

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍA DE
TELECOMUNICACIÓN

TRABAJO FIN DE GRADO

ANÁLISIS DEL IMPACTO DE LOS EFECTOS DE CANAL EN LAS COMUNICACIONES NARROWBAND PLC SEGÚN EL ESTÁNDAR PRIME

Alumno: González Ramos, Jon

Directora: Angulo Pita, Itziar

Curso: 2018-2019

Fecha: 15/07/2019

Resumen

Power Line Communications (PLC) es una tecnología que utiliza la red eléctrica como medio de comunicación. A pesar de que las ventajas son diversas como, por ejemplo, que la red se encuentra totalmente desplegada, las emisiones no deseadas introducidas por los equipos conectados a la misma, junto con la impedancia cambiante del medio pueden degradar de forma considerable nuestras comunicaciones. Por ello, en este trabajo, se trata de analizar el impacto de los efectos de canal en Narrowband PLC según el estándar PRIME. Con ese fin, se han seleccionado cuatro filtros EMC con respuesta frecuencial de impedancia conocida. El objetivo se consigue, por un lado, analizando la atenuación introducida por los filtros y, por otro, mediante la degradación de las curvas de FER frente a SNR en los diferentes canales del estándar. Esto último, permite estudiar las diferencias existentes entre los rangos frecuenciales asignados actualmente en Europa y las bandas de frecuencias superiores.

Palabras clave: Canal de propagación, impedancia de la red eléctrica, pérdidas de transmisión, Power Line Communications, PRIME, respuesta frecuencial.

Laburpena

Power Line Communications (PLC) sare elektrikoa komunikabide gisa erabiltzen duen teknologia da. Nahiz eta abantailak ugariak izan, sarea erabat zabaldua egotea, esate baterako, konektatutako ekipoek sartu nahi ez dituzten emisioek, inguruaren inpedantzia aldakorrekin batera, gure komunikazioak nabarmen honda ditzakete. Horregatik, lan honek kanal-efektuek Narrowband PLCn duten eragina aztertzea du helburu, PRIME estandarraren arabera. Horretarako, lau EMC iragazki hautatu dira, inpedantziaren maiztasun-erantzuna ezagunarekin. Proiektuaren helburua, batetik, iragazkiek eragindako arintzea aztertuz, eta bestetik, estandarraren kanal guztietan FER bihurguneak degradatuz, lortuko da. Azken horrek aukera emango du, gaur egun European esleituta dauden maiztasun-banda eta banda nagusien artean dauden desberdintasunak aztertzeko.

Gako-hitzak: Hedapen-kanala, maiztasun-erantzuna, Power Line Communications, PRIME, sare elektrikoaren impedantzia, transmisio-galerak.

Abstract

Power Line Communications (PLC) is a technology that uses the electrical network as a means of communication. Although the advantages are diverse, for example, that the network is fully deployed, the unwanted emissions introduced by the equipment connected to it, together with the changing impedance of the medium, can considerably degrade our communications. Therefore, in this paper, we analyze the impact of channel effects on Narrowband PLC according to the PRIME standard. To this end, four EMC filters have been selected with a known impedance frequency response. The objective is achieved, on the one hand, by analyzing the attenuation introduced by the filters and, on the other, by the degradation of the FER versus SNR curves in the different channels of the standard. The latter allows us to study the differences between the frequency ranges currently assigned in Europe and the higher frequency bands.

Keywords: Frequency response, grid impedance, Power Line Communications, PRIME, propagation channel, transmission losses.

Índice

1.	Introducción	11
2.	Contexto y antecedentes	11
2.1.	Asignación de frecuencias para los servicios NB-PLC.....	12
2.2.	PLC PRIME	13
2.3.	Trabajo previo sobre las perturbaciones de canal en las comunicaciones Narrowband PLC.....	15
2.3.1.	Emisiones no deseadas	16
2.3.2.	Efectos de canal.....	16
3.	Objetivos	18
4.	Beneficios	18
4.1.	Beneficios técnicos.....	19
4.2.	Beneficios sociales y económicos.....	19
5.	Análisis de alternativas.....	20
5.1.	Alternativas al software-hardware utilizado.....	20
5.1.1.	Simulación de una cadena completa de transmisión-recepción	20
5.1.2.	Utilización de dispositivos hardware.....	20
5.2.	Alternativas para analizar el impacto de los efectos de canal	21
5.2.1.	Medición de los efectos de canal in situ en la red de distribución	21
5.2.2.	Utilización de filtros EMC en medidas de laboratorio.....	21
6.	Selección/Descripción de la solución propuesta.....	21
7.	Equipo de trabajo	23
7.1.	Equipo de trabajo	23
7.2.	Paquetes de trabajo	24
7.3.	Diagrama de Gantt	29
8.	Medios y técnicas básicas	30
8.1.	Dispositivos hardware	30
8.2.	Software	30

9.	Presupuesto	30
9.1.	Horas internas	31
9.2.	Amortizaciones.....	31
9.3.	Gastos.....	31
9.4.	Resumen del presupuesto.....	32
10.	Análisis de riesgos	32
10.1.	Demoras (A).....	32
10.2.	Malfuncionamiento de los dispositivos ATMEL ATPL240A-EK (B)	32
10.3.	Dispositivos de comunicaciones estropeados (C)	33
10.4.	Limitaciones hardware y software (D)	33
10.5.	Matriz probabilidad – impacto.....	34
11.	Metodología	34
11.1.	Metodología propuesta.....	34
11.1.1.	Descripción general	34
11.1.2.	Equipamiento	35
11.1.2.1.	Picoscope 5444b.....	35
11.1.2.3.	Agilent 33220A	42
11.1.2.4.	Filtros EMC	43
11.2.	Validación de la metodología	49
11.2.1.	Comprobación de las diferentes formas de obtener la SNR	54
12.	Resultados y análisis.....	58
12.1.	Influencia de la atenuación de los filtros en la señal PLC PRIME	58
12.2.	Curvas de FER frente a SNR.....	66
12.2.1.	Resultados en el canal uno de PRIME	66
12.2.2.	Resultados en los canales superiores de PRIME	69
13.	Conclusiones.....	78
14.	Bibliografía	80

Lista de ilustraciones

Ilustración 1. Rango frecuencial de la tecnología PLC PRIME [6].....	13
Ilustración 2. Diagrama de bloques del modo robusto en PRIME v1.4 [2]	13
Ilustración 3. Estructura de la trama tipo A [2]	14
Ilustración 4. Bits asociados a la cabecera y carga útil de la trama tipo A de PRIME [5].....	14
Ilustración 5. Posición de las subportadoras de datos y piloto en una trama tipo A en los diferentes canales de PRIME [5]	15
Ilustración 6. Influencia de la impedancia de la red en la señal PLC recibida [10]	17
Ilustración 7. Montaje a realizar compuesto por: dispositivos ATMEL ATPL230A-EK, generador de señales y filtro EMC.....	23
Ilustración 8. Diagrama de Gantt del proyecto	29
Ilustración 9. Picoscope 5444b.....	35
Ilustración 10. Dispositivo de comunicaciones PLC ATMEL ATPL230A-EK.....	36
Ilustración 11. Parámetros de transmisión a configurar.....	38
Ilustración 12. Parámetros a configurar en transmisor y receptor.....	39
Ilustración 13. Resultados de la recepción de tramas	40
Ilustración 14. Circuito equivalente del transmisor PRIME.....	41
Ilustración 15. Trama PLC PRIME en el Picoscope 5444b en la que se mide el nivel de señal ...	41
Ilustración 16. Agilent 33220A	43
Ilustración 17. Esquemático del filtro EMC 5500.2044	43
Ilustración 18. Módulo de la respuesta frecuencial de la impedancia del filtro EMC 5500.2044	44
Ilustración 19. Fase de la respuesta frecuencial de la impedancia del filtro EMC 5500.2044....	44
Ilustración 20. Esquemático del filtro EMC 5500.2052	45
Ilustración 21. Módulo de la respuesta frecuencial de la impedancia del filtro EMC 5500.2052	45
Ilustración 22. Fase de la respuesta frecuencial de la impedancia del filtro EMC 5500.2052....	46
Ilustración 23. Esquemático del filtro EMC 5500.2055	46
Ilustración 24. Módulo de la respuesta frecuencial de la impedancia del filtro EMC 5500.2055	47
Ilustración 25. Fase de la respuesta frecuencial de la impedancia del filtro EMC 5500.2055....	47
Ilustración 26. Esquemático del filtro EMC 5500.2060	48
Ilustración 27. Módulo de la respuesta frecuencial de la impedancia del filtro EMC 5500.2060	48
Ilustración 28. Fase de la respuesta frecuencial de la impedancia del filtro 5500.2060	49
Ilustración 29. Curvas que relacionan FER y SNR para las diferentes modulaciones utilizando ruido blanco en el canal uno de PRIME.....	50

Ilustración 30. Curvas teóricas de FER frente a SNR [4].....	51
Ilustración 31. Curvas que relacionan SNR y FER para las diferentes modulaciones utilizando ruido blanco en el canal tres de PRIME.....	52
Ilustración 32. Modulación DBPSK para tres canales diferentes de PRIME: canal 1, 3 y 8.....	54
Ilustración 33. Curvas de FER frente a SNR en el primer canal de PRIME para las diferentes impedancias variando ruido inyectado y nivel de señal	55
Ilustración 34. Todos los valores obtenidos graficados sobre la misma curva en el canal uno..	56
Ilustración 35. Curvas de FER frente a SNR en el primer canal de PRIME para las diferentes impedancias variando ruido inyectado y nivel de señal	57
Ilustración 36. Todos los valores obtenidos graficados sobre la misma curva en el canal tres..	57
Ilustración 37. Respuesta frecuencial del filtro EMC 5500.2044 junto con la atenuación introducida en cada canal de PRIME.....	59
Ilustración 38. Respuesta frecuencial del filtro EMC 5500.2052 junto con la atenuación introducida en cada canal de PRIME.....	60
Ilustración 39. Respuesta frecuencial del filtro EMC 5500.2055 junto con la atenuación introducida en cada canal de PRIME.....	60
Ilustración 40. Respuesta frecuencial del filtro EMC 5500.2060 junto con la atenuación introducida en cada canal de PRIME.....	61
Ilustración 41. Respuesta frecuencial del canal sin filtro y utilizando el filtro 5500.2044.....	64
Ilustración 42. Respuesta frecuencial del canal sin filtro y utilizando el filtro 5500.2052.....	64
Ilustración 43. Respuesta frecuencial del canal sin filtro y utilizando el filtro 5500.2055.....	65
Ilustración 44. Respuesta frecuencial del canal sin filtro y utilizando el filtro 5500.2060.....	65
Ilustración 45. Curva FER frente a SNR con el filtro 5500.2044 en el canal uno de PRIME	66
Ilustración 46. Curva FER frente a SNR con el filtro 5500.2052 en el canal uno de PRIME	67
Ilustración 47. Curva FER frente a SNR con el filtro 5500.2055 en el canal uno de PRIME	67
Ilustración 48. Curva FER frente a SNR con el filtro 5500.2060 en el canal uno de PRIME	68
Ilustración 49. Curva FER frente a SNR con el filtro 5500.2052 en el canal ocho de PRIME.....	69
Ilustración 50. Curva FER frente a SNR con el filtro 5500.2055 en el canal ocho de PRIME.....	70
Ilustración 51. Curva de FER frente a SNR para el filtro 5500.2044 en los diferentes canales de PRIME utilizando una modulación DBPSK_C.....	71
Ilustración 52. Curva de FER frente a SNR para el filtro 5500.2052 en los diferentes canales de PRIME utilizando una modulación DBPSK_C.....	72
Ilustración 53. Curva de FER frente a SNR para el filtro 5500.2055 en los diferentes canales de PRIME utilizando una modulación DBPSK_C.....	73
Ilustración 54. Curva de FER frente a SNR para el filtro 5500.2060 en los diferentes canales de PRIME utilizando una modulación DBPSK_C.....	74
Ilustración 55. Respuesta frecuencial del canal en los diferentes rangos frecuenciales sin filtro y utilizando el filtro EMC 5500.2044.....	76

Ilustración 56. Respuesta frecuencial del canal en los diferentes rangos frecuenciales sin filtro y utilizando el filtro EMC 5500.2052.....	77
Ilustración 57. Respuesta frecuencial del canal en los diferentes rangos frecuenciales sin filtro y utilizando el filtro EMC 5500.2055.....	77
Ilustración 58. Respuesta frecuencial del canal en los diferentes rangos frecuenciales sin filtro y utilizando el filtro EMC 5500.2060.....	78

Lista de tablas

Tabla 1. Aplicaciones en las diferentes bandas de CENELEC en Europa [1] [3]	12
Tabla 2. Ponderación de los diferentes criterios de selección de las alternativas referidas a la implementación de la cadena de transmisión – recepción	22
Tabla 3. Ponderación de los diferentes criterios de selección de las alternativas referidas al análisis del efecto de canal	22
Tabla 4. Equipo de trabajo del proyecto	23
Tabla 5. Paquete de trabajo 1: Tareas iniciales.....	24
Tabla 6. Paquete de trabajo 2: Definición y validación de la metodología.....	25
Tabla 7. Paquete de trabajo 3: Análisis del impacto del efecto de canal en las comunicaciones PLC PRIME	27
Tabla 8. Paquete de trabajo 4: Análisis de la atenuación introducida por los filtros EMC.....	27
Tabla 9. Paquete de trabajo 5: Gestión y documentación del proyecto.....	28
Tabla 10. Presupuesto correspondiendo a la partida de horas internas	31
Tabla 11. Presupuesto correspondiente a la partida de amortizaciones.....	31
Tabla 12. Presupuesto correspondiente a la partida de gastos.....	31
Tabla 13. Resumen del presupuesto por partidas	32
Tabla 14. Matriz probabilidad - impacto del proyecto.....	34
Tabla 15. Valores RMS medidos en el transmisor.....	42
Tabla 16. Comparativa de los valores de SNR para un FER de 10^{-2} en el canal uno de PRIME...	52
Tabla 17. Valores de SNR aproximados para un FER de 10^{-2} en los canales uno y tres de PRIME	53
Tabla 18. Valores RSSI medidos en los diferentes canales de PRIME para los diferentes filtros EMC a analizar	58
Tabla 19. Atenuación en función de la impedancia media para el filtro 5500.2044	62
Tabla 20. Atenuación en función de la impedancia media para el filtro 5500.2052	62
Tabla 21. Atenuación en función de la impedancia media para el filtro 5500.2055	62
Tabla 22. Atenuación en función de la impedancia media para el filtro 5500.2060	63
Tabla 23. Comparativa de los valores de SNR para un FER de 10^{-2} para los diferentes filtros EMC analizados para cada una de las modulaciones	68
Tabla 24. Comparativa de los valores de SNR para un FER de 10^{-2} para los diferentes filtros EMC analizados para la modulación DBPSK_C	75

Lista de acrónimos

AGC	Automatic Gain Control
AMI	Advanced Metering Infraestructure
AWGN	Additive White Gaussian Noise
BN	Base Node
DC	Data Concentrator
DER	Distributed Energy Resources
DPSK	Differential Phase Shift Keying
EVM	Error Vector Magnitude
FER	Frame Error Rate
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
PLC	Power Line Communications
PRIME	PowerLine Intelligent Metering Evolution
RMS	Root Mean Square
RSSI	Received Signal Strength Indicator
SM	Smart Meter
SN	Service Node
SNR	Signal to Noise Ratio
TSR	Tratamiento de la Señal y Radiocomunicaciones

1. Introducción

PLC (Power Line Communications) es una tecnología que utiliza la red eléctrica como medio de transmisión de información. Tiene como principales ventajas la gran extensión de la red y que ésta ya se encuentra desplegada. De esta forma, se evitan los gastos asociados al despliegue de nuevas infraestructuras de red. Sin embargo, el impacto de los ruidos generados e introducidos por cada uno de los equipos conectados a ella, ligado a la impedancia cambiante del medio, pueden degradar de forma considerable nuestras comunicaciones. Además, es importante mencionar que la red eléctrica no está ideada para la transmisión de datos [1].

PLC se puede clasificar según diferentes criterios, siendo uno de ellos el rango frecuencial utilizado, en el que se encuentran UltraNarrowband PLC, Narrowband PLC y BroadBand PLC. Este trabajo se centra en la tecnología Narrowband PLC, utilizada por las operadoras eléctricas para comunicar medidores inteligentes. La asignación del espectro a esta tecnología en Europa está limitado a la banda CENELEC A (3 – 95 kHz), mientras que, en otras zonas del mundo, por el contrario, se realiza hasta los 500 kHz. La posibilidad de transmitir en bandas superiores ofrece diferentes ventajas: por un lado, permite disponer de un ancho de banda mayor y, por otro, se espera que las interferencias introducidas sean menores.

Este trabajo se centra en PLC PRIME (PowerLine Intelligent Metering Evolution), una tecnología basada en OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) con una tasa de datos de hasta 130 kbps, que trata de abordar los desafíos de las Smart Grids en las redes eléctricas de baja y media tensión ya existentes [2]. La tecnología PRIME, ahora un estándar internacional denominado ITU G.9904, fue desarrollada por la Alianza PRIME, presidida por Iberdrola. En una primera versión, PRIME 1.3.6, se especifican las características básicas de la tecnología. La versión 1.4 incluye ciertas mejoras, como son los modos más robustos, además de permitir un ancho de banda superior, hasta los 500 kHz, con el que se consigue una mayor flexibilidad y tasa de datos.

El objetivo principal de este trabajo es analizar el impacto de los efectos de canal en las comunicaciones PLC PRIME, además de las posibles diferencias existentes entre la asignación de frecuencias actualmente vigente en Europa y la utilización de las bandas de frecuencias superiores para ofrecer estos servicios.

2. Contexto y antecedentes

Este trabajo se engloba dentro de la línea de investigación sobre PLC en el grupo TSR (Tratamiento de la Señal y Radiocomunicaciones) de la Universidad del País Vasco. Los objetivos principales de esta línea de investigación son los siguientes. Por un lado, analizar la

eficiencia y el rendimiento de la tecnología en diferentes escenarios, caracterizando las emisiones no deseadas y evaluando la degradación de la señal transmitida. Por otro lado, se trata de definir nuevas técnicas de modulación y codificación y de diseñar toda la cadena de transmisión-recepción, con la finalidad de incrementar la capacidad y robustez ante interferencias.

2.1. Asignación de frecuencias para los servicios NB-PLC

El rango frecuencial asignado a Narrowband PLC varía según la localización geográfica. En Estados Unidos, FCC, el organismo regulador, especifica un rango de frecuencias desde 10 kHz hasta los 490 kHz, mientras que ARIB lo define desde los 10 kHz hasta los 450 kHz en Japón y desde los 3 kHz hasta los 500 kHz en China. En Europa, la banda asignada por CENELEC a esta tecnología, desde los 3 kHz hasta los 148.5 kHz, está dividida en cuatro subbandas en función de la aplicación a la que esté destinada: banda CENELEC A (3 kHz – 95 kHz), CENELEC B (95 kHz – 125 kHz), CENELEC C (125 kHz – 140 kHz) y CENELEC D (140 kHz – 148.5 kHz). A pesar de que la banda CENELEC A da comienzo en los 3 kHz, la mayoría de los equipos PLC están preparados para trabajar a partir de los 30 – 40 kHz, ya que a frecuencias menores se dan más interferencias.

En la Tabla 1 podemos ver las distintas aplicaciones para las que se destinan las diferentes bandas de CENELEC.

Banda	Frecuencia	Uso	Protocolo de acceso
A	3 - 95 kHz	Reservada a compañías eléctricas	No
B	95 - 125 kHz	Interiores sin protocolo de acceso	No
C	125 - 140 kHz	Aplicaciones en redes domésticas	CSMA/CD
D	140 – 148.5 kHz	Alarmas y sistemas de seguridad	No

Tabla 1. Aplicaciones en las diferentes bandas de CENELEC en Europa [1] [3]

A pesar de que la asignación actual de frecuencias en Europa para los sistemas NB-PLC en la red de distribución se limita hasta 95 kHz, existe un creciente interés en Europa por extender este rango frecuencial hasta los 500 kHz [4].

2.2. PLC PRIME

Las frecuencias inferiores a 40 kHz muestran diferentes problemas, como pueden ser la baja impedancia de carga vista por el transmisor, ruido coloreado... Por ello, PRIME, en su versión 1.4, utiliza el rango frecuencial desde los 41.992 kHz hasta 471.6796875 kHz, dividiéndolo en ocho canales. Cada canal se puede tomar como independiente, es decir, como una banda de transmisión-recepción única [5]. Como se explicará más adelante en detalle, la versión 1.3.6 de PRIME, trabaja únicamente en la banda CENELEC A (canal 1).

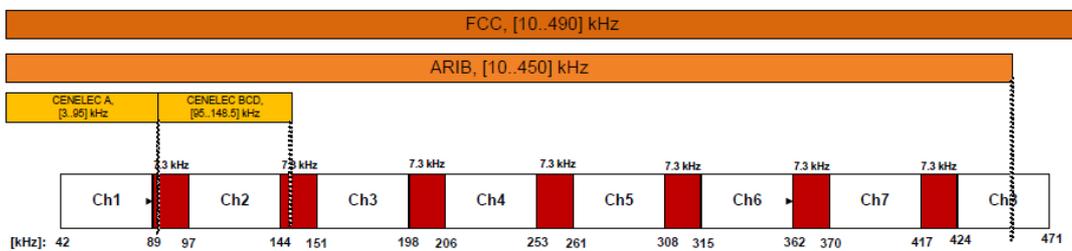


Ilustración 1. Rango frecuencial de la tecnología PLC PRIME [2]

La tecnología PLC PRIME utiliza modulaciones en fase, DPSK (Differential Phase Shift Keying), con tres posibles esquemas: DBPSK, DQPSK y D8PSK. Las modulaciones diferenciales son aquellas en las que la información se transmite en la diferencia entre dos símbolos consecutivos. Tanto PRIME v1.3.6, como PRIME v1.4, incluyen dichas configuraciones con códigos de corrección de errores opcionales. Adicionalmente, la versión 1.4 incluye dos modos más robustos, denominados DBPSK robusto y DQPSK robusto. Estos dos modos, además de incluir códigos de corrección de errores, añaden códigos de repetición con factor cuatro, como se puede ver en la siguiente ilustración.

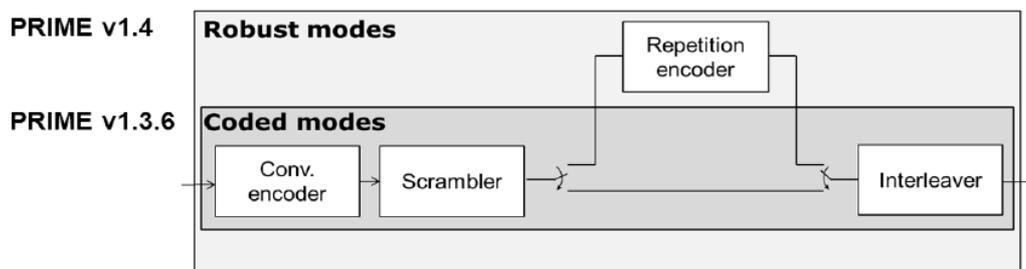


Ilustración 2. Diagrama de bloques del modo robusto en PRIME v1.4 [2]

La versión 1.3.6 de PRIME permite la transmisión de tramas tipo A, mientras que la versión 1.4 permite tanto tramas de tipo A (compatibles con 1.3.6.) como un nuevo tipo de trama tipo B. A pesar de que, en este trabajo, como se explicará más adelante en la metodología, sólo se utilizarán tramas tipo A, de tal forma que se pueda realizar una comparación correcta entre la influencia de los efectos de canal en las diferentes bandas de frecuencia, es importante conocer la existencia y las características principales de las tramas B. En redes mixtas, compuestas por equipos que implementen la versión 1.3.6 y otros que trabajen según la versión 1.4, se utilizan tramas denominadas BC [5].

En la siguiente ilustración se puede apreciar la estructura de la trama tipo A definida en el estándar PRIME.

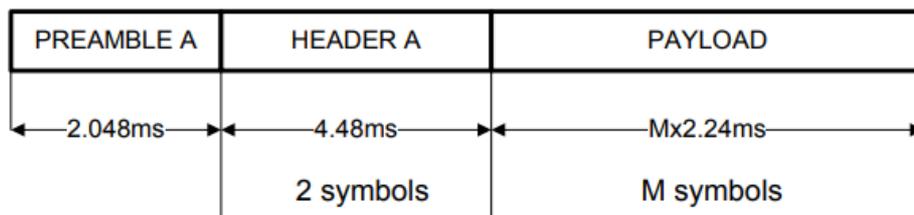


Ilustración 3. Estructura de la trama tipo A [2]

Como se puede ver en la imagen anterior, la trama tipo A comienza con un preámbulo de 2.048 ms, al que le siguen 2 + M símbolos OFDM. Los dos primeros símbolos son los encargados de transportar la cabecera de la trama física. Se transmiten siempre utilizando una modulación DBPSK con código de corrección de errores. Los M restantes portan la carga útil, mediante una modulación DBPSK, DQPSK o D8PSK, dependiendo de la configuración seleccionada por la capa MAC. El valor de M se indica en la cabecera, pudiendo alcanzar un valor máximo de 63 símbolos [2].

La ilustración 4 muestra la estructura a nivel de bits de la cabecera y de la carga útil de la trama tipo A.

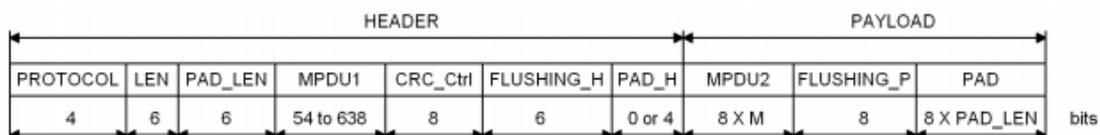


Ilustración 4. Bits asociados a la cabecera y carga útil de la trama tipo A de PRIME [5]

A continuación, en la ilustración 5, se muestra la posición de las portadoras de datos y piloto en la trama tipo A en los diferentes canales de PRIME.

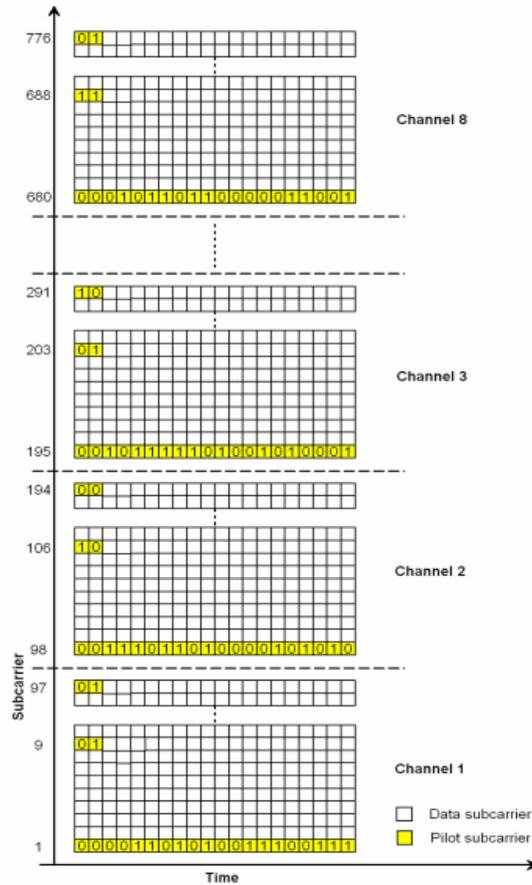


Ilustración 5. Posición de las subportadoras de datos y piloto en una trama tipo A en los diferentes canales de PRIME [5]

2.3. Trabajo previo sobre las perturbaciones de canal en las comunicaciones Narrowband PLC

Las comunicaciones PLC se pueden degradar por diferentes razones. Por un lado, están las emisiones no deseadas y, por otro, se encuentra la baja impedancia de los dispositivos conectados a la red.

2.3.1. Emisiones no deseadas

El modelo de ruido de PLC es más complejo que en otros sistemas de comunicaciones tradicionales, ya que incluye ruido de banda ancha coloreado, interferencias de banda estrecha y diferentes tipos de ruido impulsivo [6].

Las emisiones no deseadas a partir de 2 kHz se refieren, en la mayor parte de los casos, a los supraarmónicos generados por los dispositivos conectados a la red en la banda hasta los 150 kHz, como pueden ser aerogeneradores, inversores fotovoltaicos, turbinas eléctricas o cargadores de baterías [4]. Todos estos dispositivos son denominados DER (Distributed Energy Resources). A pesar de que todos estos equipos cumplen las directivas y disponen de marcado CE, las emisiones introducidas por los DER generan ruido e interferencias en la red eléctrica (frecuencias de conmutación del orden de los kHz, picos de hasta 100 dB μ V o superiores, armónicos de las frecuencias de conmutación...) [7]. Por ello, un alto nivel de emisiones puede suponer una reducción de la SNR (Signal to Noise Ratio) para las comunicaciones NB-PLC, lo que puede implicar un mal funcionamiento de las comunicaciones [8]. Esta es la principal razón por la que es crucial mantener la SNR requerida entre la señal PLC y las emisiones no deseadas. Además, debido a la ubicación de los DER, que en la mayoría de las ocasiones se encuentran cerca de las casas o en el interior de las mismas, es decir, cerca de los contadores inteligentes, la influencia es mayor.

Se pueden identificar diferentes aspectos relacionados con el efecto del ruido en PLC. Por un lado, se encontraría la influencia de las emisiones secundarias. La arquitectura de PRIME define dos tipos de nodos dentro de la estructura en árbol: los BN (Base Node), que se encuentran embebidos en los DCs (Data Concentrator), y los SNs (Service Node) embebidos en el SM (Smart Meter), los encargados de mantener la conectividad dentro de la subred. El nivel de cobertura de un SN se puede ver afectado no sólo por el DER asociado, sino también por los dispositivos emisores cercanos. A pesar de que una emisión puede no ser suficientemente perjudicial para bloquear el acceso a un SN, sí que podría causar cambios en la topología de la red, pudiendo aislar SNs existentes. Por otro lado, estas emisiones no deseadas pueden afectar a los paquetes de datos, corrompiéndolos o, incluso, cancelándolos. En ambos casos, se requiere la retransmisión de la información [6].

2.3.2. Efectos de canal

La impedancia de la red tiene una gran importancia en la propagación de la señal PLC, principalmente, debido a que es necesaria la existencia de adaptación de impedancias para que se dé máxima transferencia de potencia. Si esta condición no se cumple, las comunicaciones pueden degradarse considerablemente. Este efecto toma una gran importancia, ya que la impedancia de la red varía con el tiempo y la frecuencia [9].

En la siguiente imagen se puede apreciar cuál es el efecto que tiene la impedancia de la red en la señal recibida. Las impedancias más bajas son aquellas que más reducen el nivel de señal.

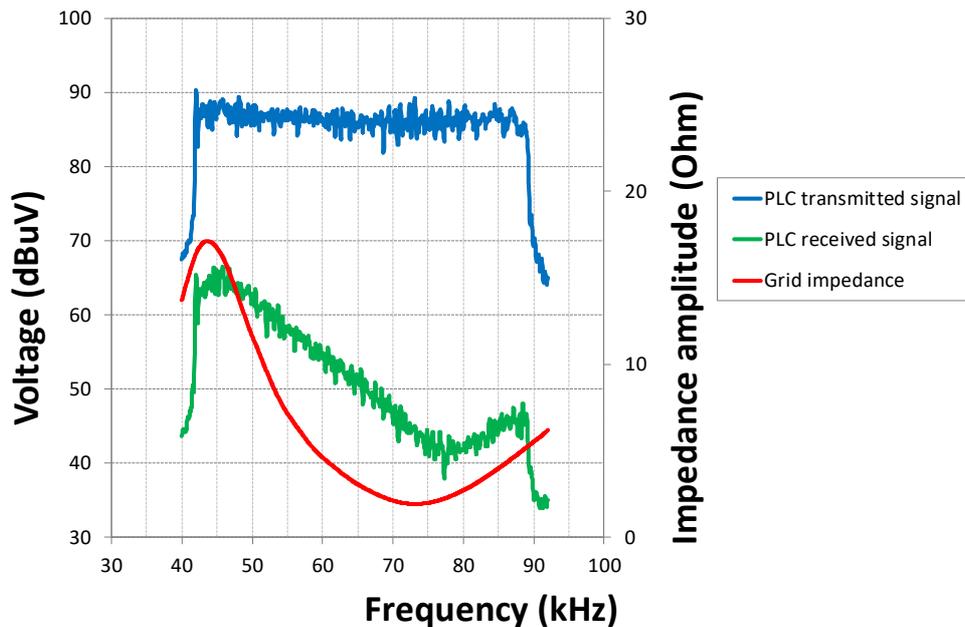


Ilustración 6. Influencia de la impedancia de la red en la señal PLC recibida [9]

Además, el efecto de las emisiones no deseadas comentadas en el apartado anterior también va a depender de la impedancia. Por ejemplo, los inversores conectados a la red eléctrica generan armónicos entre 8 y 80 kHz. Estos armónicos pueden interferir en la transmisión de la señal PLC y degradar la señal, sobre todo cuando la impedancia de salida del convertidor es más pequeña que la impedancia de la red.

Tal y como se ha comentado en el apartado anterior, hay equipamiento de red, como los inversores o las fuentes de alimentación conmutadas, que introducen perturbaciones en la red eléctrica, no solo a las frecuencias que se utilizan para los sistemas PLC sino también a frecuencias más bajas. Para solucionar este problema, se utilizan filtros para cumplir con la normativa de compatibilidad electromagnética (EMC). Para el caso de los inversores, por ejemplo, se diseñan filtros EMC de alta impedancia en aquellas frecuencias en las que los inversores hayan generado los armónicos.

Sin embargo, estos filtros LCL presentan resonancias serie o paralelo, que hacen que la impedancia vista desde la red que muestran sea muy cambiante en toda la banda de frecuencias. Así, en algunos casos, estos filtros pueden mostrar impedancias muy bajas a las frecuencias de resonancia de los elementos en serie. Esto puede interferir a la comunicación

PLC, debido a los efectos *notching*, ya que la señal PLC cercana a esas frecuencias se vería filtrada [10].

En [9], se presentan medidas de la impedancia que presentan algunos filtros EMC en función de la frecuencia. Algunos de los filtros analizados toman valores de impedancia muy bajos en frecuencias cercanas a las bandas de comunicaciones PLC. Como se ha mencionado con anterioridad, son las impedancias más bajas las que reducen el nivel de la señal PLC recibida. De esta forma, en caso de que estos dispositivos pasivos se encuentren cerca de un SM trabajando a estas frecuencias, podrían degradar las comunicaciones PLC. Por otra parte, es necesario evaluar si los cambios en la función de transferencia del canal de comunicaciones debidos a estas variaciones de impedancia pueden afectar a las comunicaciones PLC.

3. Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es analizar el impacto de los efectos de canal en las comunicaciones PLC PRIME. Para la consecución de este objetivo principal, se definen una serie de objetivos parciales:

- Definir una metodología que permita analizar el impacto de los efectos de canal en las comunicaciones PLC PRIME, considerando los diferentes rangos frecuenciales definidos en las versiones 1.3.6. y 1.4.
- Validar la metodología de trabajo propuesta.
- Analizar la atenuación de la señal PLC PRIME debida a los filtros EMC en las distintas bandas de frecuencia.
- Evaluar la posible degradación de las comunicaciones PLC PRIME debida a los cambios en la función de transferencia del canal de comunicaciones causadas por las variaciones frecuenciales de impedancia.

4. Beneficios

Los beneficios que aporta este proyecto se pueden clasificar en técnicos, económicos y sociales. A continuación, se detalla cada uno de ellos.

4.1. Beneficios técnicos

El beneficio técnico principal de este trabajo es obtener resultados, mediante medidas controladas en laboratorio, sobre el impacto de los efectos de canal en las comunicaciones Narrowband PLC según el estándar PRIME. De esta manera, se puede caracterizar uno de los inconvenientes principales que posee esta tecnología de comunicaciones.

Además, el proyecto se centrará en el rango frecuencial hasta los 500 kHz, es decir, no únicamente hasta los 150 kHz asociados a la versión 1.3.6 de PRIME. Las bandas de frecuencias superiores, especificadas en la versión 1.4, no han sido tan analizadas como las frecuencias bajas, por lo que no se conoce tan a fondo el comportamiento de PLC. Así, se puede realizar una comparativa entre la asignación actualmente vigente en Europa y las bandas superiores, como ya se ha mencionado anteriormente.

Asimismo, se puede obtener información sobre la atenuación introducida por los filtros EMC en la señal PLC para los diferentes canales de PRIME, esto es, para los diferentes rangos frecuenciales.

4.2. Beneficios sociales y económicos

Este proyecto permitiría caracterizar uno de los inconvenientes principales de la tecnología PLC, que podría mejorar los sistemas AMI (Advanced Metering Infrastructure). Los AMI se definen como los sistemas que son capaces de registrar y transmitir remotamente la información asociada al consumo y forma de uso de la energía eléctrica, con el objetivo de analizar y gestionar esta información.

Por lo tanto, mediante el uso de contadores inteligentes, se permitiría a las empresas realizar un seguimiento eficiente de los recursos que ofrece a la población. Asimismo, evitaría el desplazamiento del personal de la empresa al lugar en el que se encuentran los contadores. De esta manera, se reduce el uso del transporte, lo que supone una ventaja medioambiental, además de económica para la empresa.

En lo que se refiere al usuario, por un lado, ofrecería fiabilidad. Así, podría conocer en todo momento el consumo exacto, realizando una lectura real de éste. Por otro lado, la rapidez en caso de avería será mucho mayor, reduciendo los tiempos con la luz cortada, ya que cualquier problema con el suministro se identificaría de forma sencilla.

Por último, es importante mencionar que los SMs evitarían las manipulaciones, debido a que éstos se encuentran monitorizados y controlados remotamente en todo momento.

Derivado de todos los beneficios anteriormente mencionados, existiría también un beneficio económico indirecto, debido a disponer de una red eléctrica más fiable, segura y eficiente.

5. Análisis de alternativas

A continuación, se detallarán las diferentes alternativas existentes para llevar a cabo este proyecto. En primer lugar, se explicarán las correspondientes al software-hardware utilizado y, en segundo lugar, las alternativas para analizar el impacto de los efectos de canal.

5.1. Alternativas al software-hardware utilizado

5.1.1. Simulación de una cadena completa de transmisión-recepción

La simulación de una cadena completa de transmisión-recepción supone no tener en cuenta ciertas pérdidas de implementación, importantes en un despliegue real. Asimismo, podría requerir equipos muy potentes. En todo momento, será necesaria una compatibilidad del software con el sistema operativo, lo que requeriría actualizaciones constantes del mismo. Como última desventaja, es importante mencionar que es necesario invertir bastante tiempo para desarrollar una cadena software completa de transmisión y recepción.

En contraprestación, utilizar únicamente software en el proyecto supone que éste sea más económico, sobre todo si se puede llevar a cabo mediante software libre o software desarrollado ad-hoc para el proyecto. Por último, es importante mencionar que ofrece la posibilidad de modificar cada uno de los módulos de los que está compuesta la cadena de transmisión – recepción, con el objetivo de simular las situaciones que se deseen analizar, proporcionando mayor flexibilidad.

5.1.2. Utilización de dispositivos hardware

La principal desventaja del hardware es que no permite la modificación de los diferentes módulos de los que está compuesta la cadena de transmisión – recepción, lo que supone que sea menos flexible que el software. Además, el precio puede ser bastante elevado, ya que, en ciertos proyectos, el material necesario debe disponer de ciertas características específicas. Los equipos hardware pueden estropearse a causa, principalmente, de la manipulación continua de los mismos.

Sin embargo, los resultados obtenidos se aproximan más a la realidad, ya que se tiene en cuenta las pérdidas de implementación. Como se verá más adelante, es muy importante tener

en cuenta este aspecto en el desarrollo de un proyecto. Además, el tiempo de desarrollo del proyecto hasta la obtención de resultados es mucho menor.

5.2. Alternativas para analizar el impacto de los efectos de canal

El impacto de los efectos de canal en las comunicaciones PLC se puede analizar mediante diferentes alternativas, entre las que se encontrarían:

- Medir los efectos de canal in situ en la red de distribución
- Utilizar filtros EMC en medidas de laboratorio

5.2.1. Medición de los efectos de canal in situ en la red de distribución

A pesar de que esta alternativa es la que más se acerca a una implementación real, la impedancia de la red sufre grandes variaciones con la frecuencia y el tiempo. Debido a que no se conoce el canal y las posibles consecuencias de éste en las comunicaciones, los resultados obtenidos en los diferentes puntos de la red no se obtendrían bajo condiciones controladas y serían difíciles de analizar. Por ello, será más complicado sacar conclusiones comunes a los diferentes casos estudiados. Además, medir en la red de distribución requiere de la colaboración de la compañía eléctrica correspondiente, por lo que la disponibilidad para realizar pruebas es pequeña.

5.2.2. Utilización de filtros EMC en medidas de laboratorio

La utilización de filtros EMC permite caracterizar el impacto de los efectos de canal en un entorno controlado, ya que la respuesta frecuencial de impedancia es conocida. Por ello, se podrían obtener conclusiones de cuál es la influencia de dicho canal y de la degradación que sufre la señal en las comunicaciones PLC.

6. Selección/Descripción de la solución propuesta

La selección de la solución propuesta se ha realizado teniendo en cuenta las diferentes características, ventajas y desventajas, de cada una de las alternativas planteadas con anterioridad. Para ello, se presentan dos tablas, en las que se ponderan los criterios utilizados. La Tabla 2 compara las formas de implementación de la cadena de transmisión – recepción.

Criterios	Simulación completa	Dispositivos hardware
Resultados reales (35 %)	6,00	9,00
Precio (10 %)	9,00	6,00
Tiempo de desarrollo (30 %)	4,00	8,00
Flexibilidad (25 %)	8,00	6,00
Puntuación total (100 %)	6,20	7,65

Tabla 2. Ponderación de los diferentes criterios de selección de las alternativas referidas a la implementación de la cadena de transmisión – recepción

La importancia de las pérdidas de implementación, es decir, tratar de obtener resultados semejantes a los reales, junto al tiempo de desarrollo, supone la necesidad de utilizar dispositivos hardware para el proyecto.

La Tabla 3, por su parte, detalla las opciones referidas al análisis del efecto de canal.

Criterios	Medición de la impedancia de la red	Utilización de filtros EMC
Entorno controlado (35 %)	3,00	9,00
Medidas reales (35 %)	9,00	6,00
Disponibilidad (30 %)	5,00	7,00
Puntuación total (100 %)	5,70	7,35

Tabla 3. Ponderación de los diferentes criterios de selección de las alternativas referidas al análisis del efecto de canal

Una vez analizadas las tablas anteriores, se decide que la mejor opción para llevar a cabo el proyecto es la siguiente: la utilización de filtros EMC para realizar el análisis del efecto de canal mediante dispositivos hardware de comunicaciones PLC. A continuación, se describe, brevemente, la solución propuesta.

En primer lugar, se intentará definir una metodología válida para evaluar la degradación de las comunicaciones debida a los efectos de canal mediante equipos hardware. Esto requerirá de un par de equipos transmisor y receptor de PLC PRIME (ATMEL ATPL230A-EK), filtros EMC para modificar el canal de comunicación, y un generador arbitrario de señal que permita introducir ruido blanco (Agilent 33220A), que se conectarán a través de una regleta no conectada a la red. Por lo tanto, se considera que las medidas son *offline*.

Una vez validada la metodología propuesta, se tratará de analizar el impacto de los efectos de canal en dichas comunicaciones. Para ello, se emplearán cuatro filtros EMC, con diferentes respuestas frecuenciales, con el objetivo de estudiar su influencia en PLC. Las medidas se

realizarán en el canal uno y se repetirán, después, en aquel canal en el que la respuesta del filtro sea más crítica, para lo que se tendrá en cuenta la respuesta frecuencial de impedancia.

La siguiente ilustración muestra un boceto del montaje utilizado para realizar las medidas.

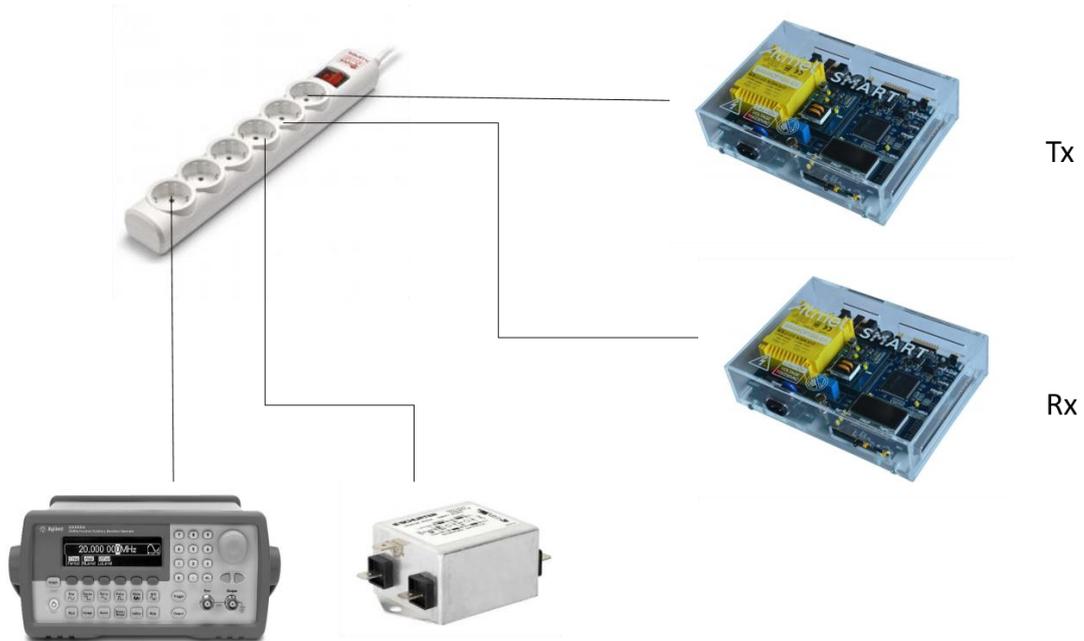


Ilustración 7. Montaje a realizar compuesto por: dispositivos ATMEL ATPL230A-EK, generador de señales y filtro EMC

7. Equipo de trabajo

En este apartado se especifican, en primer lugar, los integrantes del grupo de trabajo y, en segundo lugar, las diferentes fases o paquetes de trabajo en las que se divide el proyecto.

7.1. Equipo de trabajo

Nombre y apellidos	Función
Itziar Angulo Pita	Directora de proyecto
Jon González Ramos	Proyectista principal
Ainhoa García Esquina	Proyectista

Tabla 4. Equipo de trabajo del proyecto

La directora del proyecto tiene como función establecer un plan de trabajo, además de determinar los objetivos a alcanzar y ser la encargada de supervisar el proyecto y corregir la documentación. El proyectista principal, por su parte, llevará adelante lo propuesto por la directora y redactará un documento en el que se resume el trabajo realizado. Algunas de las tareas iniciales de este proyecto se han compartido con otra alumna, dentro de la definición de los Trabajos de Fin de Grado correspondientes a ambos.

7.2. Paquetes de trabajo

P.T.1.	Tareas iniciales. 37 días (15/10/2018 – 21/11/2018)
T.1.1.	<ul style="list-style-type: none"> • Realización de las primeras pruebas. Se realizan las primeras pruebas con los dispositivos a utilizar para conocer su funcionamiento básico. • Recursos humanos: proyectistas. • Recursos técnicos: ordenador, Kit ATMEL ATPL240A-EK, Agilent 33220A. • Duración: 37 días (15/10/2018 – 21/11/2018) • Carga de trabajo: 33 h proyectista principal, 33 h proyectista.
T.1.2.	<ul style="list-style-type: none"> • Realización de pruebas con el Picoscope 5444b. Se realizan pruebas con el Picoscope, con la función de osciloscopio, con el objetivo de conocer su funcionamiento. • Recursos humanos: proyectista. • Recursos técnicos: ordenador, Kit ATMEL ATPL240A-EK, Picoscope 5444b, ATMEL PLC PHY TesterTool v.2.5.2. • Duración: 7 días (23/10/2018 – 30/10/2018) • Carga de trabajo: 7 h proyectista principal.
T.1.3.	<ul style="list-style-type: none"> • Análisis de la influencia de la impedancia de salida del transmisor en las comunicaciones PLC. Se analiza el efecto de los diferentes valores de impedancia de salida del transmisor en el nivel de señal transmitida. • Recursos humanos: proyectista. • Recursos técnicos: ordenador, Kit ATMEL ATPL240A-EK, Picoscope 5444b, ATMEL PLC PHY TesterTool v.2.5.2. • Duración: 9 días (30/10/2018 – 8/11/2018) • Carga de trabajo: 12 h proyectista principal.
H.1.	Finalización de pruebas iniciales con los dispositivos a utilizar a lo largo del proyecto.

Tabla 5. Paquete de trabajo 1: Tareas iniciales

P.T.2.	Definición y validación de la metodología. 67 días (24/11/2018 – 30/01/2019)
T.2.1.	<ul style="list-style-type: none"> • Definición de la metodología. Se define la metodología a utilizar a lo largo del proyecto. • Recursos humanos: directora del proyecto, proyectista. • Recursos técnicos: ordenador, kit ATMEL ATPL240A-EK, Agilent 33220A, ATMEL PLC PHY TesterTool v.2.5.2. • Duración: 8 días (24/11/2018 – 02/12/2019) • Carga de trabajo: 9 h proyectista principal, 5 horas directora del proyecto.
T.2.2.	<ul style="list-style-type: none"> • Realización de las curvas de FER frente a SNR inyectando ruido blanco en el canal 1 de PRIME. Se realizan las curvas de FER frente a SNR en el canal 1 inyectando ruido blanco a las comunicaciones PLC PRIME para validar la metodología propuesta. • Recursos humanos: proyectistas. • Recursos técnicos: ordenador, kit ATMEL ATPL240A-EK, Agilent 33220A, ATMEL PLC PHY TesterTool v.2.5.2. • Duración: 15 días (03/12/2019 – 18/12/2019) • Carga de trabajo: 30 h proyectista principal, 30 h proyectista.
T.2.3.	<ul style="list-style-type: none"> • Comparación de las curvas obtenidas con las curvas teóricas. Se comparan las curvas obtenidas con las curvas teóricas publicadas en [11]. • Recursos humanos: proyectista, directora del proyecto. • Recursos técnicos: ordenador. • Duración: 1 día (18/12/2019) • Carga de trabajo: 5 h proyectista principal, 3 h directora del proyecto.
T.2.4.	<ul style="list-style-type: none"> • Realización de las curvas de FER frente a SNR inyectando ruido blanco en los canales superiores de PRIME. Se realiza el mismo procedimiento que en el canal 1 y se obtienen las curvas de FER frente a SNR en el canal 3. • Recursos humanos: proyectistas. • Recursos técnicos: ordenador, kit ATMEL ATPL240A-EK, Agilent 33220A, ATMEL PLC PHY TesterTool v.2.5.2. • Duración: 43 días (20/12/2019 – 30/01/2019) • Carga de trabajo: 30 h proyectista principal, 30 h proyectista.
T.2.5.	<ul style="list-style-type: none"> • Comparación de los resultados obtenidos en los canales superiores con los del canal 1 y las curvas teóricas. Se realiza una comparativa entre las gráficas de FER frente a SNR obtenidas en los diferentes canales con las curvas teóricas de [11]. • Recursos humanos: proyectista, directora del proyecto. • Recursos técnicos: ordenador. • Duración: 1 día (30/01/2019) • Carga de trabajo: 5 h proyectista principal, 3 h directora del proyecto.
H.2.	Finalización de las curvas de FER frente a SNR inyectando ruido blanco.

Tabla 6. Paquete de trabajo 2: Definición y validación de la metodología

P.T.3.	Análisis del impacto del efecto de canal en las curvas FER frente a SNR. 145 días (05/02/2019 – 01/07/2019)
T.3.1.	<ul style="list-style-type: none"> • Lectura de bibliografía. Análisis del estado del arte sobre la influencia del canal y de la impedancia en las comunicaciones PLC PRIME. • Recursos utilizados: proyectista principal. • Recursos técnicos: ordenador. • Duración: 13 días (05/02/2019 –18/02/2019) • Carga de trabajo: 6 h proyectista principal.
T.3.2.	<ul style="list-style-type: none"> • Realización de las curvas de FER frente a SNR inyectando ruido blanco utilizando los filtros EMC en el canal 1 de PRIME. Se realizan las curvas de FER frente a SNR en el canal 1 inyectando ruido blanco utilizando los cuatro filtros EMC. • Recursos humanos: proyectista principal. • Recursos técnicos: ordenador, kit ATMEL ATPL240A-EK, Agilent 33220A, filtros EMC, ATMEL PLC PHY TesterTool v.2.5.2. • Duración: 64 días (18/02/2019 – 24/04/2019) • Carga de trabajo: 35 h proyectista principal.
T.3.3.	<ul style="list-style-type: none"> • Análisis de los resultados obtenidos utilizando los filtros EMC. Se comparan las curvas obtenidas con los cuatro filtros EMC con las curvas de ruido blanco. • Recursos humanos: proyectista principal, directora del proyecto. • Recursos técnicos: ordenador. • Duración: 1 día (24/04/2019) • Carga de trabajo: 8 h proyectista principal, 6 h directora del proyecto.
T.3.4.	<ul style="list-style-type: none"> • Realización de las curvas de FER frente a SNR inyectando ruido blanco utilizando los filtros EMC en los canales superiores de PRIME. Se realizan las curvas de FER frente a SNR en uno de los canales superiores para dos de los filtros. A continuación, se obtienen estas curvas para los cuatro filtros para la modulación DBPSK_C en todos los canales de PRIME. • Recursos humanos: proyectista principal. • Recursos técnicos: ordenador, kit ATMEL ATPL240A-EK, Agilent 33220A, filtros EMC, ATMEL PLC PHY TesterTool v.2.5.2. • Duración: 68 días (24/04/2019 - 01/07/2019) • Carga de trabajo: 45 h proyectista principal.
T.3.5.	<ul style="list-style-type: none"> • Análisis de los resultados obtenidos entre los diferentes canales. Se realiza una comparativa entre las gráficas de FER frente a SNR obtenidas para la modulación DBPSK_C en los diferentes canales de PRIME. • Recursos humanos: proyectista principal, directora del proyecto. • Recursos técnicos: ordenador, kit ATMEL ATPL240A-EK, Agilent 33220A, filtros EMC, ATMEL PLC PHY TesterTool v.2.5.2. • Duración: 1 día (01/07/2019) • Carga de trabajo: 8 h proyectista principal, 6 h directora del proyecto.

H.3.	Finalización del análisis del impacto de los efectos de canal en las curvas FER frente a SNR en las comunicaciones PLC PRIME.
-------------	--

Tabla 7. Paquete de trabajo 3: Análisis del impacto del efecto de canal en las comunicaciones PLC PRIME

P.T.4.	Análisis de la atenuación introducida por los filtros EMC. 12 días (01/07/2019 – 12/07/2019)
T.4.1.	<ul style="list-style-type: none"> • Cálculo de la atenuación introducida por los filtros EMC en las comunicaciones PLC PRIME. Se realiza una comparativa entre el valor RSSI medido sin filtro y con la utilización del mismo en los diferentes canales, con el objetivo de calcular la atenuación introducida por los filtros EMC en los diferentes canales. • Recursos humanos: proyectista principal. • Recursos técnicos: ordenador, kit ATMEL ATPL240A-EK, filtros EMC, ATMEL PLC PHY TesterTool v.2.5.2. • Duración: 12 días (01/07/2019 – 12/07/2019) • Carga de trabajo: 30 h proyectista principal.
T.4.2.	<ul style="list-style-type: none"> • Análisis de los resultados obtenidos en los diferentes canales. Se realiza una comparación de los valores RSSI medidos y se grafican junto con las respuestas frecuenciales de impedancia de cada filtro. • Recursos humanos: proyectista principal, directora del proyecto. • Recursos técnicos: ordenador. • Duración: 1 día (12/07/2019) • Carga de trabajo: 8 h proyectista principal, 6 h directora del proyecto.
H.4.	Finalización del análisis de la atenuación introducida por los diferentes filtros EMC utilizados.

Tabla 8. Paquete de trabajo 4: Análisis de la atenuación introducida por los filtros EMC

P.T.5.	Gestión y documentación del proyecto. 312 días (10/09/2018 – 19/07/2019)
T.5.1.	<ul style="list-style-type: none"> • Reuniones con la directora del proyecto. Se realizan reuniones cada cierto tiempo en las que se comentan los avances y analizan los resultados obtenidos. • Recursos humanos: proyectistas, directora del proyecto. • Recursos técnicos: ordenador. • Duración: 312 días (10/09/2018 – 19/07/2019) • Carga de trabajo: 13 h proyectista principal, 7 h proyectista, 13 h directora del proyecto.

T.5.2.	<ul style="list-style-type: none">• Redacción y supervisión de la documentación. Documentación de los resultados parciales del proyecto y redacción final del TFG.• Recursos humanos: proyectista principal, directora del proyecto.• Recursos técnicos: ordenador.• Duración: 312 días (10/09/2018 – 19/07/2019)• Carga de trabajo: 35 h proyectista principal, 30 h directora del proyecto.
---------------	--

Tabla 9. Paquete de trabajo 5: Gestión y documentación del proyecto

7.3. Diagrama de Gantt

En la Ilustración 8 se puede observar el diagrama de Gantt del proyecto.

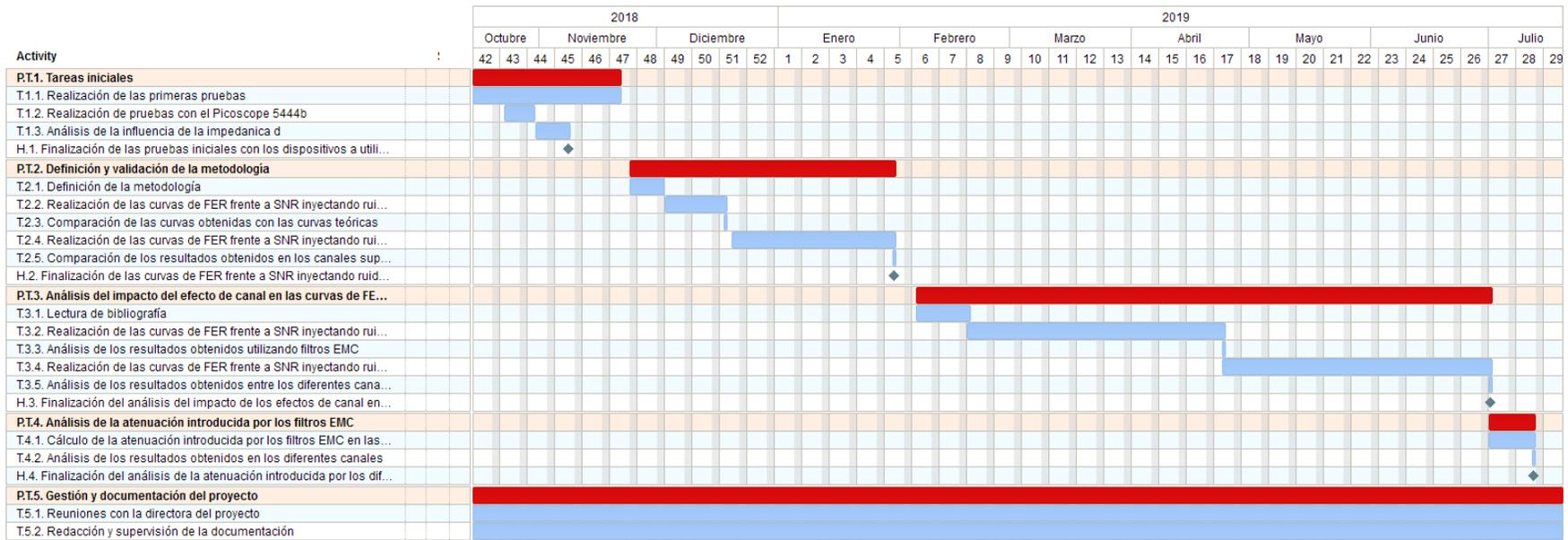


Ilustración 8. Diagrama de Gantt del proyecto

8. Medios y técnicas básicas

8.1. Dispositivos hardware

Los distintos dispositivos hardware utilizados en este proyecto se listan a continuación:

- Kit ATMEL ATPL240A-EK
- Picoscope5444b
- Generador de señales. Agilent 33220A
- Filtros EMC
 - 5500.2044
 - 5500.2052
 - 5500.2055
 - 5500.2060

8.2. Software

En el desarrollo de este proyecto, se ha empleado el software ATMEL PLC PHY TesterTool v.2.5.2 para establecer la configuración de nuestra comunicación en cada momento. La versión 2014b de Matlab ha permitido el procesado de las diferentes señales con las que se ha trabajado.

Además de esto, las gráficas de FER frente a SNR se han representado mediante Microsoft Excel y la redacción del documento se ha llevado a cabo utilizando Microsoft Word.

9. Presupuesto

Los costes directos del proyecto se dividen en diferentes partidas: horas internas, amortizaciones y gastos.

- Horas internas: se definen como las horas de los miembros del equipo de trabajo para la realización del proyecto.
- Amortizaciones: son los activos fijos que se utilizan para el proyecto.
- Gastos: costes asociados a lo utilizado en el proyecto y que no puede ser utilizado posteriormente.

9.1. Horas internas

Horas internas			
Concepto	Número de horas (h)	Coste horario (€/h)	Coste total (€)
Directora del proyecto	72	60	4.320,00 €
Proyectista	300	30	9.000,00 €
Proyectista 2	100	30	3.000,00 €
Subtotal (€)			16.320,00 €

Tabla 10. Presupuesto correspondiendo a la partida de horas internas

9.2. Amortizaciones

Amortizaciones				
Concepto	Coste (€)	Vida útil (meses)	Uso (meses)	Coste total (€)
Kit ATMEL ATPL240A-EK	500,00 €	48	6	62,50 €
Picoscope 5444b	900,00 €	36	1	25,00 €
Ordenador	1.200,00 €	60	6	120,00 €
Licencia Matlab	15.000,00 €	12	3	3.750,00 €
Pen drive	14,99 €	36	6	2,50 €
Agilent 33220A	2.700,00 €	96	6	168,75 €
Filtros EMC	100,00 €	96	4	4,17 €
Subtotal (€)				4.132,92 €

Tabla 11. Presupuesto correspondiente a la partida de amortizaciones

9.3. Gastos

Gastos			
Concepto	Coste unitario (€)	Número de unidades	Coste total (€)
Bolígrafos	0,40 €	3	1,20 €
Folios	12,50 €	1	12,50 €
Luz	-	-	40,00 €
Subtotal (€)			53,70 €

Tabla 12. Presupuesto correspondiente a la partida de gastos

9.4. Resumen del presupuesto

Resumen	
Concepto	Coste total (€)
Subtotal horas internas	16.320,00 €
Subtotal amortizaciones	4.132,92 €
Subtotal gastos	53,70 €
Total	20.506,62 €

Tabla 13. Resumen del presupuesto por partidas

10. Análisis de riesgos

Los riesgos se definen como aquellos eventos que pueden tener un efecto sobre el proyecto, ya dependan directamente de los miembros del equipo de trabajo (internos) o tengan su origen fuera del equipo (externos). El objetivo del análisis de riesgos es aumentar la probabilidad y el impacto de los eventos positivos y disminuirlos en el caso de los negativos, de tal forma que el proyecto salga adelante en los plazos marcados [11]. En este proyecto los posibles riesgos analizados son los siguientes.

10.1. Demoras (A)

En todos los proyectos, pueden darse retrasos, que impidan la correcta finalización del mismo en los plazos fijados previamente. Por lo tanto, es necesario establecer una planificación en la que se identifiquen, de manera clara, las tareas a realizar y las fechas de finalización de las mismas. A pesar de que el impacto en el proyecto es medio, la probabilidad de aparición es baja, ya que el trabajo es guiado por la directora del proyecto, que determina, en todo momento, las diferentes tareas a seguir, realizando un seguimiento de las mismas.

10.2. Malfuncionamiento de los dispositivos ATMEL ATPL240A-EK (B)

En ocasiones, los dispositivos ATMEL pueden no funcionar de manera correcta, por lo que los resultados obtenidos podrían no coincidir con los esperados. La probabilidad de aparición de este evento es media, a pesar de que los dispositivos hardware superen ciertos controles de calidad y estándares. Además, su impacto es muy alto, debido a que sería imposible alcanzar

los objetivos fijados a priori, impidiendo, de manera considerable, conseguir conclusiones sobre el tema a analizar. Esta es una de las razones por las que es vital elegir un equipamiento específico y que proporcione lo que se busca.

10.3. Dispositivos de comunicaciones estropeados (C)

El uso habitual de los dispositivos de comunicaciones puede estropearlos y, de esta manera, podrían dejar de funcionar total o parcialmente. A pesar de tener una probabilidad de aparición baja, el impacto que podría tener en el proyecto es alto, ya que significaría un parón obligatorio en la realización de las medidas. En consecuencia, sería importante disponer de más de un kit de dispositivos para poder rotarlos o cambiarlos en caso de que fuera necesario.

10.4. Limitaciones hardware y software (D)

Los dispositivos hardware y el software utilizados tienen ciertas limitaciones, que no permiten que, en ciertas ocasiones, se puedan alcanzar los objetivos fijados. La probabilidad de aparición de este riesgo es bastante alta, de la misma forma que ocurre con el impacto del mismo. Además, desgraciadamente, es muy complicado tomar medidas para hacer frente a este problema. Por ello, es importante analizar los distintos equipos, con las características que se buscan, disponibles en el mercado, con la finalidad de seleccionar aquel con las mejores prestaciones.

10.5. Matriz probabilidad – impacto

La gestión de riesgo se realiza mediante la matriz probabilidad – impacto que se explicará a continuación, en la que se resumen todos los riesgos mencionados hasta ahora.

		IMPACTO		
		BAJO 0,2	MEDIO 0,5	ALTO 0,8
PROBABILIDAD	BAJO 0,2	Bajo 0,04	Bajo 0,1 (A)	Moderado 0,16 (C)
	MEDIO 0,5	Bajo 0,1	Moderado 0,25	Alto 0,4 (B)
	ALTO 0,8	Moderado 0,16	Alto 0,4	Alto 0,64 (D)

Tabla 14. Matriz probabilidad - impacto del proyecto

11. Metodología

11.1. Metodología propuesta

11.1.1. Descripción general

La metodología está basada en equipamiento hardware, siendo medidas controladas en un entorno de laboratorio.

El objetivo principal de esta metodología es representar curvas de FER (Frame Error Rate) frente a SNR (Signal to Noise Ratio) para las diferentes configuraciones. La SNR, medida en dB, representa cuántos dB es superior la señal a la potencia del ruido. El FER, por su parte, se calcula como el número de tramas erróneas entre el número de tramas totales. Estas gráficas se obtienen variando el valor de la SNR. Para ello, existen dos opciones: por una parte, modificar la potencia de la señal, atenuándola, o por otra, modificar la potencia del ruido, aumentándola. En este trabajo se combinarán ambas alternativas.

Por otra parte, también es necesario analizar la atenuación introducida por los filtros EMC en la señal transmitida.

11.1.2. Equipamiento

Las curvas de FER frente a SNR se obtendrán utilizando ciertos equipos hardware. Por un lado, se dispone de dos dispositivos de comunicaciones ATMEL ATPL240A-EK, que permitirán establecer la comunicación PLC PRIME. Por otro lado, se utilizará un generador de señales Agilent 33220A para inyectar ruido blanco y degradar las comunicaciones y el Picoscope 5444b como osciloscopio.

Como se ha indicado en la sección anterior, para analizar el impacto de los efectos de canal en las comunicaciones PLC PRIME, se dispondrá de cuatro filtros EMC.

11.1.2.1. Picoscope 5444b

El Picoscope 5444b se utilizará en su función de osciloscopio en el dominio del tiempo, para visualizar las tramas PLC transmitidas, así como para medir los niveles de señal mediante la opción *Mediciones*. Más adelante se detallará el procedimiento seguido para conseguir los niveles de tensión. En el dominio de la frecuencia, se visualizarán los espectros de las señales transmitidas. Este dispositivo se controla mediante el software Picoscope 6.

Este dispositivo cuenta con salida USB, que habrá que conectar al ordenador, además de un cable extra de alimentación, que será necesario, sobre todo, si se utiliza la función de generación de señal. A parte de esto, cuenta con 4 canales, que pueden ser utilizados al mismo tiempo. De esta forma, se podrá visualizar, en uno de ellos, la transmisión de tramas PLC y, en el otro, el ruido inyectado.



Ilustración 9. Picoscope 5444b

11.1.2.2. ATMEL ATPL240A-EK

En este proyecto, se trabajará con dos dispositivos ATMEL ATPL240-EK para establecer las comunicaciones PLC. Uno de ellos actuará como transmisor y el otro lo hará como receptor, estando los dos preparados para llevar a cabo ambas funciones. Los equipos se comunicarán mediante una regleta no conectada a la red, por lo que todas las medidas se realizarán de manera *offline*. Utilizan dos cables diferentes: por un lado, el cable de alimentación y, por otro lado, un B micro a puerto USB, que permitirá conectar el ATMEL a un ordenador, de tal manera que se pueda determinar la configuración de la comunicación.



Ilustración 10. Dispositivo de comunicaciones PLC ATMEL ATPL230A-EK

Los parámetros de nuestra comunicación serán configurables mediante software, para lo que se utilizará el programa ATMEL PLC PHY TesterTool v.2.5.2. En primer lugar, se detallarán aquellos a configurar únicamente en nuestro transmisor (ver Ilustración 11): *Frame Type* (tipo de trama a transmitir), *Modulation Scheme* (esquema de modulación), *Attenuation Level* (atenuación introducida en dB) y *Branch Configuration* (impedancia de salida de nuestro transmisor). En segundo lugar, se indicarán los parámetros que deben compartir ambos dispositivos (ver Ilustración 12): versión PRIME y canal utilizados, *Time Interval* (tiempo entre tramas medido en milisegundos), *Number of Frames* (número de tramas a transmitir) y *Message* (mensaje a enviar).

Existen tres tipos de trama: *Type A/PRIME v1.3.6*, *Type B* y *TypeBC*. En todas las medidas se seleccionará la trama tipo A, tanto para la versión 1.3.6 de PRIME, como para la 1.4. De esta

forma, se podrá realizar una correcta comparativa entre los valores obtenidos para los diferentes canales de ambas versiones, sin evaluar las mejoras de capa física introducidas en la versión 1.4 de PRIME.

Si se trabaja con PRIME v1.3.6, el software permite utilizar seis modulaciones DPSK diferentes: DBPSK, DQPSK, D8PSK y las correspondientes con corrección de errores. Sin embargo, si se selecciona la versión 1.4 de PRIME, se añaden las opciones DBPSK robusta y DQPSK robusta. En este trabajo, no se utilizarán estas dos últimas opciones. El número de tramas recibidas de forma correcta será más alto cuando se utilicen modulaciones más robustas, es decir, aquellas con menor número de símbolos en su constelación IQ y que utilicen códigos de corrección de errores.

La atenuación, indicada en dB, se podrá variar entre 0 y 21 dB. Aumentando este valor se podrá reducir la relación señal a ruido, con el objetivo de empeorar nuestra comunicación y obtener un número más elevado de tramas incorrectas.

Como último parámetro necesario a definir en el transmisor está la impedancia de salida, siendo muy importante a la hora de degradar las comunicaciones. El campo puede tomar cuatro valores diferentes: Auto, High Impedance, Low Impedance y Very Low Impedance. En función de la impedancia de salida seleccionada, la señal transmitida se ve atenuada en mayor o menor medida. La impedancia Auto tiene un valor muy similar a Low y Very Low Impedance, por lo que los resultados obtenidos en recepción no variarán de forma considerable para estas configuraciones. Es importante mencionar que el receptor no adapta su impedancia a la impedancia de salida seleccionada en el transmisor. Esto se puede apreciar si se conecta directamente el transmisor ATMEL a un osciloscopio (en nuestro caso el Picoscope5444b) en el que se medirá el valor RMS (Root Mean Square) de nuestra señal recibida, sin introducir atenuación de forma manual. Más adelante se detallará el procedimiento seguido para alcanzar esta conclusión.

Description

This tab allow to configure all necessary parameters in order to make a transmission

Coupling Selection

Select Coupling: ATPLCOUP001_v1

Transmission Parameters

Channel:	Ch. 1
Frame Type:	Type A / PRIME v1.3.6
Modulation Scheme:	D8PSK
Attenuation Level:	21 dB
Branch Configuration:	High Impedance
Perform EVM Test:	<input checked="" type="checkbox"/>

Ilustración 11. Parámetros de transmisión a configurar

Como ya se ha mencionado anteriormente, existen ciertos parámetros que es necesario configurar de la misma forma tanto en transmisor como receptor, para poder comunicar de forma correcta ambos dispositivos. En nuestro caso, el intervalo entre tramas será siempre de 100 ms, de tal forma que el receptor sea capaz de recibir las tramas recibidas sin que se dé el TIMEOUT, es decir, para que sea capaz de leer la cabecera. Tomando como ejemplo la longitud de trama seleccionada en el artículo *Analysis of the Channel Influence to Power Line Communications Based on ITU-T G.9904 (PRIME)* [11], transmitiremos siempre un mensaje de 256 bytes. El valor de FER será más cercano al real cuantas más tramas se transmitan. Por ello, es importante que este parámetro tome un valor elevado. En nuestro caso, se enviarán 10000 tramas en cualquiera de las configuraciones a analizar. Las gráficas obtenidas en este proyecto mostrarán el valor mínimo que debe tomar para obtener un valor de FER concreto. Un FER de 10^{-3} se considera de excepcional calidad, por lo que el valor umbral de referencia se fija en un FER de 10^{-2} .

En primer lugar, se realizará el análisis para la versión 1.3.6 de PRIME, por lo que no será necesario modificar los campos versión PRIME y canal mencionados con anterioridad. Sin embargo, a la hora de caracterizar las diferentes emisiones para la versión 1.4 de PRIME es importante seleccionar la versión ATPLCOUP0006_v1, además de elegir el canal. El software sólo permite seleccionar entre los canales 3 y 8, ya que el canal 2 no está preparado para la transmisión. Además, es necesario modificar el módulo hardware en la placa ATMEL y el jumper J16.

Test Parameters

Time Interval (ms): 100
Number of Frames: 10000
Message: IDERFULaaaaa TECHN

Ilustración 12. Parámetros a configurar en transmisor y receptor

Para que la comunicación se dé de manera completa y no se pierda información, es necesario que el receptor esté preparado para recibir tramas antes de que el transmisor las envíe.

Una vez finalizada la comunicación se deben interpretar los resultados proporcionados por el receptor. Para ello, se deben tener en cuenta los siguientes parámetros que proporciona el software: RSSI, SNR, EVM, mensaje recibido y Payload integrity. El RSSI (Received Signal Strength Indicator), medido en $\text{dB}\mu\text{V}$, indica el valor de la tensión de señal en el receptor. Su valor depende de la potencia transmitida, de la atenuación introducida y de la adaptación de impedancias. Este parámetro no coincide exactamente con el nivel de señal recibido por el receptor, ya que éste amplifica la señal mediante el Control Automático de Ganancia (AGC). La SNR medida en dB representa el valor de la relación señal a ruido (Signal to Noise Ratio) en el receptor, es decir, cuántos dB es superior la señal a la potencia del ruido. Se define como el valor inverso de la EVM, que se definirá a continuación, más 3 dB. El EVM (Error Vector Magnitude) se calcula tal y como está definido en las especificaciones PRIME. Es otra forma de caracterizar la SNR, que nos indica cómo de lejos se encuentran, en la constelación, los puntos transmitidos de los puntos ideales. Los valores de EVM de la cabecera serán superiores, ya que estos datos se encuentran más protegidos. En el campo mensaje recibido se puede leer qué mensaje recibe el receptor para cada una de las tramas. Por último, se encuentra *Payload Integrity*, que indicará si la trama enviada ha sido recibida o no de forma correcta (Ok, No ok). La Ilustración 13 muestra un ejemplo de los resultados proporcionados por la herramienta.

Frame #	Frame Type	Mod. Scheme	RSI (dBuV)	SNR (dB)	EVM (db)	EVM (Header)	EVM (Payload)	EVM (Header Acum)	EVM (Payload Acum)	
3120	TYPE A	DQPSK	102	13.50	-10.50	38.6953	49.4297	8.7300	9.9835	PRIME IS A WONDERFUL TECHNOLOGY PRIME IS A WONDERFUL
3121	TYPE A	DQPSK	102	14.00	-11.00	42.0547	48.7422	8.6164	10.3677	PRIME IS A WONDERFUL TECHNOLOGY PRIME IS A WONDERFUL
3122	TYPE A	DQPSK	102	14.00	-11.00	28.4688	48.8828	8.1213	11.0572	PRIME IS A WONDERFUL TECHNOLOGY PRIME IS A WONDERFUL
3123	TYPE A	DQPSK	102	14.50	-11.50	27.0781	49.4844	8.1848	10.1776	PRIME IS A WONDERFUL TECHNOLOGY PRIME IS A WONDERFUL
3124	TYPE A	DQPSK	102	14.50	-11.50	32.3438	48.7969	7.6086	9.3657	PRIME IS A WONDERFUL TECHNOLOGY PRIME IS A WONDERFUL
3125	TYPE A	DQPSK	102	14.00	-11.00	51.9062	46.4062	8.1733	9.3973	PRIME IS A WONDERFUL TECHNOLOGY PRIME IS A WONDERFUL
3126	TYPE A	DQPSK	102	13.75	-10.75	46.5234	48.6406	9.5377	10.1835	PRIME IS A WONDERFUL TECHNOLOGY PRIME IS A WONDERFUL
3127	TYPE A	DQPSK	102	13.50	-10.50	35.3438	49.3125	7.8417	10.0899	PRIME IS A WONDERFUL TECHNOLOGY PRIME IS A WONDERFUL
3128	TYPE A	DQPSK	102	13.75	-10.75	35.8281	48.7891	9.1192	10.0521	PRIME IS A WONDERFUL TECHNOLOGY PRIME IS A WONDERFUL
3129	TYPE A	DQPSK	102	13.75	-10.75	38.5391	43.2500	8.5950	10.0509	PRIME IS A WONDERFUL TECHNOLOGY PRIME IS A WONDERFUL
3130	TYPE A	DQPSK	102	14.50	-11.50	43.2500	46.8672	8.4739	9.9686	PRIME IS A WONDERFUL TECHNOLOGY PRIME IS A WONDERFUL
3131	TYPE A	DQPSK	102	13.50	-10.50	33.5469	46.8672	7.9300	10.1934	PRIME IS A WONDERFUL TECHNOLOGY PRIME IS A WONDERFUL
3132	TYPE A	DQPSK	102	13.75	-10.75	32.6094	44.3594	8.8699	11.1019	PRIME IS A WONDERFUL TECHNOLOGY PRIME IS A WONDERFUL
3133	TYPE A	DQPSK	102	14.00	-11.00	35.8594	48.7969	9.3215	9.8824	PRIME IS A WONDERFUL TECHNOLOGY PRIME IS A WONDERFUL
3134	TYPE A	DQPSK	102	13.50	-10.50	35.8828	45.7969	8.0698	11.3226	PRIME IS A WONDERFUL TECHNOLOGY PRIME IS A WONDERFUL
3135	TYPE A	DQPSK	102	13.75	-10.75	36.8047	49.4297	9.2135	10.7045	PRIME IS A WONDERFUL TECHNOLOGY PRIME IS A WONDERFUL
3136	TYPE A	DQPSK	102	13.50	-10.50	24.5469	43.5000	7.4805	9.8051	PRIME IS A WONDERFUL TECHNOLOGY PRIME IS A WONDERFUL
3137	TYPE A	DQPSK	102	14.75	-11.75	42.5391	49.2344	8.4225	11.3950	PRIME IS A WONDERFUL TECHNOLOGY PRIME IS A WONDERFUL
3138	TYPE A	DQPSK	102	13.75	-10.75	33.2656	48.1797	7.5020	11.3752	PRIME IS A WONDERFUL TECHNOLOGY PRIME IS A WONDERFUL
3139	TYPE A	DQPSK	102	14.00	-11.00	39.1953	40.5312	8.5212	9.9027	PRIME IS A WONDERFUL TECHNOLOGY PRIME IS A WONDERFUL
3140	TYPE A	DQPSK	102	14.00	-11.00	32.2734	48.7109	10.1042	10.5826	PRIME IS A WONDERFUL TECHNOLOGY PRIME IS A WONDERFUL
3141	TYPE A	DQPSK	102	14.00	-11.00	38.5391	47.4141	8.4893	10.2784	PRIME IS A WONDERFUL TECHNOLOGY PRIME IS A WONDERFUL
3142	TYPE A	DQPSK	102	13.50	-10.50	35.7656	48.2891	7.8998	11.3485	PRIME IS A WONDERFUL TECHNOLOGY PRIME IS A WONDERFUL
3143	TYPE A	DQPSK	102	13.75	-10.75	37.9375	45.9141	7.4205	9.8785	PRIME IS A WONDERFUL TECHNOLOGY PRIME IS A WONDERFUL

Ilustración 13. Resultados de la recepción de tramas

A continuación, se explicará cuál es la influencia de la impedancia de salida indicada como parámetro en el transmisor en estas comunicaciones. La atenuación máxima que permite configurar el software del dispositivo, junto con la máxima potencia de ruido del generador de señales, no es suficiente para degradar las comunicaciones con las modulaciones más robustas. Por ello, es necesario modificar la impedancia para alcanzar valores de FER cercanos a la unidad. Una vez analizados los niveles de señal transmitidos por el equipo en cada uno de los canales, se puede concluir que éste varía en función del rango de frecuencias. El procedimiento a seguir para realizar estas medidas es el siguiente. En primer lugar, se conectará uno de los dos dispositivos Atmel como transmisor de tramas PLC a la regleta, a la que se conectará también el Picoscope, utilizándolo como osciloscopio. La alta impedancia del osciloscopio, 1 MΩ en paralelo con 13 pF, se puede tomar como un circuito abierto, por lo que, al no circular corriente, el valor medido equivaldrá a la del propio generador del transmisor Atmel (V en la siguiente figura).

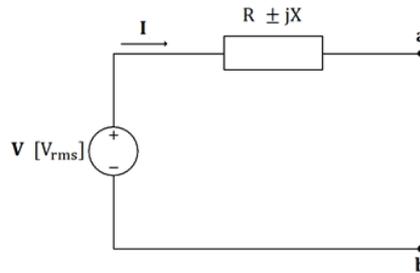


Ilustración 14. Circuito equivalente del transmisor PRIME

A continuación, una vez comenzada la transmisión, se pulsará el botón STOP en el osciloscopio, de tal manera que en la pantalla se muestre únicamente una trama PLC. Posteriormente, se seleccionará la opción *Mediciones* en la parte posterior derecha de la pantalla, en la que se indicará que se quiere obtener la tensión RMS entre reglas. Estas reglas se colocarán en el inicio y final de la trama, ya que así obtendremos únicamente la tensión RMS de la trama a analizar. El valor mostrado se corresponderá con la tensión V que se quería conocer.

La Ilustración 15 muestra una trama PLC PRIME en la que se puede medir el nivel de señal.

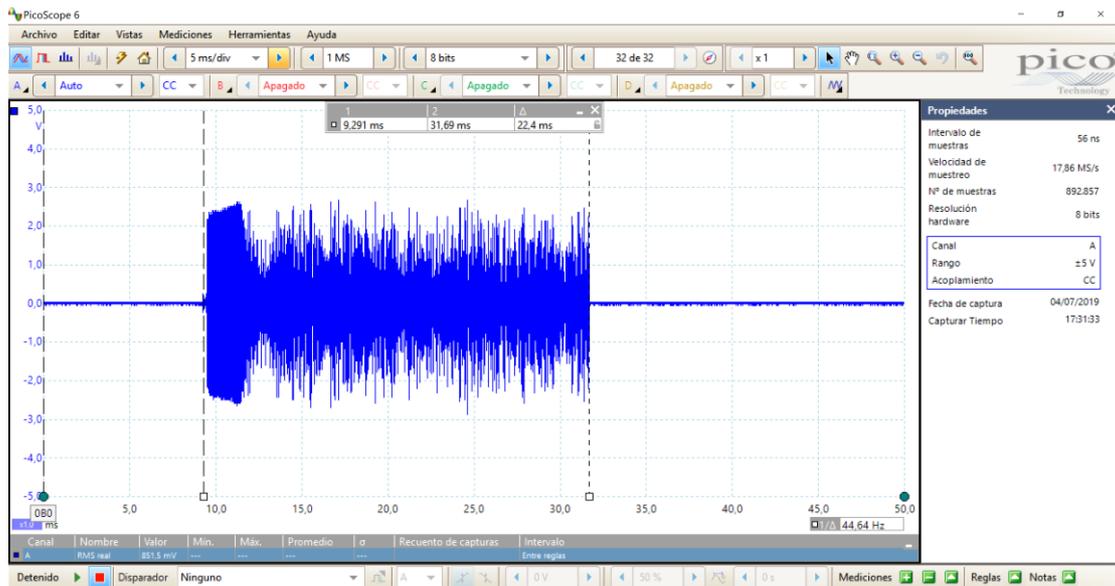


Ilustración 15. Trama PLC PRIME en el Picoscope 5444b en la que se mide el nivel de señal

Para una modulación DBPSK, sin atenuación y sin inyectar ruido blanco, los resultados obtenidos son los que se muestran en la siguiente tabla.

	Auto	Very Low	Low	High
Canal 1	849,0 mV	848,9 mV	850,2 mV	356,4 mV
Canal 3	860,1 mV	855,5 mV	897,7 mV	185,1 mV
Canal 4	649,1 mV	649,7 mV	650,4 mV	161,1 mV
Canal 5	592,4 mV	595,8 mV	592,0 mV	165,4 mV
Canal 6	607,1 mV	607,9 mV	605,6 mV	169,7 mV
Canal 7	665,4 mV	663,6 mV	663,5 mV	141,1 mV
Canal 8	779,5 mV	779,0 mV	780,3 mV	100,1 mV

Tabla 15. Valores RMS medidos en el transmisor

Atendiendo a las tensiones RMS de la tabla, se puede concluir que la potencia transmitida varía con la frecuencia, es decir, con el canal seleccionado. Además, la influencia de la impedancia High sobre la comunicación es mucho mayor en los canales superiores, es decir, los asociados a la versión 1.4 de PRIME, ya que se transmite un nivel de señal mucho menor. Esto ocurre, principalmente, en el canal ocho donde el nivel de señal inyectado se reduce, aproximadamente, a una octava parte respecto al de cualquiera de las impedancias restantes a seleccionar.

Por ello, el receptor es capaz de detectar, en el canal uno, en todo momento, ya sea de forma correcta o incorrecta, la existencia de las tramas, indicando los valores RSSI y SNR asociados a cada una de ellas. En los canales superiores, por el contrario, si se selecciona una impedancia alta y se inyectan 10 Vpp de ruido con una atenuación máxima de 21 dB, el receptor se quedará esperando tramas hasta que salte el TIMEOUT. En estos casos no se podrán obtener nuevos puntos en la gráfica de SNR frente a FER.

11.1.2.3. Agilent 33220A

El generador de señal Agilent 33220A, que se puede ver en la siguiente imagen, se utilizará para inyectar ruido blanco en las comunicaciones PLC. Se conectará a la regleta mediante un cable BNC a dos bananas. Es importante mencionar que permite variar la amplitud del ruido desde 10 mVpp hasta 10 Vpp, permitiendo así obtener diferentes valores de SNR en las comunicaciones.



Ilustración 16. Agilent 33220A

11.1.2.4. Filtros EMC

A continuación, se muestran los esquemáticos y las respuestas frecuenciales de las impedancias de los cuatro filtros empleados. Estas medidas se realizaron con un medidor de precisión Keysight E4990A Impedance Analyzer.

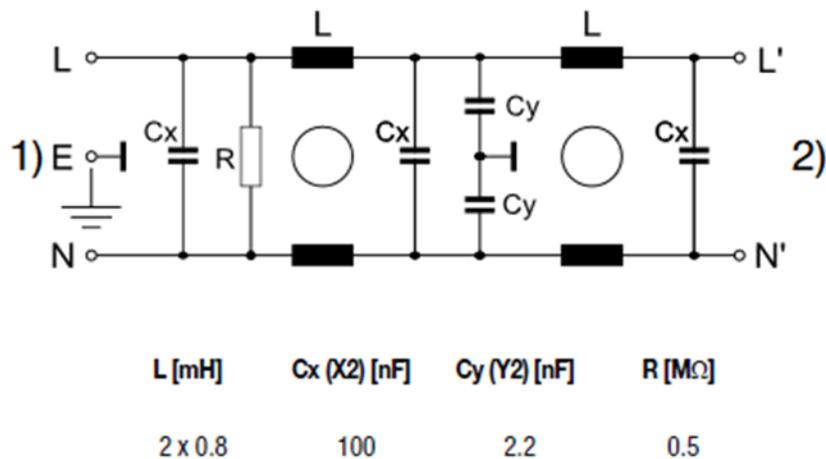


Ilustración 17. Esquemático del filtro EMC 5500.2044

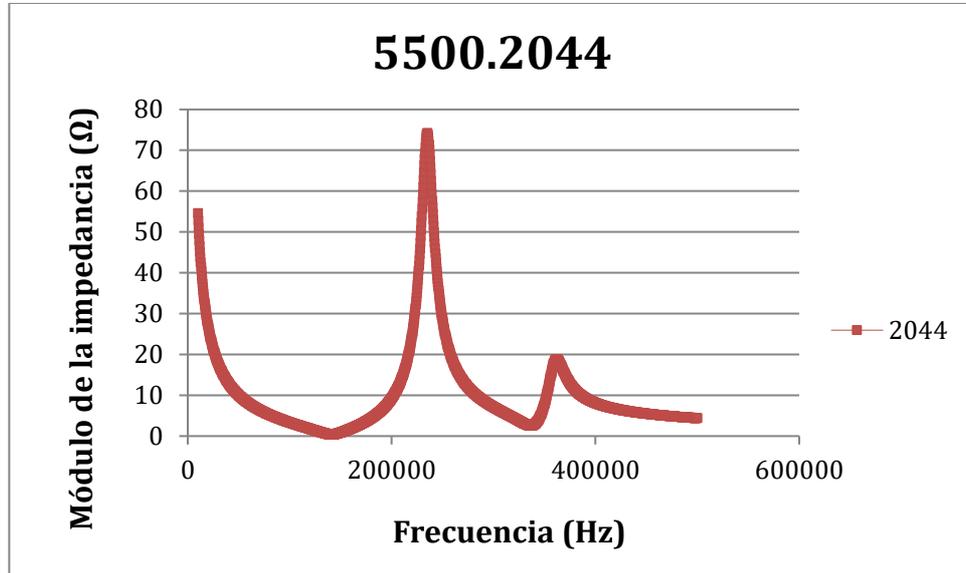


Ilustración 18. Módulo de la respuesta frecuencial de la impedancia del filtro EMC 5500.2044

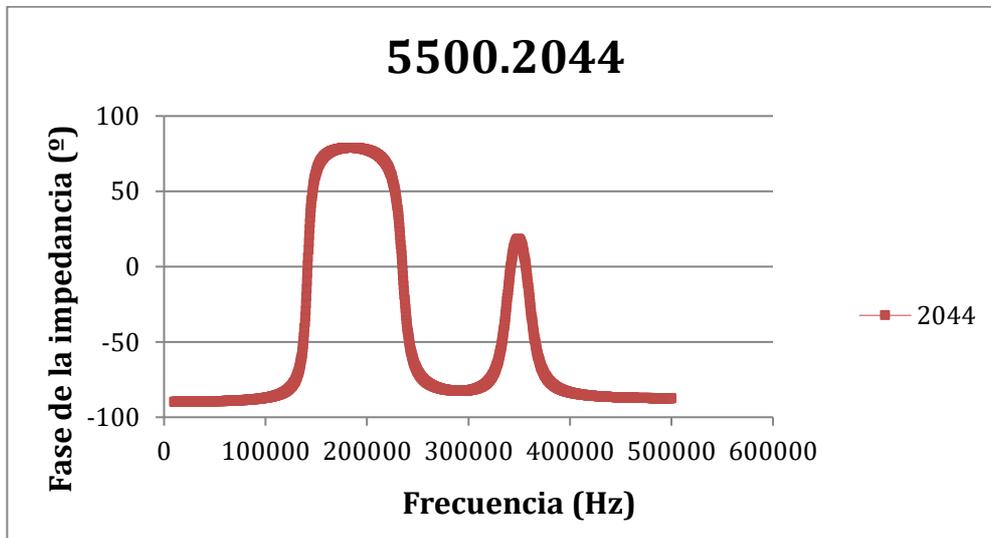


Ilustración 19. Fase de la respuesta frecuencial de la impedancia del filtro EMC 5500.2044

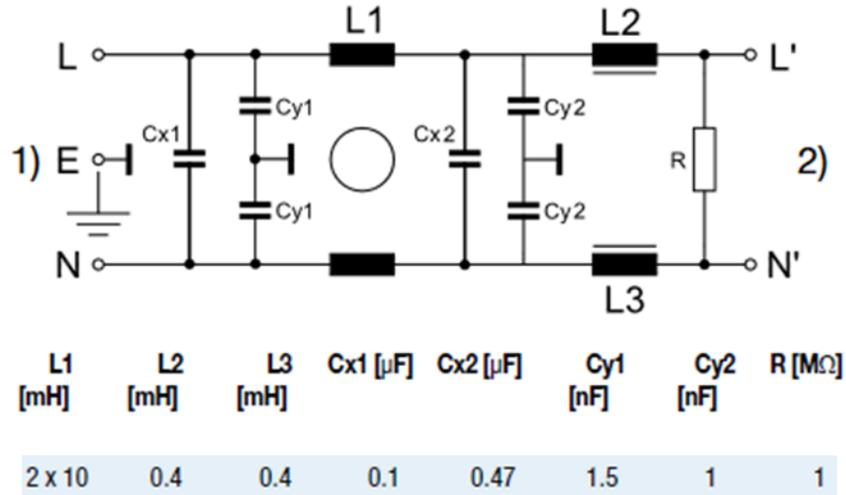


Ilustración 20. Esquemático del filtro EMC 5500.2052

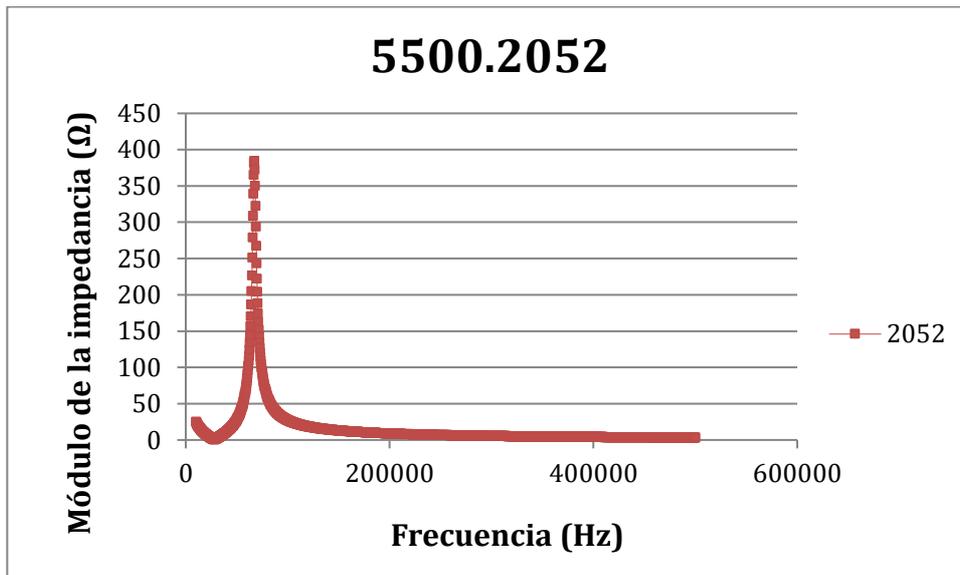


Ilustración 21. Módulo de la respuesta frecuencial de la impedancia del filtro EMC 5500.2052

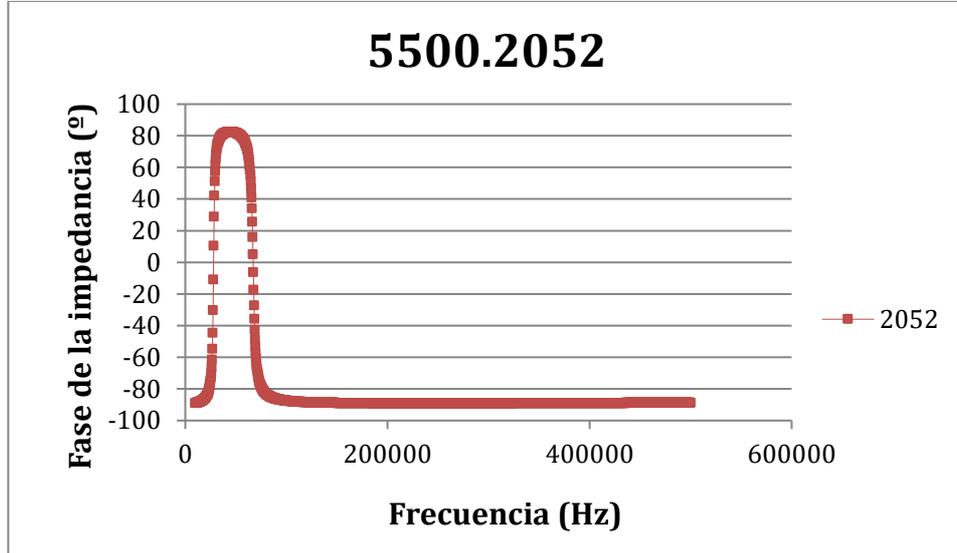


Ilustración 22. Fase de la respuesta frecuencial de la impedancia del filtro EMC 5500.2052

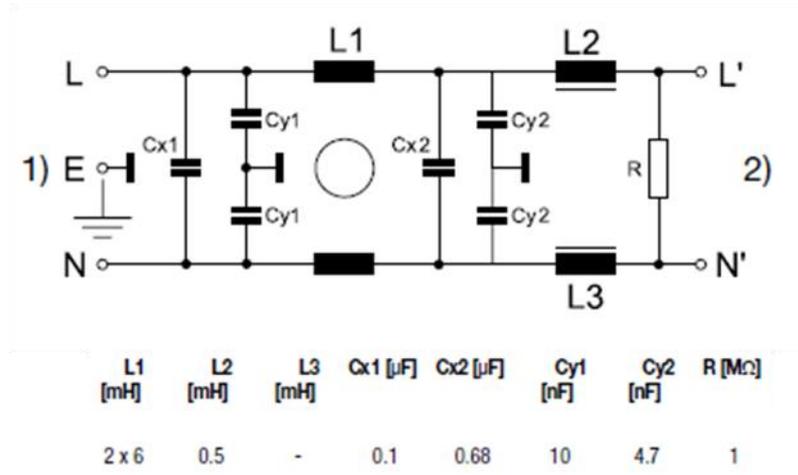


Ilustración 23. Esquemático del filtro EMC 5500.2055

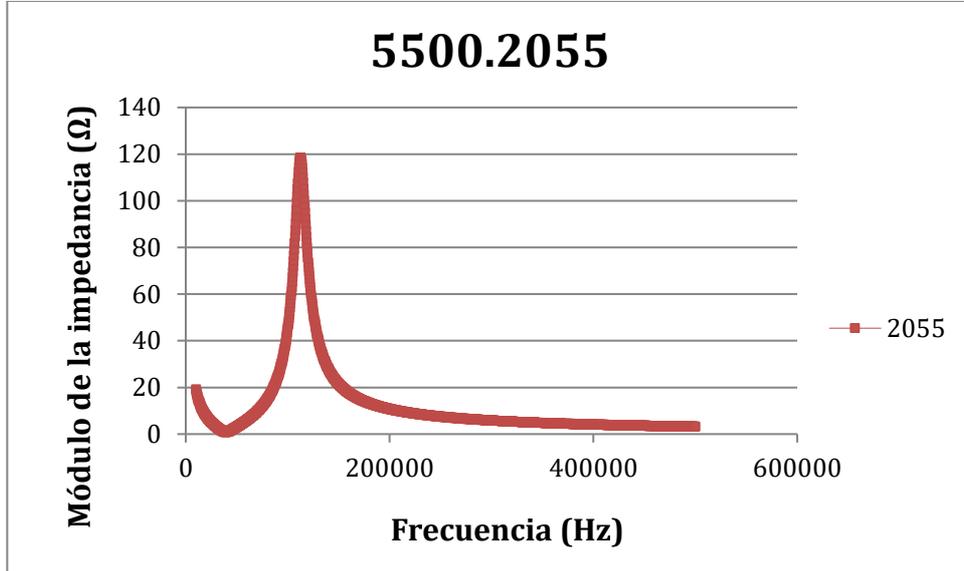


Ilustración 24. Módulo de la respuesta frecuencial de la impedancia del filtro EMC 5500.2055

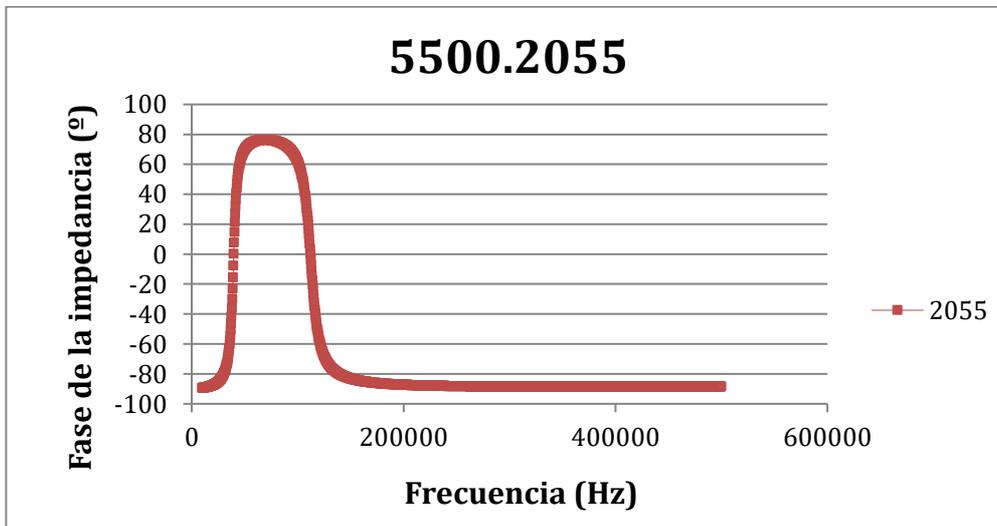


Ilustración 25. Fase de la respuesta frecuencial de la impedancia del filtro EMC 5500.2055

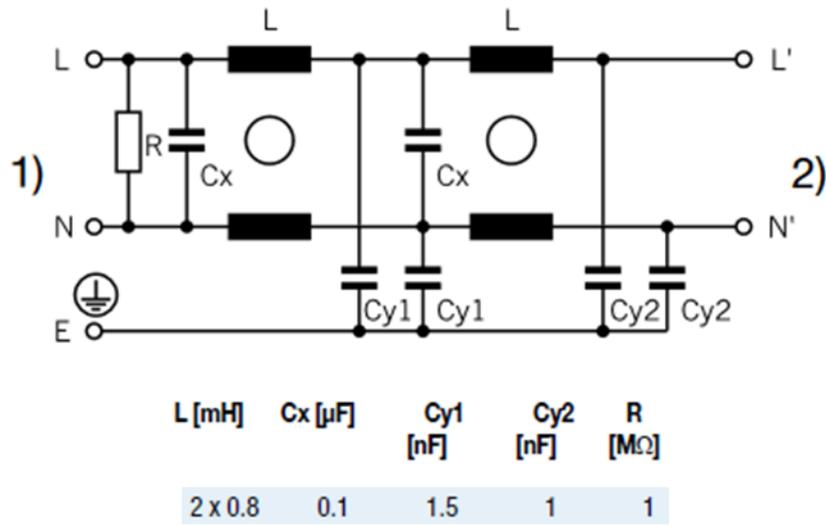


Ilustración 26. Esquemático del filtro EMC 5500.2060

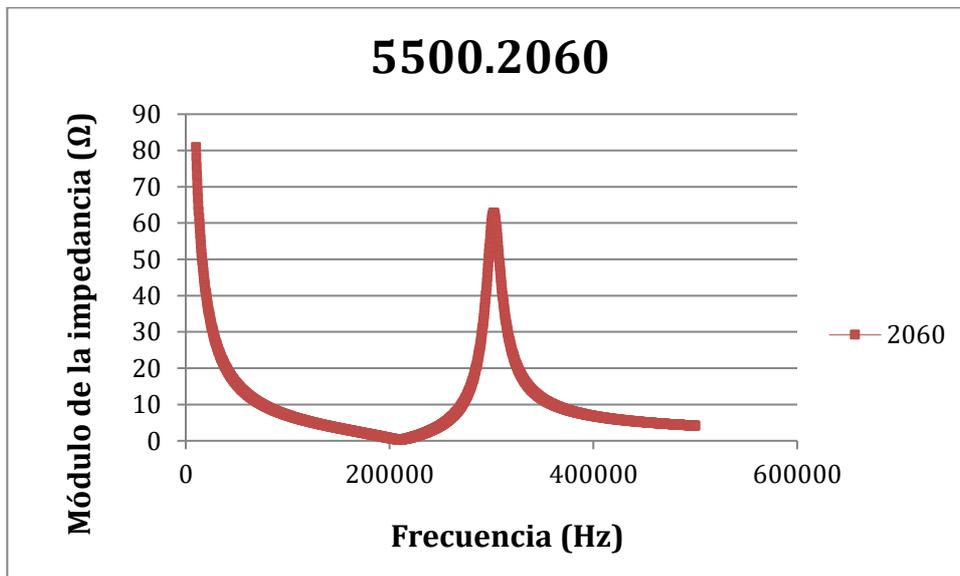


Ilustración 27. Módulo de la respuesta frecuencial de la impedancia del filtro EMC 5500.2060

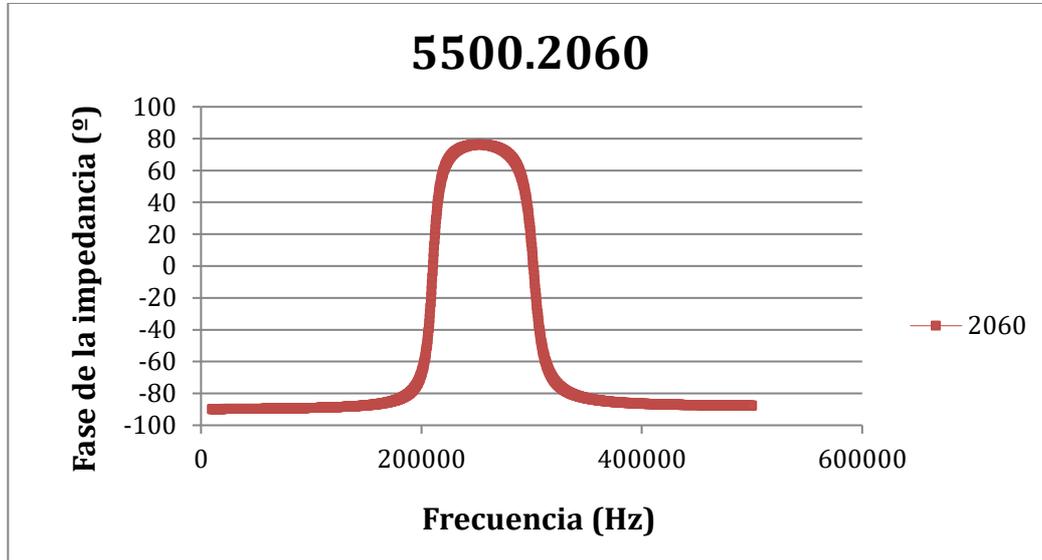


Ilustración 28. Fase de la respuesta frecuencial de la impedancia del filtro 5500.2060

En el esquemático de los filtros mostrados en las ilustraciones anteriores, 1 y 2 representan los puertos de la línea eléctrica y de la carga. En nuestro caso, las medidas se realizarán en circuito abierto, es decir, no se conectará ninguna carga a L' y N' . Las entradas L y N se conectarán mediante dos cables banana-cocodrilo a la regleta mencionada con anterioridad.

11.2. Validación de la metodología

Para validar la metodología propuesta se tratará de replicar las curvas de FER frente a SNR, mencionadas anteriormente, utilizando como emisión no deseada ruido blanco. El ruido blanco gaussiano (AWGN) se caracteriza por tener una respuesta plana en toda la banda de frecuencias. Por lo tanto, las curvas correspondientes a los diferentes rangos frecuenciales asociados a los canales de PRIME deberían ser idénticas a priori.

En primer lugar, se realizarán las pruebas en el primer canal de PRIME. Como todos los puntos de la regleta se encuentran interconectados, se inyectará el ruido blanco usando el generador de señales.

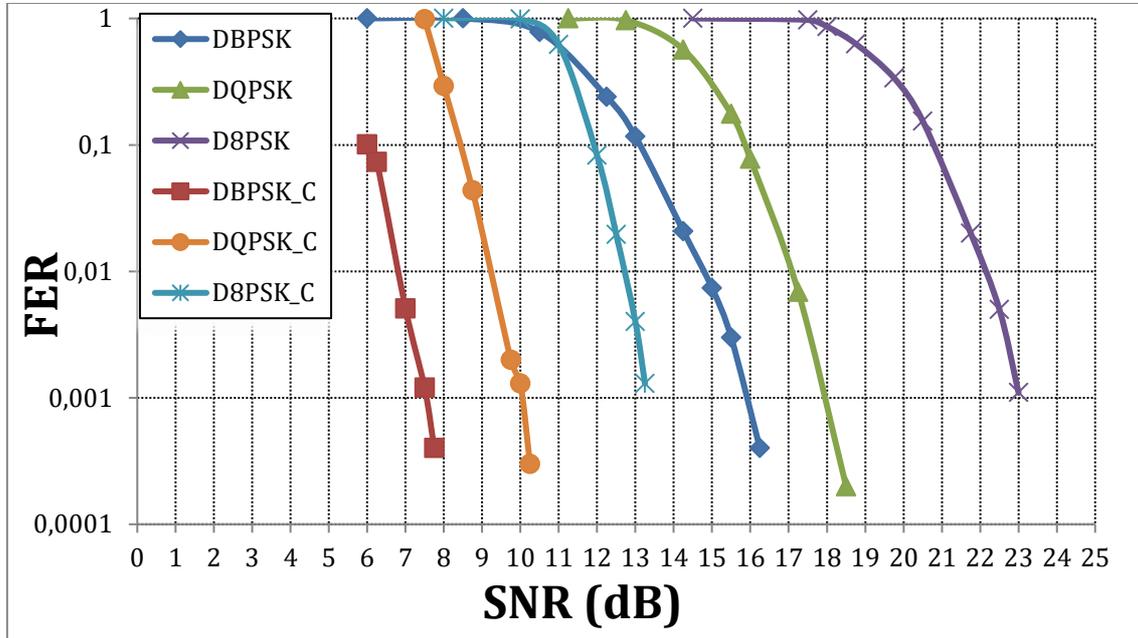


Ilustración 29. Curvas que relacionan FER y SNR para las diferentes modulaciones utilizando ruido blanco en el canal uno de PRIME

En la mayoría de los casos analizados, la amplitud máxima del ruido blanco y la atenuación máxima que permite configurar el software del ATMEL no son suficientes para degradar suficientemente las señales PLC PRIME. Por ello, es necesario seleccionar la impedancia alta para el campo *Branch Configuration* del transmisor. De esta forma, la corriente que circula será muy pequeña, por lo que la señal recibida en el receptor será de muy baja amplitud.

Sin embargo, como se puede ver en la Ilustración 29, con las modulaciones más robustas, es decir, DBPSK y DQPSK con corrección de errores, no se alcanzan valores de FER cercanos a la unidad. Esto se debe, principalmente, a las limitaciones de nuestros equipos mencionadas con anterioridad, amplitud máxima de ruido inyectado y atenuación máxima de 21 dB. En cualquier caso, dado que el valor de referencia para análisis posteriores es el umbral de FER 10^{-2} , esta limitación no se considera crítica.

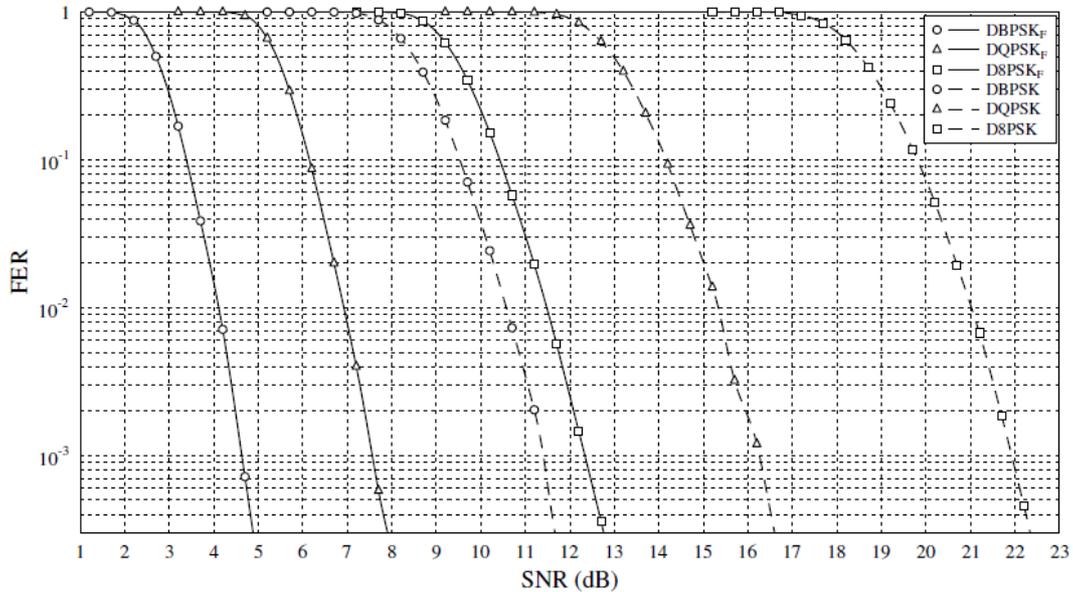


Ilustración 30. Curvas teóricas de FER frente a SNR [11]

Si se comparan los valores de las curvas obtenidas con respecto a las curvas teóricas de la Ilustración 30, se pueden apreciar claras diferencias. Si tomamos como referencia los valores de FER de 10^{-2} se puede ver cómo la SNR es de, aproximadamente, 2 dB mayor en la mayoría de nuestras gráficas. Esto se debe, principalmente, a las características de nuestro hardware (pérdidas de implementación) y el propio hecho de que se trate de medidas reales controladas en un entorno de laboratorio. Al trabajar con estos equipos se dan pequeñas reflexiones, que suponen que el canal no sea plano, por lo que los resultados no coincidirán exactamente con los obtenidos en la simulación pura. Por ello, se podría decir que las curvas obtenidas pueden aproximarse más a los resultados en entorno real que las teóricas, ya que éstas últimas se han conseguido mediante simulación. Además de esto, se puede destacar cómo para la modulación DBPSK, la SNR necesaria para obtener un FER de 10^{-2} es superior a la requerida para una modulación D8PSK, a diferencia de lo que ocurría de forma teórica. Esto supone que la diferencia entre la SNR teórica y la de la DQPSK obtenida sea muy alta, aproximadamente, 4,25 dB.

La siguiente tabla muestra un resumen de los valores de SNR obtenidos para un FER de 10^{-2} mencionados con anterioridad.

	SNR (dB)	
	Teórico	Canal 1 (medido)
DBPSK_C	4,10	6,75
DQPSK_C	7,00	9,25
D8PSK_C	11,50	12,75
DBPSK	10,50	14,75
DQPSK	15,25	17,00
D8PSK	21,00	22,10

Tabla 16. Comparativa de los valores de SNR para un FER de 10^{-2} en el canal uno de PRIME

Una vez finalizadas las medidas para el canal uno de PRIME, se trata de concluir que el comportamiento de los equipos es idéntico en toda la banda de frecuencias. Para ello, se repiten las curvas de ruido blanco al completo para el canal tres de PRIME. El procedimiento a seguir es el mismo que en el canal uno.

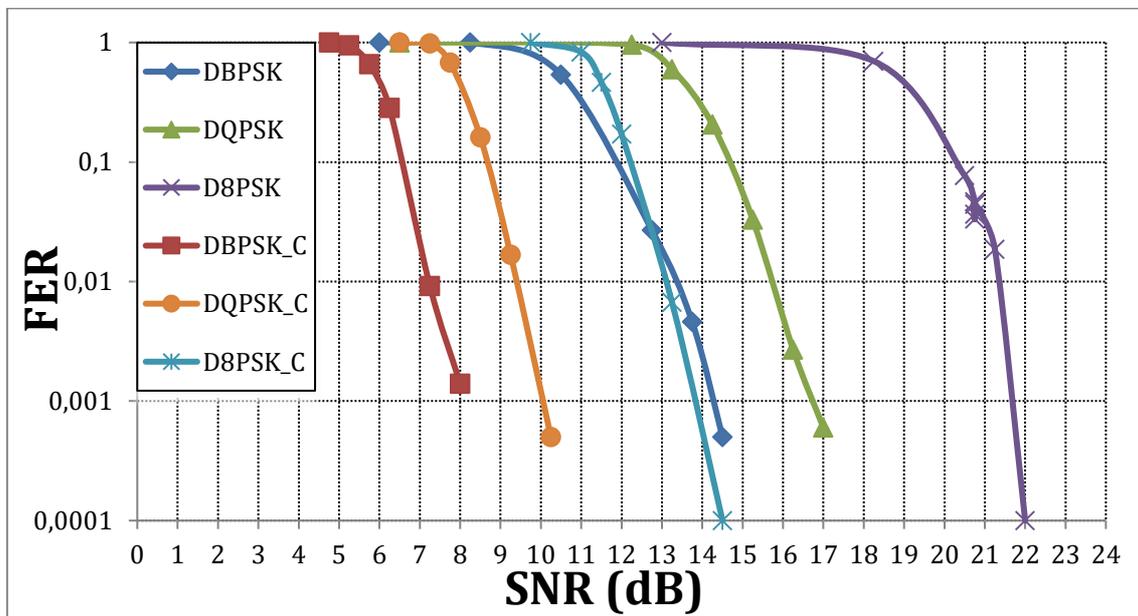


Ilustración 31. Curvas que relacionan SNR y FER para las diferentes modulsiones utilizando ruido blanco en el canal tres de PRIME

En la siguiente tabla, se indican los diferentes valores aproximados de SNR medidos para un FER de 10^{-2} en los dos canales analizados, tomando como referencia las gráficas anteriores, junto con los umbrales teóricos.

	SNR (dB)		
	Teórico	Canal 1	Canal 3
DBPSK_C	4,10	6,75	7,00
DQPSK_C	7,00	9,25	9,25
D8PSK_C	11,50	12,75	13,00
DBPSK	10,50	14,75	13,25
DQPSK	15,25	17,00	15,75
D8PSK	21,00	22,10	21,25

Tabla 17. Valores de SNR aproximados para un FER de 10^{-2} en los canales uno y tres de PRIME

La comparativa entre las curvas para los diferentes canales de PRIME medidos, muestra que los resultados se aproximan bastante entre sí en las modulaciones más robustas, es decir, aquellas que utilizan códigos de corrección de errores. Sin embargo, la SNR requerida para establecer una comunicación con un FER de 10^{-2} para las modulaciones menos robustas, las restantes, es ligeramente superior en el canal uno. Estas diferencias se aproximan a 1 dB. Esto puede deberse a no linealidades en la etapa de potencia del transmisor para los diferentes canales.

De esta manera, para el canal 3, las SNR umbrales sí coinciden con las teóricas, de manera aproximada, para las modulaciones menos robustas, es decir, DQPSK y D8PSK. Por el contrario, las curvas asociadas a las modulaciones restantes se encuentran desplazadas a la izquierda un rango que oscila entre los 1,5 dB y los 2,9 dB. De esta manera, se puede concluir que las medidas reales controladas requieren de una SNR mayor a la teórica, debido, principalmente, a los errores introducidos por la propia implementación de los equipos.

Vistas las diferencias obtenidas entre los canales 1 y 3, de cara a comprobar si estas diferencias se mantienen en el resto de los canales superiores, se repetirán las mismas mediciones en el canal ocho de PRIME para el caso de una modulación DBPSK.

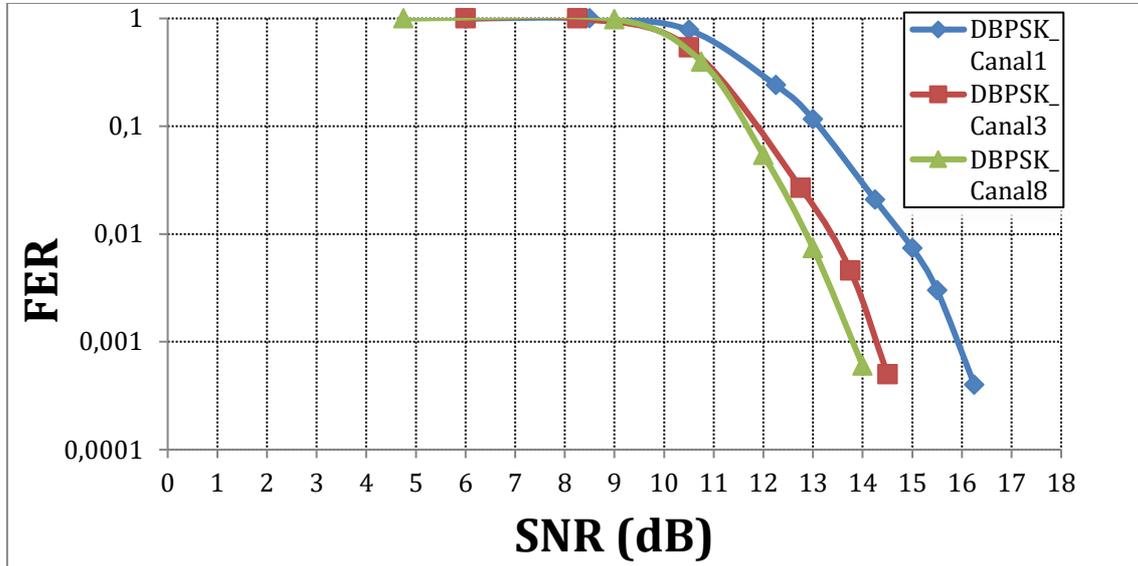


Ilustración 32. Modulación DBPSK para tres canales diferentes de PRIME: canal 1, 3 y 8

A simple vista se puede apreciar que los valores de SNR frente a FER que se consiguen para los diferentes canales no coinciden exactamente. Si se toma como referencia un FER de 10^{-2} , el valor de la SNR es de, aproximadamente, 12,75 dB en el canal ocho, de 13,25 dB en el tres y de 14,75 dB en el uno. Dado que la diferencia entre los canales 3 y 8 es mínima en comparación con el canal 1, la diferencia obtenida entre el canal 1 y los canales superiores puede deberse a que el módulo de transmisión es diferente entre ambos casos.

11.2.1. Comprobación de las diferentes formas de obtener la SNR

Como ya se ha mencionado en la descripción general de la metodología, existen diferentes formas de variar la SNR. Por un lado, modificando el nivel de señal transmitida (atenuando la señal o cambiando la impedancia de salida del transmisor) y, por otro, modificando el nivel de la potencia del ruido (en el generador arbitrario). A continuación, se quiere comprobar cómo, independientemente de la configuración seleccionada, un valor de SNR lleva asociado un valor de FER concreto. Para ello, se han realizado dos pruebas. En la primera de ellas, se ha fijado la impedancia de salida del transmisor en Low y se han variado la atenuación introducida por el Atmel y la potencia del ruido. En la segunda, se ha repetido el mismo procedimiento para una impedancia High. Así, se han obtenido dos curvas de FER frente a SNR para una misma modulación, pero de manera distinta. Sin embargo, como se puede comprobar en la siguiente ilustración, ambas curvas son muy similares, lo que valida la metodología propuesta.

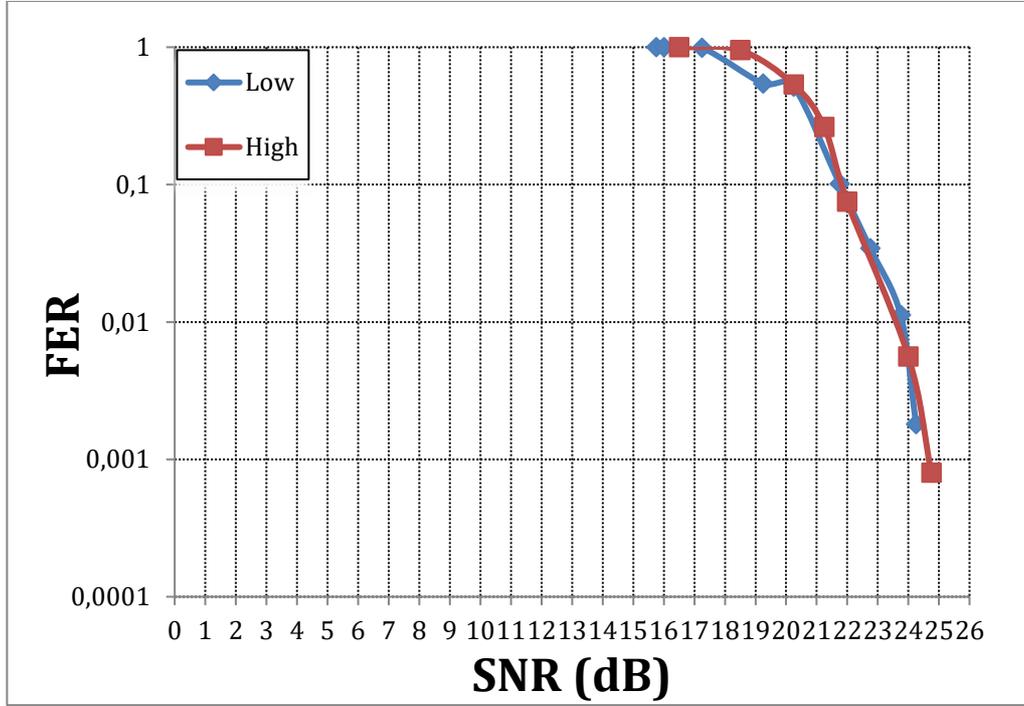


Ilustración 33. Curvas de FER frente a SNR en el primer canal de PRIME para las diferentes impedancias variando ruido inyectado y nivel de señal

Si los puntos (SNR, FER) de ambas gráficas se dibujan en una única, el resultado indica que la curva se acerca, de manera considerable, a la forma de la curva teórica.

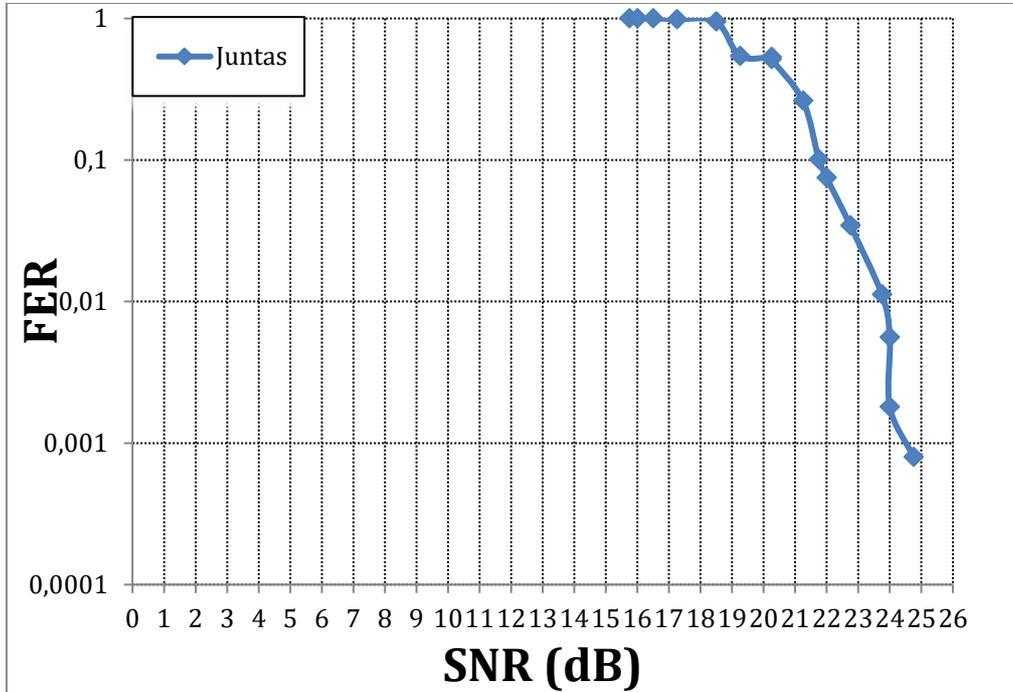


Ilustración 34. Todos los valores obtenidos graficados sobre la misma curva en el canal uno

En el canal tres de PRIME los resultados son muy parecidos, como se puede ver en las Ilustraciones 35 y 36.

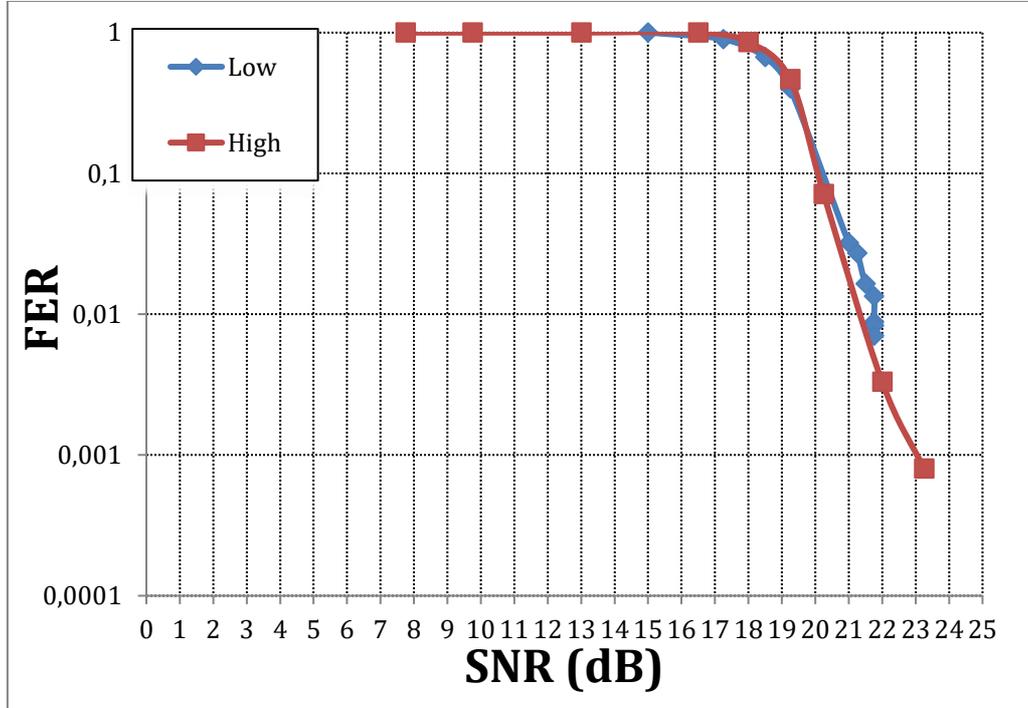


Ilustración 35. Curvas de FER frente a SNR en el primer canal de PRIME para las diferentes impedancias variando ruido inyectado y nivel de señal

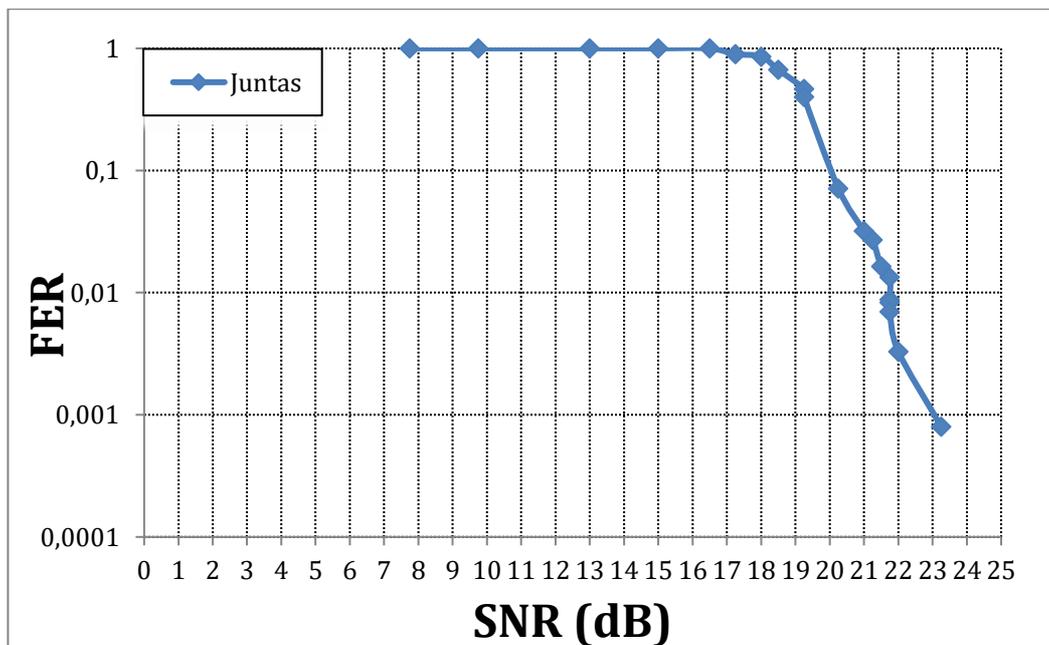


Ilustración 36. Todos los valores obtenidos graficados sobre la misma curva en el canal tres

Por lo tanto, una vez analizados ambos canales, se puede concluir que para cualquier rango frecuencial los valores de FER frente a SNR obtenidos son independientes de la configuración utilizada para la transmisión de tramas.

12. Resultados y análisis

El objetivo principal de este proyecto, como se ha mencionado con anterioridad, es analizar el impacto de los efectos de canal en las comunicaciones PLC según el estándar PRIME. Con esta finalidad, por un lado, se ha analizado la atenuación de la señal PLC debida los filtros EMC en los diferentes rangos frecuenciales y, por otro, se ha evaluado la degradación de las curvas de FER frente a SNR en los diferentes canales del estándar.

12.1. Influencia de la atenuación de los filtros en la señal PLC PRIME

La influencia de la atenuación de los filtros se ha obtenido teniendo en cuenta los valores de tensión recibidos en cada uno de los canales. Para ello, se ha comparado el RSSI medido en el receptor con la ausencia del filtro con el valor del RSSI al conectar cada uno de los filtros EMC de los que se dispone.

En la siguiente tabla, se pueden apreciar los valores de RSSI proporcionados por el receptor Atmel para una modulación DBPSK, sin atenuación y para una impedancia Low en los diferentes canales de PRIME.

	Sin filtro	Filtro 5500.2044	Filtro 5500.2052	Filtro 5500.2055	Filtro 5500.2060
Canal 1	120 dB μ V	119 dB μ V	121 dB μ V	118 dB μ V	121 dB μ V
Canal 3	120 dB μ V	119 dB μ V	118 dB μ V	118 dB μ V	106 dB μ V
Canal 4	117 dB μ V	117 dB μ V	116 dB μ V	116 dB μ V	115 dB μ V
Canal 5	116 dB μ V	117 dB μ V	118 dB μ V	117 dB μ V	115 dB μ V
Canal 6	116 dB μ V	112 dB μ V	114 dB μ V	114 dB μ V	118 dB μ V
Canal 7	117 dB μ V	119 dB μ V	102 dB μ V	100 dB μ V	119 dB μ V
Canal 8	119 dB μ V	108 dB μ V	98 dB μ V	99 dB μ V	106 dB μ V

Tabla 18. Valores RSSI medidos en los diferentes canales de PRIME para los diferentes filtros EMC a analizar

En las siguientes gráficas, se dibujan, de forma conjunta, las respuestas frecuenciales del módulo de la impedancia de cada uno de los filtros y la atenuación introducida por éstos en cada canal.

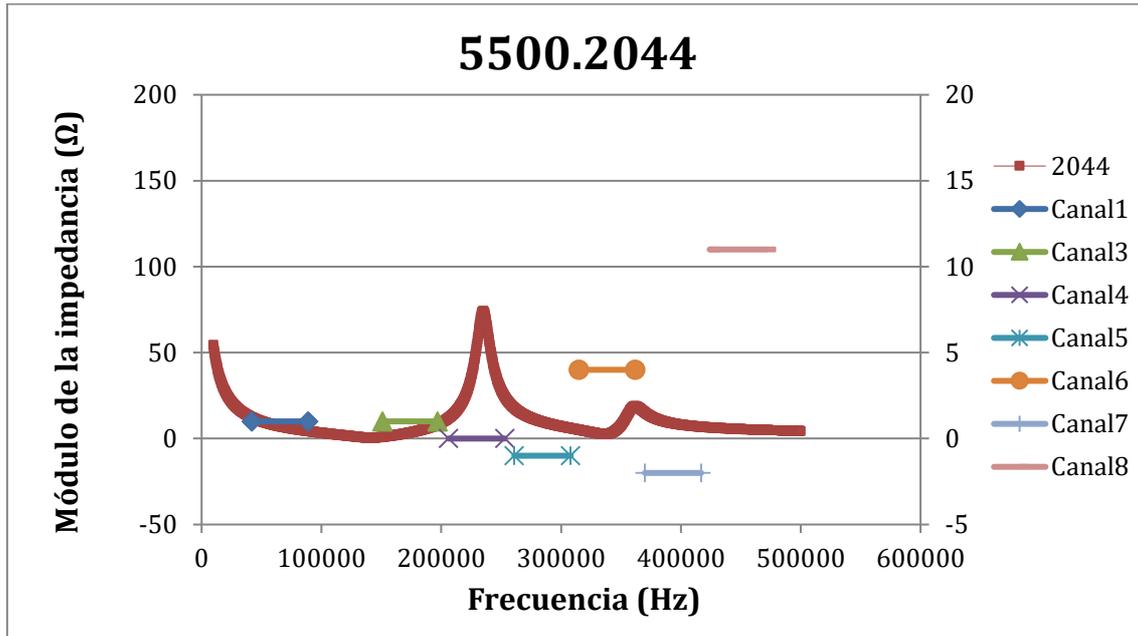


Ilustración 37. Respuesta frecuencial del filtro EMC 5500.2044 junto con la atenuación introducida en cada canal de PRIME

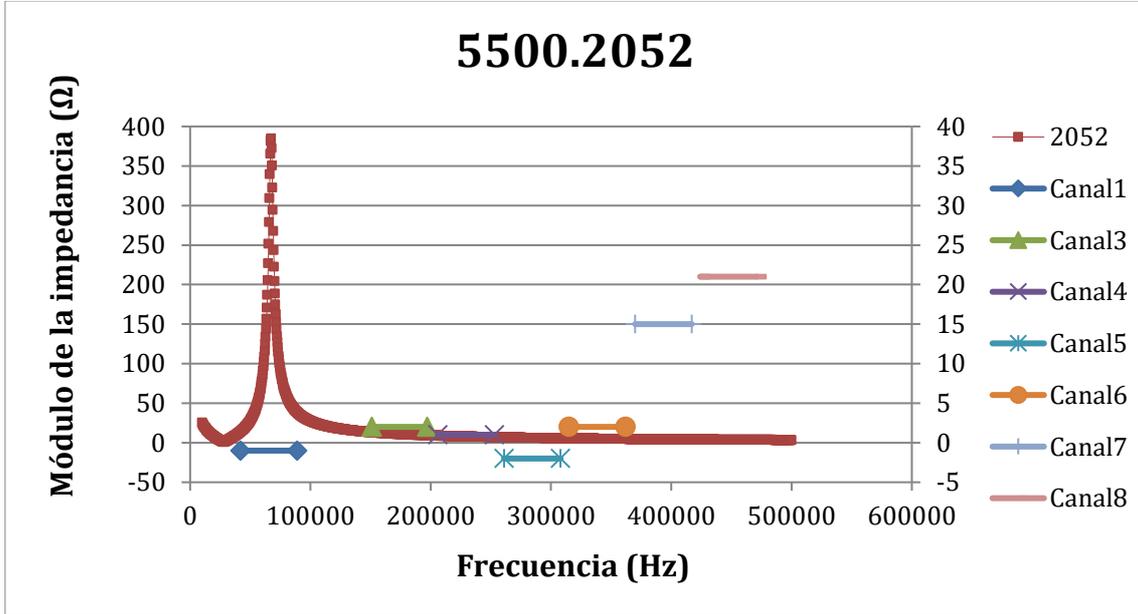


Ilustración 38. Respuesta frecuencial del filtro EMC 5500.2052 junto con la atenuación introducida en cada canal de PRIME

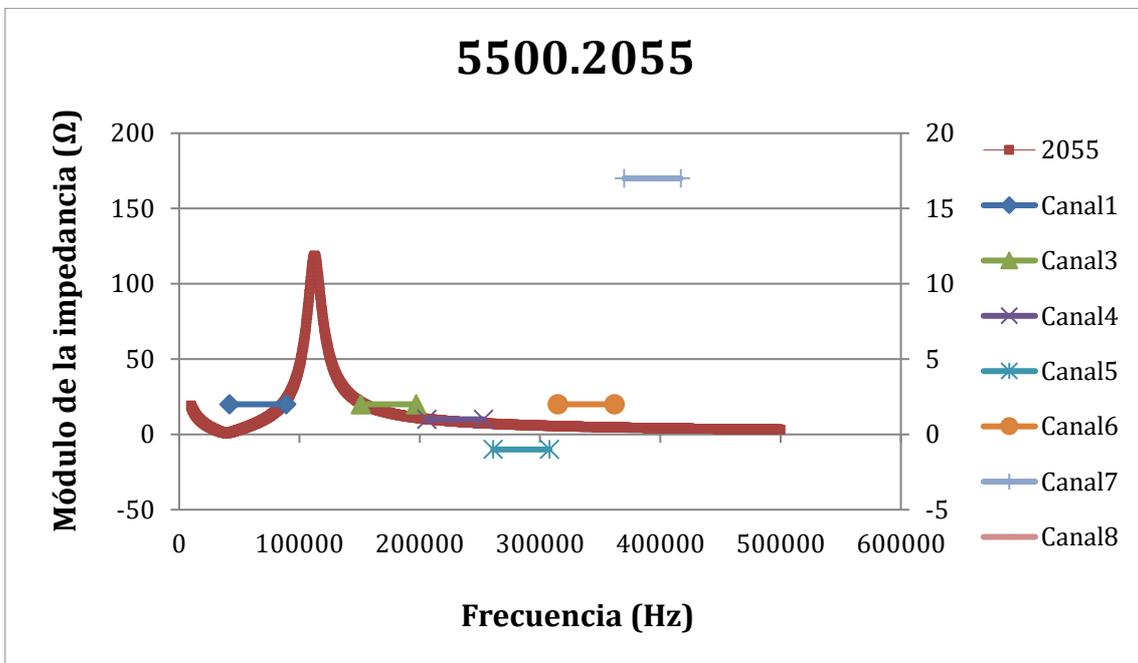


Ilustración 39. Respuesta frecuencial del filtro EMC 5500.2055 junto con la atenuación introducida en cada canal de PRIME

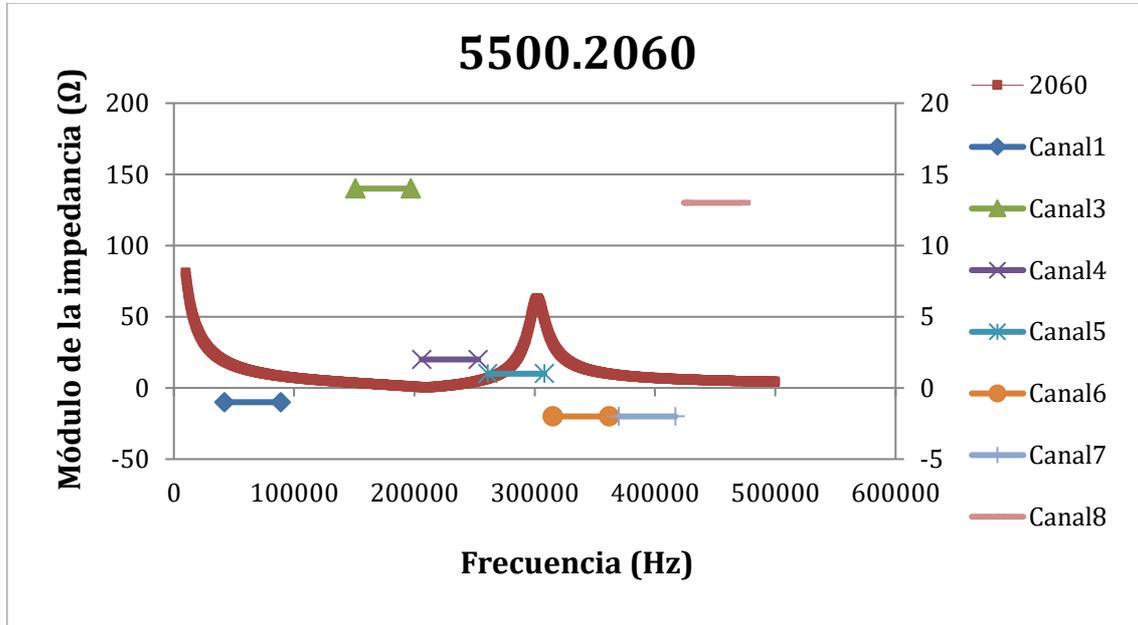


Ilustración 40. Respuesta frecuencial del filtro EMC 5500.2060 junto con la atenuación introducida en cada canal de PRIME

En el contexto y antecedentes de este trabajo, se indica que el efecto *notching* (impedancias bajas debidas a las resonancias de los filtros EMC) podría ser el factor más influyente en la degradación de las señales PLC PRIME. No obstante, analizando los resultados obtenidos, parece que esto no siempre se cumple.

Si se analiza, por ejemplo, el comportamiento del filtro 5500.2055, se observa que la respuesta frecuencial de este filtro muestra un efecto de *notching* en el canal 1, donde el nivel de señal recibida es de 118 dB μ V. Los resultados de la tabla anterior indican que la amplitud de la señal recibida es menor en los canales 7 y 8, con 100 dB μ V y 99 dB μ V respectivamente. Es importante recordar que la tensión transmitida en todos los canales no es la misma, por lo que para calcular la atenuación hay que tomar como referencia el nivel de la señal recibida sin filtro. Así, se obtiene que la atenuación en el canal 1 es de 2 dB, mientras que en los canales 7 y 8 es de 17 dB y 20 dB respectivamente.

A la vista de estos resultados, parece que, de cara a la atenuación introducida en los diferentes canales, más crítico que caídas abruptas de la impedancia pueden resultar valores de impedancia bajos que se mantienen a lo largo del todo el canal de comunicaciones.

Para comprobar esto, las siguientes tablas muestran la relación de la impedancia en cada uno de los canales de PRIME, con la atenuación introducida por cada uno de los filtros. Para ello, se detallan el valor medio y la desviación típica del módulo de la impedancia.

	Valor medio del módulo de la impedancia (Ω)	Desviación típica (Ω)	Atenuación (dB)
Canal 1	7,44	2,22	1
Canal 3	3,76	2,03	1
Canal 4	37,25	19,19	0
Canal 5	10,32	3,19	-1
Canal 6	6,40	4,91	4
Canal 7	9,45	2,24	-2
Canal 8	5,55	0,44	11

Tabla 19. Atenuación en función de la impedancia media para el filtro 5500.2044

	Valor medio del módulo de la impedancia (Ω)	Desviación típica (Ω)	Atenuación (dB)
Canal 1	92,71	89,42	-1
Canal 3	10,82	1,11	2
Canal 4	7,65	0,54	1
Canal 5	5,97	0,32	-2
Canal 6	4,93	0,22	2
Canal 7	4,18	0,16	15
Canal 8	3,64	0,12	21

Tabla 20. Atenuación en función de la impedancia media para el filtro 5500.2052

	Valor medio del módulo de la impedancia (Ω)	Desviación típica (Ω)	Atenuación (dB)
Canal 1	8,96	5,84	2
Canal 3	14,78	2,81	2
Canal 4	8,51	0,82	1
Canal 5	6,18	0,40	-1
Canal 6	19,17	0,256	2
Canal 7	4,09	0,17	17
Canal 8	3,51	0,13	21

Tabla 21. Atenuación en función de la impedancia media para el filtro 5500.2055

	Valor medio del módulo de la impedancia (Ω)	Desviación típica (Ω)	Atenuación (dB)
Canal 1	12,28	2,99	-1
Canal 3	2,19	0,73	14
Canal 4	1,90	1,33	2
Canal 5	27,55	19,40	1
Canal 6	16,12	5,63	-2
Canal 7	7,30	0,80	-2
Canal 8	5,21	0,34	13

Tabla 22. Atenuación en función de la impedancia media para el filtro 5500.2060

Las tablas anteriores muestran que, además de una impedancia baja, se necesita que la desviación entre los diferentes valores de la impedancia dentro del canal sea pequeña, para que la atenuación introducida por los filtros sea alta. Este efecto se puede apreciar en, por ejemplo, el filtro 5500.2060 en el canal tres o el ocho, donde las atenuaciones ascienden a los 14 y 13 dB, respectivamente. El canal tres utilizando el filtro 5500.2044 permite concluir que, a pesar de tener un valor de impedancia bajo (un poco superior a los 3 Ω), la alta desviación típica supone una baja atenuación en la señal. Los valores de atenuación más altos, superiores a 10 dB, se dan cuando el valor medio del módulo de la impedancia es inferior a 6 Ω y la desviación típica es menor a 1.

Para demostrar la influencia de la impedancia de los filtros en la atenuación introducida en la señal, las siguientes cuatro gráficas muestran las respuestas frecuenciales del canal sin filtro y utilizando filtro EMC en el canal 8. Como se puede apreciar, la amplitud del canal se reduce considerablemente al introducir los filtros. Cabe destacar que atenuaciones tan grandes reducirían drásticamente el alcance de las señales transmitidas, limitando la comunicación entre Smart Meters.

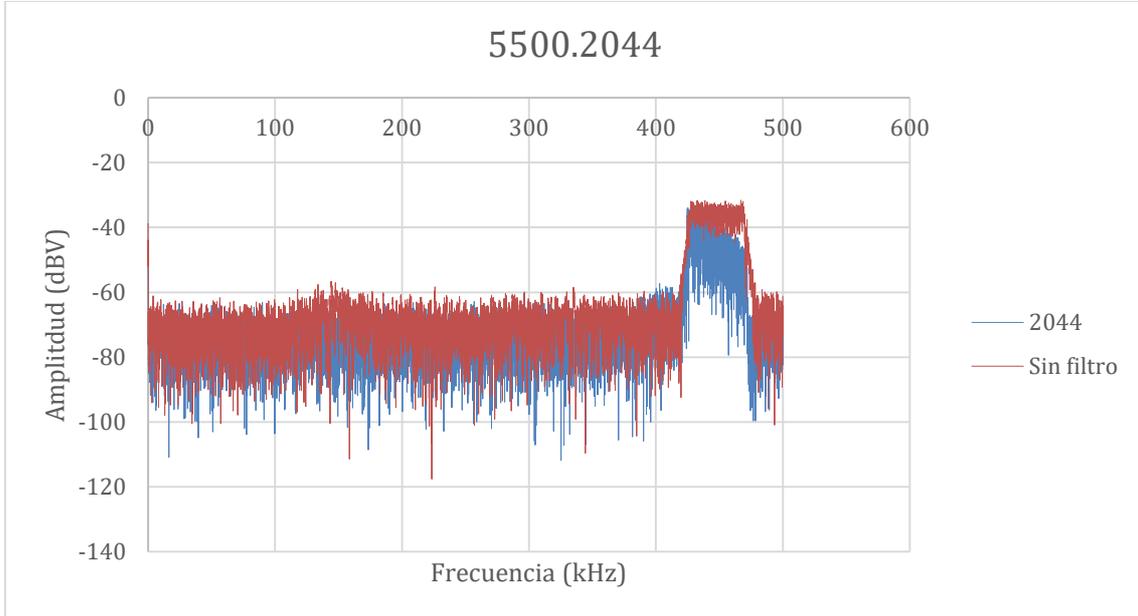


Ilustración 41. Respuesta frecuencial del canal sin filtro y utilizando el filtro 5500.2044

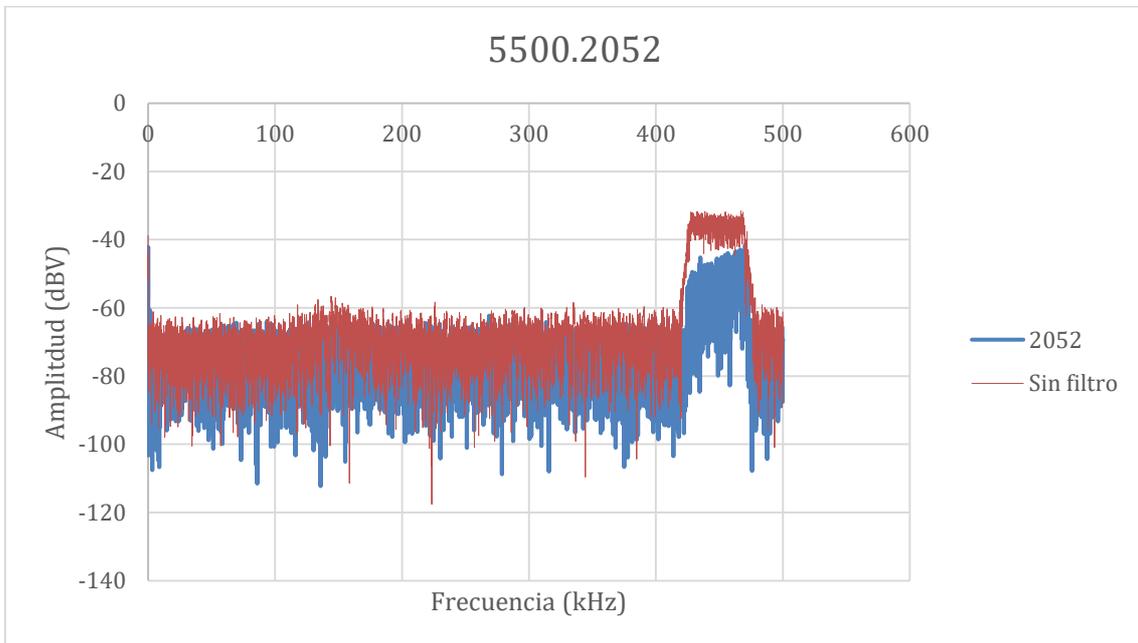


Ilustración 42. Respuesta frecuencial del canal sin filtro y utilizando el filtro 5500.2052

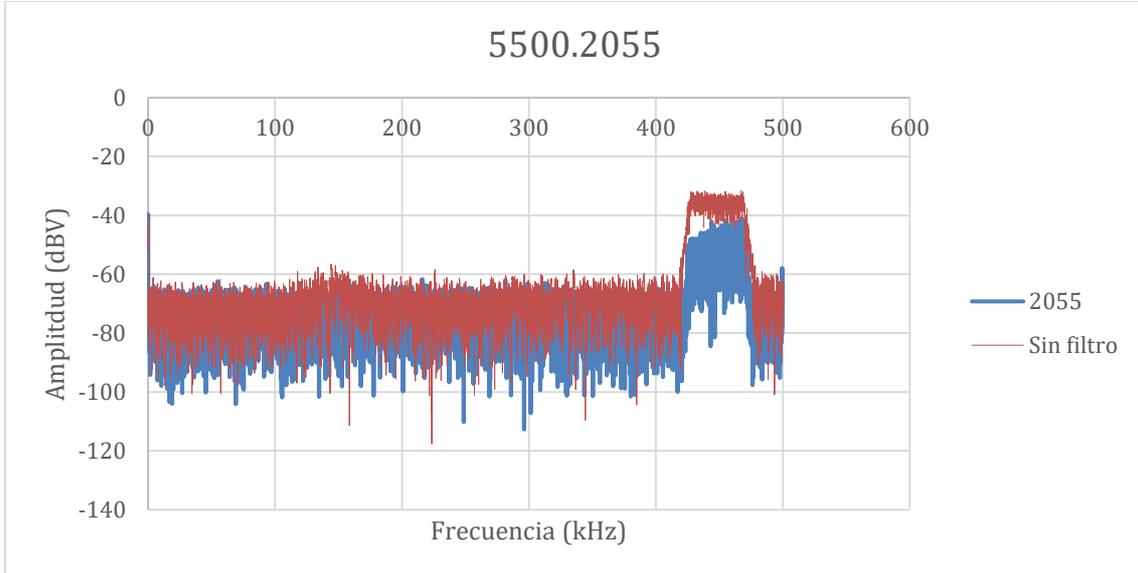


Ilustración 43. Respuesta frecuencial del canal sin filtro y utilizando el filtro 5500.2055

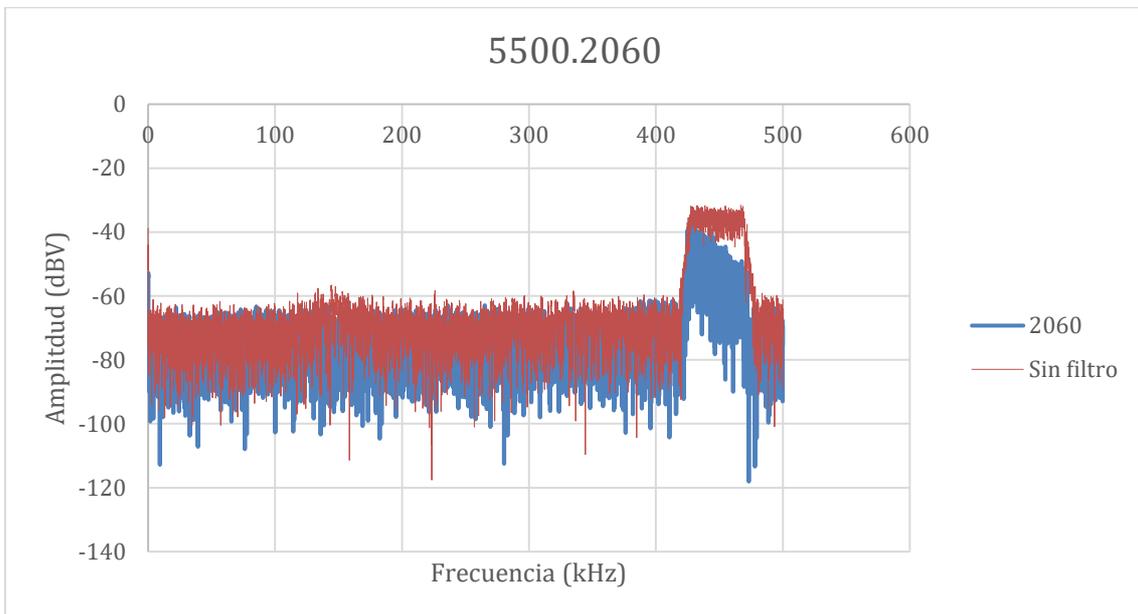


Ilustración 44. Respuesta frecuencial del canal sin filtro y utilizando el filtro 5500.2060

12.2. Curvas de FER frente a SNR

12.2.1. Resultados en el canal uno de PRIME

En este primer apartado, se mostrarán las gráficas de FER frente a SNR para las diferentes modulaciones que permite la versión 1.3.6 de PRIME, utilizando los diferentes filtros.

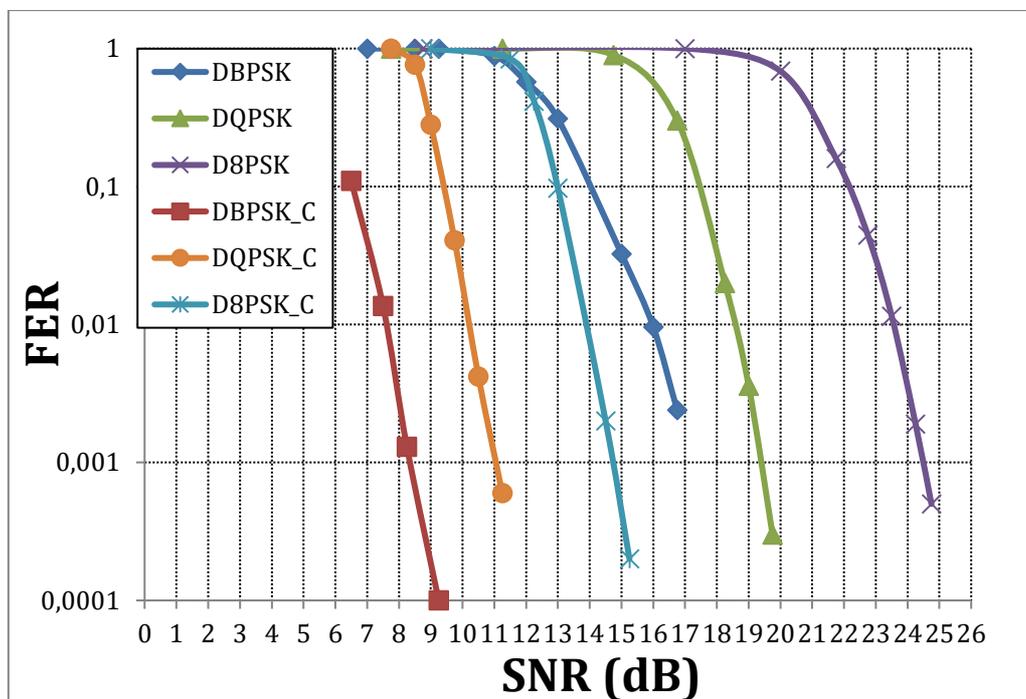


Ilustración 45. Curva FER frente a SNR con el filtro 5500.2044 en el canal uno de PRIME

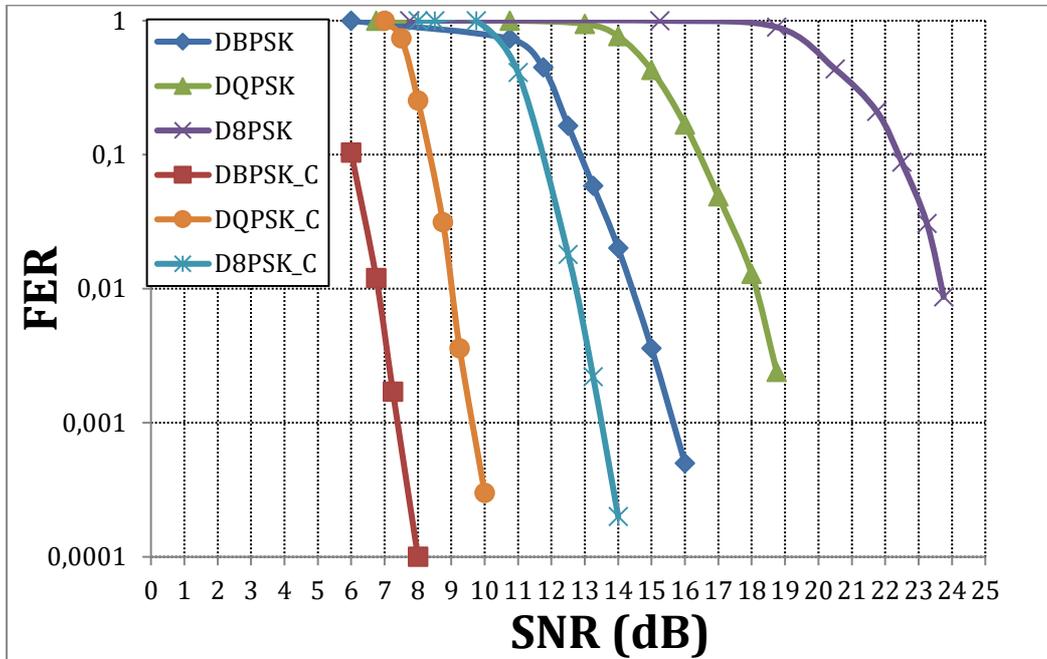


Ilustración 46. Curva FER frente a SNR con el filtro 5500.2052 en el canal uno de PRIME

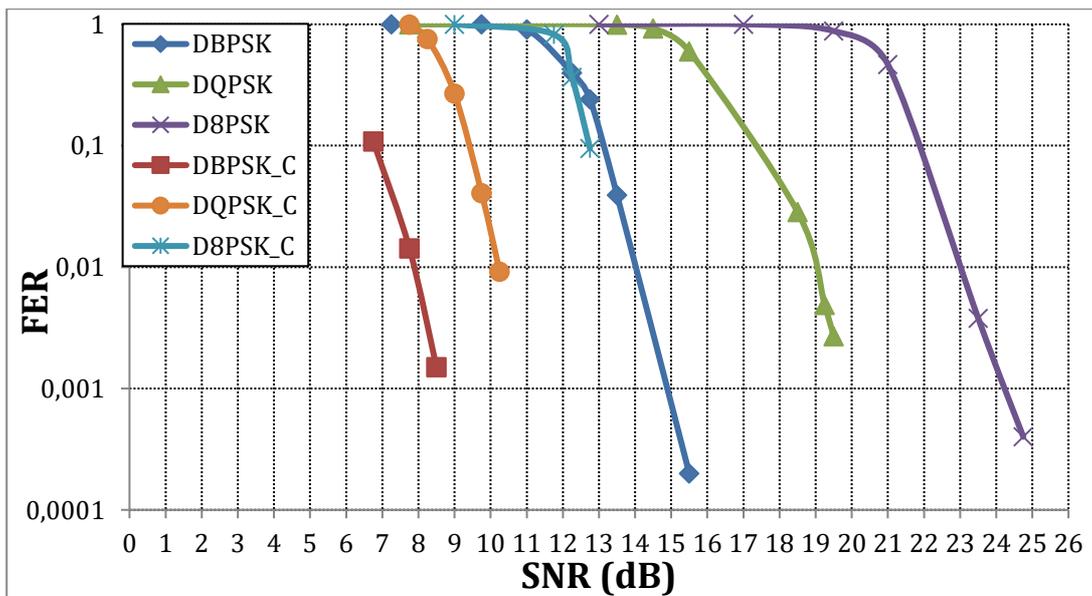


Ilustración 47. Curva FER frente a SNR con el filtro 5500.2055 en el canal uno de PRIME

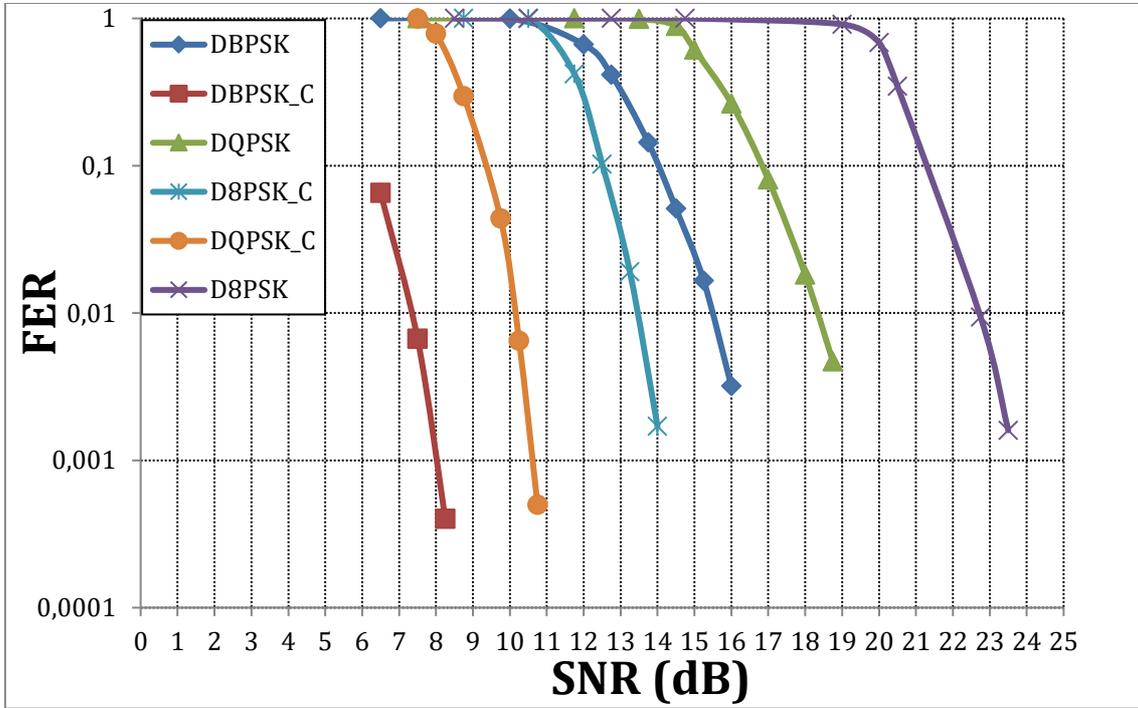


Ilustración 48. Curva FER frente a SNR con el filtro 5500.2060 en el canal uno de PRIME

La Tabla 23 muestra los umbrales de SNR correspondientes a un FER de 10^{-2} correspondientes a cada una de las modulaciones y cada uno de los filtros, y las compara con los umbrales obtenidos en ausencia de filtro (Sección 11.2).

	SNR (dB)				
	Sin filtro	Filtro 5500.2044	Filtro 5500.2052	Filtro 5500.2055	Filtro 5500.2060
DBPSK_C	6,75	7,50	6,90	8,00	7,25
DQPSK_C	9,25	10,10	9,00	10,00	10,10
D8PSK_C	12,75	14,00	12,75	13,00	13,50
DBPSK	14,75	16,00	14,50	14,00	15,50
DQPSK	17,00	18,50	18,00	19,00	18,40
D8PSK	22,10	23,50	23,50	23,00	22,75

Tabla 23. Comparativa de los valores de SNR para un FER de 10^{-2} para los diferentes filtros EMC analizados para cada una de las modulaciones

Como se puede observar, los resultados obtenidos son bastante similares para los cuatro filtros, tanto para las modulaciones con corrección de errores, como para aquellas que no disponen de estos códigos. Las mayores diferencias que se pueden discernir son de 1,75 dB. Por lo tanto, se podría concluir que, en general, las variaciones del canal introducidas por los filtros EMC no son suficientemente críticas para afectar a las curvas de FER frente a SNR, ya que no modifican los umbrales para 10^{-2} . De esta manera, la calidad de las comunicaciones no se ve afectada por este efecto.

12.2.2. Resultados en los canales superiores de PRIME

Las siguientes gráficas muestran las curvas de FER frente a SNR obtenidas para dos de los filtros EMC seleccionados en el canal 8, que es el que presenta una mayor atenuación.

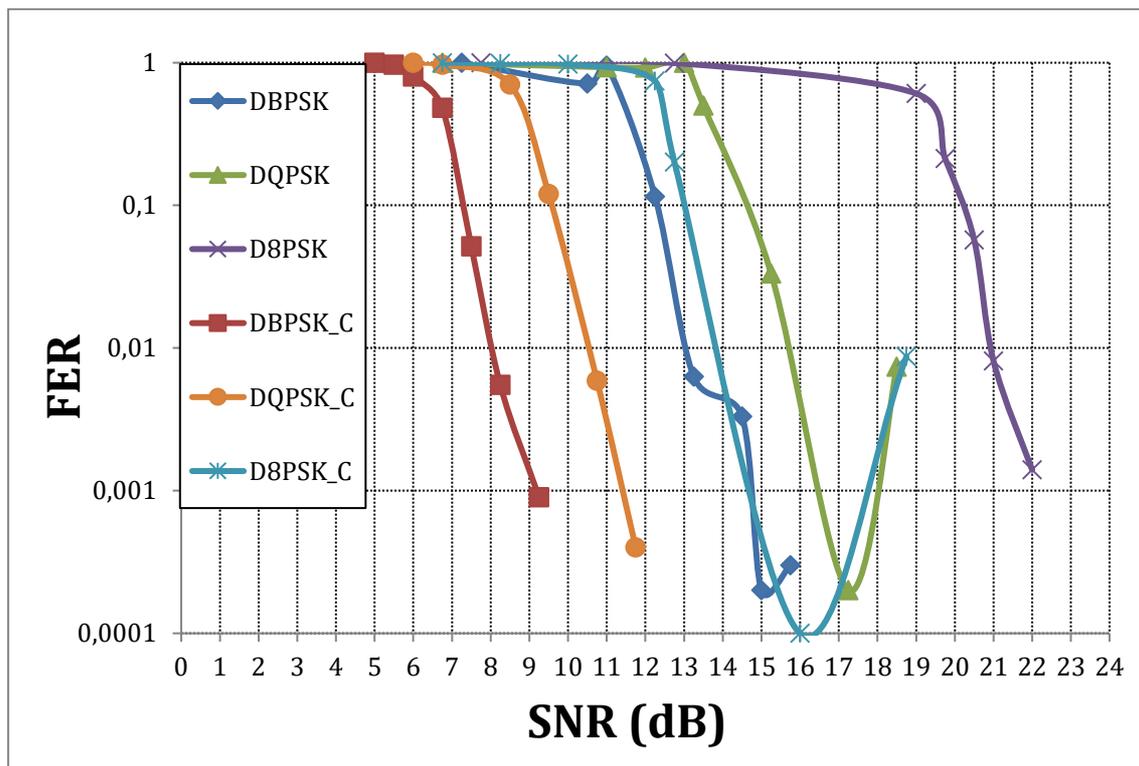


Ilustración 49. Curva FER frente a SNR con el filtro 5500.2052 en el canal ocho de PRIME

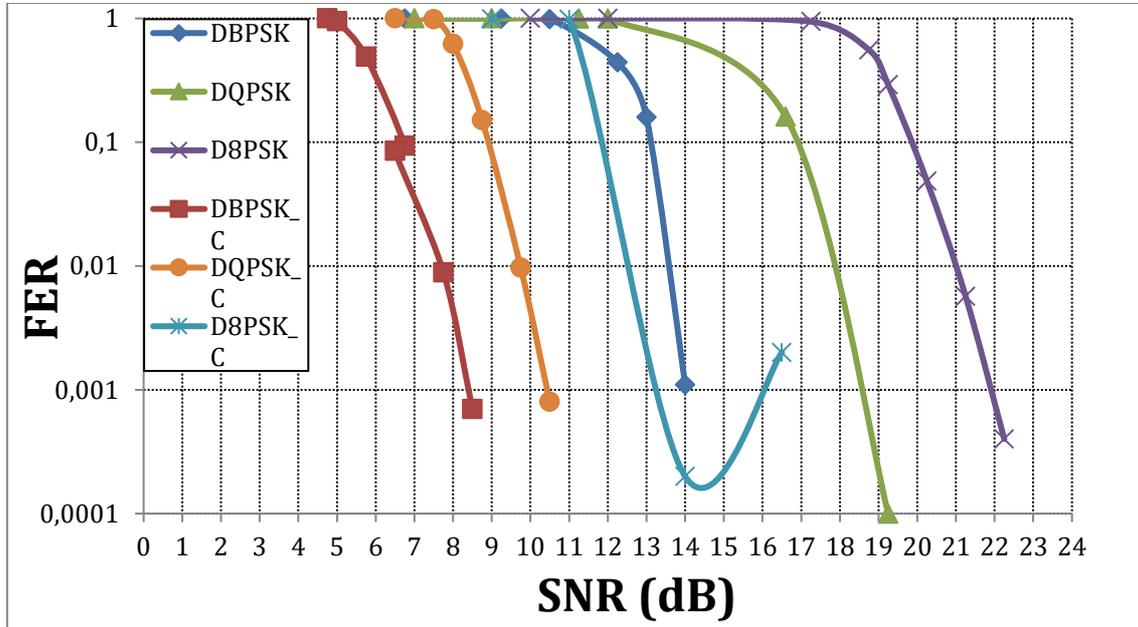


Ilustración 50. Curva FER frente a SNR con el filtro 5500.2055 en el canal ocho de PRIME

En la comprobación de las diferentes formas de obtener la SNR (Sección 11.2.1), se concluye que el número de tramas correctas no depende de la configuración utilizada para establecer una comunicación con una cierta SNR. Sin embargo, las dos gráficas anteriores no se comportan de esta manera. Los diferentes valores de las curvas se han obtenido modificando los tres parámetros que suponen una variación en la Relación Señal a Ruido: atenuación introducida, impedancia de salida del transmisor y ruido inyectado.

Como se puede ver, ciertos puntos toman valores de FER mayores cuando la SNR aumenta. Por esta razón, se han analizado las configuraciones utilizadas en estos casos. Un ejemplo de ellos sería el siguiente:

Filtro 5500.2052. Modulación D8PSK_C:

- Atenuación = 13 dB, Impedancia = Low, Ruido = 10 Vpp
- Atenuación = 0 dB, Impedancia = High, Ruido = 1,45 Vpp

En el primero de los casos, la SNR asciende hasta los 18,75 dB, recibiendo de forma correcta 9913 tramas de las 10000 enviadas. En el segundo, la SNR es de 16 dB y se reciben 9999 tramas correctamente. Estos valores indican que el número de tramas correctas es inversamente proporcional a la SNR recibida. Si esto fuera así, SNR altas supondrían valores de FER altos.

Por lo tanto, cuando se utilizan los filtros EMC, las variaciones del ruido y de la impedancia de salida del transmisor generan incongruencias en las gráficas de FER frente a SNR. Por ello, la

metodología definida no es válida en estas ocasiones. Esto puede deberse al parámetro de impedancia de salida del transmisor, del que el fabricante no da detalles de sobre cómo se comporta en función de la impedancia que se encuentre en el medio de transmisión.

El análisis de la degradación de las curvas de FER frente a SNR en los canales superiores de PRIME se realizará utilizando una única modulación. Es importante mencionar que las gráficas que se van a mostrar posteriormente se han realizado manteniendo siempre fija la impedancia de salida del transmisor, para evitar el efecto anteriormente descrito.

A continuación, se presentan las curvas mencionadas para cada uno de los cuatro filtros utilizando una modulación DBPSK_C. Las tablas indican cuál es el SNR mínimo para obtener un FER de 10^{-2} en cada una de las situaciones estudiadas. Se ha seleccionado esta modulación, ya que, al ser muy robusta, es más sencillo obtener valores de SNR para un FER cercano a 10^{-2} .

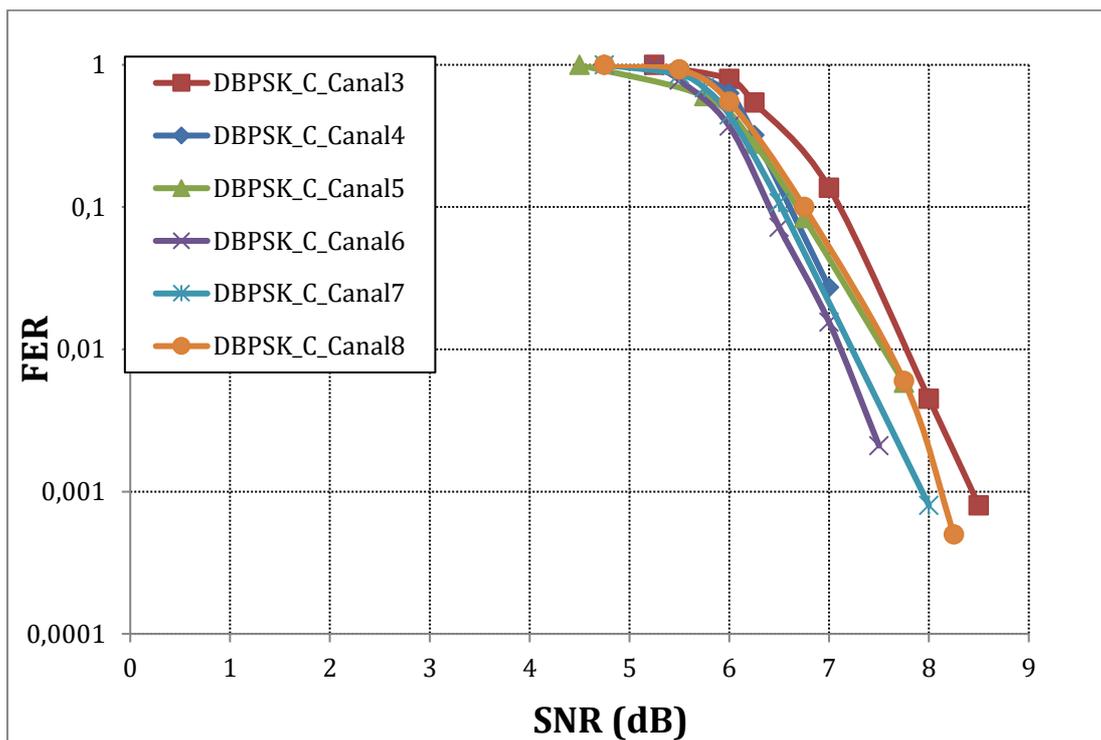


Ilustración 51. Curva de FER frente a SNR para el filtro 5500.2044 en los diferentes canales de PRIME utilizando una modulación DBPSK_C

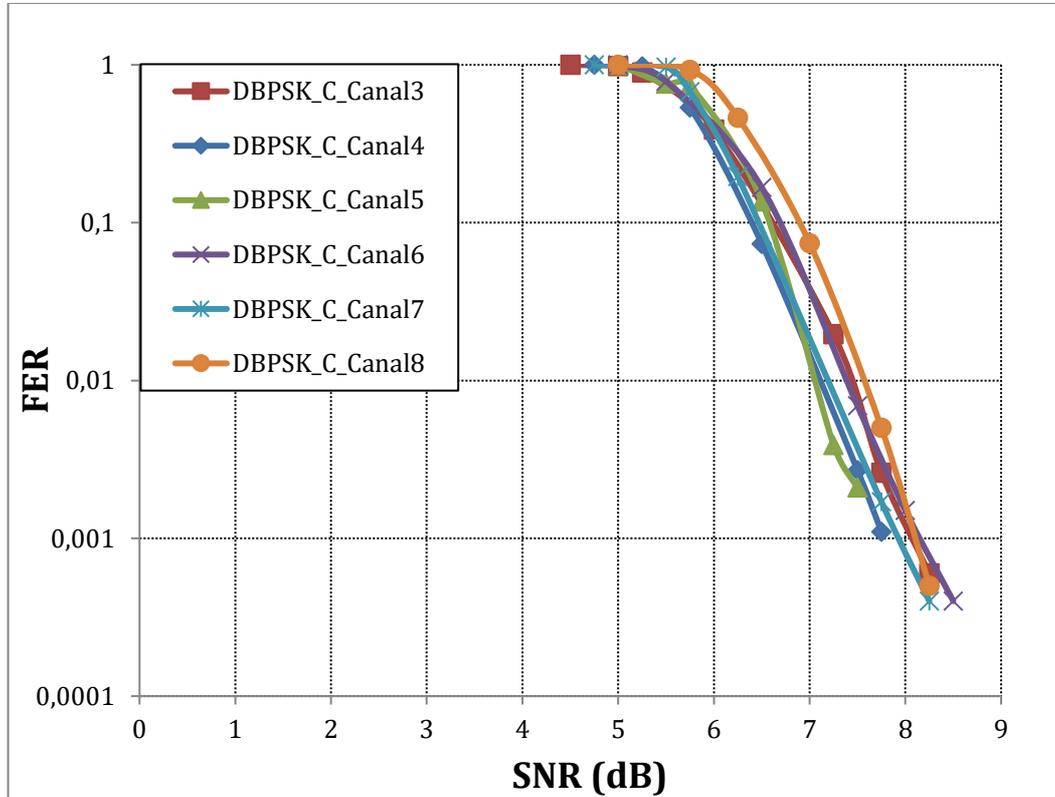


Ilustración 52. Curva de FER frente a SNR para el filtro 5500.2052 en los diferentes canales de PRIME utilizando una modulación DBPSK_C

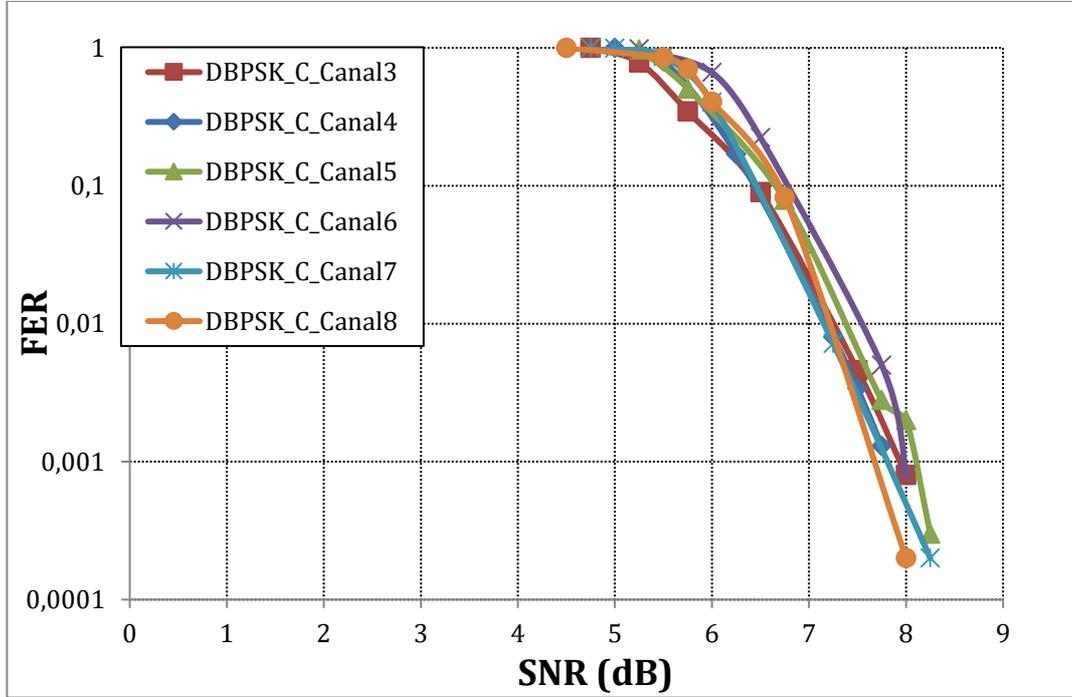


Ilustración 53. Curva de FER frente a SNR para el filtro 5500.2055 en los diferentes canales de PRIME utilizando una modulación DBPSK_C

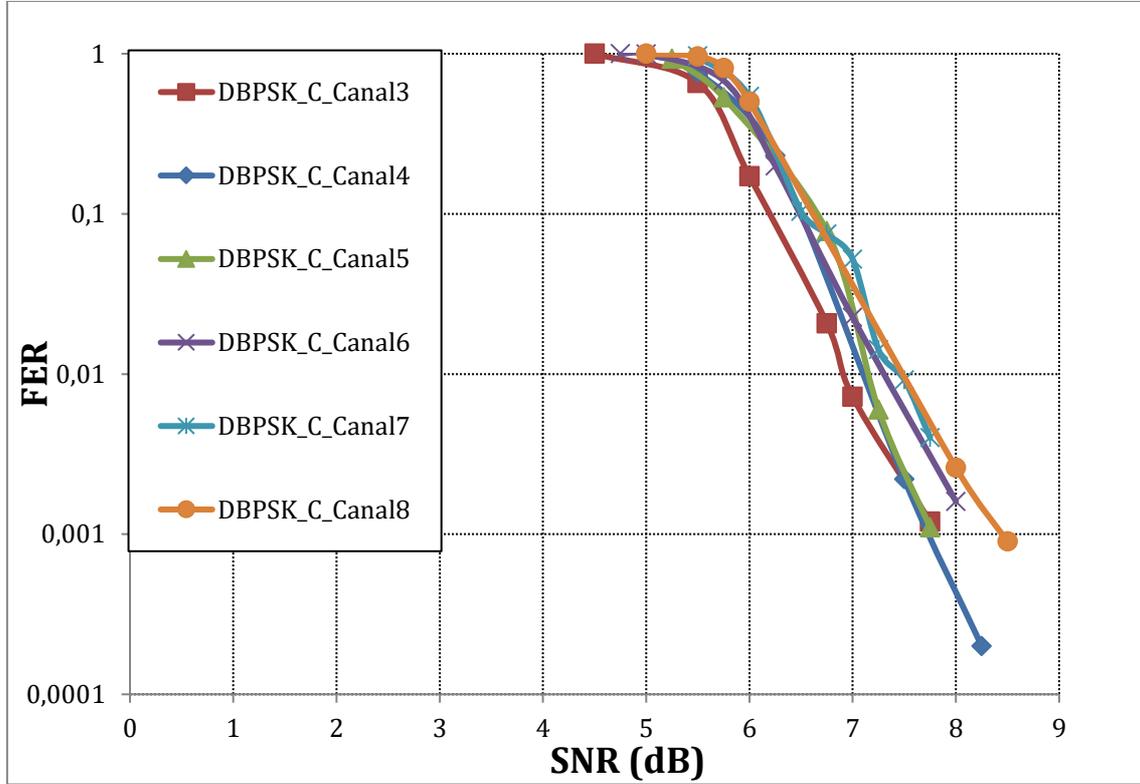


Ilustración 54. Curva de FER frente a SNR para el filtro 5500.2060 en los diferentes canales de PRIME utilizando una modulación DBPSK_C

	SNR (dB)			
	Filtro 5500.2044	Filtro 5500.2052	Filtro 5500.2055	Filtro 5500.2060
Canal 3	7,75	7,50	7,25	6,90
Canal 4	7,40	7,25	7,25	7,25
Canal 5	7,50	7,00	7,50	7,25
Canal 6	7,25	7,50	7,50	7,25
Canal 7	7,25	7,25	7,25	7,50
Canal 8	7,50	7,50	7,75	7,50

Tabla 24. Comparativa de los valores de SNR para un FER de 10^{-2} para los diferentes filtros EMC analizados para la modulación DBPSK_C

La tabla comparativa nos permite concluir que, en todos los canales, independientemente del filtro utilizado, la variación de la SNR es muy pequeña. Los valores oscilan entre los 6,9 dB y los 7,75 dB. Estos resultados son muy cercanos también a la SNR medida sin filtro EMC en el canal tres, que era de 7 dB. Por lo tanto, de la misma manera que se ha concluido en el primer canal de PRIME, las variaciones del canal no son lo suficientemente críticas como para afectar a las curvas de FER frente a SNR.

A continuación, se muestra la respuesta del canal en las diferentes frecuencias utilizando el filtro y en su ausencia. En esta segunda situación, la respuesta es totalmente plana. Con el objetivo de que la amplitud sea igual en todos los canales, se transmitirá la mínima de las potencias máximas recibida en cada uno de los canales de PRIME. En los casos que sea necesario, se introducirá atenuación.

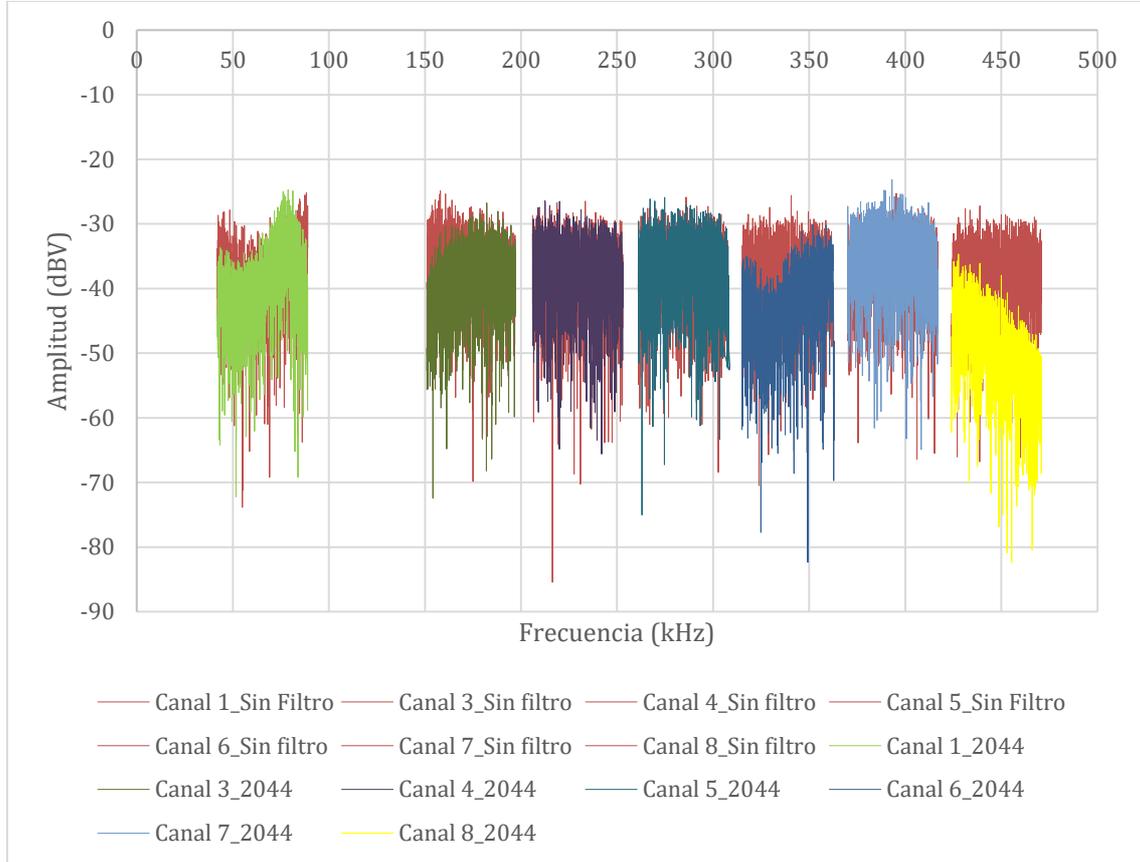


Ilustración 55. Respuesta frecuencial del canal en los diferentes rangos frecuenciales sin filtro y utilizando el filtro EMC 5500.2044

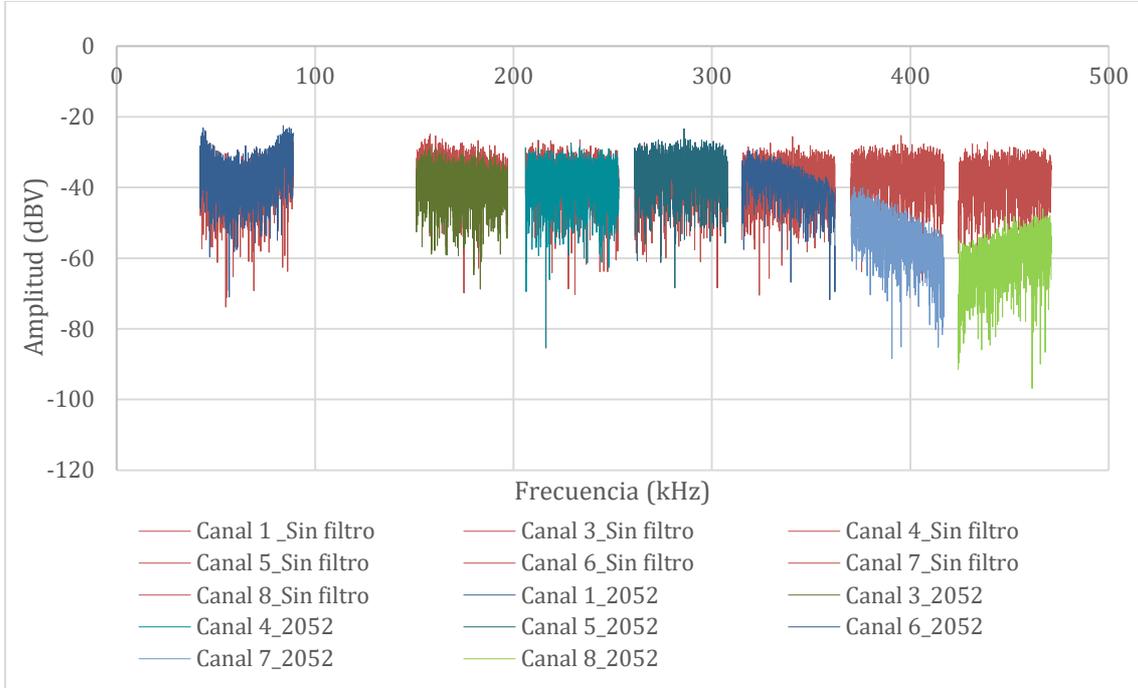


Ilustración 56. Respuesta frecuencial del canal en los diferentes rangos frecuenciales sin filtro y utilizando el filtro EMC 5500.2052

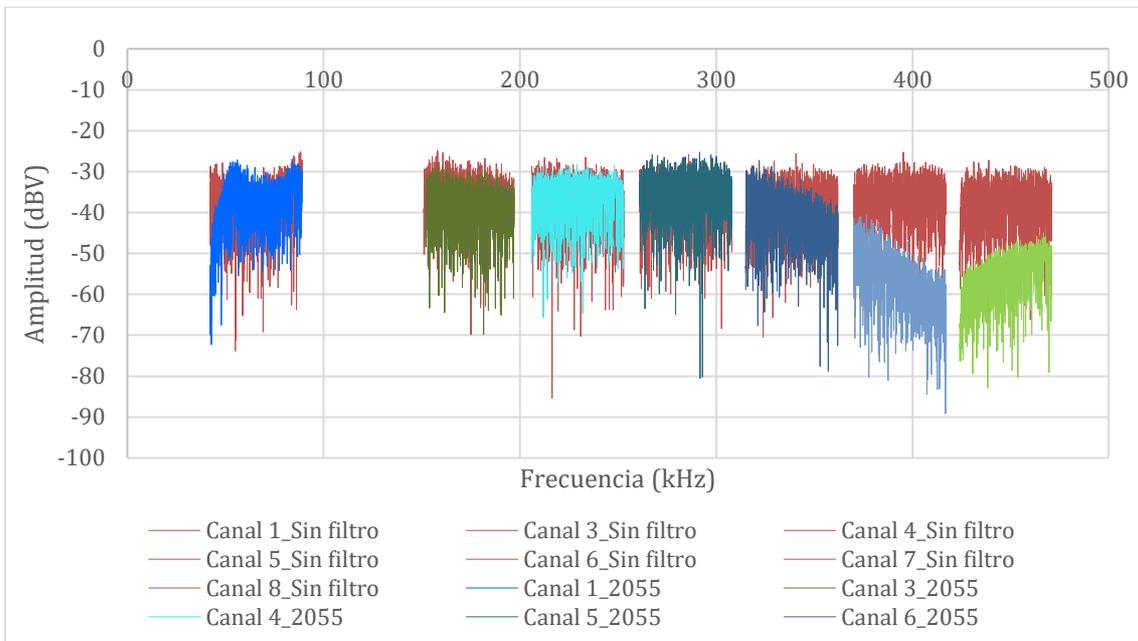


Ilustración 57. Respuesta frecuencial del canal en los diferentes rangos frecuenciales sin filtro y utilizando el filtro EMC 5500.2055

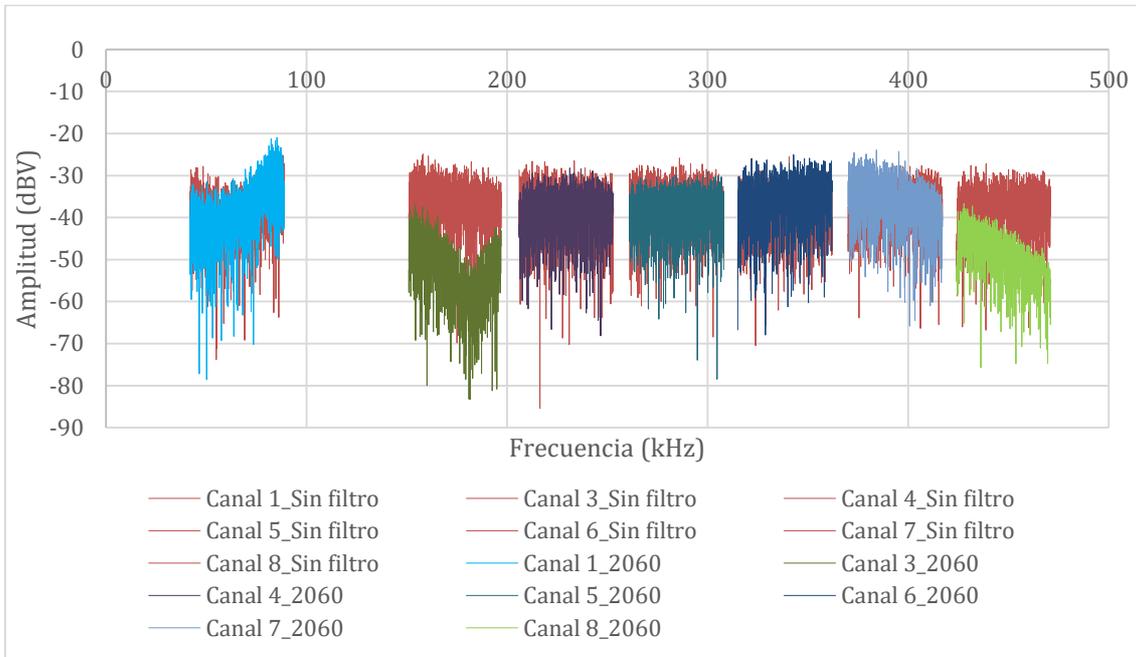


Ilustración 58. Respuesta frecuencial del canal en los diferentes rangos frecuenciales sin filtro y utilizando el filtro EMC 5500.2060

Tal y como se observa en las figuras, a pesar de que la introducción de los filtros EMC producen variaciones en la función de transferencia del canal a las diferentes frecuencias, estas variaciones no son lo suficientemente abruptas como para producir cambios significativos en los umbrales de SNR para FER 10^{-2} . Esto se debe a que el procesado de señal en el receptor, especialmente el funcionamiento del estimador de canal y el ecualizador, son capaces de deshacer los efectos de canal introducidos por el filtro EMC.

13. Conclusiones

Este trabajo permite analizar el impacto de los efectos de canal en las comunicaciones Narrowband PLC según PRIME. Con este fin, se ha calculado la atenuación introducida por los filtros EMC y se ha estimado la degradación de las curvas de FER frente a SNR en los diferentes canales del estándar.

Los artículos de investigación presentes en la bibliografía señalan que son las impedancias más bajas debidas a efectos de resonancia aquellas que más reducen el nivel de señal PLC recibido.

Los resultados obtenidos en este proyecto indican que la mayor atenuación se da cuando se cumplen dos condiciones. Por un lado, la impedancia media dentro del canal debe ser baja. Las mediciones realizadas indican que deben estar por debajo de los 6Ω , aproximadamente. Por otro lado, estos valores de impedancia bajos se deben mantener dentro del canal de comunicaciones, esto es, la desviación típica debe ser muy pequeña. Esto supone que, en el caso de obtener impedancias pequeñas por efecto de resonancias, si estos cambios son muy abruptos e incluyen valores de impedancia altos dentro del canal de comunicaciones, parece que de alguna manera se contrarresta el efecto negativo de las impedancias bajas.

El análisis de las curvas de FER frente a SNR realizado, tomando como referencia un valor de FER de 10^{-2} , permite concluir que éstas no se ven afectadas por los filtros. A pesar de que en [11] se puede observar cómo cambios muy abruptos en módulo o en fase pueden suponer un aumento en el umbral de la SNR, parece que las variaciones del canal de estos filtros no son lo suficientemente críticas para modificarlo.

En conclusión, los filtros EMC utilizados influyen sólo en atenuación, por lo que los umbrales que definen la calidad de nuestras comunicaciones no se verán perjudicados. Sin embargo, el alcance de nuestra señal puede disminuirse considerablemente, lo que implicaría reducir la distancia entre los diferentes SMs para establecer una correcta comunicación.

14. Bibliografía

- [1] N. Uribe, “Análisis de la capacidad de PRIME para gestión de red en entornos con generación distribuida y sistemas de almacenamiento”.
- [2] I. Berganza, S. Bois, A. Brunschweiler, N. Garai, I.H. Kim, A. Llano, A. Muñoz, A. Sendín, I. Urrutia, “PRIME v1.4 White Paper”, Prepared by the PRIME Alliance Technical Working Group.
- [3] V. Hugo, “Comunicaciones a través de la red eléctrica – PLC”.
- [4] I. Fernandez, N. Uribe-Pérez, I. Eizmendi, I. Angulo, D. de la Vega, A. Arrinda, T. Arzuaga. “Characterization of non-intentional emissions from distributed energy resources up to 500 kHz: a case study in Spain”.
- [5] A. Ankou, M. Arribas, A. Arzuaga, I. Berganza, G. Bertoni, P. Bisaglia, S. Bois, A. Brunschweiler, A. Cassin-Delauriere, P. Estopinan, M. Garai, S. Du, S. Garotta, I.H. Kim, A. Lasciandare, W. Liu, A. Llano, A. Lunn, S. Miguel, A. Pulkkinen, J. Rodríguez, G. Romero, A. Sánchez, A. Sanz, T. Schaub, M. Sedjaj, A. Sendín, M. Sharma, F. Tarruell, F. Tarruell, J. Teijeiro, B. Varadarajan, H. Widmer, J. Wikiera, “Specification for PowerLine Intelligent Metering Evolution”, Prepared by the PRIME Alliance Technical Working Group.
- [6] N. Uribe, I. Angulo, L. Hernández, T. Arzuaga, D. de la Vega, A. Arrinda, “Study of Unwanted Emissions in the CENELEC-A Band Generated by Distributed Energy Resources and Their Influence over Narrow Band Power Line Communications”.
- [7] G. F. Bartak, A. Abart, “EMI of Emissions in the frequency range 2 - 150 kHz”.
- [8] J. Meyer, V. Khokhlov, M. Klatt, J. Blum, C. Waniek, T. Wohlfahrt, J. Myrzik, “Overview and Classification of Interferences in the Frequency Range 2-150 kHz (Supraharmonics)”, International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, 2018.
- [9] I. Fernández, D. Roggo, R. Stiegler, L. Capponi, I. Angulo, J. Meyer, A. Arrinda, D. de la Vega, “Comparison of Measurement Methods of LV Grid Impedance between 9 kHz and 500 kHz”.
- [10] D. Roggo, “Spectral Grid Impedance and Electromagnetic Interferences in the 2 to 150 kHz frequency range”, International Journal of Distributed Energy Resources and Smart Grids, Volume 11, Number 2, pp 143-151.
- [11] A. Llano, I. Angulo, P. Angueira, T. Arzuaga, D. de la Vega, “Analysis of the Channel Influence to Power Line Communications Based on ITU-T G.9904 (PRIME)”, energies, 2011.
- [12] “Organización y dirección de Proyectos”, Apuntes Proyectos de Ingeniería, Tema 5, p.33-40.