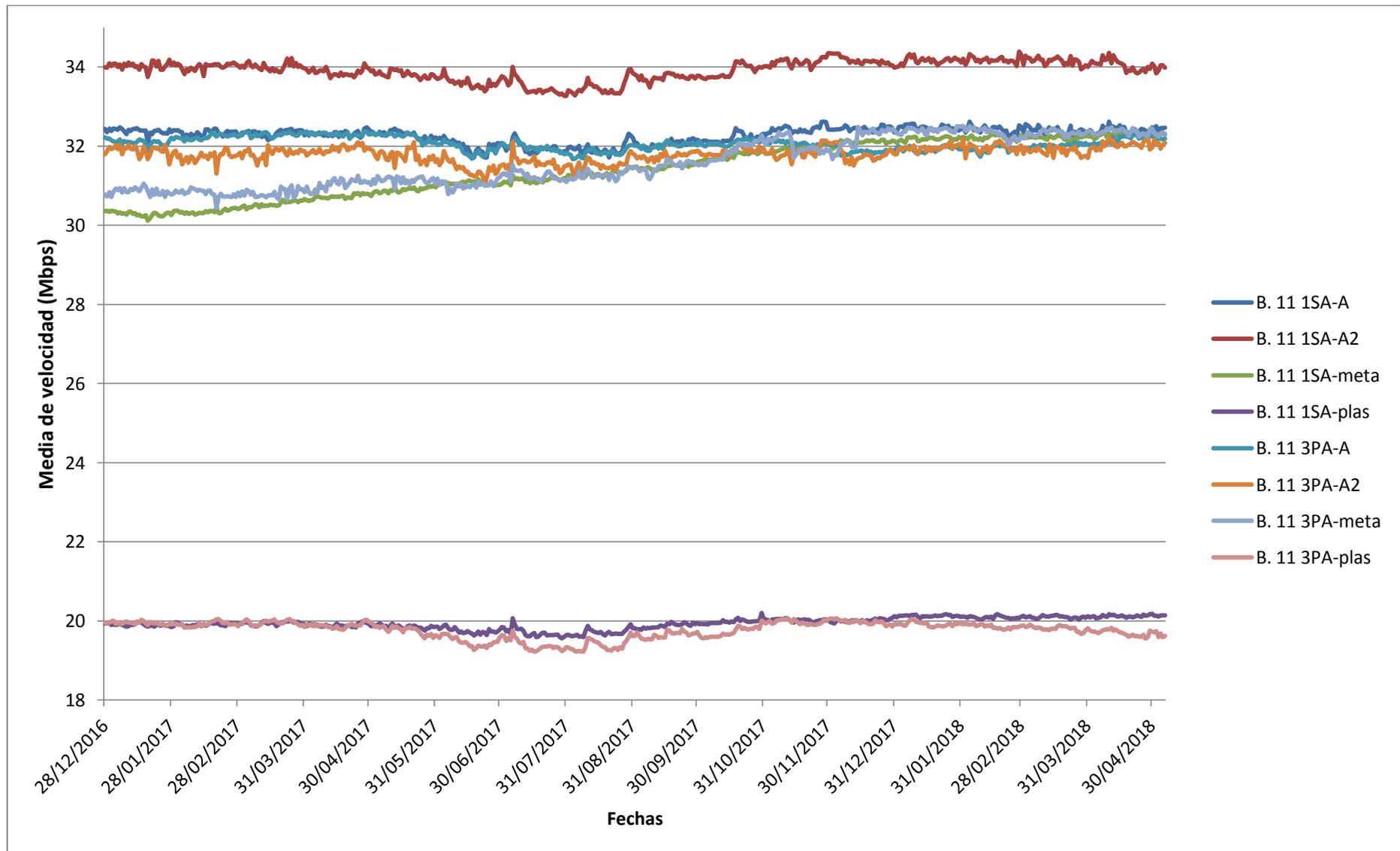


Ilustración 17.- Resultados de la Evolución temporal de la media de la velocidad de la Banda 11.

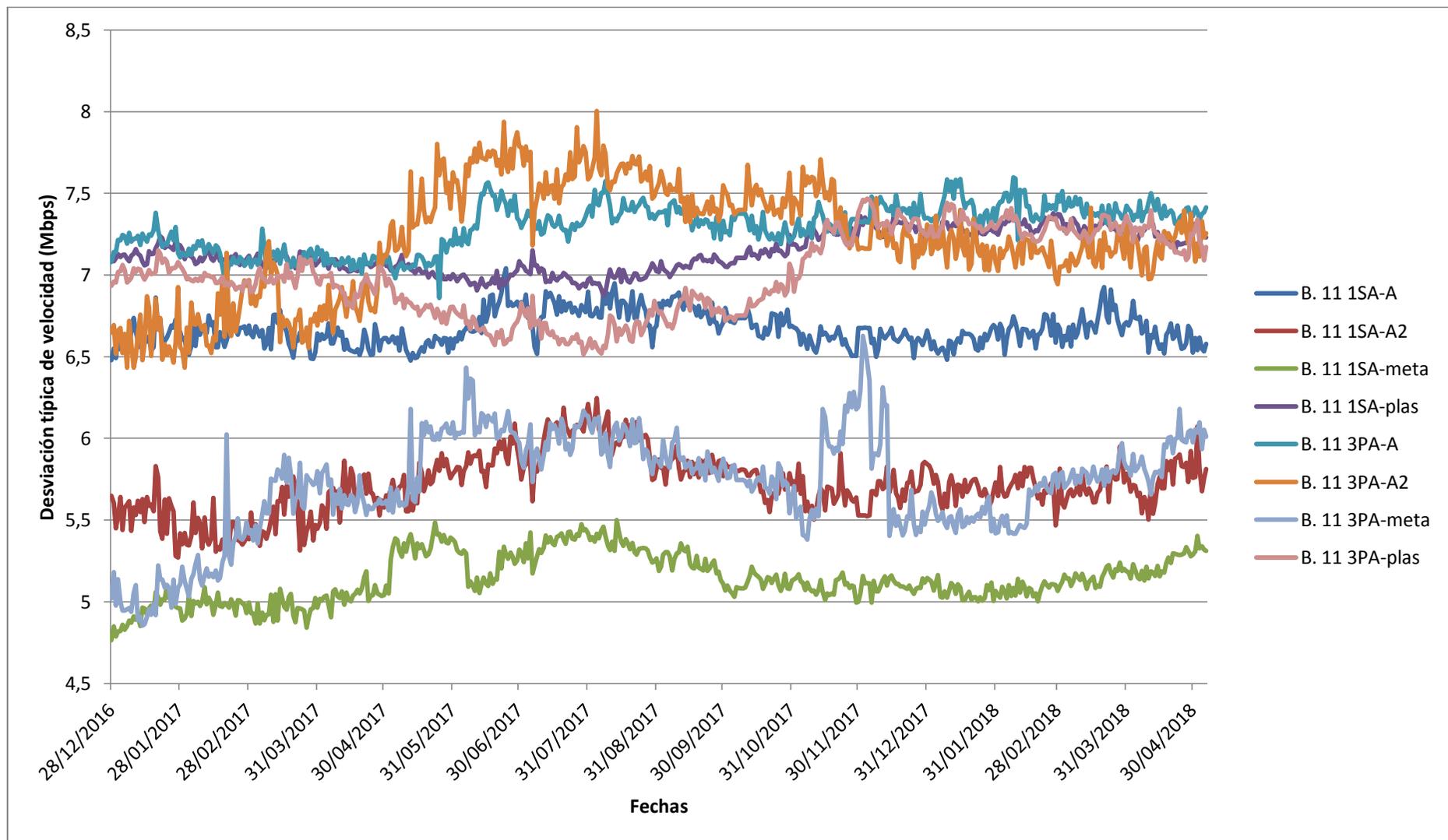


Ilustración 18.- Resultados de la Evolución temporal de la desviación típica de la velocidad de la Banda 11.

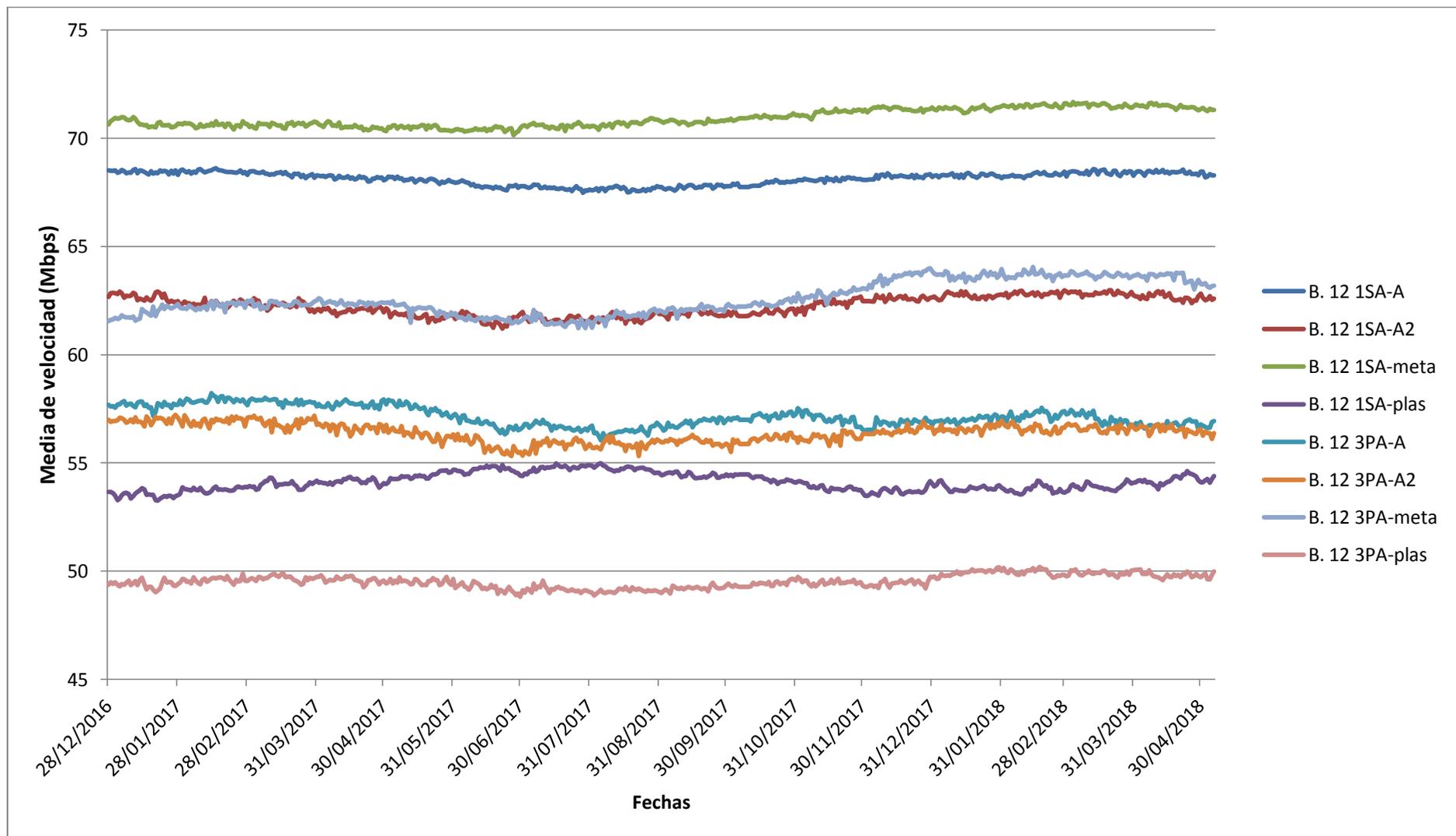


Ilustración 19.- Resultados de la Evolución temporal de la media de la velocidad de la Banda 12.

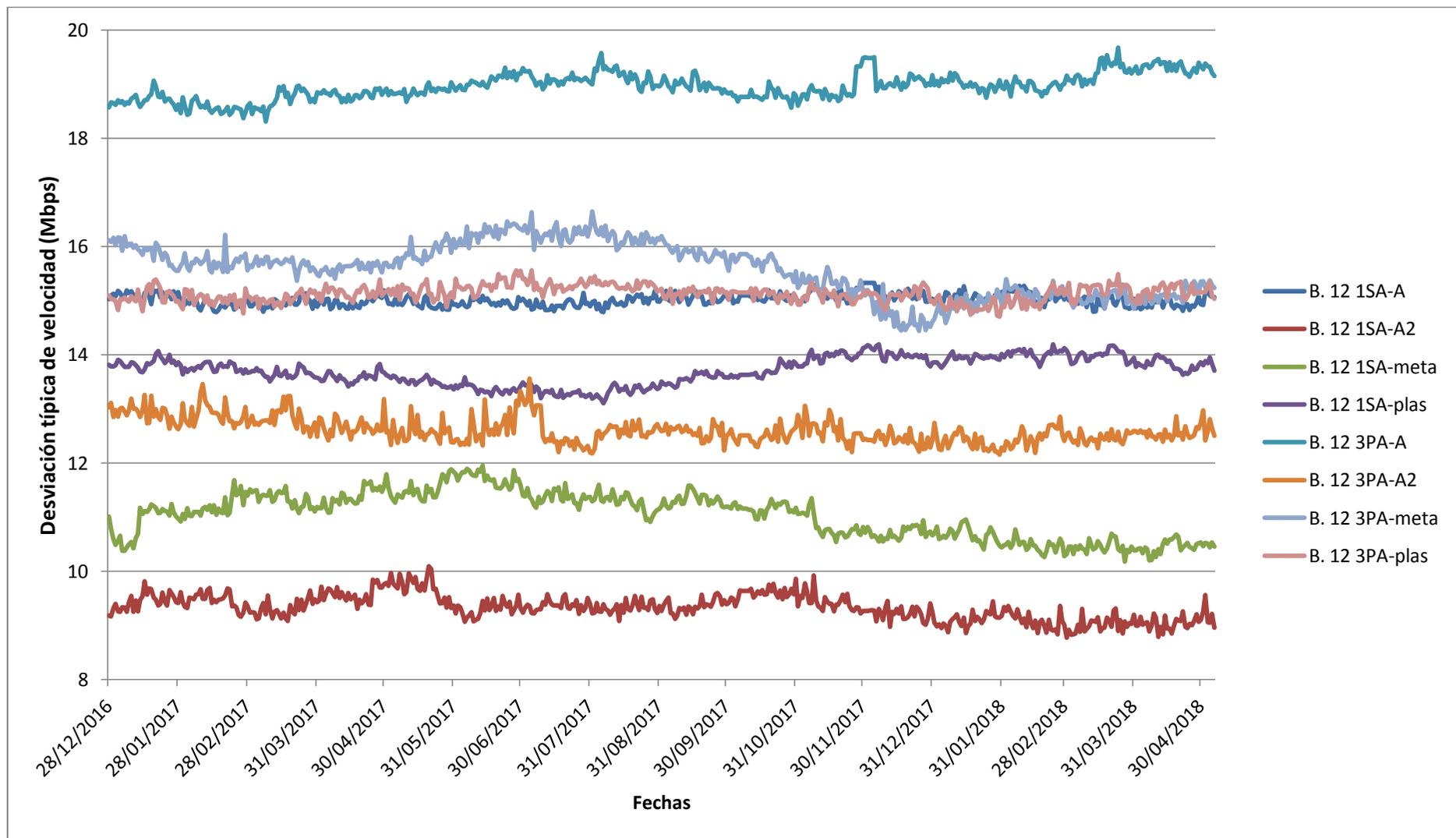


Ilustración 20.- Resultados de la Evolución temporal de la desviación típica de la velocidad de la Banda 12.

7.8.3. Correlación velocidad-distancia y comparativa velocidad-distancia

En primer lugar vamos a comentar los resultados de las correlaciones entre la velocidad de cada enlace, y la distancia del cable que les une.

La primera impresión es que en la mayoría de los casos (excepto 3 de los 32 casos) la correlación es negativa, lo que indica que con el aumento de la distancia, la tendencia de la velocidad es a decrecer. Aunque también es destacable que la correlación no es especialmente fuerte ni clara en la mayoría de los casos (en ningún caso se supera el 0.5 de correlación), lo que nos dice que la relación no es tan fuerte como cabría esperar. También vemos que la correlación es más fuerte en los equipos del fabricante Ormazabal (APISA y APISA2), que en los equipos de Corinex (meta y plas), este último caso es el que aporta los casos en los que no hay prácticamente correlación entre ambas variables. Estos casos se dan en la Banda 11, y curiosamente si recordamos las reglas de diseño, y como se comprobaba en el siguiente apartado del estudio, en la banda 11 con cable nuevo se permiten los enlaces de mayor distancia, con lo cual hay mayor distancia y debería de verse mejor una tendencia, lo que nos lleva a pensar que esos equipos se comportan con una gran estabilidad respecto a la distancia.

En general, vemos que los equipos que trabajan con cable viejo (3PA) presentan una correlación considerablemente mayor a los que operan con cable nuevo (1SA). Esto quizá lo podamos achacar a que debido a las reglas de diseño, que fijan el límite de la longitud del enlace, hace que las longitudes estén más concentradas, y haya menor dispersión de longitudes y velocidades, lo que conlleva que la muestra que nos permite calcular la correlación este mas compactada, resultando en una muestra de datos más limpia. Sea como fuere, ciñéndonos a los datos, con los cables viejos se obtiene más dependencia de la velocidad con la distancia del enlace, lo que quiere decir es que, el cable viejo se comporta peor con la distancia, mientras que mediante el cable nuevo, se obtiene un comportamiento mejor. Con el aumento de la frecuencia pasa algo parecido; los equipos que utilizan la Banda 12 tienen mayores valores de correlación que aquellos que trabajan en Banda 11.

Tabla 6.- Correlación velocidad-distancia de los equipos que trabajan en Banda 11.

Banda 11	APISA	APISA2	meta	plas
1SA (Rx)	-0,081	-0,153	0,004	0,002
1SA (Tx)	-0,110	-0,112	0,021	-0,019
3PA (Rx)	-0,270	-0,337	-0,102	-0,046
3PA (Tx)	-0,270	-0,356	-0,248	-0,064

Tabla 7.- Correlación velocidad-distancia de los equipos que trabajan en Banda 12.

Banda 12	APISA	APISA2	meta	plas
1SA (Rx)	-0,067	-0,087	-0,184	-0,128
1SA (Tx)	-0,056	-0,080	-0,178	-0,139
3PA (Rx)	-0,414	-0,420	-0,418	-0,279
3PA (Tx)	-0,453	-0,354	-0,437	-0,248

En el caso de la segunda parte de este estudio, es necesario recordar que se filtraron los casos en los que considerábamos que no había una muestra representativa, y tomábamos que como mínimo debía haber 3.000 datos en cada paso de distancias, para mostrar ese dato, por tanto, las siguientes graficas están filtradas de acuerdo a ese criterio.

De nuevo, lo más llamativo de la Ilustración 21, es que los equipos de plástico tienen una media de velocidad considerablemente menor al resto de casos. En el resto de casos, vemos que las velocidades en su mayoría se concentran entre 30 y 35 Mbps, y no se aprecia una tendencia clara, aunque en el caso de los equipos APISA2000SA si que se aprecia una ligera reducción en la velocidad al alcanzar distancias largas (> 500 m).

En el caso de la desviación típica de la banda 11 (Ilustración 22), existe una gran dispersión de valores, sin ningún tipo de tendencia aparente. Esta grafica aparentemente no aporta nada significativo al estudio. Lo mismo sucede con la Ilustración 24, en la cual vemos que los valores de desviación se concentran ligeramente alrededor de un valor, pero no apreciamos ningún resultado de interés.

En el caso de la media de la velocidad respecto a la distancia de la banda 12 (Ilustración 23), de nuevo vemos esa dualidad en los equipos de Corinex de chasis de plástico – bajas velocidad y chasis metálico – velocidades mayores. Podemos apreciar una ligera tendencia a reducirse la velocidad respecto al aumento de la distancia, aunque si queremos buscar este parámetro deberíamos comprobar la correlación en si misma.

Es de suma importancia además, tener en cuenta de que no tenemos enlaces aislados, que idealmente no se ven afectados por interferencias externas, en cuyo caso sería lógico que a menor distancia (manteniendo un mínimo para no saturar), obtendríamos velocidades mayores. Y también podríamos ver cuál es la distancia limite con cada modo frecuencial, y con cada tipo de cable y estimar las pérdidas debidas a los empalmes. Este razonamiento da pie a otro posible estudio, teniendo en cuenta como variable los empalmes PPLC, y el número de equipos que conviven en la misma célula PLC.

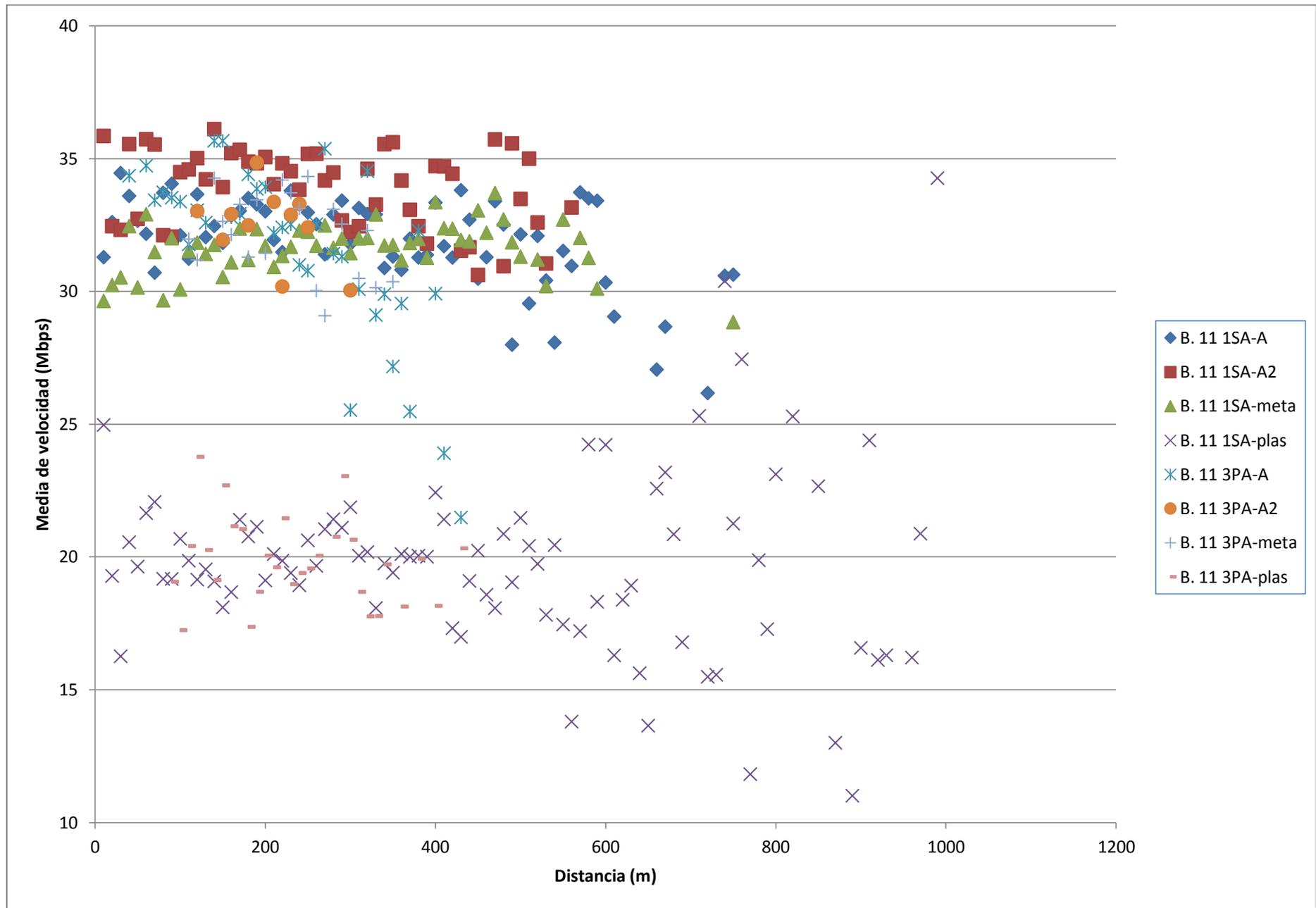


Ilustración 21.- Comparativa velocidad media del enlace - Distancia de la Banda 11.

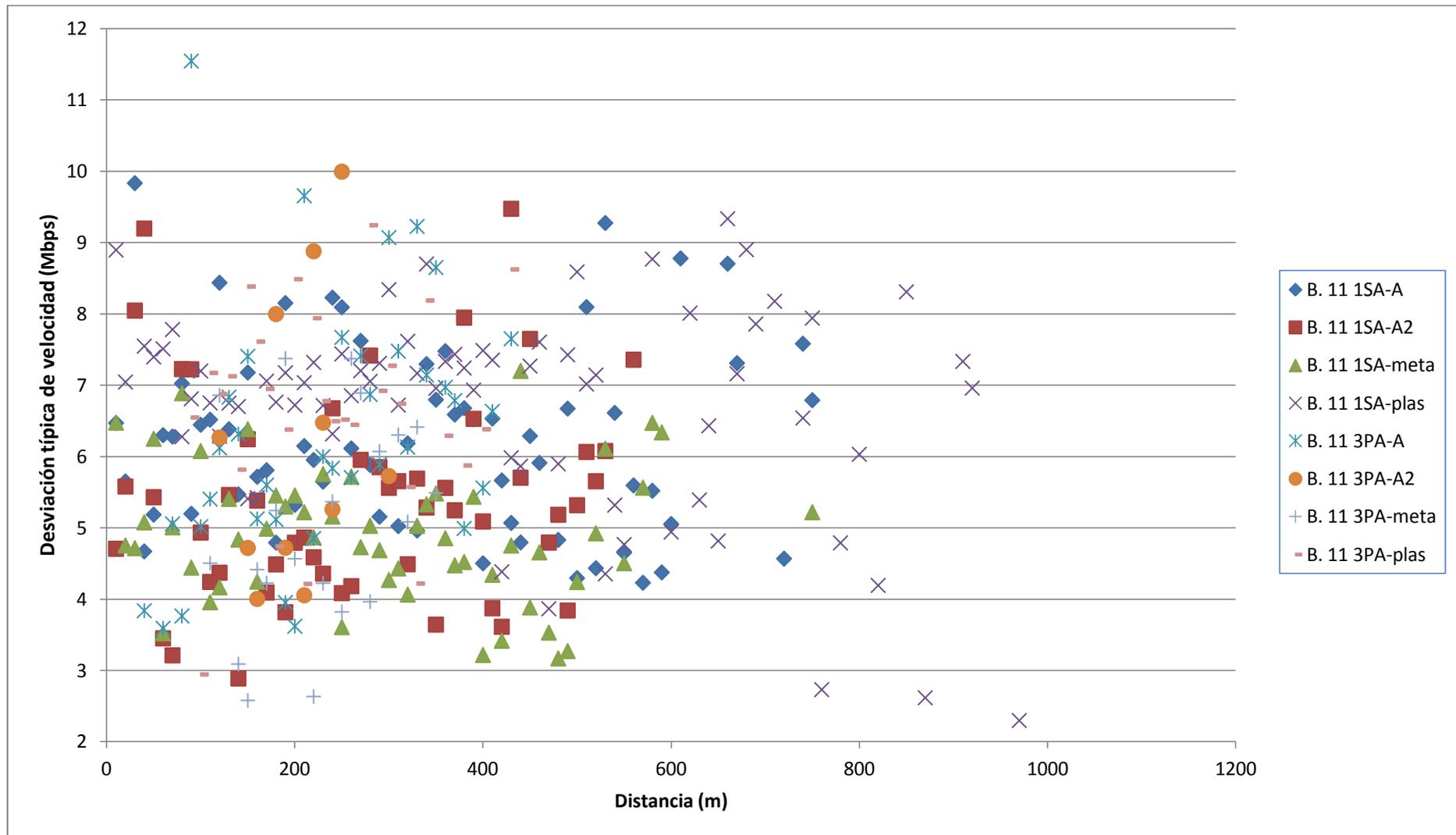


Ilustración 22.- Comparativa desviación típica de la velocidad del enlace - Distancia de la Banda 11.

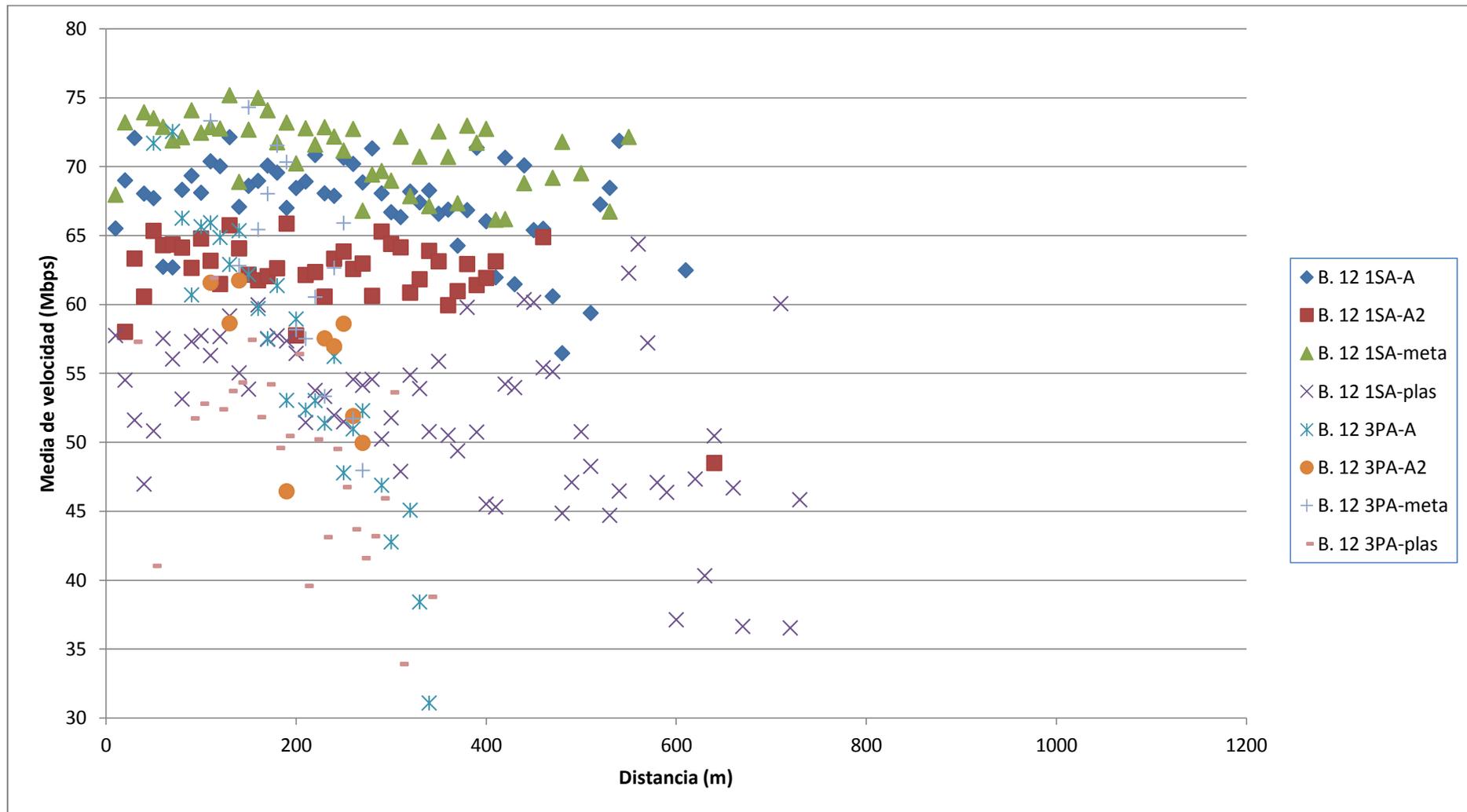


Ilustración 23.- Comparativa velocidad media del enlace - Distancia de la Banda 12.

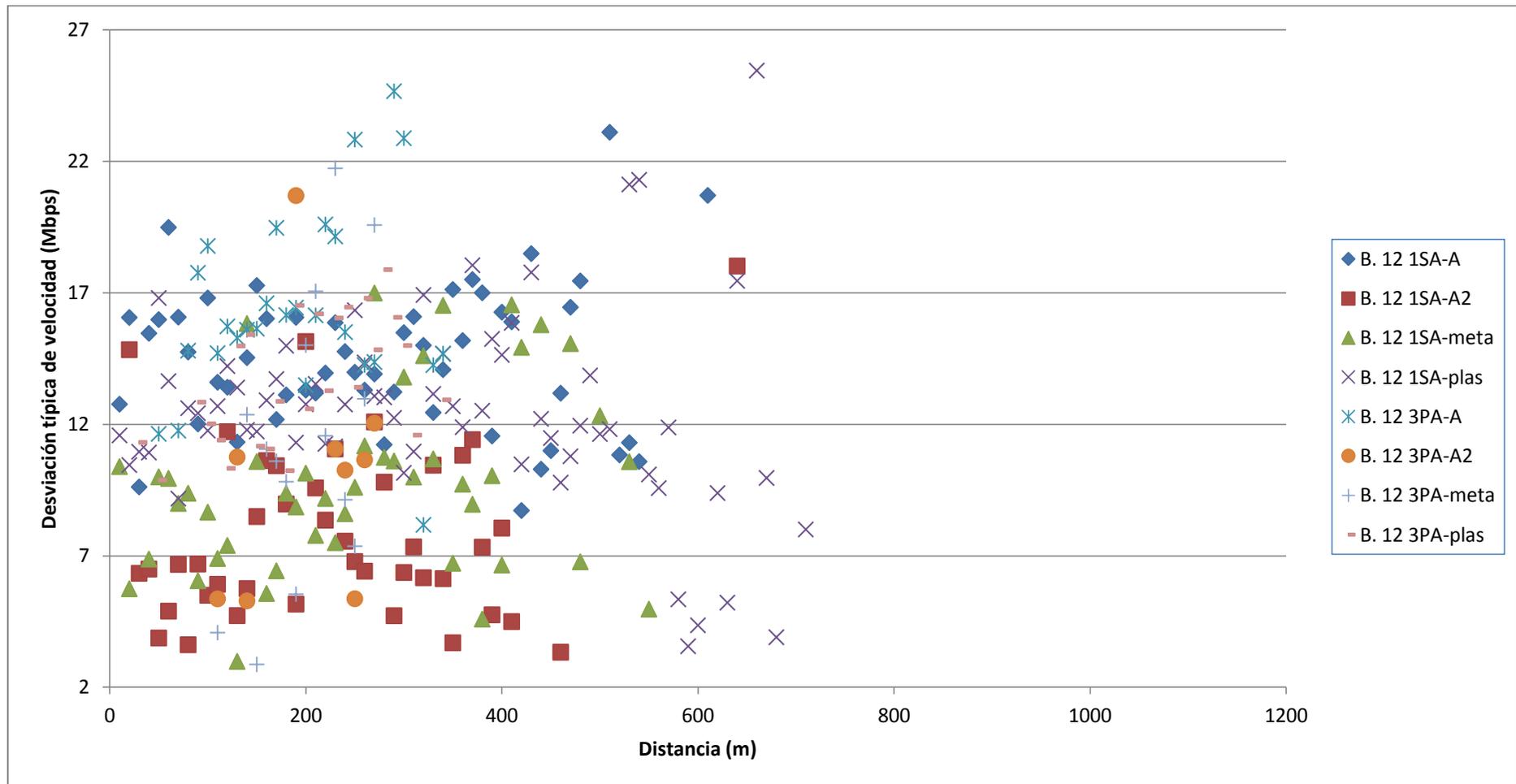


Ilustración 24.- Comparativa desviación típica de la velocidad del enlace - Distancia de la Banda 12.

7.8.4. Histograma longitudes

Este estudio en principio sirve para revisar en qué grado se han cumplido las reglas de diseño, y para poder apreciar junto al apartado anterior qué función de distribución siguen las distancias en si mismas de cada grupo. Se puede constatar que las reglas de diseño se han cumplido rigurosamente, a excepción de unos pocos equipos, que están trabajando con cables de mayor longitud al que deberían trabajar, según las reglas de diseño, pero esto nos llevo a constatar que esos equipos estaban ofreciendo un rendimiento alrededor de la media de sus compañeros de agrupación. Esto resulta de especial interés, puesto que podría llevar a nuevos estudios, que en ultimo termino llevaran a relajar las reglas de diseño de la red PLC de Iberdrola, permitiendo utilizar la tecnología en lugares que estas reglas no permitían, o utilizando la Banda 12, la cual ofrece mayor rendimiento, en lugares en los que por distancia no se podía alcanzar.

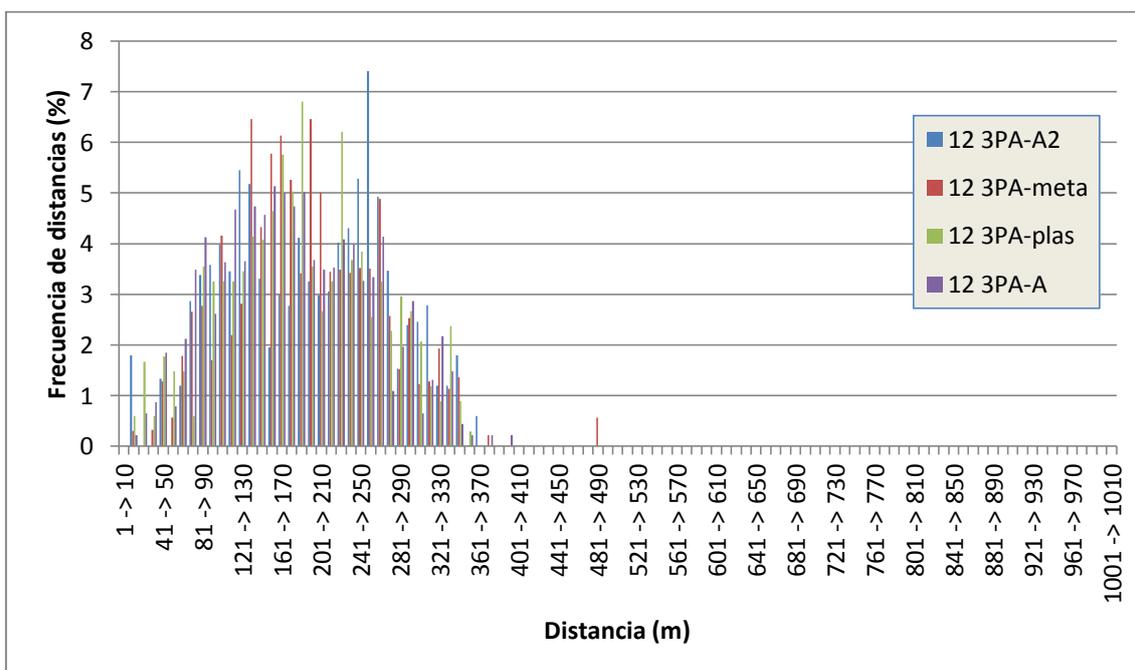


Ilustración 25.- Histograma de longitudes 3PA - Banda 12.

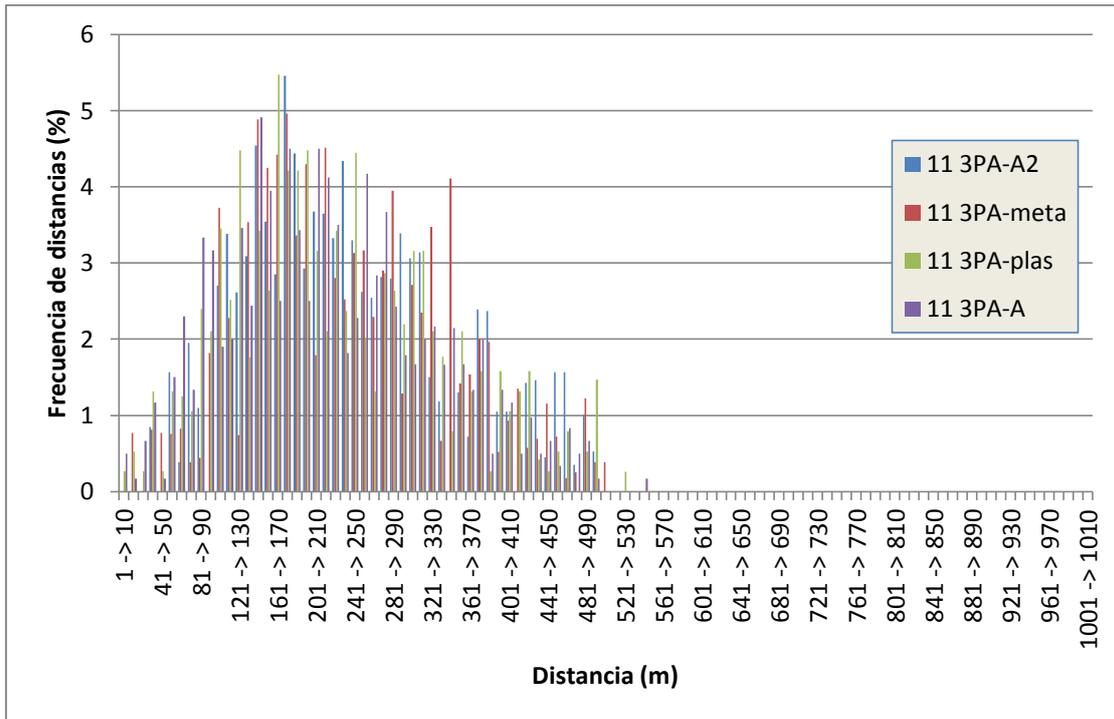


Ilustración 26.- Histograma de longitudes 3PA - Banda 11.

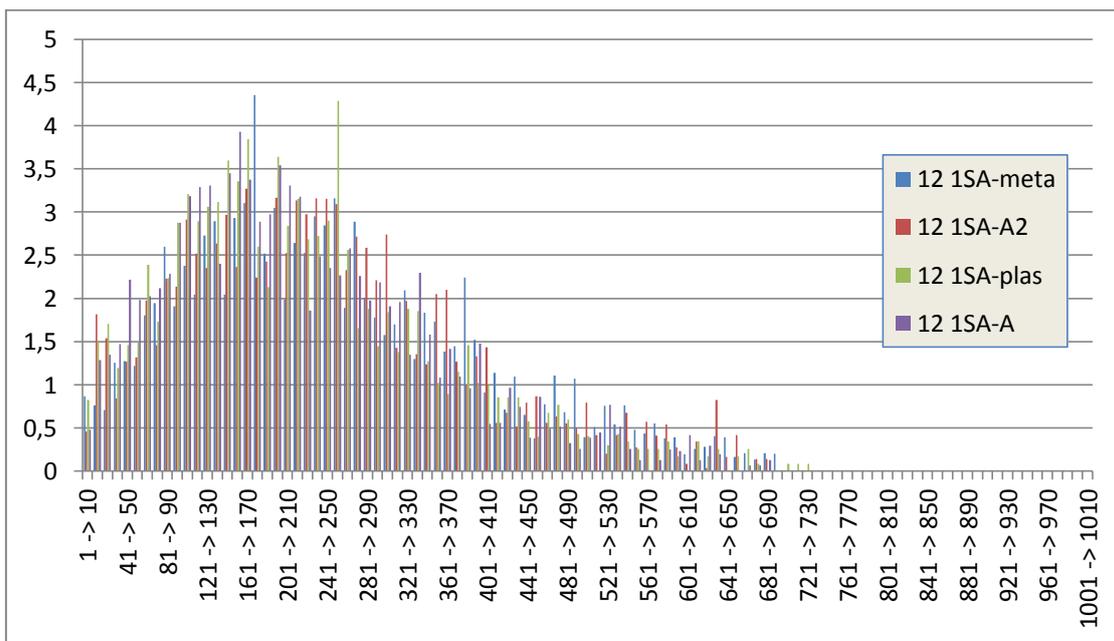


Ilustración 27.- Histograma de longitudes 1SA - Banda 12.

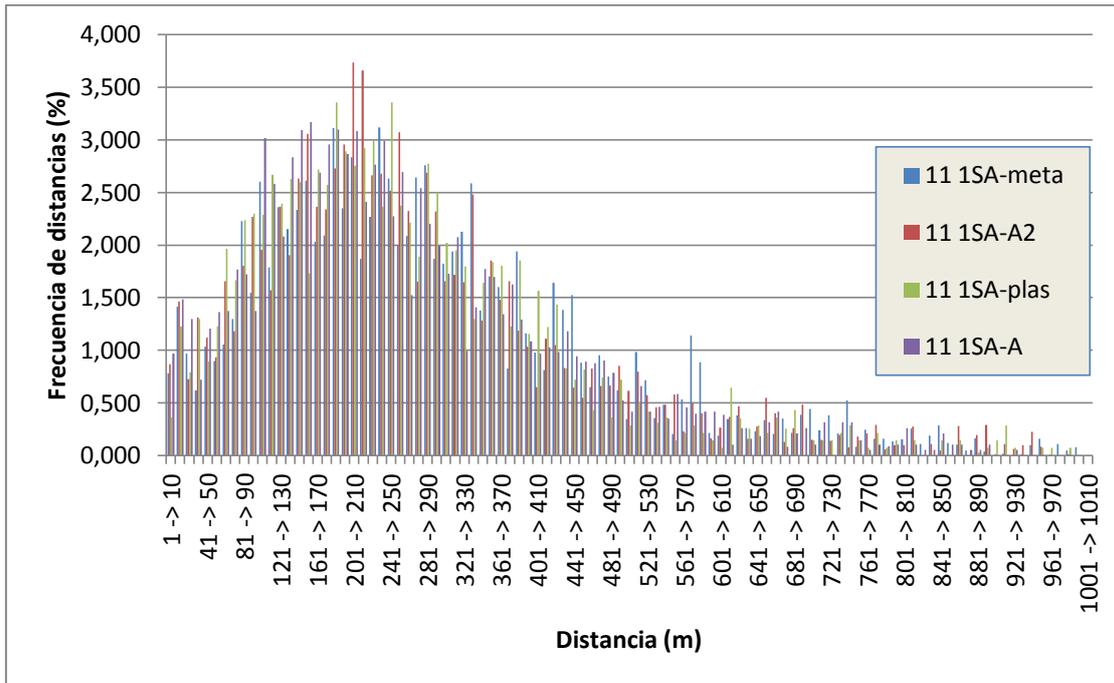


Ilustración 28.- Histograma de longitudes 1SA- Banda 11.

7.8.5. Correlación velocidad-distancia con 0 dependientes

Este apartado, que no estaba previsto en principio, surgió tras ver los resultados de los apartados anteriores y procesar las implicaciones de los resultados. Tras los resultados del apartado 7.8.3., se realizó un pequeño estudio del comportamiento de varias células aisladas PLC de un tamaño medio (aproximadamente 8 equipos), y se contrastó con el conocimiento de que los últimos equipos de cada célula PLC, los cuales no tienen equipos dependientes, se ven afectados por menos ruido de sus vecinos. En conclusión, si realizamos el mismo estudio, pero tomando únicamente los equipos con 0 dependientes, deberíamos despejar la muestra de una de las fuentes de ruido, y la muestra debería ser más limpia en el sentido de que deberían tener menos ruido.

Para poder constatar esa mejora del estudio anterior, realizamos una comparativa, que se puede apreciar en las tablas Tabla 8 y Tabla 9. En estos resultados observamos una reducción de la dependencia con la distancia en la mayoría de los casos, sobre todo en los resultados de la Banda 12. También hay que tener en cuenta que la muestra se reduce notablemente al filtrar los equipos con dependientes, aunque en la mayoría de los casos sigue siendo una muestra considerablemente grande. Estos resultados pueden tomarse como una invitación a realizar pruebas para probar los límites de las reglas de diseño, ya que aparentemente con la distancia no decrece la velocidad de los enlaces.

Tabla 8.- Comparativa de los valores de correlación de la banda 11.

	Total de equipos				Equipos con 0 dependientes			
	APISA	APISA2	meta	plas	APISA	APISA2	meta	plas
B. 11								
1SA (Rx)	-0,081	-0,153	0,004	0,002	-0,030	-0,036	0,050	0,032
3PA (Rx)	-0,270	-0,337	-0,102	-0,046	-0,230	-0,315	-0,040	-0,110
1SA (Tx)	-0,110	-0,112	0,021	-0,019	-0,086	-0,076	0,055	-0,031
3PA (Tx)	-0,270	-0,356	-0,248	-0,064	-0,256	-0,334	-0,198	-0,099

Tabla 9.- Comparativa de los valores de correlación de la banda 12.

	Total de equipos				Equipos con 0 dependientes			
	APISA	APISA2	meta	plas	APISA	APISA2	meta	plas
B. 12								
1SA (Rx)	-0,067	-0,087	-0,184	-0,128	0,019	-0,053	-0,132	-0,070
3PA (Rx)	-0,414	-0,420	-0,418	-0,279	-0,361	-0,288	-0,378	-0,196
1SA (Tx)	-0,056	-0,080	-0,178	-0,139	0,005	-0,037	-0,116	-0,076
3PA (Tx)	-0,453	-0,354	-0,437	-0,248	-0,374	-0,246	-0,291	-0,153

8. DESCARGO DE GASTOS

Dado que el coste total del proyecto se ha realizado una vez finalizado el mismo, el desglose del mismo es el coste real y definitivo, y no hay gastos considerados imprevistos. Por lo tanto, no es un presupuesto como tal, sino un descargo de datos. Se han dividido los costes en diferentes partidas, para después englobar todas en la última partida, y calcular así el total.

- Horas internas:

Tabla 10.- Desglose de los gastos producidos por las horas internas.

Trabajador	Coste horario	Horas	Coste
Ingeniero junior	12,5 €	350	4.375 €
Ingeniero Senior A	20 €	6	120 €
Ingeniero Senior B	30 €	4	120 €
Subtotal Horas Internas			4.615 €

- Amortizaciones:

Tabla 11.- Desglose de gastos producidos por las amortizaciones.

Activo fijo	Coste de adquisición	Vida útil	Tiempo de uso en el proyecto	Amortización
Ordenador	800 €	4 años	3 meses	50 €
Licencia Windows 7	130 €	5 años	3 meses	6,5 €
Licencia Microsoft Office	93 €	5 años	3 meses	4,65 €
Subtotal amortizaciones				61,15 €

- Gastos:

Tabla 12.- Desglose de gastos producidos por el concepto de gastos.

Concepto	Coste
Material de oficina	4 €
Subtotal gastos	4 €

- Costes indirectos:

Tabla 13.- Desglose de gastos producidos por los costes indirectos.

Concepto	Coste
Luz	40 €
Agua	10 €
Conexión a internet	60 €
Subtotal C. I.	110 €

- Coste completo del proyecto:

Tabla 14- Descargo de gastos completo del proyecto.

Concepto	Coste (€)
Horas internas	4.615
Amortizaciones	61,15
Gastos	4
Subcontrataciones	110
Subtotal	4.790,15
Imprevistos (0 %)	0
TOTAL	4.790,15

CONCLUSIONES

El objetivo del trabajo era comprobar el rendimiento de la tecnología PLC OPERA, con datos reales de velocidad extraídos de la red PLC Iberdrola. Con esto, se pretendía comprobar la bondad de las reglas de diseño de la red, y tratar de ver puntos de mejora de las reglas actuales.

Para ello, hemos realizado tres estudios principalmente: Ver qué función de distribución sigue el grueso de datos de velocidad de los enlaces, comprobar el comportamiento de la velocidad respecto al tiempo en un marco de aproximadamente dos años, y por último, medir el grado de correlación entre la velocidad del enlace y la distancia.

Gracias a la diferenciación de tipo de equipamiento y tipo de cable que utilizamos, podemos constatar las diferencias en esos tres aspectos de cada una de las agrupaciones. Hemos confirmado el conocimiento previo de la velocidad máxima que se alcanza con cada modo frecuencial, y las capacidades de cada tipo de equipamiento.

En el primer estudio destacan los equipos de Banda 12 que obtienen un rendimiento bajo, los cuales se podrían aislar y estudiar los factores que inducen ese comportamiento anómalo. El segundo estudio revela que en algunos marcos de tiempo la desviación típica de la velocidad se dispara, lo cual podría tomarse también como un punto de estudio nuevo. Además, como el número de datos disponibles crece en el tiempo, puede volver a revisarse este estudio en un marco temporal más amplio, y comprobar cómo ha sido la evolución. A juicio personal, los límites de distancia que establecen las normas de diseño pueden ser revisados con cierta precaución (probablemente serían necesarios más estudios respecto al tema), en los casos en los que la correlación no revela apenas dependencia entre velocidad y distancia, que en su mayoría son los casos con cable nuevo.

En mi opinión, este trabajo ha logrado los objetivos que se fijaron a su inicio, y además abre nuevas posibilidades de estudio de la red PLC, en un campo prácticamente puro en el campo de las telecomunicaciones, aunque uno de los aspectos más interesantes, implicaría realizar pruebas en campo, sobre las distancias de los enlaces, tratando de alcanzar los límites de distancias sobre cada tecnología.

BIBLIOGRAFÍA

- Gandarias J., García-Borreguero I., Angulo I., Fernandez I., De la Vega D. y Arzuaga T. (2018) Nueva generación de sistemas de comunicaciones PLC para acometer los nuevos retos de las redes de distribución de BT.
- Garcia E., Chimenó M. A. y Legorburu L. (2005) El Proyecto OPERA (Open PLC European Research Alliance).
- Sendin A. (2016) Telecommunication Networks for Smart Grids. Bilbao, España, Artech House Books. Chapter 3. Electric Power System Concepts for Telecommunication Engineers & Chapter 7. PLC Technologies Supporting the Smart Grid: Use Cases.
- Sendin A., Simon J., Urrutia I. y Berganza I. (2014) PLC Deployment and Architecture for Smart Grid Applications in Iberdrola. *18th IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications*.
- Serna V.H. (2011) Comunicaciones a través de la red eléctrica – PLC.
- Simon J., Sancho Pradales P., Martínez M. y Torres L. (2009) D51. White Paper: OPERA Technology.

ANEXO 1. Manual del código

1. Cargas los BPL Repeater

La ejecución de este botón no requiere de ninguna hoja Excel accesible previa, ni que el usuario cree ninguna hoja previamente vacía. Este comando crea una hoja Excel nueva denominada REPEATERS, con información de los equipos no maestros de la red BPL.

La hoja resultante tiene el formato que sigue en la Ilustración 29. Primero aparece la dirección IP de cada equipo BPL, el tipo de modelo del equipo, el tipo de nodo (en esta hoja son todo repeaters), y la banda de frecuencia en la que operan (principalmente Banda 11 y Banda 12).

	A	B	C	D
1	IP_ADDRESS	NODE_MODEL	NODE_TYPE	BANDA
2	100.97.1.5	API2000SA2	REPEATER	12
3	100.97.1.7	API2000SA2	REPEATER	12
4	100.97.1.9	API2000SA2	REPEATER	12
5	100.97.2.5	API2000SA2	REPEATER	11
6	100.97.2.7	API2000SA2	REPEATER	11
7	100.97.2.9	API2000SA2	REPEATER	11

Ilustración 29.- Fragmento de la hoja REPEATERS.

2. Cargar total equipos

De nuevo, la ejecución de este botón no requiere de ninguna hoja Excel previa, ni la creación de ninguna hoja nueva. En este caso, carga la información de todos los equipos de la red, con información bastante más extensa que en el caso anterior. La información la deposita en una nueva hoja Excel denominada "TotalEquipos".

En este caso, la hoja resultante tiene 25 columnas, vamos a comentar las más interesantes y que nos resulten de interés:

- IP_ADDRESS: Dirección IP de cada equipo.
- COD_INSTALACION: numero univoco que representa al centro de transformación. A la hora de buscar el equipo en los gestores de los fabricantes resulta crucial este parámetro.
- ID_ZONA: Se refiere a la zona UTD (Unidad Territorial de Distribución). Estas zonas representan la repartición geográfica de Iberdrola de los equipos de mantenimiento.
- NOMBRE: Se refiere al nombre del equipo dentro de la red BPL. Este nombre sigue el siguiente formato:

<Tipo de equipo en función de la función dentro de la SCP: R de Repeater ó MB de Master Backbone>

<CT (Centro de transformación) + 9 dígitos del código SIGRID>: Este es el identificador univoco referido a la instalación, que en este caso son centros de transformación, donde va el equipo BPL.

<Nombre del centro de transformación>

- NODE_MODEL: el tipo de modelo del equipamiento. Hay 4 modelos, 2 de cada fabricante:
 - API2000SA: Modelo original de Ormazabal.
 - API2000SA2: Modelo más actual de Ormazabal. La principal diferencia con el tipo de equipo anterior es que estos últimos tienen más memoria para integrar capacidades de Ciberseguridad.
 - plas_CXP-MVCI-GWYC: Equipo antiguo de Corinex. El chasis es de plástico, lo que ocasiona peor rendimiento.
 - meta_CXP-MVCI-GWYC: Equipo más reciente de Corinex. En este caso el chasis es metálico lo que le confiere de mayor resistencia al ruido, redundando en mejor rendimiento que los equipos de plástico.
- TEL_PLC_BACKBONE: Se refiere a la tecnología con la que están conectados los equipos Master al backbone de la red.
- NODE_TYPE: Se refiere al tipo de nodo BPL, en función del papel que desempeñan dentro de cada célula SCP. Puede ser un maestro o un repeater. Debido a que todos los datos que se manejan están referidos en dirección hacia el equipo jerárquicamente superior, no manejaremos los equipos maestros como tal, sino que las comunicaciones de dichos equipos vendrán dentro de los datos de los equipos que están justo por debajo en la jerarquía.
- TOTAL_DEPENDIENTES: Este parámetro nos dice cuántos equipos “cuelgan” en la jerarquía de cada célula del equipo al que se refiere este dato.
- TOTAL_DEPENDIENTES_DIRECTOS: En este caso, nos dicen cuántos equipos están directamente conectados al equipo al que se refiere este dato.
- BANDA: Se refiere al modo de frecuencia en el que opera cada equipo. Se utilizan dos bandas de frecuencias: Banda 11 (o modo 1), y Banda 12 (o modo 2). En los equipos de Corinex pueden encontrarse banda 17 y banda 18, pero en la práctica están operando en banda 11 y banda 12 respectivamente.

(Todos los parámetros están descritos completamente en los apartados de 7.2. Descripción de datos obtenidos de GADIP y 7.1. Descripción de los datos contenidos en la foto de la red)

3. Cargar datos Tx-Rx

Para la ejecución de este botón, si es necesario tener una hoja Excel previa. Este comando requiere una hoja Excel con el nombre GRUPO (variable global ubicada al inicio del módulo principal), la cual debe contener en la primera columna un listado de direcciones IP. El comando presupone que la primera posición de dicha columna contiene una cabecera, por lo que comienza a trabajar con la posición “A2”. Por cada una de dichas direcciones IP, busca e imprime sobre la hoja “Historico Tx-Rx” el histórico de datos de dicho equipo, si es que la BBDD Gadip contiene datos acerca del equipo.

Importante: la ejecución de este comando es lenta. En un grupo de 2 000 datos puede tardar alrededor de 2 – 3 horas.

La hoja “Historico Tx-Rx” tiene el formato que se aprecia en la ilustración siguiente:

	A	B	C	D	E
1					
2	28/12/2016	35	32	3	10.70.222.5
3	29/12/2016	35	31	4	10.70.222.5
4	30/12/2016	36	30	6	10.70.222.5
5	31/12/2016	36	31	5	10.70.222.5
6	01/01/2017	33	31	2	10.70.222.5
7	02/01/2017	36	30	6	10.70.222.5

Ilustración 30.- Fragmento ejemplo de la hoja "Historico Tx-Rx".

La primera columna contiene la fecha a la que se refieren los datos. La segunda columna es el dato de la velocidad de recepción medida en Mbps. La tercera columna es el dato de la velocidad de transmisión medida en Mbps. Y por último tenemos la dirección IP a la que se refieren los datos de dicha fecha.

Procesamiento manual de los datos

La información que se obtiene con la ejecución de este comando, es utilizada para la ejecución del resto de botones, pero para ello, hay que realizar un pequeño procesamiento manual. Primero, a cada dato hay que añadirle la banda de frecuencia a la que opera, esto se realiza aplicando un buscar en la columna F. Pero primero es necesario añadir al libro Excel la hoja IP Origen, o la hoja resultado del primer apartado; REPEATERS, y entonces ejecutamos la fórmula del modo:

=buscarv(E2;REPEATERS!A:D;4;FALSO)

Y aplicando dicha fórmula a todas las filas, en este punto somos capaces de filtrar los datos que pertenecen a una banda u otra. El siguiente paso, por tanto, es ese: Filtramos los resultados de la Banda 11, y los copiamos a una hoja nueva Excel con nombre "Banda 11". Hacemos lo propio con los resultados de banda 12, en una hoja nombrada "Banda 12". Es posible, que entre los resultados veamos que haya también equipos de banda 17 y banda 18, en cuyo caso los tomamos como banda 11 y banda 12 respectivamente. Estos equipos son exclusivamente los equipos del fabricante Corinex (los equipos denominados en las hojas Excel plas_CXP-MVCI-GWYC Y algún caso de meta_CXP-MVCI-GWYC). Otro caso es que tengamos equipos con banda 0, en cuyo caso es un error y descartaremos esos datos, o incluso con el campo banda vacía, siendo este el caso de equipos que han sido dados de baja de la red, o no estén en funcionamiento, por lo que también descartamos esos datos.

Otra casuística a tener en cuenta es que al tratar de extraer grandes grupos de datos (aproximadamente más de 2 000 direcciones IP), los datos alcanzan fácilmente el límite de filas de Excel (Ilustrado en la Ilustración 31). Las macros no están preparadas para estos casos, y la ejecución se detiene sin dar aviso del error. En este caso se debe hacer otro procesamiento manual de los datos: Se mueven los datos extraídos correctamente a la columna H por ejemplo, y buscamos en la hoja del grupo la última dirección IP extraída, y movemos también los datos a la derecha, para que en la siguiente ejecución comience a buscar en la última dirección, y tenga las cuatro primeras columnas libres para extraer nuevos datos.

1048557	01/06/2018	26	48	22	10.74.239.135
1048558	02/06/2018	25	48	23	10.74.239.135
1048559	03/06/2018	26	49	23	10.74.239.135
1048560	04/06/2018	26	49	23	10.74.239.135
1048561	05/06/2018	26	47	21	10.74.239.135
1048562	06/06/2018	26	48	22	10.74.239.135
1048563	07/06/2018	26	48	22	10.74.239.135
1048564	08/06/2018	27	49	22	10.74.239.135
1048565	09/06/2018	26	49	23	10.74.239.135
1048566	10/06/2018	26	48	22	10.74.239.135
1048567	11/06/2018	26	48	22	10.74.239.135
1048568	12/06/2018	26	49	23	10.74.239.135
1048569	13/06/2018	25	48	23	10.74.239.135
1048570	14/06/2018	26	47	21	10.74.239.135
1048571	15/06/2018	26	49	23	10.74.239.135
1048572	16/06/2018	26	49	23	10.74.239.135
1048573	17/06/2018	25	48	23	10.74.239.135
1048574	18/06/2018	25	48	23	10.74.239.135
1048575	02/05/2018	63	65	2	100.102.179.9
1048576	03/05/2018	62	67	5	100.102.179.9

Ilustración 31.- Ejemplo de alcance del límite de filas.

Cuando hayamos ejecutado por segunda vez (y no se haya llegado de nuevo al límite de datos y haya que repetir este proceso...), debemos seguir el mismo proceso anterior, utilizando la función buscar para casar la banda de frecuencias en todos los datos que hemos extraído, y después colocar los datos en las hojas **Banda 11** y **Banda 12**.

4. Histograma Bandas - Tx - Rx - Tx+Rx

La ejecución de este comando requiere de las hojas Excel rellenas **Banda 11** y **Banda 12**. A partir de ellas crea dos hojas Excel nuevas **Hist Rx** y **Hist Tx**, las cuales contienen los histogramas con la frecuencia absoluta de las velocidades. El formato de estas hojas se aprecia en la Ilustración 32. A la izquierda tenemos entre varios parámetros los datos que utiliza la gráfica para graficar las velocidades de la banda 11. La primera columna representa los intervalos de velocidad. Aprovechando que los datos son discretos, el paso que se ha elegido es unitario, por lo que van de uno en uno. La segunda columna contiene los valores normalizados (porcentuales) de cada rango de velocidad, esto es lo que se gráfica, ya que resulta la opción más interesante a la hora de comparar los datos. La tercera columna tiene los valores totales de cada rango. A la derecha del gráfico se encuentran los mismos datos pero de la banda 12. En el centro de la hoja se encuentra el gráfico. Y encima y debajo, nos encontramos varios estadísticos. Los estadísticos que se encuentran encima del gráfico son los referidos a la función de distribución que representan los datos de la banda 11, y los que se encuentran debajo de la gráfica los referidos a la banda 12.

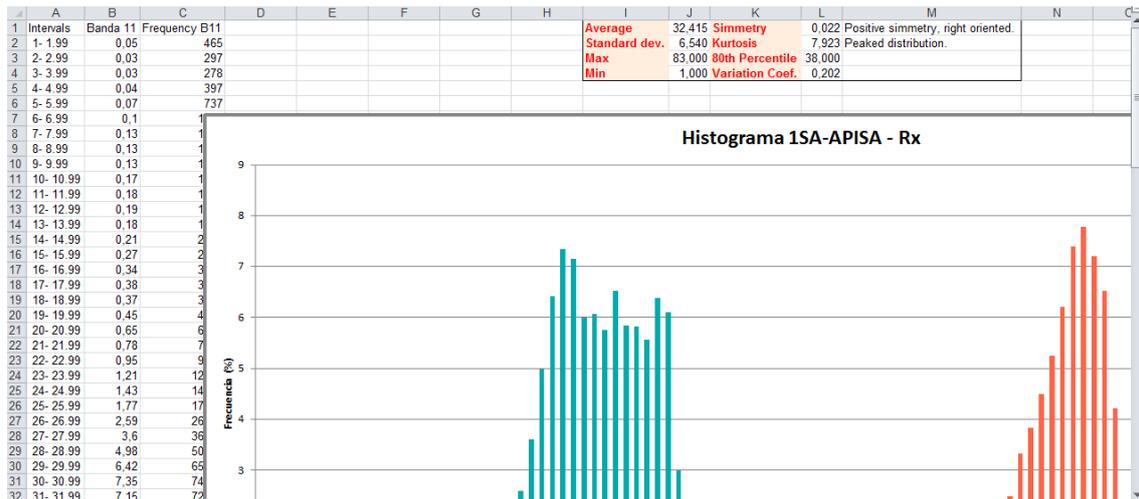


Ilustración 32.- Fragmento ejemplo de hoja Hist Rx.

El comando **Histograma Tx+Rx**, requiere los datos de las hojas **Hist Tx** y **Hist Rx**, y realiza las medias de los valores de Banda 11 de transmisión y recepción, para resultar en una nueva función de distribución que representa a la Banda 11, y lo mismo para la Banda 12. Plotea los resultados en una nueva hoja Excel con nombre **Hist Tx+Rx**.

El formato de esta hoja es parecido a las hojas **Hist Tx** y **Hist Rx**. En la primera columna los intervalos, en la segunda los datos de la distribución de la recepción de banda 11, y en la tercera los datos de la transmisión de la banda 12. En la cuarta columna tenemos la media de los dos valores. El mismo formato sigue los datos de la banda 12 a la derecha de la hoja.

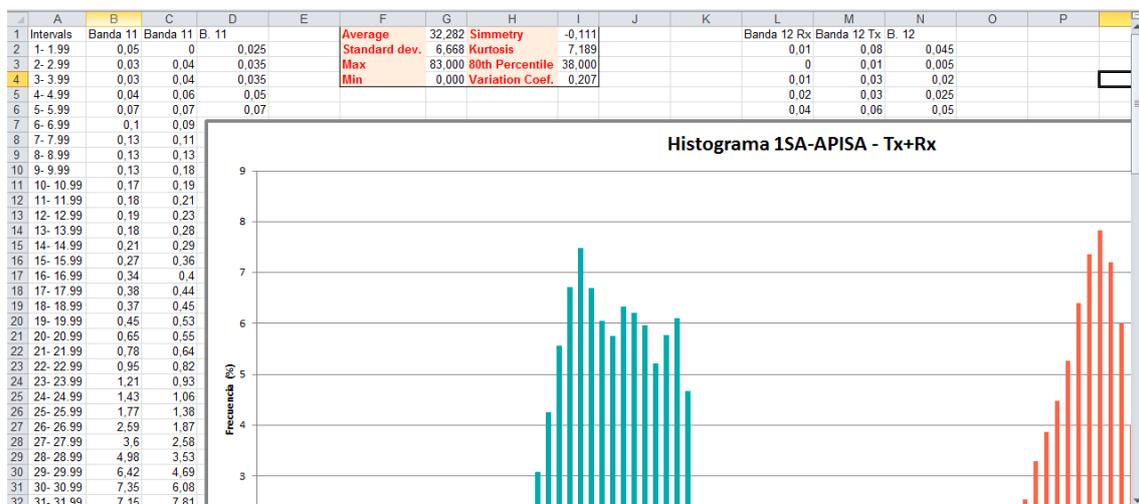


Ilustración 33.- Fragmento ejemplo de hoja Hist Tx+Rx.

5. Fechas Banda 11 - 12

La ejecución de estos comandos requiere de las hojas rellenas Banda 11 y Banda 12, obtenidas en el paso Cargar datos Tx-Rx. A partir de esos datos, y sobre esas mismas hojas Excel,

calculara la media y la desviación típica de los datos que coinciden en la misma fecha, y realizara cuatro gráficos sobre cada hoja:

- Evolución temporal de la media de la velocidad en recepción (Esquina superior izquierda).
- Evolución temporal de la media de la velocidad en transmisión (Esquina superior derecha).
- Evolución temporal de la desviación típica en recepción (Esquina inferior izquierda).
- Evolución temporal la media de la desviación típica en transmisión (Esquina inferior derecha).

Los datos sobre los que se realizan estas gráficas, tienen el formato que se aprecia en la Ilustración 34. En las cuatro primeras columnas, tenemos los datos de partida de la banda (el histórico). En la columna I tenemos el listado de fechas únicas. Los datos provenientes de Gadip se toman una vez al día, y los registros diarios no se van perdiendo a la par que se añaden, por lo que, en posteriores ejecuciones la salida de estas funciones tendrán un número creciente de resultados. En las columnas J y K tenemos la media y desviación típica de la banda a la que pertenece la hoja, en los datos de recepción, y en las columnas M y N los resultados de los datos de transmisión.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	28/12/2016	17	18	1	10.78.248.9	11			Fechas	media	Desviacion tipica		media	Desviacion t
2	28/12/2016	16	35	19	100.97.4.8	11			28/12/2016	20,203166	6,9467659		19,71504	6,9188846
3	28/12/2016	17	17	0	10.79.198.9	11			29/12/2016	20,184211	7,0003968		19,707895	6,9199296
4	28/12/2016	15	13	2	10.79.199.7	11			30/12/2016	20,181579	6,9836732		19,726316	6,9250678
5	28/12/2016	16	14	2	10.79.199.9	11			31/12/2016	20,210526	7,0011605		19,765789	7,0355591
6	28/12/2016	33	36	3	10.79.232.9	11			01/01/2017	20,292105	7,0547382		19,728947	6,9939819
7	28/12/2016	35	35	0	10.70.212.4	11			02/01/2017	20,197368	7,089365		19,647368	7,032294

Ilustración 34.- Muestra de los datos obtenidos con el comando Fechas Banda 11.

Con el comando **Comparativa Banda 11** y **Comparativa Banda 12**, se utilizan los datos obtenidos con el comando anterior, y se pasan de tener cuatro graficas por banda a tener dos. De este modo resulta más sencillo comparar los resultados de transmisión y recepción. Simplemente se toman los datos resultados de las hojas Banda 11 y banda 12, y se pegan en las hojas Comparativa B. 11 y Comparativa B. 12.

Gracias a los resultados que se obtienen con este último comando, se puede constatar que el comportamiento por banda en transmisión y recepción es bastante parejo, por lo que resulto inmediato unir de alguna manera ambos datos para que la comparativa final resulte más sencilla. Esto se consigue con la ejecución del botón **Fechas Tx+Rx**. Este botón calcula la media entre los datos de cada banda de recepción y transmisión, y los grafica. Para ello, toma los datos que residen en las hojas Comparativa B. 11 y Comparativa B. 12, y calcula las medias entre ellos, para después graficarlos. En este caso, como en el caso de las comparativas, por cada banda nos quedan 2 graficas:

- Evolución temporal de la media de la velocidad (Esquina superior).
- Evolución temporal de la desviación típica de la velocidad (Esquina inferior).

El formato de los datos de estas hojas, son como aparecen en la Ilustración 35. En la primera columna las fechas únicas. En las columnas B y C, los datos de la media de recepción y

transmisión respectivamente originales de cada fechas. Y en la columna D la Media entre estos dos últimos valores. El formato del resto de columnas es análogo a este: En las columnas G y H la desviación típica a de recepción y transmisión, y en la columna I la media entre estos dos últimos valores. Las columnas que se grafican son la D y la I, sobre el eje X de fechas en ambos casos representado en la columna A.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Fechas	Rx Media	Tx Media	B. 11 Media		Fechas	Desvi Rx	Desvi Tx	B. 11 Desvi.
2	28/12/2016	20,2031662	19,7150396	19,9591029		28/12/2016	6,94676587	6,91888457	6,93282522
3	29/12/2016	20,1842105	19,7078947	19,9460526		29/12/2016	7,00039676	6,9199296	6,96016318
4	30/12/2016	20,1815789	19,7263158	19,9539474		30/12/2016	6,9836732	6,92506762	6,95437041
5	31/12/2016	20,2105263	19,7657895	19,9881579		31/12/2016	7,00116046	7,035559	7,01835973
6	01/01/2017	20,2921053	19,7289474	20,0105263		01/01/2017	7,05473817	6,99398188	7,02436002
7	02/01/2017	20,1973684	19,6473684	19,9223684		02/01/2017	7,08936499	7,03229403	7,06082951

Ilustración 35.- Ejemplo de hoja B.11 Tx+Rx.

6. Correlación Banda 11 - 12

La ejecución de esta hoja, requiere de las hojas Banda 11 y Banda 12 obtenidas con el botón Cargar datos Tx-Rx, además de la hoja Excel GRUPO, la cual es la hoja Excel **IP Origen**, la cual podemos introducir filtrada con los equipos con los que trabajamos, o sin filtrar, aunque ralentizara la ejecución del comando. Esta hoja es la salida del comando Cargas los BPL Repeater, pero con los datos del tipo de cable, y la longitud del enlace añadidas.

Una vez tenemos los datos de partida sobre el mismo libro, la ejecución de estos botones añaden el dato de la longitud al histórico de datos (Banda 11 y banda 12), y calcula para cada rango de longitudes de los enlaces (en este caso el paso se estableció en 10 metros por rango), la media de las velocidades y la desviación típica de todos los datos de los enlaces que pertenecen a ese rango. Además, calcula el número de enlaces que hay en ese rango, y el porcentaje que representa ese valor en el total de enlaces en esa banda. También toma todos los datos de velocidades primero de recepción y después de transmisión, y calcula la correlación que tienen con la distancia de los enlaces a los que pertenecen.

El formato de los datos es el siguiente: En las cuatro primeras columnas aparecen los datos de los históricos originales, aunque en la columna 7 se ha añadido la longitud del cable al que pertenece cada dato. Los datos calculados comienzan en la columna I, y tienen el aspecto que se aprecia en la Ilustración 36. En las celdas I3 y P3 se almacenan los datos de correlación de recepción y transmisión respectivamente. Después En las columnas J y Q se guardan los datos de los rangos de distancias, aunque no tienen el mismo formato las dos columnas. Esto último es debido a que al representar gráficamente los valores con el formato de la columna Q surgen problemas. En las columnas K y R se guarda la media de la velocidad de los datos de recepción y transmisión. En las columnas L y S lo propio pero con los datos de desviación. En las columnas M y N se almacenan el total de datos que hay en dicho rango en valores totales y porcentuales respectivamente.

	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S
1	Rx	Distancias	Media Velo.	Desv. Velo.	Valores	Valores (%)		Tx	Distancias	Media Velo.	Desv. Velo.
2	Correlacion distancia-Velocidad.	10	16,04	0,33	536,00	0,26339714		Correlacion distancia-Velocidad.	1 -> 10	15,09	0,44
3		20	30,67	2,01	1072,00	0,52679427			11 -> 20	32,86	0,76
4		30	16,00	0,81	536,00	0,26339714			21 -> 30	16,10	0,80
5		40	16,02	1,58	2680,00	1,31698568			31 -> 40	15,75	2,32
6		50	14,93	0,69	536,00	0,26339714			41 -> 50	14,65	0,62
7		60	20,12	4,67	2680,00	1,31698568			51 -> 60	20,07	5,01

Ilustración 36.- Ejemplo de datos obtenidos con Correlación Banda 11.

Un aspecto importante es que la función aplica un filtro para mostrar únicamente los valores de los rangos que tienen al menos 3 000 datos, por lo que, pueden taparse los resultados de la correlación. Además en grupos pequeños, es habitual que no haya muchos rangos que cumplan este criterio, por lo que estarán relativamente “vacíos”. También hay que tener en cuenta que puede no haber valores en algún rango, por lo que esos valores los tomara como cero. Al quitar el filtro se verán estos puntos, y desdibujaran las curvas de la media.

En este caso solo se grafican las curvas de la media de la velocidad en transmisión y recepción de cada banda, aunque están disponibles los cálculos de la desviación, pero al aplicar el filtro estas graficas quedarían tapadas y por eso no se han mostrado.

El botón **Correlación Tx+Rx** toma los resultados del comando anterior, y calcula las medias de los valores medios y las desviaciones típicas, y aplica de nuevo el filtro de los 3 000 valores. Toma los valores necesarios de las hojas Banda 11 y Banda 12, y realiza los cálculos y grafica sobre las hojas B. 11 TxRx y B. 12 TxRx.

Libro Excel resultado de cada apartado

1. Histograma Bandas



Ilustración 37.- Nombres de las hojas Excel resultantes del apartado 1.

La hoja **Principal** contiene los botones que ejecutan el código. En este apartado no se deposita ningún cálculo ni ninguna grafica sobre las hojas Excel **Banda 11** y **Banda 12**. Estas tres primeras hojas son necesarias para obtener el resto de hojas.

Las hojas **Hist Tx** y **Hist Rx** contienen tanto los cálculos para llegar a los histogramas, como los propios histogramas, además de los estadísticos calculados sobre las muestras de las hojas **Banda 11** y **Banda 12**. Por último, la hoja **Hist Tx+Rx** contiene los mismos contenidos de las hojas **Hist Tx** y **Hist Rx**, pero de la media entre las dos distribuciones.

2. Evolución temporal



Ilustración 38.- Nombres de las hojas Excel resultantes del apartado 2.

En este apartado, se depositan cálculos y las graficas sobre las hojas **Banda 11** y **Banda 12**. Para conseguir los cálculos son necesarias las tres primeras hojas.

Sobre las hojas **Banda 11** y **Banda 12** se realizan los cálculos, y se plotean cuatro graficas: Evolución temporal del promedio y la desviación en transmisión y recepción. En las hojas **Comparativa B. 11** y **Comparativa B. 12** se tratan de reducir las graficas mostradas en las hojas **Banda 11** y **Banda 12**, y se muestran conjuntamente las dos curvas de transmisión y recepción sobre dos graficas (de promedio y desviación típica). Finalmente en las hojas **B.11 Tx+Rx** y **B.12 Tx+Rx** se calcula la media entre transmisión y recepción de las hojas **Comparativa B. 11** y **Comparativa B. 12**, y se grafican.

3. Correlación Velocidad-Distancia



Ilustración 39.- Nombres de las hojas Excel resultantes del apartado 3.

En este caso, también se realizan y depositan cálculos sobre las hojas **Banda 11** y **Banda 12**. En la cuarta hoja Excel que se aprecia en la Ilustración 39, es la hoja denominada con la variable global GRUPO; es la lista de los equipos con las direcciones IP, que surgen del libro Excel **IP Origen**. Estas cuatro hojas son los datos de partida de este apartado.

En este caso también se trabaja sobre las hojas **Banda 11** y **Banda 12**. Sobre ellas se muestran gráficamente los resultados, aunque con un filtro aplicado para únicamente mostrar las muestras representativas. También se encuentra el dato de la correlación entre las velocidades de transmisión y recepción respecto a la longitud del enlace. En las hojas **B. 11 TxRx** y **B. 12**

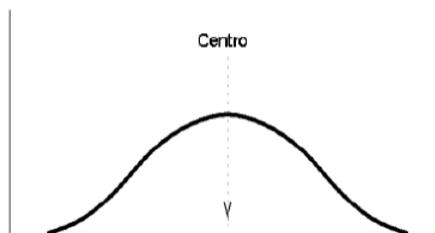
TxRx, se muestra el promedio de transmisión y recepción de cada banda, de la media y la desviación por cada longitud, y se grafican esos resultados. En este caso también se grafica el resultado.

Estadísticos calculados

1. **La media o el promedio:** Es el valor medio de una muestra dada. Su objetivo es localizar alrededor de qué punto se sitúan todas las observaciones. También puede verse como el valor al que tienden a agruparse el resto de valores

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

La función que se utiliza es la que proporciona VBA, WorksheetFunction.Average().

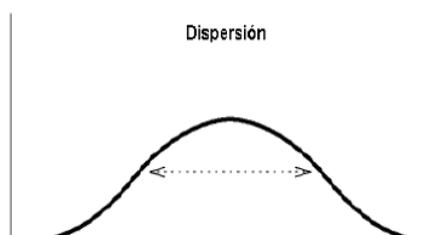


2. **La varianza** mide la dispersión alrededor de la media; cuanto más pequeño sea su valor, más concentrados estarán los puntos alrededor de la media \bar{x} . No se ha implementado esta función, si no la siguiente.

$$s_x^2 = \frac{(x_1 - \bar{x})^2 + (x_2 - \bar{x})^2 + \dots + (x_n - \bar{x})^2}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$$

3. **La desviación típica** surge a raíz de la anterior, como una alternativa para no tener que trabajar con unidades cuadradas. Se extrae de la raíz cuadrada de la varianza.

$$s_x = \sqrt{s_x^2}$$



Se ha utilizado la función WorksheetFunction.StDev() para aplicar este estadístico a la muestra.

4. El **máximo** y el **minino** son sencillamente los valores máximos y mínimos que alcanza la muestra.

Para implementar estas funciones se han utilizado las funciones: WorksheetFunction.max(), y WorksheetFunction.Min().

5. El **coeficiente de simetría** (g_1) mide el grado asimetría de la muestra alrededor de la media:

- Si $g_1 < 0$, la simetría es negativa, con la cola de la distribución extendiéndose hacia valores negativos; la dispersión se da hacia la izquierda de la media.
- Si $g_1 > 0$, la simetría es positiva, con la cola de la distribución extendiéndose hacia valores positivos; la dispersión se da hacia la derecha de la media.
- Si $g_1 = 0$, la muestra es simétrica; sigue una distribución normal.

$$g_1 = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3}{s_x^3}$$

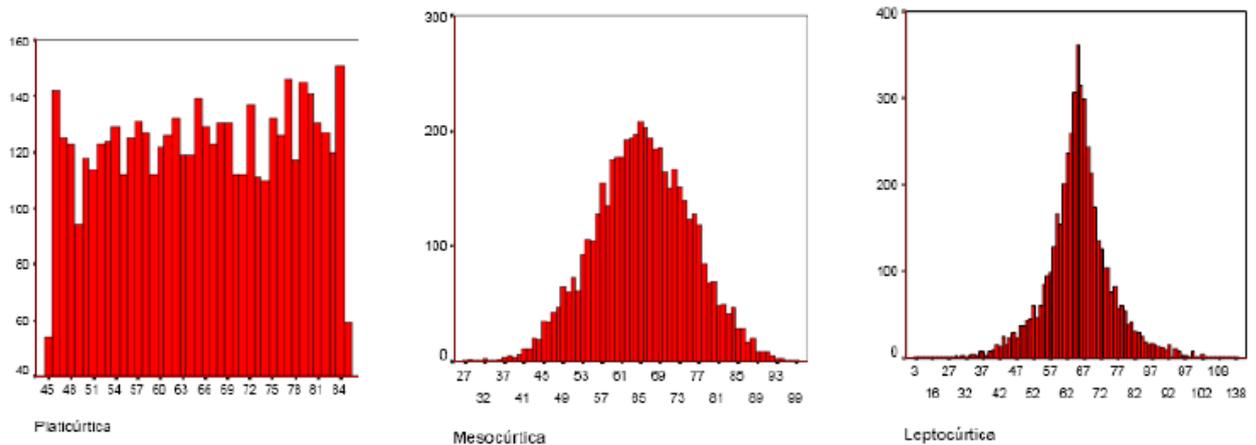
Se ha utilizado la función WorksheetFunction.Skew().

6. El **coeficiente de apuntamiento o curtosis** (g_2) mide el grado de concentración de la muestra alrededor de la media, comparada a la distribución normal. También puede verse como el grado de aplastamiento de una distribución con respecto a la distribución normal o Gaussiana:

- Si $g_2 < 0$, el histograma de la muestra está más aplastado que el de la distribución normal. La distribución está relativamente “achatada”. En este caso se denomina Platicúrtica.
- Si $g_2 > 0$, el histograma de la muestra está menos aplastado que el de la distribución normal. La distribución está relativamente “angulosa”. En este caso se denomina Leptocúrtica.
- Si $g_2 = 0$, el histograma de la muestra está igual de aplastado que el de la distribución normal. En este caso se denomina Mesocúrtica.

$$g_2 = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^4}{s_x^4} - 3$$

Se ha implementado con la función WorksheetFunction.Kurt(). Los gráficos mostrados, tienen la misma media y desviación típica, pero diferente grado de kurtosis.



7. El **coeficiente de variación** se utiliza para comparar la dispersión relativa de varias muestras.

$$V = \frac{S_x}{\bar{x}}$$

Para aplicar este estadístico, simplemente se ha dividido la desviación típica obtenida entre la media.

8. El **coeficiente de correlación de Pearson** mide la relación lineal entre dos variables aleatorias. Este estadístico es independiente de la escala de medida de las variables. El valor del índice de correlación varía en el intervalo $[-1,1]$. El valor que toma el coeficiente, representa la relación entre las dos variables:

- Si $r = 1$, existe una correlación positiva perfecta. El índice indica una dependencia total entre las dos variables denominada relación directa: cuando una de ellas aumenta, la otra también lo hace en proporción constante.
- Si $0 < r < 1$, existe una correlación positiva.
- Si $r = 0$, no existe relación lineal. Pero esto no necesariamente implica que las variables son independientes: pueden existir todavía relaciones no lineales entre las dos variables.
- Si $-1 < r < 0$, existe una correlación negativa.
- Si $r = -1$, existe una correlación negativa perfecta. El índice indica una dependencia total entre las dos variables llamada relación inversa: cuando una de ellas aumenta, la otra disminuye en proporción constante.

$$\rho_{X,Y} = \frac{\sigma_{XY}}{\sigma_X \sigma_Y} = \frac{E [(X - \mu_X)(Y - \mu_Y)]}{\sigma_X \sigma_Y}$$

Para implementar esta función se utiliza el método VBA WorksheetFunction.Correl().

9. El **percentil k-ésimo**, dado un valor porcentual de k, y una vez ordenador los valores de una muestra, nos revela cual es el valor de la muestra sobre el que se encuentra el

porcentaje de la muestra. Por ejemplo, el percentil 30-ésimo es el valor por debajo del cual se hallan el 30 por ciento de las muestras.

Para utilizar esta función, se ha usado el método: `WorksheetFunction.Percentile(<muestra>, 0.8)`, de modo que se realiza el cálculo del perfil 80-ésimo.