

MÁSTER EN INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIÓN

TRABAJO DE FIN DE MÁSTER

*CREACIÓN DE UNA BASE DE DATOS DE
SEÑALES DE TEST PARA LA EVALUACIÓN DE
MÉTODOS DE MEDIDA DE SEÑALES
ELÉCTRICAS HASTA 500 KHZ*

Alumno/alumna: Andrea Martínez Zubiaurre

Director/directora: David de la Vega Moreno

Curso: 2021-2022

Fecha: 5 de septiembre de 2022

Índice

Índice de figuras.....	3
Índice de tablas.....	7
Lista de acrónimos.....	8
Resumen trilingüe.....	10
1. Introducción.....	13
2. Contexto.....	15
3. Objetivos.....	17
4. Estado del arte.....	19
4.1 Descripción de los tipos de NIE.....	19
4.2 Descripción de los protocolos PLC: PRIME y G3-PLC.....	24
4.3 Descripción de los métodos de medida.....	29
5. Metodología.....	35
6. Nuevas funcionalidades para el desarrollo de señales de test.....	36
7. Resultados.....	40
7.1 Resultados: Selección de señales grabadas.....	40
7.2 Resultados: Guía de diseño de una señal sintética.....	48
7.2.1 Análisis de la señal grabada e identificación de emisiones elementales.....	49
7.2.2 Parametrización de las emisiones elementales y generación de las señales sintéticas elementales.....	54
7.2.3 Señal sintética combinada.....	67
7.2.4 Validación de la señal sintética combinada.....	67
8. Planificación.....	70
8.1 Fases de trabajo.....	70
8.2 Gantt.....	74
9. Presupuesto.....	75
9.1 Horas internas.....	75
9.2 Costes indirectos.....	75
10. Conclusiones.....	76
11. Bibliografía.....	77
Anexo 1: Base de datos de señales sintéticas.....	80
Anexo 2: Guía de usuario del SW.....	100

Índice de figuras

<i>Figura 1: Espectrograma (izquierda) y espectro (derecha) de NIE en forma de emisiones tonales [8]</i>	20
<i>Figura 2: Espectrograma (izquierda) y espectro (derecha) de NIE en forma de armónicos de emisiones tonales [8]</i>	21
<i>Figura 3: Espectrograma (izquierda) y espectro (derecha) de NIE en forma de emisiones de banda ancha [8]</i>	21
<i>Figura 4: Espectrograma (izquierda) y espectro (derecha) de NIE en forma de ruido coloreado [8]</i>	22
<i>Figura 5: Espectrograma (izquierda) y espectro (derecha) de NIE en forma de Réplicas PLC [8]</i>	22
<i>Figura 6: Espectrograma (izquierda) y espectro (derecha) de NIE en forma de ruido impulsional [8]</i>	23
<i>Figura 7: Diagrama de bloques PRIME v1.4 y PRIME v1-3-6</i>	25
<i>Figura 8: Estructura de una trama PRIME v1.4 tipo A</i>	26
<i>Figura 9: Diagrama de bloques de G3-PLC</i>	26
<i>Figura 10: Estructura de una trama G3-PLC</i>	27
<i>Figura 11: Esquema del método de medición del Anexo B de la IEC 61000-4-7 (en azul) y la estrategia de agregación de la IEC 61000-4-30 (en naranja) [27]</i>	30
<i>Figura 12: Esquemático del procedimiento propuesto para adaptar el anexo B del método IEC 61000-4-7 al rango de frecuencia de 9 kHz a 150 kHz [27]</i>	31
<i>Figura 13: Esquema general del método Light-QP [4]</i>	33
<i>Figura 14: Modificación de los límites de los plots</i>	40
<i>Figura 15: Modificación de la respuesta impulsional</i>	41
<i>Figura 16: Espectro RMS calculado mediante el método Light-QP de la señal 'Inverter'</i>	43
<i>Figura 17: Espectro RMS calculado mediante el método Light-QP de la señal 'leaf_12A_1_oscviejo'</i>	44
<i>Figura 18: Espectro RMS calculado mediante el método Light-QP de la señal 'NIE_500_EV2_NISSAN_H2H3H5_H2'</i>	44
<i>Figura 19: Espectro RMS calculado mediante el método Light-QP de la señal 'NIE_500_EV3_CAMION75_H2H3H5_H2'</i>	45
<i>Figura 20: Espectro RMS calculado mediante el método Light-QP de la señal 'NIE_500_EV5_ZOE_H2H3H5_H5'</i>	45
<i>Figura 21: Espectro RMS calculado mediante el método Light-QP de la señal 'PV_18APEXANAUTB12230LC'</i>	46
<i>Figura 22: Espectro RMS calculado mediante el método Light-QP de la señal 'RUIDOCTAXGANERX1F1'</i>	46
<i>Figura 23: Espectro RMS calculado mediante el método Light-QP de la señal 'RUIDOCTAXGANERX5F2'</i>	47
<i>Figura 24: Espectro RMS calculado mediante el método Light-QP de la señal 'RUIDOCTEREDUNEF2'</i>	47
<i>Figura 25: Espectro RMS calculado mediante el método Light-QP de la señal 'RUIDOCTEREDUNEF3'</i>	48
<i>Figura 26: Espectro RMS calculado mediante el método Light-QP de la señal 'RUIDOCTOLARETXEF2'</i>	48

Figura 27: Espectro RMS calculado con la primera etapa del método Light-QP de la señal 'RUIDOCTAXGANERX1F1'	49
Figura 28: Espectrograma de la señal 'RUIDOCTAXGANERX1F1'	49
Figura 29: Espectro de la señal 'RUIDOCTAXGANERX1F1' que contiene emisiones tonales	50
Figura 30: Espectrograma de la señal 'RUIDOCTAXGANERX1F1' que contiene emisiones tonales	51
Figura 31: Espectro de la señal 'RUIDOCTAXGANERX1F1' que contiene una emisión PLC	51
Figura 32: Espectrograma de la señal 'RUIDOCTAXGANERX1F1' que contiene emisiones PLC	52
Figura 33: Espectro de la señal 'RUIDOCTAXGANERX1F1' que contiene una emisión de banda ancha	52
Figura 34: Espectrograma de la señal 'RUIDOCTAXGANERX1F1' que contiene emisiones de banda ancha	53
Figura 35: Espectro de la señal 'RUIDOCTAXGANERX1F1' que contiene ruido impulsional	53
Figura 36: Espectrograma de la señal 'RUIDOCTAXGANERX1F1' que contiene ruido impulsional	54
Figura 37: Espectro de la señal 'RUIDOCTAXGANERX1F1' que contiene réplicas PLC	54
Figura 38: Conjunto de emisiones tonales que conforman la señal 'RUIDOCTAXGANERX1F1'	58
Figura 39: Ruido coloreado de la señal 'RUIDOCTAXGANERX1F1'	61
Figura 40: Espectro calculados a partir de la primera etapa del método Light-QP de 'SYN_RUIDOCTAXGANERX1F1'	67
Figura 41: Espectro calculados a partir de la primera etapa del método Light-QP de 'RUIDOCTAXGANERX1F1'	67
Figura 42: Espectrograma de la señal 'SYN_RUIDOCTAXGANERX1F1'	68
Figura 43: Espectrograma de la señal 'RUIDOCTAXGANERX1F1'	68
Figura 44: Gantt del proyecto	70
Figura 45: Espectro de la señal 'Inverter'	77
Figura 46: Espectro de la señal 'SYN Inverter'	77
Figura 47: Espectrograma de la señal 'Inverter'	78
Figura 48: Espectrograma de la señal 'SYN_Inverter'	78
Figura 49: Espectro de la señal 'leaf_12A_1_oscviejo'	79
Figura 50: Espectro de la señal 'SYN_leaf_12A_1_oscviejo'	79
Figura 51: Espectrograma de la señal 'leaf_12A_1_oscviejo'	80
Figura 52: Espectrograma de la señal 'SYN_leaf_12A_1_oscviejo'	80
Figura 53: Espectro de la señal 'NIE_500_EV2_NISSAN_H2H3H5_H2'	81
Figura 54: Espectro de la señal 'SYN_NIE_500_EV2_NISSAN_H2H3H5_H2'	81
Figura 55: Espectrograma de la señal 'NIE_500_EV2_NISSAN_H2H3H5_H2'	82
Figura 56: Espectrograma de la señal 'SYN_NIE_500_EV2_NISSAN_H2H3H5_H2'	82
Figura 57: Espectro de la señal 'NIE_500_EV3_CAMION75_H2H3H5_H2'	83
Figura 58: Espectro de la señal 'SYN_NIE_500_EV3_CAMION75_H2H3H5_H2'	83
Figura 59: Espectrograma de la señal 'NIE_500_EV3_CAMION75_H2H3H5_H2'	84
Figura 60: Espectrograma de la señal 'SYN_NIE_500_EV3_CAMION75_H2H3H5_H2'	84
Figura 61: Espectro de la señal 'NIE_500_EV5_ZOE_H2H3H5_H5'	85

<i>Figura 62: Espectro de la señal 'SYN_NIE_500_EV5_ZOE_H2H3H5_H5'</i>	85
<i>Figura 63: Espectrograma de la señal 'NIE_500_EV5_ZOE_H2H3H5_H5'</i>	86
<i>Figura 64: Espectrograma de la señal 'SYN_NIE_500_EV5_ZOE_H2H3H5_H5'</i>	86
<i>Figura 65: Espectro de la señal PV-N18APEXANAUTB12230LC</i>	87
<i>Figura 66: Espectro de la señal 'SYN_PV-N18APEXANAUTB12230LC'</i>	87
<i>Figura 67: Espectrograma de la señal PV-N18APEXANAUTB12230LC</i>	88
<i>Figura 68: Espectrograma de la señal 'SYN_PV-N18APEXANAUTB12230LC'</i>	88
<i>Figura 69: Espectro de la señal 'RUIDOCTAXGANERX5F2'</i>	89
<i>Figura 70: Espectro de la señal 'SYN_RUIDOCTAXGANERX5F2'</i>	89
<i>Figura 71: Espectrograma de la señal 'RUIDOCTAXGANERX5F2'</i>	90
<i>Figura 72: Espectrograma de la señal 'SYN_RUIDOCTAXGANERX5F2'</i>	90
<i>Figura 73: Espectro de la señal 'RUIDOCTEREDUNEF2'</i>	91
<i>Figura 74: Espectro de la señal 'SYN_RUIDOCTEREDUNEF2'</i>	91
<i>Figura 75: Espectrograma de la señal 'RUIDOCTEREDUNEF2'</i>	92
<i>Figura 76: Espectrograma de la señal 'SYN_RUIDOCTEREDUNEF2'</i>	92
<i>Figura 77: Espectro de la señal 'RUIDOCTEREDUNEF3'</i>	93
<i>Figura 78: Espectro de la señal 'SYN_RUIDOCTEREDUNEF3'</i>	93
<i>Figura 79: Espectrograma de la señal 'RUIDOCTEREDUNEF3'</i>	94
<i>Figura 80: Espectrograma de la señal 'SYN_RUIDOCTEREDUNEF3'</i>	94
<i>Figura 81: Espectro de la señal 'RUIDOCTOLARETXEF2'</i>	95
<i>Figura 82: Espectro de la señal 'SYN_RUIDOCTOLARETXEF2'</i>	95
<i>Figura 83: Espectrograma de la señal 'RUIDOCTOLARETXEF2'</i>	96
<i>Figura 84: Espectrograma de la señal 'SYN_RUIDOCTOLARETXEF2'</i>	96
<i>Figura 85: Menú del SW</i>	97
<i>Figura 86: Parámetros para la generación del AWGN</i>	98
<i>Figura 87: Pestaña de comando en el momento de la ejecución</i>	98
<i>Figura 88: Espectro del conjunto de emisiones tonales de la señal 'SYN_RUIDOCTAXGANERX1F1' calculado a partir de los métodos IEC 61000-4-7 y Light-QP (primera etapa) y las señales de referencia para ResBW 200 Hz y 1 Hz</i>	99
<i>Figura 89: Número de formas de onda que conforman el ruido coloreado</i>	100
<i>Figura 90: Parámetros para la generación del AWGN</i>	100
<i>Figura 91: Espectro del AWGN (RMS) y sus valores máximos y mínimos calculados a partir de los métodos IEC 61000-4-7 y Light-QP (primera etapa)</i>	101
<i>Figura 92: Comprobación de que la señal se ha generado correctamente</i>	101
<i>Figura 93: Pestaña de inicio de filtrado</i>	102
<i>Figura 94: Parámetros del filtro</i>	102
<i>Figura 95: Espectro de la primera forma de onda</i>	103
<i>Figura 96: Menú de inicio de filtrado</i>	103
<i>Figura 97: Ruido coloreado de la señal 'SYN_RUIDOCTAXGANERX1F1'</i>	104
<i>Figura 98: Parámetros del estándar PLC PRIME</i>	105
<i>Figura 99: Espectro del burst PLC según el estándar PRIME calculado a partir de los métodos IEC 61000-4-7 y Light-QP (primera etapa) y su señal de referencia</i>	106
<i>Figura 100: Señal de referencia del burst PLC según el estándar PRIME</i>	106
<i>Figura 101: Comprobación de que la señal se ha generado correctamente</i>	107
<i>Figura 102: Parámetros del filtro</i>	107
<i>Figura 103: Menú de inicio de filtrado</i>	107
<i>Figura 104: Espectro del burst PLC según el estándar PRIME calculado a partir de los métodos IEC 61000-4-7 y Light-QP (primera etapa) y su señal de referencia</i>	108

<i>Figura 105: Parámetros para la generación del AWGN</i>	109
<i>Figura 106: Parámetros para la generación del AWGN</i>	109
<i>Figura 107: Número de formas de onda</i>	110
<i>Figura 108: Nombre de la señal sintética</i>	110
<i>Figura 109: Espectro de la señal 'SYN_RUIDOCTAXGANERX1F1' calculado a partir del método IEC 61000-4-7 y de la señal de referencia</i>	111
<i>Figura 110: Espectro de la señal de referencia de 'SYN_RUIDOCTAXGANERX1F1'</i>	111
<i>Figura 111: Menú del botón 'Add multiple synthetic signals'</i>	112
<i>Figura 112: Espectros solapados de la señal grabada y la sintética calculados a partir de los métodos IEC 61000-4-7 y Light-QP (primera etapa) y la señal de referencia (ResBW 200 Hz)</i>	112
<i>Figura 113: Espectros solapados de la señal grabada y la sintética calculados a partir del método CISPr 16 y la señal de referencia (ResBW 200 Hz)</i>	113

Índice de tablas

Tabla 1.	Comparativa de protocolos PLC PRIME y G3-PLC	28
Tabla 2.	Información de configuración de G3-PLC	38
Tabla 3.	Emisiones que contienen las once señales grabadas.....	41
Tabla 4.	Parámetros para generar las emisiones tonales de ‘RUIDOCTAXGANERX1F1’ 55	
Tabla 5.	Parámetros correspondientes a cada tipo de emisión tonal.....	56
Tabla 6.	Parámetros para generar el ruido coloreado de ‘RUIDOCTAXGANERX1F1’	60
Tabla 7.	Parámetros para la generación de las ráfagas PLC de ‘RUIDOCTAXGANERX1F1’	62
Tabla 8.	Característica del filtro paso-banda Butterworth IIR.....	62
Tabla 9.	Parámetros para generar las réplicas PLC de ‘RUIDOCTAXGANERX1F1’	65
Tabla 10.	Parámetros tiempo final e inicial de las réplicas PLC de ‘RUIDOCTAXGANERX1F1’	65
Tabla 11.	Parámetros para generar el ruido impulsional de ‘RUIDOCTAXGANERX1F1’ ..	66
Tabla 12.	Parámetros tiempo final e inicial de las ráfagas de ruido impulsional de ‘RUIDOCTAXGANERX1F1’	66
Tabla 13.	Fases de trabajo.....	71
Tabla 14.	Hitos del proyecto.....	73
Tabla 15.	Presupuesto: horas internas.....	75
Tabla 16.	Presupuesto: costes indirectos.....	75

Lista de acrónimos

AMI	Advanced Metering Infrastructure
AMR	Automatic Meter Reading
AWGN	Additive White Gaussian Noise
BPL	Broadband PLC
CEN	Comité Europeo de Normalización
CENELEC	Comité Europeo para la Normalización Electrotécnica
CL	Compatibility Level
D8PSK	Differential 8-Phase Shift Keying
DER	Distributed Energy Resources
DBPSK	Differential Binary Phase Shift Keying
DFT	Discrete Fourier Transform
DQPSK	Differential Quadrature-Phase Shift Keying
DSO	Distribution System Operator
EMC	Electromagnetic Compatibility
EMI	Electromagnetic Interference
ETSI	Instituto Europeo de Normas de Telecomunicaciones
EV	Electric Vehicle
FEC	Forward Error Correction
FEC-RC	Forward Error Correction Repetition Code
NIE	Non Intentional Emissions
NB-PLC	Narrowband PLC
OFDM	Orthogonal Frequency-Division Multiplexing
PLC	Power Line Communications

PRIME	PowerLine Intelligent Metering Evolution
PSD	Power Spectral Density
QP	Quasi-Peak
ResBW	Resolution Bandwidth
RMS	Root Mean Square
SNR	Signal to Noise Ratio
STFT	Short-time Fourier Transform
UNB-PLC	Ultra Narrowband PLC

Resumen trilingüe

La red eléctrica es un medio hostil debido a su carácter cambiante y a las perturbaciones que aparecen por los dispositivos conectados a la red, que pueden degradar gravemente la calidad de las comunicaciones. Por ello, la identificación y caracterización de estas perturbaciones es esencial para asegurar el correcto funcionamiento de las comunicaciones PLC.

Hoy en día no existe un método de medida de NIE normativo para frecuencias superiores a 9 kHz y por el momento sólo hay propuestas de métodos. Como es de esperar, existe una gran desviación en los resultados proporcionados por las diferentes propuestas de métodos de medida debido a las diferentes técnicas que se utilizan en el procesado. En estudios anteriores, estas desviaciones se han analizado empleando señales de test simples cuya forma espectral dista de las emisiones que se ven en la red eléctrica.

En este Trabajo de Fin de Máster se propone el desarrollo, la implementación y validación de señales de test sintéticas que contienen fenómenos similares a las perturbaciones presentes en la red, para el rango de 2 kHz a 500 kHz, con valores de amplitud conocidos que podrán ser utilizadas para evaluar la precisión de los métodos de medida. Estas señales de test se han implementado empleando un software heredado que permite simular señales de test sintéticas, al que se le han añadido nuevas funcionalidades que permiten generar nuevos tipos de señales elementales, en concreto señales según el estándar G3-PLC y ruido impulsional. A su vez, se han extendido todos los algoritmos hasta 500 kHz, lo que permite caracterizar la red eléctrica hasta esa frecuencia.

Finalmente, se ha creado una base de datos conformada por once señales de test sintéticas similares a grabaciones de la red que han sido seleccionadas previamente. Estas grabaciones proceden de diferentes fuentes y contienen una gran variedad de tipos de emisiones, que son inyectadas a la red por distintos dispositivos electrónicos.

The electrical network is a hostile environment due to its changeable nature and the disturbances caused by the devices connected to the network, which can seriously degrade the quality of communications. For this reason, it is important to characterize the disturbances existing on the network. Therefore, the identification and characterization of these disturbances are important aspects to ensure the correct operation of PLC communications.

Today there is no normative NIE measurement method for frequencies above 9 kHz and at the moment there are only proposed methods. As expected, there is a large deviation in the results provided by the different measurement method proposals due to the different techniques used in the processing. In previous studies, these deviations have been analyzed using simple test signals whose spectral shape is far from the emissions seen in the power grid.

In this Master Thesis, we propose the development, implementation and validation of synthetic test signals containing phenomena similar to the disturbances present in the grid, for the range from 2 kHz to 500 kHz, with known amplitude values that can be used to evaluate the accuracy of the measurement methods. These test signals have been implemented using legacy software to simulate synthetic test signals, to which new functionalities have been added to generate new types of elementary signals, namely signals according to the G3-PLC standard and impulse noise. At the same time, all the algorithms have been extended up to 500 kHz, which allows characterizing the electrical network up to that frequency.

Finally, a database has been created consisting of eleven synthetic test signals similar to previously selected recordings of the network. These recordings come from different sources and contain a wide variety of emission types, which are injected into the grid by different electronic devices.

Sare elektrikoa etsaitasunezko bitartekoa da, aldakorra delako eta sarera konektatutako gailuek asaldurak sortzen dituztelako, komunikazioen kalitatea larriki degradatu dezaketelako. Horregatik, garrantzitsua da sarean dauden perturbazioak ezaugarritzea. Horregatik, PLC komunikazioek behar bezala funtzionatzen dutela ziurtatzeko, garrantzitsua da asaldura horiek identifikatzea eta ezaugarritzea.

Gaur egun ez dago nahi gabeko emisioak arauemailea neurtzeko metodorik 9 kHz-tik gorako maiztasunetarako, eta oraingo metodo-proposamenak baino ez daude. Espero denez, desbideratze handia dago neurketa-metodoen proposamenek emandako emaitzetan, prozesatzean erabiltzen diren teknika desberdinak direla eta. Aurreko azterketetan, desbideratze horiek aztertzeko, test-seinale sinpleak erabili dira, sare elektrikoan ikusten diren emisioetatik urrun daudenak.

Master Amaierako Lan honetan, sarean dauden perturbazioen antzeko fenomenoak dituzten test sintetikoen seinaleak garatzea, implementatzea eta baliozkotzea proposatzen da, 2 kHz-tik 500 kHz-ra bitarteko tartetarako, neurketa-metodoen zehaztasuna ebaluatzeko erabili ahal izango diren anplitude-balio ezagunekin. Test-seinale horiek software heredatu bat erabiliz implementatu dira. Software horrek test-seinale sintetikoak simulatzea ahalbidetzen du, eta oinarrizko seinale mota berriak sortzeko aukera ematen duten funtzionaltasun berriak gehitu zaizkio, zehazki, G3-PLC estandarraren arabeko seinaleak eta zarata inpultsionala. Era berean, algoritmo guztiak 500 kHz-raino zabaldu dira, eta, horri esker, sare elektrikoa maiztasun horretara arte karakterizatu daiteke.

Azkenik, datu-base bat sortu da, aldeztu aurretik hautatu diren sareko grabazioen antzeko hamaika test-seinale sintetikoz osatua. Grabazio horiek hainbat iturritatik datoz eta emisio mota ugari dituzte, hainbat gailu elektronikok sarera injektatzen dituztenak.

1. Introducción

Durante esta última década, el modelo de generación y consumo de energía ha cambiado de manera drástica. Hasta hace unos años, las grandes compañías eléctricas eran las encargadas tanto de la producción como de la distribución de la energía. Es decir, los roles de consumidor y de productor estaban perfectamente definidos. En cambio, durante estos últimos años se ha visto una tendencia en alza en la que los consumidores tradicionales se han convertido en productores de energía, por ejemplo, a través de placas fotovoltaicas. Este nuevo modelo de energía ha provocado una necesidad de modernizar la red eléctrica, permitiendo una tele gestión de todos los dispositivos conectados a la red. A esta nueva red se le denomina *Smart Grid*.

La evolución de la red eléctrica tradicional a la nueva red inteligente presenta muchos desafíos. Uno de los principales desafíos es la necesidad de una buena red de comunicación para la gestión telemática en tiempo real de todos los dispositivos conectados a la red. La solución más utilizada por las compañías de distribución eléctrica es la tecnología Power Line Communication (PLC), que utiliza la propia red eléctrica como medio de comunicación. Las tecnologías PLC presentan numerosas ventajas económicas y técnicas para una amplia gama de aplicaciones, pero también deben enfrentarse a las dificultades de propagación de las señales por las redes eléctricas, debido a que los cables fueron diseñados únicamente para transmitir electricidad, en lugar de datos. Por este motivo son un tema de investigación importante dentro de las Smart Grids.

El ancho de banda es el criterio más utilizado para clasificar las diferentes tecnologías PLC en tres categorías diferentes: Ultra Narrowband PLC (UNB-PLC), Narrowband PLC (NB-PLC), and Broadband PLC (BPL). La tecnología NB-PLC se utiliza actualmente para la medición de la calidad de la energía, también llamado *Smart Metering*, como parte del concepto de Smart Grids. En Europa, su rango de frecuencia comprende desde 9 kHz hasta 150 kHz, pero estos últimos años ha habido un creciente interés en Europa por ampliar el rango de frecuencias para NB-PLC hasta 500 kHz con la finalidad de aumentar la capacidad frecuencial para las comunicaciones.

La red eléctrica es un medio hostil para las comunicaciones PLC, debido a las variaciones en las propiedades del medio de transmisión causadas por la conexión y desconexión continua de cargas y a una gran variedad de ruidos y emisiones no intencionadas (NIE) que generan interferencias electromagnéticas (EMI) en las comunicaciones. Estas perturbaciones son principalmente emisiones causadas por dispositivos electrónicos basados en inversores, como cargadores de vehículos eléctricos, inversores fotovoltaicos o cargadores de baterías.

El incremento de dispositivos electrónicos conectados a la red eléctrica está aumentando los niveles de emisiones interferentes a lo largo de la red eléctrica. Estas NIE pueden degradar gravemente la calidad de las comunicaciones o incluso aislar los dispositivos de transmisión. Por ello, la identificación y caracterización de estas perturbaciones son aspectos esenciales para el correcto funcionamiento de los servicios de redes inteligentes basadas en PLC.

Lo anteriormente expuesto muestra la necesidad de recopilar mediciones de NIE en condiciones reales de la red en diferentes entornos, que proporcionen datos de la magnitud

y los patrones de las emisiones presentes en la red, y así evaluar el impacto de estas emisiones en NB-PLC.

Para las frecuencias inferiores a 2 kHz, la forma de caracterizar las emisiones en la red está debidamente regulada por normas regionales y nacionales. En cambio, debido a la presencia limitada de NIE en el rango frecuencial de 9 kHz a 150 kHz, no existe un marco regulador obligatorio para dichas frecuencias. Varios grupos de trabajo de diferentes organizaciones europeas e internacionales están abordando actualmente este tema. Hasta el momento, existen tres propuestas de métodos de medida de NIE que están recogidas en el anexo C.3 de la Norma IEC 61000-4-30 [1].

Uno de los métodos en estudio es el de la Norma CISPR 16 (CISPR 16-1-1 y CISPR 16-1-2). Esta norma CISPR tiene el inconveniente de estar diseñada para condiciones de laboratorio y, por tanto, no para los ensayos de campo. Una segunda propuesta en estudio consiste en extender el método de la Norma IEC 61000-4-7:2002 anexo B [2] desde el límite actual de 9 kHz hasta un límite de 150 kHz. La última propuesta viene descrita en el anexo C.3 en la propia Norma IEC 61000-4-30. Estas dos últimas propuestas son métodos que proporcionan resultados en forma de valores RMS, en lugar de valores QP (quasi-peak), por lo que no permiten evaluar si las emisiones superan los niveles de compatibilidad establecidos por el estándar IEC 61000-2-2 [3].

El grupo de investigación TSR de la UPV/EHU ha propuesto un método de medida llamado Light-QP [4], que proporciona valores quasi-peak en la banda de frecuencia de 9 kHz a 150 kHz. Este método de medida está adaptado para medidas en red y requiere menores recursos de memoria y de cálculo que el de la Norma CISPR 16.

Dentro de este escenario en el que aún no se ha seleccionado un método estándar y hay varios candidatos, es necesario evaluar la precisión de los métodos de medida que se han mencionado, al igual que los métodos o estándares de medida que se desarrollen en un futuro para determinar si los valores que se obtienen de dichos métodos son los reales.

Por tanto, surge la necesidad de desarrollar un conjunto amplio de señales de test cuyo valor espectral de potencia sea conocido, que incluyan diferentes patrones frecuenciales y temporales de las emisiones presentes en la red eléctrica, que sirvan para evaluar la precisión de diferentes métodos de medida de las perturbaciones en la red eléctrica.

2. Contexto

La red eléctrica es un entorno hostil para las comunicaciones. Este problema ha llevado al desarrollo de estudios de investigación en la última década, destinados a caracterizar las propiedades de propagación de la red. En cuanto a las perturbaciones generadas por las emisiones no intencionadas (NIE), uno de los principales aspectos a resolver es que no existe un método de medición de uso obligatorio para frecuencias superiores a 9 kHz. En consecuencia, los resultados proporcionados por los diferentes métodos de medición existentes tienen una considerable desviación, debido a las diferentes técnicas de procesamiento propuestas en cada uno de los métodos.

Un papel fundamental en la comparación de los métodos de medición lo desempeñan las señales de test que se emplean en la evaluación de dichos métodos. Las desviaciones en los resultados proporcionados por los métodos de medición mencionados se han analizado en estudios anteriores con grabaciones en la red eléctrica y señales sintéticas simples creadas con funciones sinusoidales de una sola frecuencia de amplitud constante o variable [5]-[6]. Esto es apropiado para evaluar la precisión de la amplitud de frecuencias específicas en condiciones de laboratorio, pero dista mucho de ser una fiel representación de la distorsión que puede encontrarse en la red eléctrica.

El Grupo de investigación TSR de la UPV/EHU trabaja, dentro de una de sus líneas de investigación, en el desarrollo de nuevos métodos de medida y en la evaluación de la precisión de dichos métodos. La línea de trabajo anterior requiere del uso de señales de test en las que sus amplitudes sean conocidas para así poder evaluar la precisión de los métodos de medida.

El Grupo TSR desarrolló hace dos años dos métodos complementarios para el desarrollo de nuevas señales de test configurables, para el rango frecuencial de 2 kHz a 150 kHz, de complejidad similar a las emisiones que se pueden encontrar en la red eléctrica. Para ello, como paso previo se realizó un detallado trabajo de identificación y caracterización de los tipos de emisión en la red [7]-[8]. Cada una de esas emisiones individuales puede replicarse mediante uno de los dos métodos desarrollados por el Grupo TSR. Una vez creadas las señales sintéticas individuales, las salidas de ambos métodos pueden combinarse sumando las dos señales en el dominio del tiempo, y sus correspondientes valores teóricos de PSD (Power Spectral Density).

El primer método consiste en generar las formas de onda relacionadas con el NIE causadas por los equipos conectados a la red. Estas señales son generadas con Ruido Blanco Gaussiano Aditivo (AWGN) y posteriormente, son filtradas para lograr la forma espectral deseada. El segundo método consiste en replicar las emisiones de las transmisiones PLC, que son generadas por los contadores inteligentes instalados en la red; estas señales se crean sintéticamente a partir de codificación polar ya que estas comunicaciones se basan en la multiplexación por división de frecuencia ortogonal (OFDM). A su vez, se seleccionaron un conjunto de señales representativas grabadas en la red eléctrica y se implementaron señales de test con esos patrones en los dominios temporal y frecuencial, para el rango 2 kHz-150 kHz.

Las señales sintéticas de test están formadas por señales individuales simples que son configuradas y generadas por separado. Una vez se han generado esas señales elementales, se combinan para formar señales complejas similares a las presentes en la red eléctrica.

El Grupo TSR anteriormente ha generado e implementado señales elementales, entre ellas señales PLC PRIME [9]. Ahora, se plantea la simulación de señales PLC según el estándar G3-PLC [10]. Asimismo, se requiere de nuevas señales elementales que no han sido generadas ni implementadas previamente por el grupo TSR, que incluyan nuevos patrones frecuenciales, cubriendo así una casuística de emisiones mayor.

Como ya se ha comentado, hay un creciente interés en Europa por ampliar el rango de frecuencias para NB-PLC hasta 500 kHz. Por lo tanto, la caracterización de la red eléctrica como medio de propagación para la transmisión de datos debe evaluarse hasta los 500 kHz. Por ello, el Grupo TSR plantea extender todos los algoritmos de generación de señales de test hasta 500 kHz.

En resumen, se plantea la generación e implementación de un conjunto de señales de test más complejas hasta 500 kHz, que contengan fenómenos no generados por TSR hasta ahora, similares a las observadas en la red eléctrica. De igual modo, se debe tener en cuenta situaciones relevantes, como las emisiones de cargadores de vehículo eléctrico o placas fotovoltaicas a la hora de generar las señales.

3. Objetivos

Este Trabajo de Fin de Máster tiene como objetivo generar señales de prueba, con mayores prestaciones que las desarrolladas anteriormente por el Grupo TSR, con valores de referencia de amplitud teórica que son representativos del contenido de frecuencia de la red eléctrica. Los parámetros como la frecuencia central, el ancho de banda y la amplitud de las emisiones podrán ajustarse para que las señales sean similares a los registros de la red eléctrica.

Este trabajo propone la creación, implementación y validación de señales sintéticas de test que contienen fenómenos complejos en tiempo y frecuencia, similares a las perturbaciones presentes en la red eléctrica, desde 2 kHz hasta 500 kHz, que serán utilizadas como señales de referencia de valores de amplitud conocidos para evaluar la precisión de los métodos de medición. Para ello, se han seleccionado previamente once señales grabadas de la red eléctrica que serán replicadas combinando señales elementales ya generadas por TSR con las nuevas señales elementales que se generen en este trabajo.

En concreto, para generar las señales de test se deben de llevar a cabo estas tareas:

- Extender los algoritmos ya implementados por el Grupo TSR hasta 500 kHz. Los códigos a modificar son los siguientes:
 - Algoritmo de generación de señales PRIME
 - Algoritmo de generación de ruido coloreado
 - Algoritmo de generación de tonos simples
- Desarrollar un código específico en MATLAB para generar las nuevas señales elementales
 - Código específico para las comunicaciones G3-PLC
 - Código específico para el ruido impulsional
- Parametrizar las once señales grabadas de la red eléctrica
 - Fijar los parámetros de amplitud, frecuencia central y ancho de banda entre otros
 - En el caso de las señales PLC, PRIME y G3-PLC, fijar los parámetros de tiempo inicial y final de cada portadora
- Crear una base de datos conformada por las réplicas de las once señales seleccionadas, que serán generadas combinando las señales elementales necesarias. Las once señales a replicar corresponden con siete señales grabadas en la red de distribución eléctrica, una señal grabada directamente de un panel fotovoltaico y tres señales grabadas de puntos de carga de vehículos eléctricos. Siguiendo la nomenclatura utilizada por el grupo de investigación, las señales son las siguientes:
 - Inverter
 - leaf_12A_1_oscviejo
 - NIE_500_EV2_NISSAN_H2H3H5_H2
 - NIE_500_EV3_CAMION75_H2H3H5_H2
 - NIE_500_EV5_ZOE_H2H3H5_H5

- PV-N18APEXANAUTB12230LC
 - RUIDOCTAXGANERX1F1
 - RUIDOCTAXGANERX5F2
 - RUIDOCTEREDUNEF2
 - RUIDOCTEREDUNEF3
 - RUIDOCTOLARETXEF2
- Validar las señales de test generadas
 - Solapar los espectros de las señales de test sintéticas y de las señales originales grabadas en la red
 - Comprobar los espectrogramas de las señales de test sintéticas y de las señales originales grabadas en la red

Una vez se hayan cumplido con las tareas anteriores, se entregarán los siguientes entregables:

- Entregable 1: Código en MATLAB para generar las señales G3-PLC y el ruido impulsional
- Entregable 2: Ficheros Excel y de texto que contienen los parámetros de las señales de la red
- Entregable 3: Señales elementales que conforman cada una de las once señales sintéticas de test
- Entregable 4: Espectro solapado de la señal sintética y la señal medida en la red, y espectrogramas tanto de la señal medida en la red como de la sintética

4. Estado del arte

En este apartado se incluye en primer lugar una descripción de los tipos de NIE que posteriormente se van a generar empleando el software en MATLAB. En segundo lugar, se da una breve descripción teórica de dos protocolos PLC: PRIME y G3-PLC. Por último, se da una descripción detallada de los métodos de medida que se emplean para calcular los espectros de las señales en este proyecto.

4.1 Descripción de los tipos de NIE

El aumento de dispositivos electrónicos conectados a la red eléctrica está afectando a los niveles de emisiones conducidas a lo largo de la red. Algunas de las fuentes de estas emisiones no intencionadas (NIE) están relacionadas con el despliegue de recursos energéticos distribuidos (DER) y cargadores de vehículos eléctricos (EV) a través de la red de distribución. Los niveles de tensión por encima de los niveles de compatibilidad aumentan el riesgo de interferencia para los equipos conectados a la red.

Para frecuencias superiores a 2 kHz, el crecimiento de NIE de gran nivel y larga duración, que se propagan a través de los cables eléctricos, puede reducir la extensión de la vida útil de los dispositivos conectados a la red. Además, estas emisiones pueden causar graves interferencias en los datos transmitidos.

Con el fin de fomentar la investigación sobre este tema, varios grupos de trabajo en curso de diferentes organizaciones europeas e internacionales están abordando actualmente estos temas: entre otros CENELEC SC205 [11], el grupo IEC SC 77A [12], el grupo IEEE EMC Society TC7 [13], IEEE P1250 (Power and Energy Society) [14] y el grupo de trabajo CIGRE-CIRED C4.24 [15]. El IEC ha creado recientemente un grupo de trabajo conjunto de IEC SC77A y CISPR SC/H, con el objetivo de definir los requisitos para la regulación de las emisiones en frecuencias de hasta 150 kHz, con el fin de garantizar la compatibilidad de los dispositivos eléctricos [16]. La necesidad de la caracterización adecuada de esta cuestión ha llevado a la creación del grupo de trabajo IEC SC77A WG9, con el fin de proporcionar métodos de medición de la calidad de la energía a la Norma IEC 61000-4-30. Debido a la falta de resultados de las mediciones de campo que proporcionen valores reales para el correcto funcionamiento en la red, el CENELEC ha puesto en marcha recientemente el grupo de trabajo 11 de la SC 205, con el fin de promover, recopilar y analizar las NIE en las redes eléctricas, y determinar los niveles de inmunidad adecuados para las comunicaciones.

Una de las principales dificultades para determinar los niveles de inmunidad y compatibilidad es que la emisión de un dispositivo medida en condiciones de laboratorio no da una buena estimación de la emisión en una instalación real, debido a los diferentes valores de impedancia. Además, las mediciones de las emisiones no son extrapolables a otros lugares, ya que los cambios en la impedancia de la fuente debidos a la conexión y desconexión de los dispositivos vecinos afectan a los valores de NIE. Por lo tanto, es importante recopilar mediciones de NIE en condiciones reales de red en diferentes entornos, que proporcionan una imagen más clara de cuál es el nivel real que puede estar presente en la red, para evaluar el impacto potencial de estas emisiones en las comunicaciones NB-PLC.

A diferencia de lo que ocurre por debajo de 2 kHz, las metodologías de medición en el rango de 2 kHz a 500 kHz sólo están parcialmente definidas. Para poder comparar diferentes mediciones, es esencial que se aplique el mismo método de medición. En la actualidad existen múltiples enfoques, que se aplican a diferentes bandas de frecuencia y pueden dar lugar a resultados considerablemente diferentes para la misma señal. Por lo tanto, no existe un método normativo para medir los niveles reales de emisión en las redes reales para el rango de frecuencias estudiado, de 20 kHz a 500 kHz.

El Grupo TSR de la UPV/EHU en coordinación con el DSO (Distribution System Operator) Iberdrola ha realizado una campaña de medición en varios escenarios de la red eléctrica con el fin de realizar un análisis empírico de los valores de NIE en la red. Se ha empleado un sistema de medidas optimizado para el rango de frecuencias utilizado por las diferentes tecnologías de NB-PLC: 20 kHz a 500 kHz.

En el siguiente apartado se incluye una descripción de los diferentes tipos de NIE que se han observado en las mediciones mencionadas, y que han sido generadas e implementadas en este Trabajo de Fin de Máster.

- Emisiones tonales

En muchos puntos de medida, se observa NIE en forma de emisiones tonales en diferentes frecuencias. Las emisiones tonales consisten en tonos simples de gran amplitud ubicadas en frecuencias concretas. Los resultados mostrados en las siguientes dos figuras son claros ejemplos de este tipo de emisiones. Las emisiones tonales se indican con flechas amarillas en el espectrograma y con círculos verdes en el espectro.

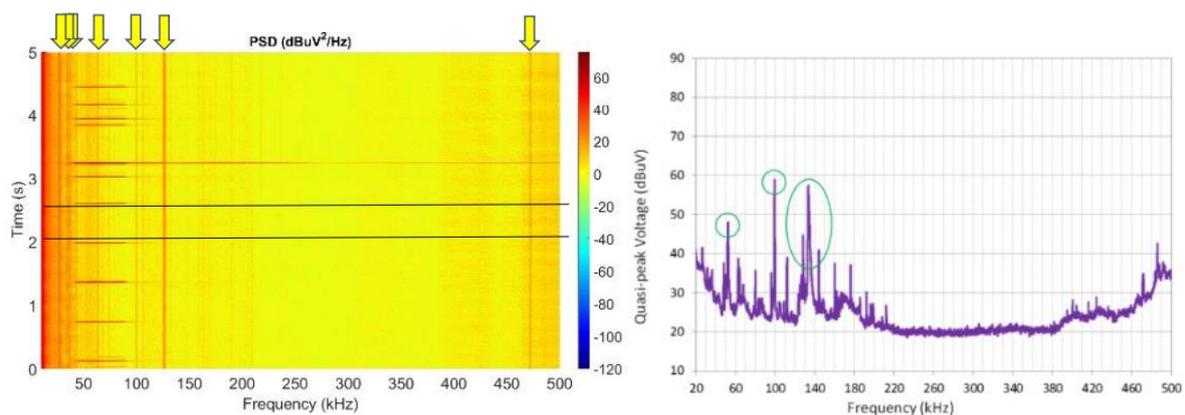


Figura 1: Espectrograma (izquierda) y espectro (derecha) de NIE en forma de emisiones tonales [8]

La presencia de NIE en forma de emisiones tonales se ha reportado anteriormente en varios artículos [17]-[18]. La figura 1 muestra componentes frecuenciales discretas en 48 kHz, 64 kHz y 70 kHz. Muchas de estas componentes frecuenciales no son permanentes, suelen ser generadas por cargas que se conectan y desconectan a la red, frecuentemente debido a convertidores de potencia [19].

- Armónicos de las emisiones tonales

Algunas de las emisiones tonales que están presentes en la red están causadas por el comportamiento no lineal de los inversores. En estos casos, la respuesta espectral está compuesta por un único tono situado en la frecuencia de conmutación del inversor, seguido de un conjunto de emisiones tonales situadas en los múltiplos de la frecuencia de conmutación, normalmente con una amplitud que disminuye con la frecuencia. Se han observado este tipo de emisiones en inversores fotovoltaicos [20]. En la figura 2 se observan armónicos situados en las frecuencias que son múltiplos de 16 kHz.

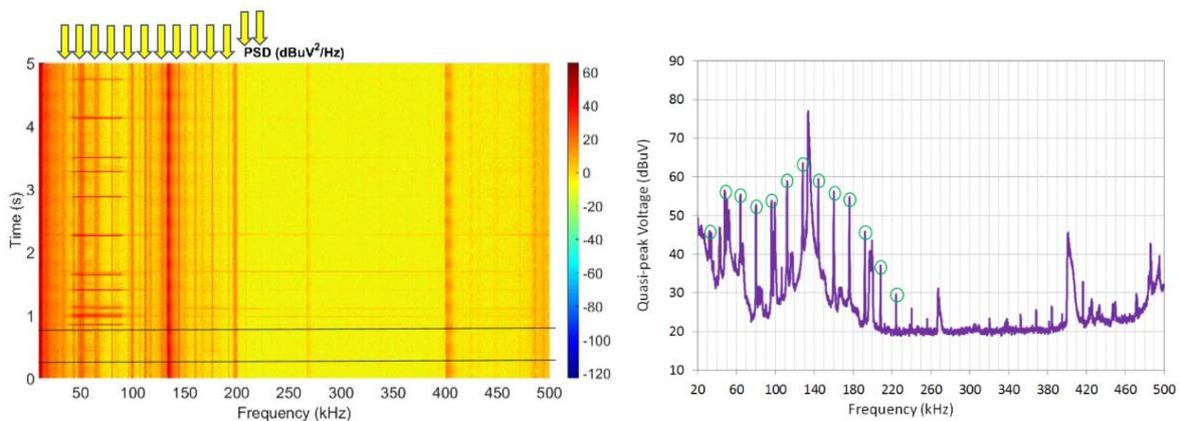


Figura 2: Espectrograma (izquierda) y espectro (derecha) de NIE en forma de armónicos de emisiones tonales [8]

- Emisiones de banda ancha

En contraste con los casos anteriores, también hay NIE que ocupan un conjunto relativamente amplio de frecuencias, donde el NIE ocupa anchos de banda de 30 kHz a 50 kHz o incluso hasta 80 kHz. En este caso concreto ocupa un ancho de banda de 30 kHz a 50 kHz. En [11] las mediciones de dos cargadores de vehículos eléctricos en condiciones de laboratorio mostraron perturbaciones de banda ancha entre 9 kHz y 65 kHz y entre 9 kHz y 100 kHz.

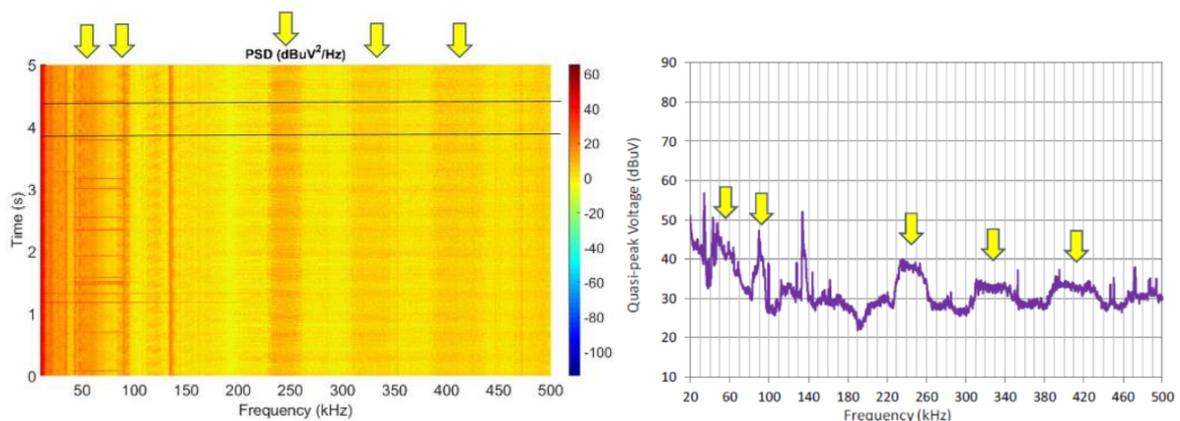


Figura 3: Espectrograma (izquierda) y espectro (derecha) de NIE en forma de emisiones de banda ancha [8]

- Ruido Coloreado

En las mediciones de campo también se han registrado emisiones en forma de ruido coloreado. Consisten en ruido de banda ancha de amplitud variable con la frecuencia. Este tipo de emisiones pueden estar generadas por diferentes tipos de dispositivos electrónicos [20]-[21], o como resultado de la suma de varias fuentes de ruido.

La figura 4 es un ejemplo representativo de estas emisiones, con niveles de ruido de gran amplitud hasta 200 kHz.

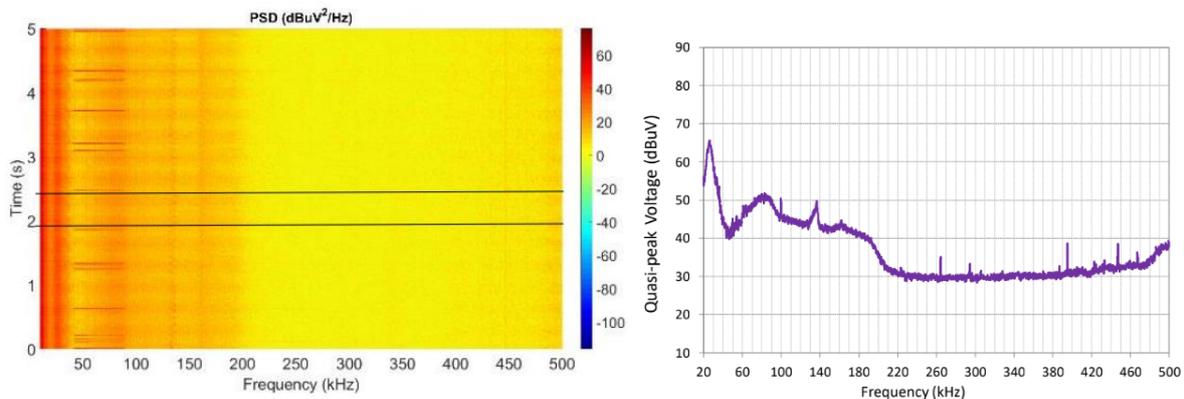


Figura 4: Espectrograma (izquierda) y espectro (derecha) de NIE en forma de ruido coloreado [8]

- Réplicas PLC

Los dispositivos NB-PLC conectados a la red también pueden generar NIE en frecuencias fuera de banda. Las emisiones consisten en réplicas de las señales transmitidas en frecuencias superiores. Por lo tanto, el patrón espectral de estas réplicas es un conjunto de emisiones similares a la señal transmitida por NB-PLC, en frecuencias superiores. Estas réplicas sólo se producen durante las ráfagas de transmisión del NB-PLC y duran unos pocos milisegundos, como se muestra en la figura 5.

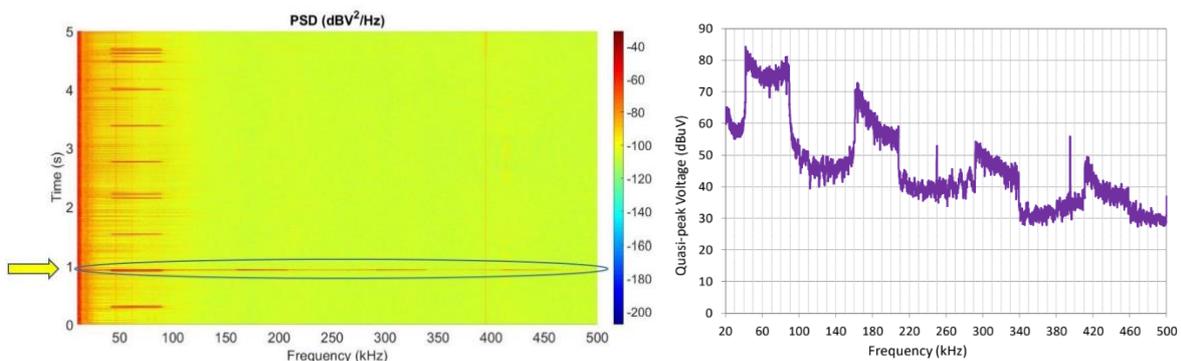


Figura 5: Espectrograma (izquierda) y espectro (derecha) de NIE en forma de Réplicas PLC [8]

- Ruido impulsional

En muchas de las mediciones, se ha observado un ruido de cierta amplitud y carácter impulsional, es decir, de corta duración, periódico o no, y que se ubica en una frecuencia determinada. Cada ráfaga de ruido impulsional solo ocupa unos pocos milisegundos. En la figura 6, en las frecuencias 394 kHz y 396 kHz aparece ruido impulsional.

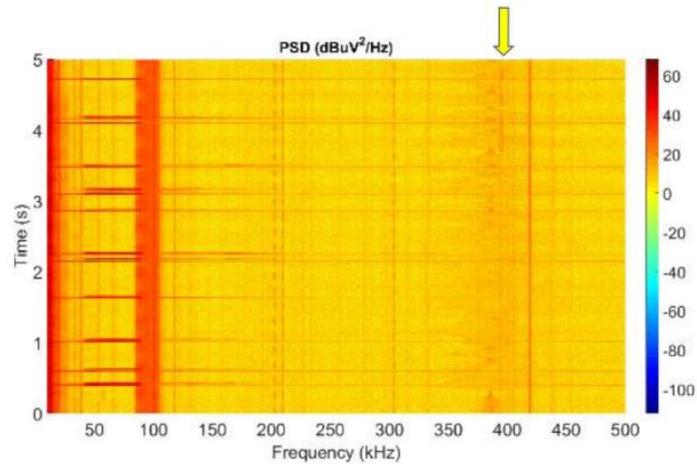


Figura 6: Espectrograma (izquierda) y espectro (derecha) de NIE en forma de ruido impulsional [8]

En la práctica, todas las mediciones registradas en los ensayos de campo incluyen varios tipos de las emisiones identificadas en las figuras anteriores. Los resultados de la figura 6 incluyen emisiones de banda ancha de gran amplitud en torno a los 100 kHz, emisiones tonales en varias frecuencias, réplicas de transmisiones NB-PLC en un alto porcentaje de transmisiones y ruido impulsional en dos frecuencias.

4.2 Descripción de los protocolos PLC: PRIME y G3-PLC

La tecnología de comunicación más adoptada en las redes inteligentes es PLC (Power Line Communications). La principal ventaja de los sistemas PLC es que no se requiere ningún cableado adicional, ya que emplea el cableado de la red eléctrica existente. La tecnología PLC aún se está desarrollando, por lo que hay varios protocolos disponibles, cada uno de los cuales se centra en diferentes aplicaciones.

Las comunicaciones PLC están sujetas al cumplimiento de las normas EMC (Electromagnetic Compatibility) y estándares que definen las agencias reguladoras. En Europa, los responsables de la estandarización en el ámbito de la ingeniería eléctrica son la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC), el Comité Europeo de Normalización Electrotécnica (CENELEC), el Instituto Europeo de Normas de Telecomunicaciones (ETSI) y el Comité Europeo de Normalización (CEN). Las normas elaboradas por esas organizaciones suelen especificar las bandas de frecuencia, los límites de las señales transmitidas en esas bandas y de las emisiones electromagnéticas. No obstante, no existe ninguna normativa acerca de la modulación o codificación para las comunicaciones PLC. Como resultado existen varios protocolos PLC que difieren en velocidad de datos, robustez y técnicas de modulación.

Se han implementado varias tecnologías NB-PLC para la transmisión de datos. Las principales tecnologías de transmisión son Meters&More [22], G3-PLC [10] (publicada en la Recomendación UIT-T G.9903 [23]), la norma IEEE 1901.2 [24] y PRIME [9] (PRIME v1.3.6 y PRIME v1.4, publicadas por la Unión Internacional de Telecomunicaciones en la Recomendación ITU-T G.9904 [25]).

Los sistemas NB-PLC operan en una banda de frecuencias inferior a 500 kHz. En Europa esta banda se ha limitado a un rango de frecuencias de 3 kHz a 148,5 kHz y se ha dividido en 4 sub-bandas de frecuencia que son reguladas por el CENELEC.

La mayoría de las aplicaciones NB-PLC son en AMI (Advanced Metering Infrastructure) y AMR (Automatic Meter Reading). Las aplicaciones AMR proporcionan una lectura básica de contadores unidireccional, mientras que las aplicaciones AMI proporcionan una comunicación bidireccional que puede utilizarse para intercambiar información con los sistemas del usuario final y del proveedor de energía.

- Protocolo PRIME

En 2009, un grupo de proveedores formó la alianza PowerLine Intelligent Metering Evolution (PRIME) liderada principalmente por Iberdrola. La idea era desarrollar una nueva solución de telecomunicaciones abierta, pública y no propietaria, que apoyará no sólo las funcionalidades del Smart Metering, sino también el progreso hacia las Smart Grids. Actualmente, la solución PRIME está implantada principalmente en España, Portugal y Reino Unido.

El protocolo PRIME tiene un rango de frecuencia de funcionamiento de 42 kHz a 89 kHz. Cada uno de los símbolos OFDM consta de 97 subportadoras con una separación entre portadoras de $\Delta f = 488$ Hz. PRIME emplea OFDM para la transmisión de datos con tres tipos de modulaciones posibles: D8PSK (Differential 8-Phase Shift Keying), DQPSK (Differential Quadrature-Phase Shift Keying) y DBPSK (Differential Binary Phase Shift Keying).

En la figura 7, se muestra el diagrama de bloques de PRIME v1.4 y PRIME v1.3.6.

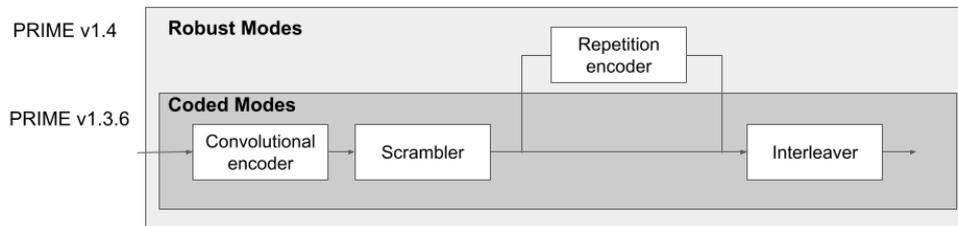


Figura 7: Diagrama de bloques PRIME v1.4 y PRIME v1-3-6

La versión más reciente del protocolo PRIME es la 1.4. Esta versión permite utilizar dos modos robustos (R-DBPSK y R-DQPSK), que añaden cuatro repeticiones de símbolos OFDM. A esto se le denomina FEC-RC (Forward Error Correction Repetition Code).

Las subportadoras OFDM se reciben generalmente con diferentes amplitudes debido al comportamiento no homogéneo del canal, por lo que se utilizan técnicas FEC (Forward Error Correction) para poder corregirlo. El mecanismo FEC del protocolo PRIME se compone de un codificador convolucional, un scrambler, un interleaver y un codificador de repetición.

El codificador convolucional se utiliza para formar un flujo de bits codificado. Es un codificador de tasa 1/2 (longitud $K=7$). El uso del codificador convolucional es opcional.

En el siguiente paso el flujo de bits pasa por el scrambler para evitar que haya largas secuencias de bits idénticas. El scrambler se utiliza siempre, independientemente de la configuración de modulación y codificación.

Si se activa el modo robusto Prime v1.4, la salida del codificador asociada a un símbolo OFDM se repite cuatro veces. Cada secuencia repetida se coloca en un símbolo OFDM diferente con desplazamiento cíclico, de modo que cada réplica de bits se coloca en una frecuencia diferente.

El último paso es el interleaver, que se aplica para dispersar, antes de la decodificación, los bits erróneos correspondientes a ráfagas de bits afectadas por efectos de canal. El interleaver se realiza por símbolo OFDM.

En el protocolo PRIME se utilizan dos formatos de trama diferentes, dependiendo de si el modo robusto está activado (trama de tipo B) o no (trama de tipo A).

En la siguiente figura, se muestra la estructura de una trama PRIME v1.4 de tipo A. Cada trama PRIME empieza con un preámbulo, seguido de una cabeza y los datos.

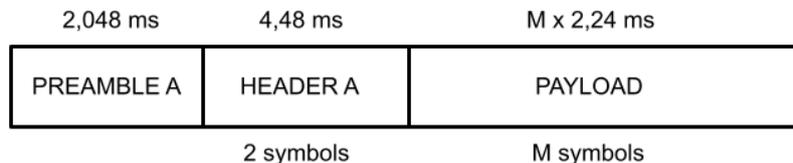


Figura 8: Estructura de una trama PRIME v1.4 tipo A

El preámbulo se utiliza para la sincronización. Dura durante 2,048 ms en el modo normal (trama de tipo A) y 8,192 ms en el modo robusto (trama tipo B).

La cabecera de la trama tipo A se compone de 2 símbolos OFDM (4,48 ms), mientras que la de tipo B se compone de 4 símbolos OFDM (8,96 ms). Además, la cabecera se modula siempre con DBPSK y se activa el codificador convolucional para que sea más robusta. Esto se debe a que la cabecera contiene información necesaria para decodificar el resto de la trama. La cabecera se modula con 13 subportadoras piloto y 84 subportadoras de datos.

La carga útil o datos (M x 2,24 ms) de la trama PRIME puede ser modulada con cada una de las tres modulaciones que se han mencionado anteriormente (D8PSK, DQPSK y DBPSK), en función de la SNR y de la información de los errores en las transmisiones anteriores.

- Protocolo G3-PLC

En 2011, se formó la organización G3-PLC Alliance, patrocinada por el FEDER, con el fin de apoyar, promover e implementar G3-PLC en aplicaciones de Smart Grids. En Europa, está presente principalmente en países como Irlanda, Francia y Holanda.

El protocolo G3-PLC tiene un rango de frecuencia de funcionamiento de 35 kHz a 91 kHz. Cada uno de los símbolos OFDM consta de 36 subportadoras con una separación entre portadoras de $\Delta f = 1562$ Hz.

En la siguiente figura se muestra el diagrama de bloques del protocolo G3-PLC.

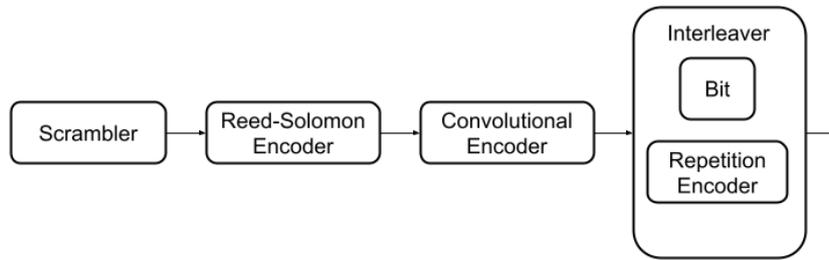


Figura 9: Diagrama de bloques de G3-PLC

G3-PLC ofrece dos tipos de modulaciones: DQPSK, DBPSK y tres modos: normal robusto y súper robusto. En el modo normal, el FEC consiste en un codificador Reed-Solomon, un codificador convolucional y un interleaver. En el modo robusto se utiliza un codificador de repetición, después del codificador convolucional, para repetir los bits cuatro veces. En el modo súper robusto estos bits se repiten seis veces. A diferencia de PRIME, el interleaver se realiza por paquete de datos.

En la siguiente figura se muestra la estructura de una trama G3-PLC.

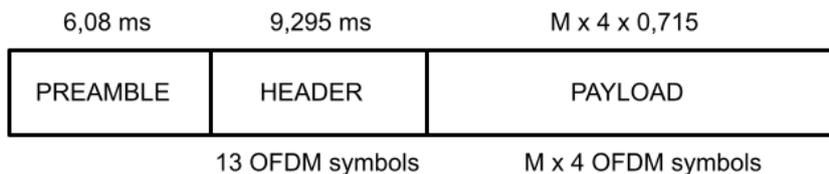


Figura 10: Estructura de una trama G3-PLC

La trama del protocolo G3-PLC también comienza con un preámbulo, seguido de una cabecera y datos. A diferencia del protocolo PRIME, el preámbulo de G3-PLC consiste en un símbolo OFDM que se repite 9,5 veces. Esto es para reducir la probabilidad de que un receptor no reconozca un paquete.

En G3-PLC no se utilizan subportadoras piloto. En su lugar, se toman las fases de las subportadoras del símbolo anterior como referencia para detectar las fases de las subportadoras del símbolo actual. Es decir, el primer símbolo de la cabecera usa la fase del último símbolo del preámbulo y así sucesivamente. Al preámbulo le siguen 13 símbolos de datos de cabecera que contienen información de la trama actual. La última parte de la trama son los datos, que se compone de grupos de 4 símbolos OFDM.

En la tabla 1 se da una comparativa de ambos protocolos PLC.

	PRIME	G3-PLC
Rango frecuencial	42-89 kHz	35-91 kHz
Frecuencia muestreo	250 kHz	400 kHz
Espacio entre portadoras	488.28125 Hz	1562.5 Hz
Num. portadoras de datos	84 (header) 96 (payload)	36
Num. portadoras piloto	13 (header) 1 (payload)	-
Intervalo FFT	2048 μ s	640 μ s
Prefijo cíclico	192 μ s	75 μ s
Duración símbolo OFDM	2240 μ s (2048 μ s + 192 μ s)	715 μ s
Periodo de preámbulo	2048 μ s (PRIME v1.3.6) 8192 μ s PRIME v1.4)	6080 μ s
FEC	Convolutional Encoder + Repetition Encoder	Convolutional Encoder + Repetition Encoder + Reed-Solomon
Interleaving	en cada símbolo OFDM	en cada paquete de datos

Tabla 1. Comparativa de protocolos PLC PRIME y G3-PLC

4.3 Descripción de los métodos de medida

En las últimas décadas, se han propuesto diferentes métodos de medición de EMI para las pruebas de EMC en el laboratorio, en los que las condiciones de reproducibilidad están garantizadas, ya que el entorno de medición está controlado. No obstante, la mayoría de estos métodos de medición de EMI no están optimizados para las mediciones en la red eléctrica, por los siguientes motivos.

En primer lugar, es imposible conservar las condiciones de reproducibilidad en un medio cambiante como es la red de distribución [26]. Además, los resultados proporcionados por los diferentes métodos de EMI tienen una desviación considerable, debido a las diferentes configuraciones permitidas por la norma que se puede utilizar para calcular el espectro (solapamiento de ventanas en las transformadas discretas de Fourier, forma de la ventana, detectores, etc.) [26]. Por último, los métodos alternativos de EMI proporcionan resultados con detectores RMS, que es el detector más común para el resto de métodos EMI, por lo que los espectros obtenidos no pueden ser utilizados para evaluar los niveles de emisión con respecto a CL, ya que estos son en forma de valores QP.

Por todas las razones mencionadas, es importante desarrollar un método de medida de EMI con una configuración fija que garantice la reproducibilidad, con bajo coste computacional y que requiere pocos recursos de memoria y esté basado en un detector que proporcione resultados comparables a los valores de QP de la norma CISPR 16-1-1.

El Grupo TSR ha desarrollado dos métodos de medida para el rango de frecuencia de 9 kHz a 150 kHz. El primer método, es una adaptación del método IEC 61000-4-7 para la banda CISPR A, que proporciona valores RMS. Al que se le ha llamado método RM-A. El método IEC 61000-4-7, definido para su uso hasta 9 kHz, se propone en la Norma IEC 61000-4-30 para su uso hasta 150 kHz, pero sin mencionar cómo debe aplicarse. Sobre el método RM-A se ha construido un segundo método llamado Light-QP, que adopta las primeras etapas del método RM-A y se añade un detector QP para poder proporcionar valores de salida QP. A continuación, se da una descripción en detalle de ambos métodos.

- Método IEC 61000-4-7 y método RM-A

En primer lugar, se da una breve descripción del método de medición estándar de la norma IEC 61000-4-7 Anexo B (punto 1). En segundo lugar, se explica en detalle la adaptación del método de la IEC 61000-4-7 a la banda CISPR A (punto 2).

1. *Método IEC 61000-4-7 Anexo B*

El anexo B de la norma IEC 61000-4-7:2002+AMD 1:2008 describe un método para cuantificar el nivel de las perturbaciones de la red de 2 kHz a 9 kHz [3]. El método se basa en dos bloques principales: el análisis espectral y la agrupación de frecuencias.

El análisis espectral utiliza ventanas rectangulares no superpuestas de 200 ms para calcular la STFT. Las componentes espectrales obtenidas en este bloque tienen un ancho de banda

de resolución de 5 Hz (Y_{cf} en la figura 11).

Aplicar las DFTs a una banda de frecuencia más amplia (9 kHz-150 kHz) requiere un coste computacional enorme, ya que la frecuencia de muestreo para 150 kHz es más de 10 veces superior a la de 9 kHz, lo que exige una mayor carga computacional. Por lo que, las componentes espectrales obtenidas cada 5 Hz se agrupan cada 200 Hz. Los resultados de este bloque tienen un ancho de banda de resolución y un tamaño de paso de frecuencia de 200 Hz y una granularidad temporal de 200 ms.

Los resultados del método IEC 61000-4-7 pueden ser agregados calculando los espectros RMS en intervalos de 3s. Esto se representa en la figura 12 como $URMS_{3s}$.

En la figura 11, se muestra el esquema del método de medición del Anexo B de la IEC 61000-4-7 (en azul) y la estrategia de agregación de la IEC 61000-4-30 (en naranja).

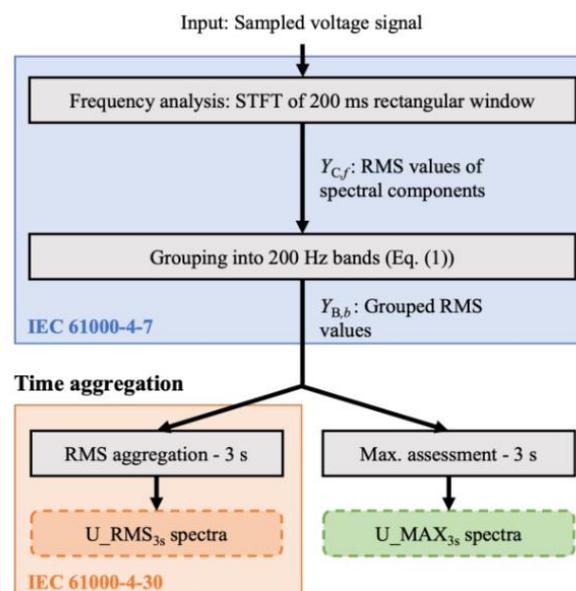


Figura 11: Esquema del método de medición del Anexo B de la IEC 61000-4-7 (en azul) y la estrategia de agregación de la IEC 61000-4-30 (en naranja) [27]

2. Adaptación del método IEC 61000-4-7 a la banda CISPR A: Método RM-A

El método RM-A [27]-[28] proporciona valores RMS para el rango de frecuencia de 9 kHz a 150 kHz, con una mayor granularidad temporal respecto al método IEC 61000-4-7, sin exigir una elevada carga computacional, de forma que pueda implementarse en dispositivos de medida de PQ económicos, tanto para redes eléctricas de 50 Hz como de 60 Hz. Además, la mayor granularidad será la base para la detección máxima de las perturbaciones impulsivas de corta duración, que pueden degradar gravemente las transmisiones del PLC y causar un mal funcionamiento en los dispositivos electrónicos conectados a la red. El método también proporcionará valores máximos, con el fin de identificar las máximas amplitudes de las perturbaciones impulsivas. Estos resultados, junto con los valores RMS de la red, proporcionarán una mejor caracterización de las perturbaciones en la red.

En la figura 12 se muestra el procedimiento propuesto para adaptar el anexo B del método IEC 61000-4-7 al rango de frecuencia de 9 kHz a 150 kHz.

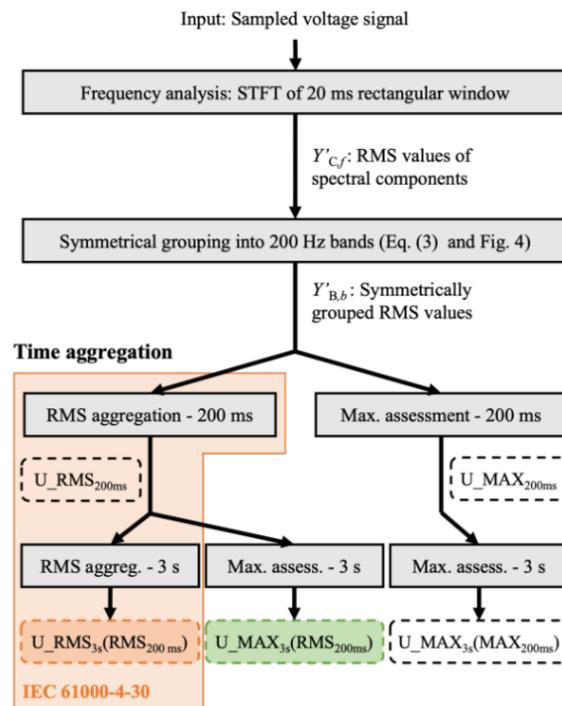


Figura 12: Esquemático del procedimiento propuesto para adaptar el anexo B del método IEC 61000-4-7 al rango de frecuencia de 9 kHz a 150 kHz [27]

El método propuesto mantiene el proceso de cálculo en dos pasos, compuesto por un análisis espectral y una agrupación de frecuencias, seguido de un paso de agregación temporal. No obstante, incorpora los siguientes cambios con respecto a la norma IEC 1000-4-7: el uso de una ventana rectangular más corta (20 ms en lugar de 200 ms) en la STFT para el análisis espectral, la definición de una nueva agrupación de frecuencias y la incorporación de otro nivel de agregación temporal de los resultados. Estas modificaciones se describen a continuación.

Como paso previo a la STFT, la señal de entrada será filtrada entre 9 kHz y 150 kHz para evitar el efecto de aliasing y la fuga generada por la señal de alimentación de 50/60 Hz. La frecuencia de muestreo será seleccionada de acuerdo al teorema de muestreo de Nyquist-Shannon para evitar el aliasing.

Se especifica una ventana rectangular no solapada de 20 ms de longitud para evaluar el contenido espectral de las señales de entrada con más detalle, consiguiendo componentes espectrales con un ancho de banda de resolución y un tamaño de paso en frecuencia de 50 Hz.

Para aplicar este análisis espectral a la red eléctrica de 60 Hz, cada ciclo de la red eléctrica $T_{60\text{ Hz}}$ se rellenará con ceros para completar las ventanas de 20 ms de longitud. Este procedimiento permite el análisis de ambas redes eléctricas de 50/60 Hz, y además

proporciona similares resoluciones temporal y de frecuencia de los resultados.

En las mediciones en la red eléctrica de 60 Hz, cada ventana de STFT comienza en múltiplos de $T_{60\text{ Hz}}$. Como resultado, se emplean 10/12 ciclos de red cada 200 ms para los sistemas de 50/60 Hz respectivamente. En ambos casos el procedimiento de medida se basa en DFTs de 20 ms, lo que implica una resolución en frecuencia de 50 Hz en este primer paso.

En el segundo paso, los componentes espectrales se agrupan en grupos de 200 Hz. Se propone una agrupación de frecuencias que corrija la asimetría definida en la norma IEC 61000-4-7, proporcionando así una asignación de frecuencias a los resultados más precisa. Esta propuesta, denominada "agrupación simétrica" (eq.1), integra tres componentes de frecuencia (la muestra central y las muestras espectrales adyacentes) y otras dos componentes adyacentes (a ± 100 Hz de la frecuencia central) divididas por dos, proporcionando así resultados con un ancho de banda de resolución de 200 Hz ($Y'_{B,b}$ en la figura 12).

$$Y'_{B,b} = \sqrt{\frac{1}{2} * Y'^2_{C,b-100\text{ (Hz)}} + \sum_{f=b-50\text{ Hz}}^{b+50\text{ Hz}} Y'^2_{C,f} + \frac{1}{2} * Y'^2_{C,b+100\text{ (Hz)}}} \quad (\text{eq. 1})$$

Además, la granularidad espectral de los resultados se mejorada replicando el proceso descrito en la ecuación 3, para obtener $Y'_{B,b}$ cada 100 Hz. Como resultado el método genera resultados con un tamaño de paso en frecuencia de 100 Hz, duplicando las componentes espectrales del resultado. Así, el nuevo método proporciona una mejor asignación de frecuencias de las perturbaciones, debido a la agrupación simétrica propuesta.

En el tercer paso del método, se aplica la agregación temporal. Primero se agregan los resultados agrupados del paso anterior hasta 200 ms ($URMS_{200\text{ ms}}$ y $UMAX_{200\text{ ms}}$ en la figura 13), lo que proporciona resultados comparables a $Y_{B,b}$ del método IEC 61000-4-7.

A continuación, estos resultados pueden agregarse de acuerdo con el intervalo de medición de 3s definido en la norma IEC 61000-4-30, para obtener los siguientes valores RMS y máximos: $URMS_{3s}(RMS\ 200ms)$, $UMAX_{3s}(RMS\ 200\ ms)$ y $UMAX_{3s}(MAX\ 200\ ms)$.

- Light-QP

El método Light-QP [4] es un nuevo método de medición para evaluar los valores de QP de las perturbaciones en la red para la banda CISPR A (de 9 kHz a 150 kHz). Este método es adecuado para las mediciones de campo en la red eléctrica. Además, es menos complejo y la carga computacional y los requisitos de memoria del método son significativamente menores que los de la Norma CISPR 16-1-1.

El método Light-QP se basa en un proceso de dos etapas: la primera es una adaptación del método IEC 61000-4-7 a la banda CISPR A, para obtener valores RMS de los niveles de perturbación cada 200 Hz, con una resolución frecuencial de 100 Hz. Estos valores RMS son la entrada a la segunda etapa, que se basa en un detector digital de QP que sigue las directrices de CISPR 16 [20], y permite la comparación directa con CL [3]. La combinación de

los valores RMS y QP permite una caracterización más detallada de las perturbaciones y su relación con los efectos en los equipos e instalaciones, así como en las comunicaciones PLC. La amplitud RMS está vinculada con el impacto térmico o el mal funcionamiento de los dispositivos y otras perturbaciones en el PQ; los valores de QP se comparan con los CL (Compatibility Levels) definidos en la norma IEC 61000-2-2 [3] para evitar interferencias en las comunicaciones PLC.

En la figura 13, se muestra el procedimiento completo del método Light-QP.

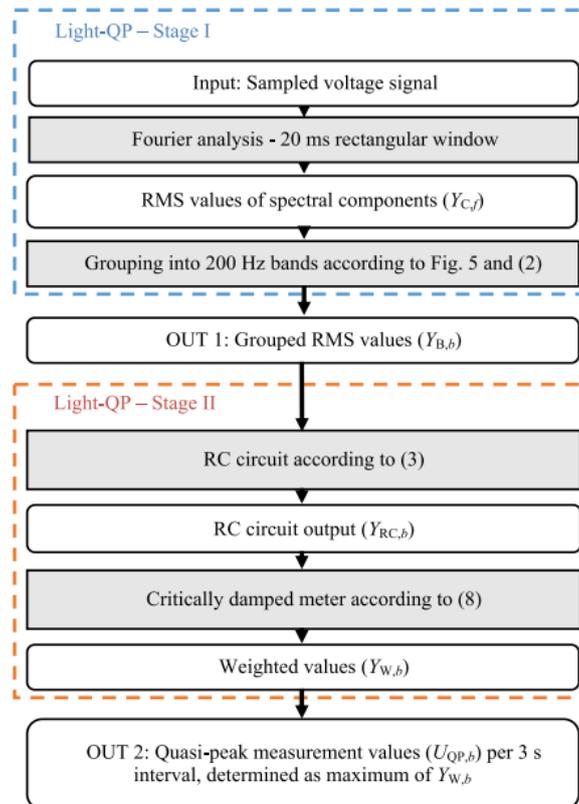


Figura 13: Esquema general del método Light-QP [4]

a. *Primera etapa Light-QP: Cálculo de los valores RMS en la banda CISPR A*

La primera etapa del método Light-QP se basa en el método de la Norma IEC 61000-4-7-Anexo B (de 2 kHz a 9 kHz), con algunas adaptaciones para considerar algunas particularidades de la Norma CISPR 16-1-1 para la banda A (de 9 kHz a 150 kHz).

El procedimiento para aplicar la primera etapa del método Light-QP se describe en los siguientes pasos:

- 1) Filtro paso-alto: Las amplitudes de las componentes fundamentales y de frecuencia por debajo de 9 kHz deben ser atenuadas, de tal manera que el rango dinámico del medidor pueda ser optimizado para medir componentes de frecuencia hasta 150 kHz.

- 2) Análisis de Fourier: Se aplica la STFT (Short-time Fourier Transform) a la señal de tensión muestreada para obtener los espectros RMS. Se utiliza una ventana rectangular no solapada de 20 ms (en lugar de la ventana de 200 ms definida en el método IEC 61000-4-7). La ventana más corta permite reducir tanto la carga computacional y los requisitos de memoria para el cálculo de la DFT (Discrete Fourier Transform). Como resultado, los componentes de frecuencia de salida de la DFT tienen un tamaño de paso de frecuencia de 50 Hz.
- 3) Agrupación de componentes: Se propone una agrupación "simétrica" en línea con el método de agrupación de armónicos definido para las frecuencias inferiores a 2 kHz en IEC 61000-4-7. Esto da como resultado un ancho de banda de resolución de 200 Hz. Además, la evaluación de las bandas de frecuencia en múltiplos de 100 Hz reduce el efecto *Picket Fence*. Como el ancho de banda de resolución es de 200 Hz, implica un solapamiento del 50% entre las bandas de frecuencia adyacentes. Sin ese solapamiento, las perturbaciones centradas en el borde entre dos bandas consecutivas, como 9.2 kHz o 9.4 kHz se dividirían en dos bandas frecuenciales, causando peores resultados que en el caso que las perturbaciones se encuentren en el centro de la banda de frecuencia (9.1 kHz o 9.3 kHz).

b. Segunda etapa Light-QP: Implementación digital de un detector QP

La segunda etapa del método Light-QP consiste en un detector QP digital, que reproduce el comportamiento analógico de un circuito RC y un medidor críticamente amortiguado, tal como se define en la Norma CISPR 16-1-1. La implementación propuesta se realiza mediante dos filtros IIR. Así, el circuito RC analógico se modela como un sistema lineal de primer orden caracterizado por una constante de tiempo de carga y otra de descarga, mientras que el voltímetro mecánico es un sistema de segundo orden críticamente amortiguado caracterizado por la frecuencia natural del sistema. Los constantes de tiempo de carga y descarga del circuito RC se fijan en 45 ms y 500 ms, respectivamente, y la constante de tiempo mecánica para el medidor críticamente amortiguado se fija en 160 ms.

La tensión de salida del circuito RC está definida por la ecuación diferencial de primer orden de un filtro IIR. El circuito RC puede estar cargando o descargando dependiendo de las magnitudes relativas de la tensión de entrada y salida del circuito.

La salida del circuito RC se procesa posteriormente con un medidor mecánico críticamente amortiguado, modelado por un filtro IIR de segundo orden, para calcular los valores eficaces ponderados de las componentes espectrales.

Por último, las salidas QP (OUT 2 en la figura 11) están determinadas por el máximo de los valores ponderados de las componentes espectrales. La primera salida requiere un intervalo de evaluación inicial de 3 s. Los valores de QP podrían determinarse periódicamente cada 20 ms a partir de una ventana deslizante de 3 s; otra opción es aplicar el método por intervalos de agregación de 3 s, siempre que las variables del detector de QP obtenidas al final de cada intervalo de 3 s se apliquen al siguiente intervalo.

5. Metodología

En este apartado se da una descripción general de la metodología que se ha seguido para generar las señales de test sintéticas. La comparación de los métodos requiere el desarrollo de señales de prueba con valores de PSD conocidos, similares a las señales complejas que pueden encontrarse en la red eléctrica, que contienen diferentes tipos de ruido y emisiones.

Como paso previo a la generación de las señales elementales, se han extendido todos los algoritmos hasta 500 kHz, modificando las líneas de código correspondientes a los plots y a la generación de ejes.

Para la generación de las señales de test se ha empleado un software heredado [28], que permite generar señales sintéticas conformadas por señales elementales. El Grupo TSR anteriormente ha generado e implementado señales elementales, entre ellas ruido coloreado, emisiones tonales y señales PLC PRIME. En este Trabajo de Fin de Máster se plantea la generación de dos tipos de señales elementales nuevas: señales según el estándar G3-PLC y ruido impulsional.

Para generar las señales elementales nuevas se han desarrollado dos métodos complementarios. Por un lado, las emisiones de ruido impulsional se crean mediante señales basadas en AWGN que son multiplicadas por un pulso rectangular de duración configurable y filtradas en frecuencia. Por otro lado, las emisiones G3-PLC se crean sintéticamente a partir de la codificación polar, ya que estas comunicaciones se basan en OFDM. Se ha desarrollado un código específico en MATLAB que genere cada una de las nuevas señales elementales.

Posteriormente, se han seleccionado once señales representativas grabadas en la red eléctrica que contiene fenómenos de interés. De igual modo, se ha tenido en cuenta situaciones relevantes, como las emisiones de cargadores de vehículo eléctrico o placas fotovoltaicas a la hora de seleccionar las señales. Es interesante generar tipos de emisiones parecidas a las que inyectan los dispositivos anteriores.

Como siguiente paso, se deben parametrizar las once señales grabadas en la red que van a ser replicadas, empleando sus espectros y espectrogramas. Se deben fijar los parámetros de ancho de banda, frecuencia central, nivel de amplitud entre otros. Estos parámetros se encuentran en ficheros Excel y se emplean para generar las señales elementales. Después, las emisiones individuales serán combinadas en una única señal sintética de prueba.

Por último, las señales de test deben superar un proceso de validación. Para ello, se debe aplicar el mismo tratamiento a las señales sintéticas que a las señales grabadas. El espectro de las señales grabadas es calculado a partir de la primera etapa del método Light-QP, por lo que se debe aplicar el mismo método a las señales sintéticas para que sus valores RMS sean comparables. Se debe comprobar que los valores de amplitud y la forma espectral de ambas señales sean lo más similares posibles.

6. Nuevas funcionalidades para el desarrollo de señales de test

Para la generación de las señales de test para el rango frecuencial de 2 kHz a 500 kHz se proponen dos métodos diferentes, que son complementarios. Por un lado, las emisiones de ruido impulsional se crean mediante señales basadas en AWGN que son multiplicadas por un pulso rectangular de duración configurable y filtradas en frecuencia. Por otro lado, las emisiones G3-PLC generadas por los contadores inteligentes instalados en la red, se crean sintéticamente a partir de la codificación polar, ya que estas comunicaciones se basan en la multiplexación por división de frecuencias ortogonales (OFDM). Asimismo, se han tenido que extender todos los algoritmos hasta 500 kHz para poder evaluar los métodos de medida hasta esa frecuencia.

A continuación, se da una breve explicación de los dos métodos mencionados y como se extienden los algoritmos hasta 500 kHz.

- Ruido impulsional

Para generar la forma espectral deseada, primero se genera una señal de pulsos cuyo tiempo de inicio y de fin coincide con el tiempo inicio y fin del ruido impulsional, es decir, la señal está a nivel alto cuando en ese instante existe ruido impulsional y a nivel bajo en caso contrario. Posteriormente, se filtra la señal anterior, adquiriendo el patrón deseado en el dominio de la frecuencia. Esto es posible ya que la energía en el ruido gaussiano se distribuye de forma casi constante en todo el espectro; por lo tanto, cuando se filtra el AWGN toma la forma espectral de la respuesta al impulso del filtro.

Por último, el valor teórico de la señal se calcula teniendo en cuenta la contribución de cada ráfaga de ruido impulsional.

Este procedimiento se ha implementado en una función de MATLAB, que requiere los siguientes parámetros de entrada:

- Parámetros para generar el ruido gaussiano:
 - Amplitud espectral requerida de la señal AWGN original para un ancho de banda de resolución de 200 Hz (en dB μ V)
 - Duración de la señal (en s)
 - Frecuencia de muestreo (en MHz)
- Parámetros para generar la variabilidad de amplitud en el tiempo:
 - Variabilidad de la amplitud (en %)
 - Tipo de variabilidad de la amplitud: Onda sinusoidal o el módulo de onda sinusoidal
 - Período de variabilidad de la amplitud: El periodo de variabilidad que debe tener la función que modula el AWGN (en s)
- Parámetro del filtro para generar la forma espectral de la emisión:
 - Tipo de respuesta impulsional (FIR o IIR)

- Método de diseño del filtro (Butterworth, Chebyshev...etc)
- Frecuencia central del filtro (en kHz)
- Banda de paso del filtro: El ancho de banda a- 3dB (en kHz)
- Stopband: El ancho de banda a -10 dB (en kHz)
- Stopband attenuation (en dB)

Esta función, que genera señales sintéticas a partir de AWGN, devuelve los siguientes parámetros:

- La señal en el dominio del tiempo
 - Array que contiene la señal sintética en el dominio del tiempo (en V)
 - Periodo de muestreo de la señal sintética (en s)
- PSD en el dominio de la frecuencia
 - Array que contiene los valores de referencia teóricos PSD (en dBμV)
 - Array con el eje de frecuencia: Contiene los valores de frecuencia asociados a cada valor de referencia (en kHz)

- Señales G3-PLC basadas en codificación polar

El segundo método para generar señales sintéticas se basa en la codificación polar. La respuesta en frecuencia de la codificación polar es una función *sinc*, y su frecuencia central viene dada por la señal portadora. Además, la anchura del lóbulo principal de esta función, en el dominio de la frecuencia, es inversamente proporcional a la anchura del pulso en el dominio del tiempo. Para crear las subportadoras requeridas en el esquema OFDM de G3-PLC hay que generar múltiples sincs. Después, todas las subportadoras deben combinarse y la señal resultante debe filtrarse para eliminar emisiones fuera de la banda de comunicación.

Para generar este tipo de señal, se crea una secuencia pseudoaleatoria de bits y se codifica utilizando la codificación polar. Así, la secuencia generada se compone de valores de amplitud negativa y positiva de igual magnitud. Una vez se ha aplicado el código polar, la señal se multiplica por una portadora que define la frecuencia central de la PSD. Los valores de referencia de estas señales vienen dados por el código polar:

$$G_x(f) = \frac{1}{4 * T_p * Z} * |A_p * T_p * sinc(T_p(f - f_c))|^2 \quad (eq.2)$$

donde,

- $G_x(f)$ es el valor de referencia PSD para señales basadas en codificación polar
- T_p es la longitud temporal del pulso
- Z es la impedancia del sistema, 50Ω en este caso
- A_p es la amplitud de los pulsos
- f es el eje de frecuencia del espectro
- f_c es la frecuencia de la portadora

A partir de las señales basadas en código polar, se generan las ráfagas PLC siguiendo las directrices de G3-PLC [17]. La información necesaria para crear ráfagas G3-PLC es la siguiente:

G3-PLC	
Frecuencia inicial	35.937 kHz
Frecuencia final	56.152 kHz
Número de portadoras	36
Separación entre portadoras	1562.5 Hz
Duración símbolo preámbulo	640 μ s
Duración símbolo cabecera	715 μ s

Tabla 2. Información de configuración de G3-PLC

Para ello, cada subportadora OFDM se generará siguiendo el procedimiento descrito anteriormente. Los valores de referencia PSD correspondientes a las ráfagas PLC se calcularán combinando los valores de referencia de cada subportadora. Por último, la señal OFDM completa se filtrará para eliminar los lóbulos laterales de las subportadoras. Los valores de referencia PSD resultantes pueden calcularse como sigue:

$$G_y(f) = \sum_{i=1}^N G_{x,i}(f) * |(H(f)_{filter})|^2 \quad (eq. 3)$$

donde,

- $G_y(f)$ es el valor de referencia PSD de la señal resultante
- $G_{x,i}(f)$ es el valor de referencia PSD de cada portadora OFDM
- N es el número de portadoras G3-PLC, que es 36
- $H(f)_{filter}$ es la respuesta frecuencial del filtro

El método anterior para la generación de ráfagas G3-PLC se ha implementado en una función de MATLAB. Este código requiere las siguientes entradas para generar las señales sintéticas:

- Parámetros para generar cada ráfaga G3-PLC
 - Amplitud de la ráfaga requerida para un ancho de banda de resolución de 200 Hz (en dB μ V)
 - Duración del pulso (en s)
 - Frecuencia de muestreo (en MHz)
 - Frecuencia central de la emisión (en kHz)
- Parámetros del filtro que elimina los lóbulos laterales
 - Tipo de respuesta impulsional (FIR o IIR)

- Método de diseño del filtro (Butterworth, Chebyshev...etc)
- Frecuencia central del filtro (en kHz)
- Banda de paso del filtro: El ancho de banda a -3dB (en kHz)
- Stopband: El ancho de banda a -10 dB (en kHz)
- Stopband attenuation (en dB)

Esta función, que genera las ráfagas PLC, devuelve los siguientes parámetros:

- La señal en el dominio del tiempo
 - Array que contiene la señal sintética en el dominio del tiempo (en V)
 - Periodo de muestreo de la señal sintética (en s)
- PSD en el dominio de la frecuencia
 - Array que contiene los valores de referencia teóricos PSD (en dB μ V)
 - Array con el eje de frecuencia: Contiene los valores de frecuencia asociados a cada valor de referencia (en kHz)

- Extender los algoritmos hasta 500 kHz

Los algoritmos que se deben extender hasta la frecuencia de 500 kHz son: el algoritmo de generación de señales PRIME, de ruido coloreado y de tonos simples.

En todos los algoritmos se deben modificar los límites de los plots. Para ello, se ajusta el límite superior a 500 kHz, en vez de a 150 kHz. En la figura 14, se muestran dos ejemplos de código donde se han modificado los ejes de los plots.

```
axis([0 500 -80 round(max(mag2db(abs(h1)))/5)*5]);

axis([0 500 max_y_axis-80 max_y_axis]);
```

Figura 14: Modificación de los límites de los plots

En cuanto al ruido coloreado, se debe definir la respuesta impulsional de cada filtro de 1 kHz a 501000 kHz (figura 15). Para poder obtener valores hasta 501 kHz se debe modificar la frecuencia de muestreo, antes fijada a 1 MHz. El teorema de muestreo de Nyquist-Shannon exige que la frecuencia de muestreo sea al menos el doble que la frecuencia máxima a muestrear. En este caso, la frecuencia de muestreo debe ser como mínimo 1,002 MHz; para redondear se ha fijado una frecuencia de muestreo de 2 MHz.

```
[h1,f] = freqz(d1,Fs/2,Fs); % Get the impulse response of the filter
h1=h1(1000:501000);
f=f(1000:501000);
```

Figura 15: Modificación de la respuesta impulsional

7. Resultados

Este apartado se divide en dos subapartados. En el primer subapartado se enumeran las señales grabadas en la red que se han seleccionado para replicar y porqué motivos se han seleccionado o resultan interesantes. El segundo apartado incluye una guía de cómo se genera una señal sintética paso a paso de manera teórica.

7.1 Resultados: Selección de señales grabadas

Las NIE en el rango de 2 kHz a 150 kHz es generado por una amplia gama de dispositivos electrónicos conectados a la red [29]. Los más relevantes son los dispositivos electrónicos que incluyen pequeños inversores (fuentes de alimentación, ascensores, lavadoras, o sistemas de control de motores) [29]-[30], equipos de iluminación (lámparas fluorescentes y lámparas LED) [31]-[33].

Algunas de las fuentes de NIE están relacionadas con el actual despliegue de recursos energéticos distribuidos (DER), cómo los inversores fotovoltaicos, los cargadores de baterías, sistemas hidroeléctricos o turbinas eólicas y cargadores de EV conectados a la red de distribución [8], [33]-[35]. A medida que se añaden más generadores de energía renovable, cargadores de EV y dispositivos de eficiencia energética, se espera que el número y la amplitud de las emisiones sean considerablemente mayores en los próximos años. El interés por el análisis de paneles fotovoltaicos, cargadores de baterías y otros dispositivos electrónicos que contienen inversores radica en el hecho de que los inversores suelen generar NIE en los armónicos de la frecuencia de conmutación, dentro del rango de frecuencias utilizado para las comunicaciones PLC.

Las once señales que se han seleccionado corresponden con seis señales grabadas en la red de distribución eléctrica, una señal grabada directamente de un panel fotovoltaico y cuatro señales grabadas de puntos de carga de vehículos eléctricos. Estos espectros son ejemplos representativos del tipo de emisiones que pueden encontrarse en la red y conforman un conjunto de señales procedentes de distintas fuentes, que contienen una gran variedad de emisiones.

En la tabla 3 se muestran las once señales seleccionadas y el tipo de emisiones que contienen.

Señal	Tipo de grabación	Tipos de emisiones	Figura
Inverter	Grabación de la red de distribución	Ruido coloreado, NIE de banda ancha y emisiones tonales	fig. 1
leaf_12A_1_oscviejo	EV	Ruido coloreado, NIE de banda ancha, emisiones tonales y armónicos	fig. 2
NIE_500_EV2_NISSAN_H2H3H5_H2	EV	Ruido coloreado, emisiones tonales y armónicos	fig. 3
NIE_500_EV3_CAMION75_H2H3H5_H2	EV	Ruido coloreado, NIE de banda ancha, emisiones tonales y armónicos	fig. 4
NIE_500_EV5_ZOE_H2H3H5_H5	EV	Ruido coloreado y emisiones tonales	fig. 5
PV-N18APEXANAUTB12230LC	Panel fotovoltaico	Ruido coloreado, NIE de banda ancha, emisiones tonales y armónicos	fig. 6
RUIDOCTAXGANERX1F1	Grabación de la red de distribución	Ruido coloreado, ruido impulsional, NIE de banda ancha, emisiones tonales, ráfaga PLC y réplicas PLC	fig. 7
RUIDOCTAXGANERX5F2	Grabación de la red de distribución	Ruido coloreado, emisiones tonales y ráfaga PLC	fig. 8
RUIDOCTEREDUNEF2	Grabación de la red de distribución	Ruido coloreado, ruido impulsional, NIE de banda ancha, emisiones tonales, ráfaga PLC y réplicas PLC	fig. 9
RUIDOCTEREDUNEF3	Grabación de la red de distribución	Ruido coloreado, NIE de banda ancha, emisiones tonales, ráfaga PLC y réplicas PLC	fig. 10
RUIDOCTOLARETXEF2	Grabación de la red de distribución	Ruido coloreado, ruido impulsional, NIE de banda ancha, emisiones tonales, ráfaga PLC y réplicas PLC	fig. 11

Tabla 3. Emisiones que contienen las once señales grabadas

A continuación, se muestran los espectros RMS que se han obtenido a partir de la primera parte del método Light-QP de las once señales grabadas mencionadas.

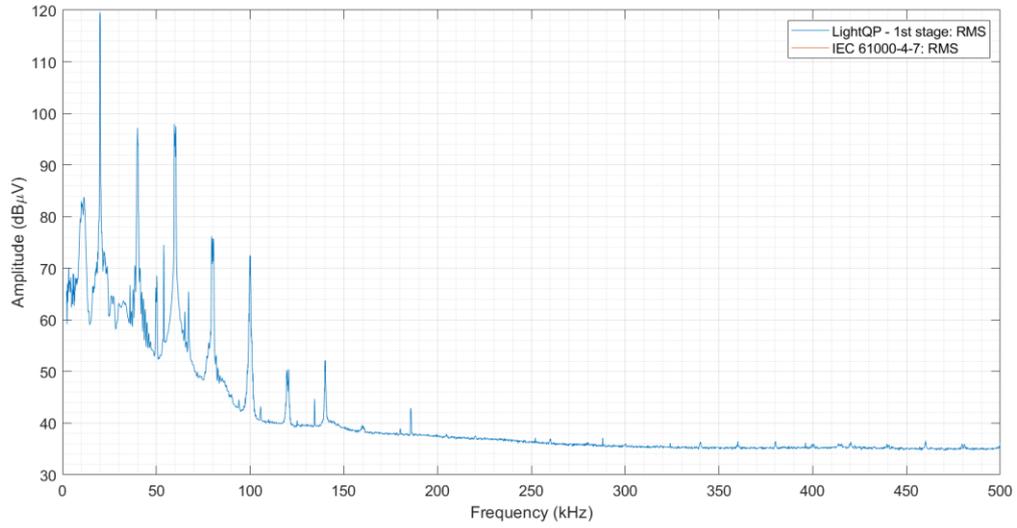


Figura 16: Espectro RMS calculado mediante el método Light-QP de la señal 'Inverter'

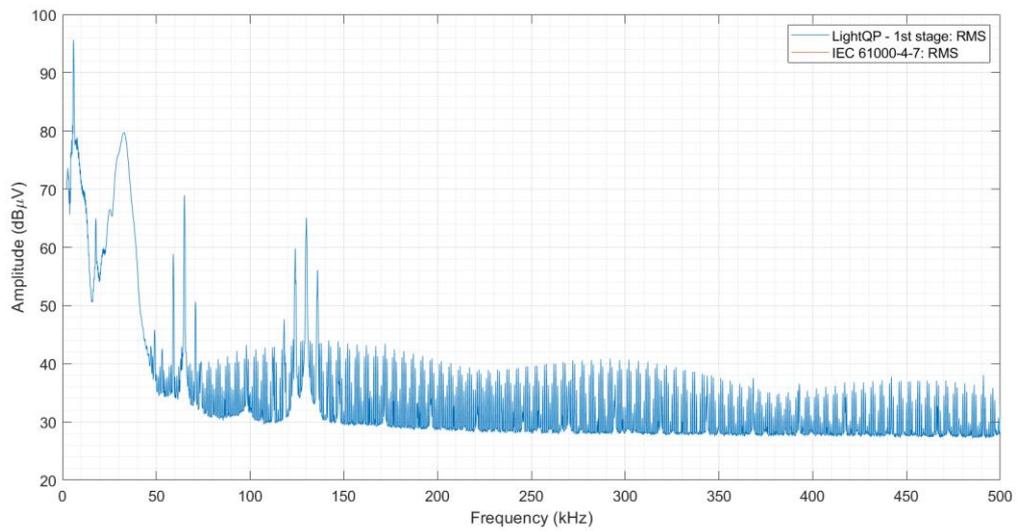


Figura 17: Espectro RMS calculado mediante el método Light-QP de la señal 'leaf_12A_1_oscviejo'

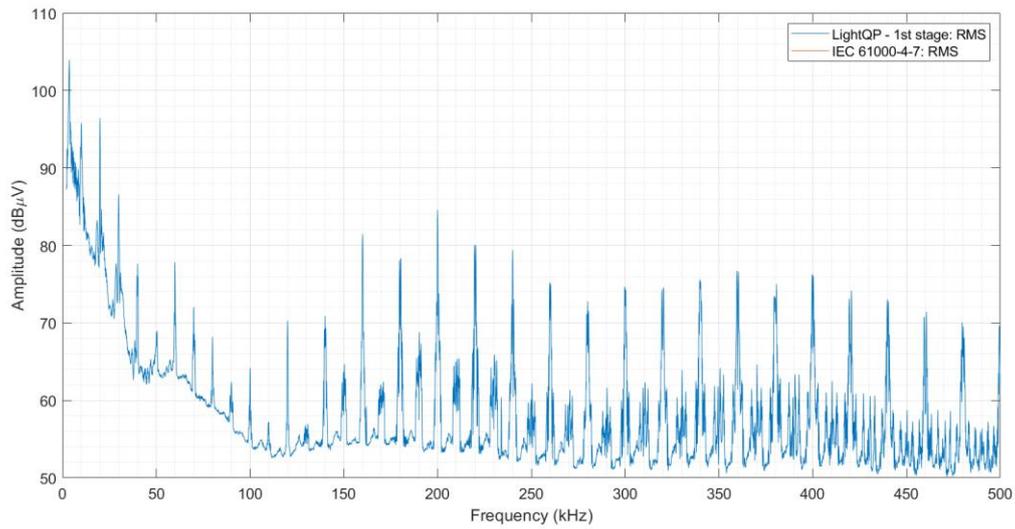


Figura 18: Espectro RMS calculado mediante el método Light-QP de la señal 'NIE_500_EV2_NISSAN_H2H3H5_H2'

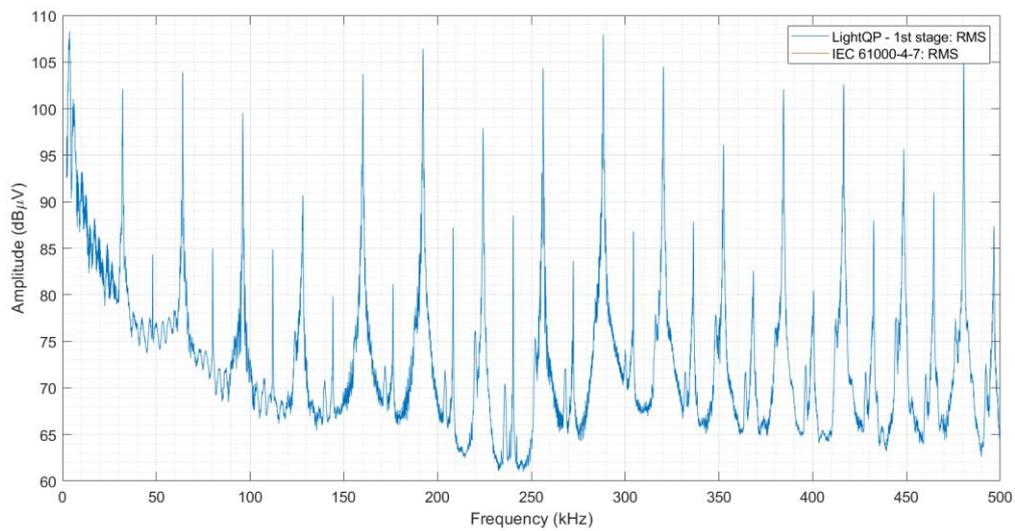


Figura 19: Espectro RMS calculado mediante el método Light-QP de la señal 'NIE_500_EV3_CAMION75_H2H3H5_H2'

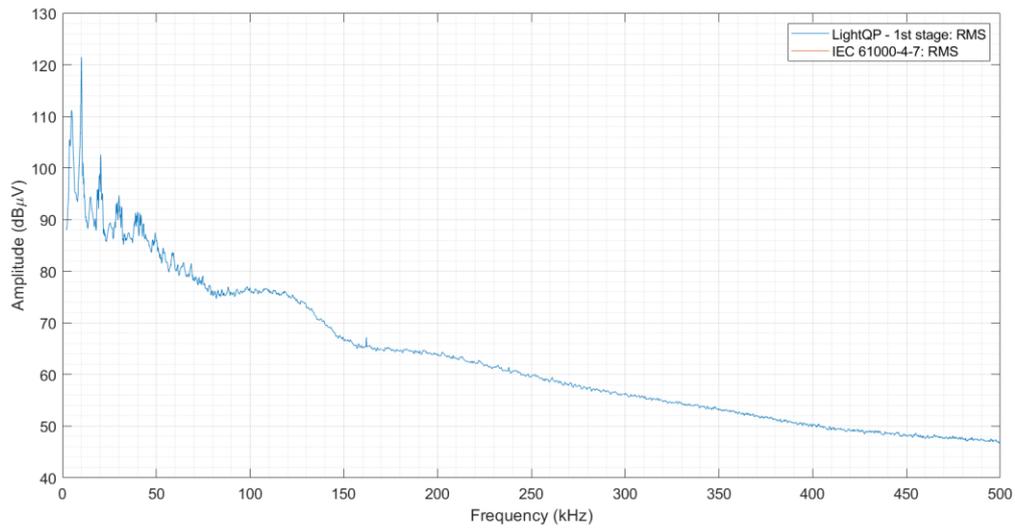


Figura 20: Espectro RMS calculado mediante el método Light-QP de la señal 'NIE_500_EV5_ZOE_H2H3H5_H5'

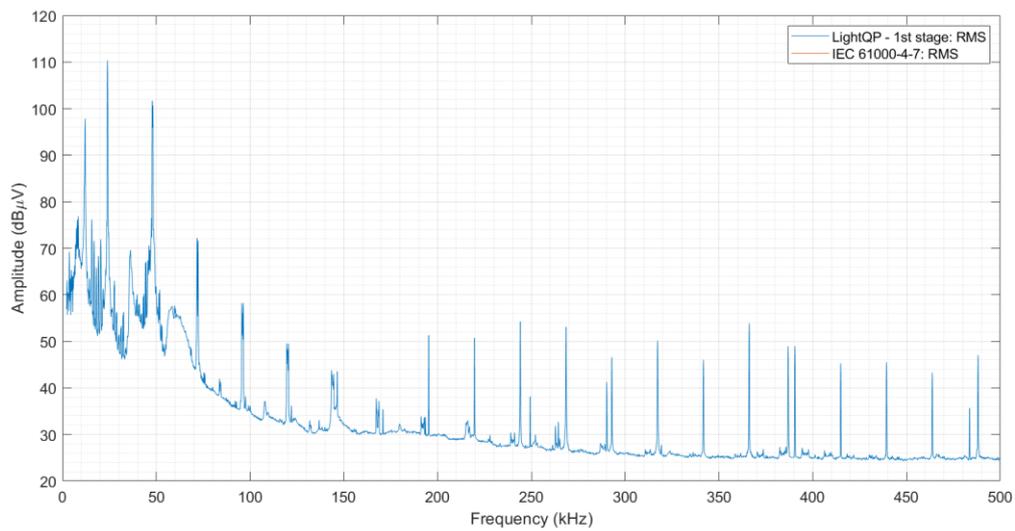


Figura 21: Espectro RMS calculado mediante el método Light-QP de la señal 'PV_18APEXANAUTB12230LC'

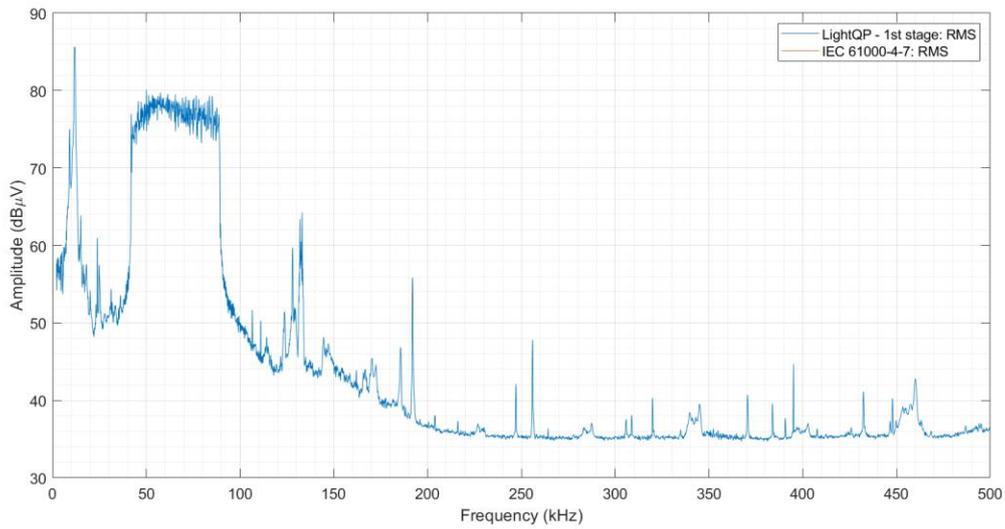


Figura 22: Espectro RMS calculado mediante el método Light-QP de la señal 'RUIDOCTAXGANERX1F1'

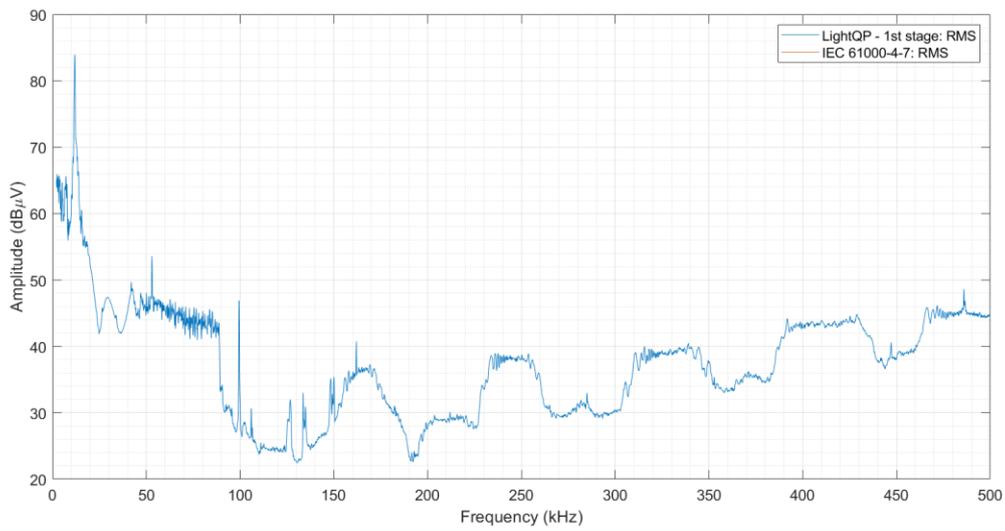


Figura 23: Espectro RMS calculado mediante el método Light-QP de la señal 'RUIDOCTAXGANERX5F2'

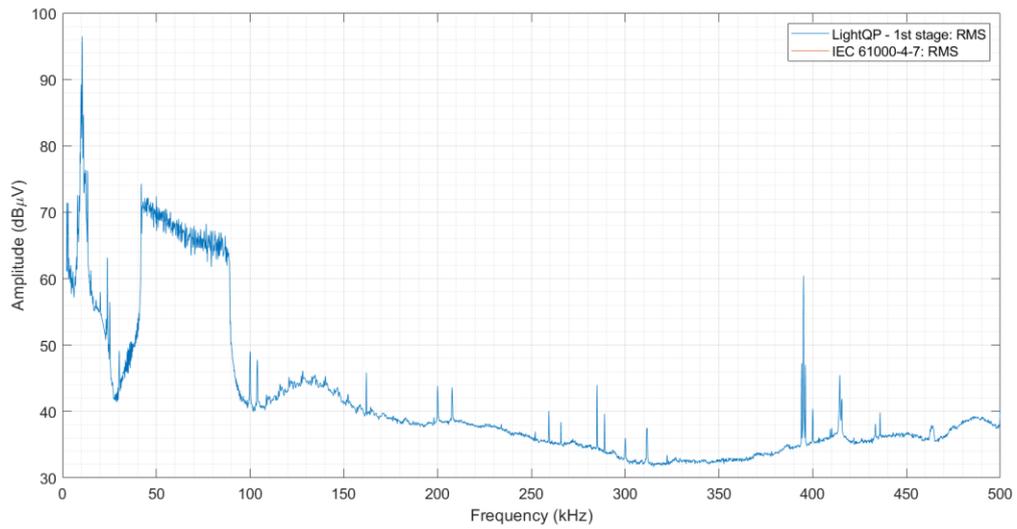


Figura 24: Espectro RMS calculado mediante el método Light-QP de la señal 'RUIDOCTEREDUNEF2'

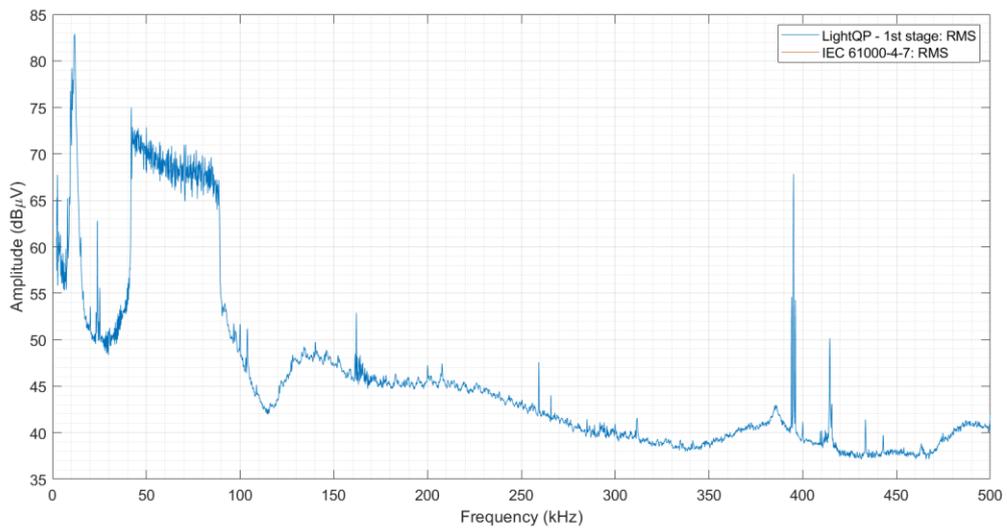


Figura 25: Espectro RMS calculado mediante el método Light-QP de la señal 'RUIDOCTEREDUNEF3'

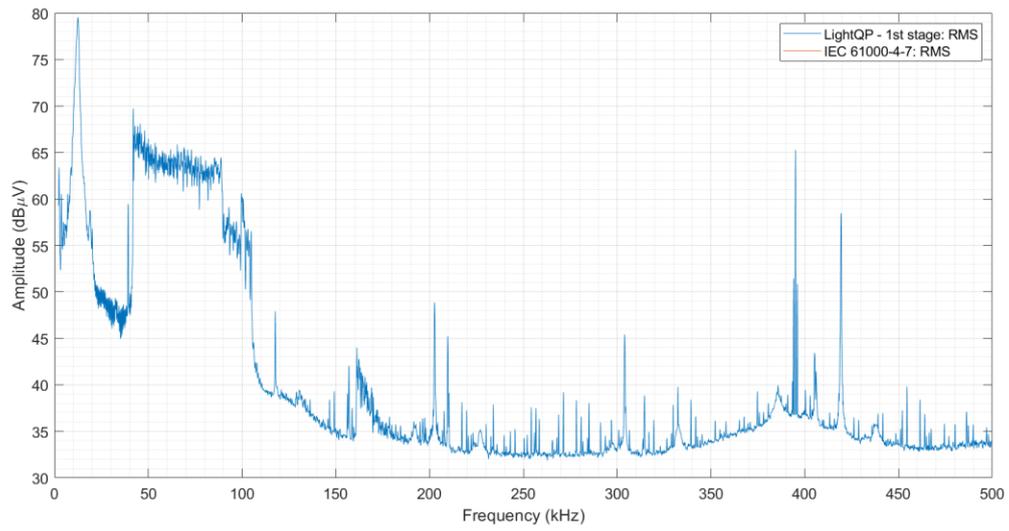


Figura 26: Espectro RMS calculado mediante el método Light-QP de la señal 'RUIDOCTOLARETXEF2'

7.2 Resultados: Guía de diseño de una señal sintética

En este apartado se va a mostrar cómo se genera una señal sintética. Esta señal sintética se basa en una grabación de la red, en la que las emisiones individuales han sido reproducidas y combinadas en una única señal sintética de prueba. Entre las formas de onda incluidas en la señal sintética se encuentran: ruido coloreado, NIE de banda estrecha, NIE de banda ancha, ruido impulsivo y ráfagas de comunicación PLC, así como sus réplicas.

La señal grabada que se ha reproducido está etiquetada como "RUIDOCTAXGANERX1F1", que fue medida por el Grupo TSR. La señal tiene los siguientes espectro y espectrograma, que se han utilizado para caracterizar sus emisiones y replicarlas en la señal sintética.

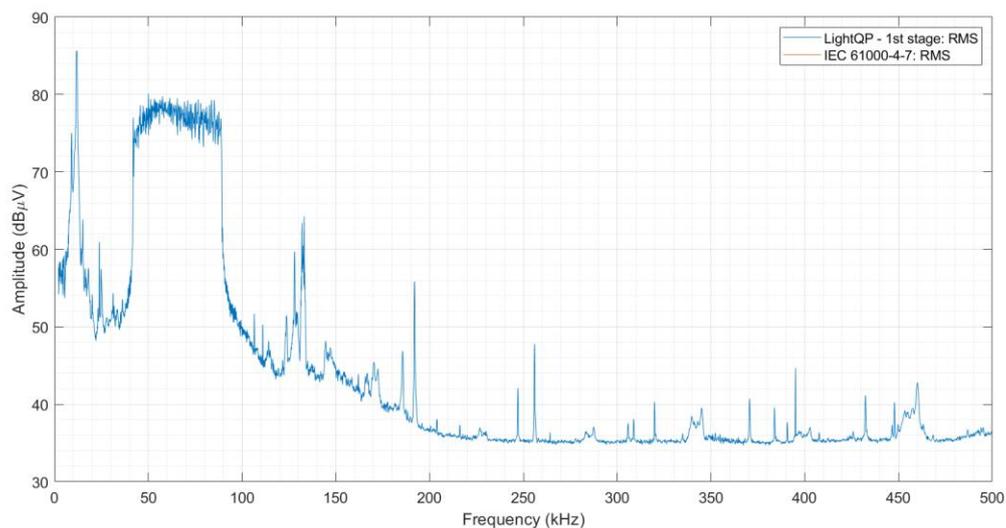


Figura 27: Espectro RMS calculado con la primera etapa del método Light-QP de la señal 'RUIDOCTAXGANERX1F1'

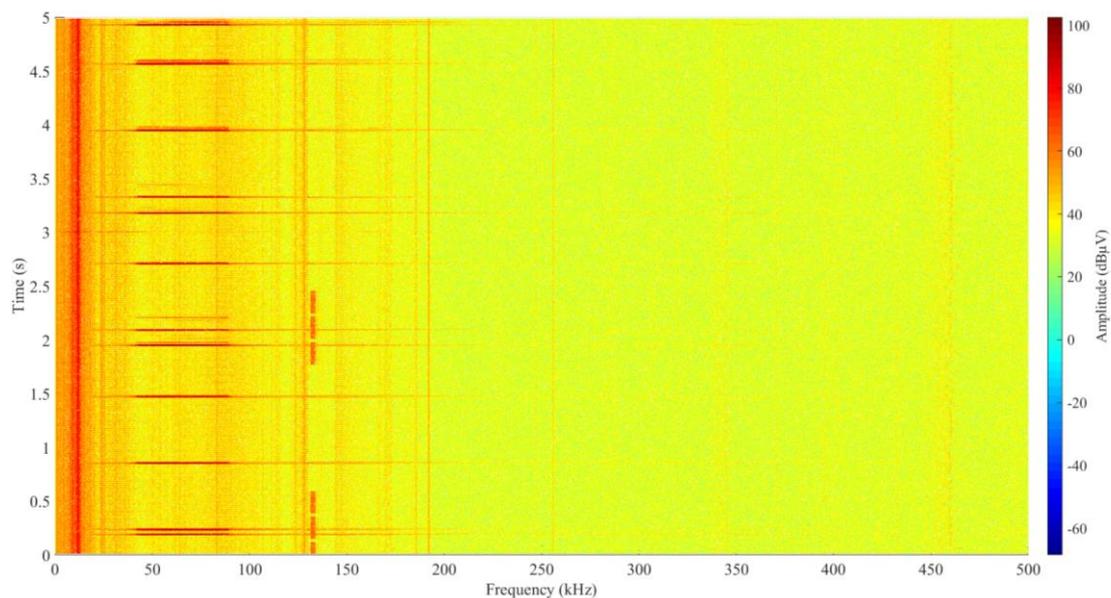


Figura 28: Espectrograma de la señal 'RUIDOCTAXGANERX1F1'

La señal sintética resultante se ha nombrado 'SYN_RUIDOCTAXGANERX1F1', nombre que hace referencia a la señal registrada en la red. Aunque ambas señales tienen un espectro y espectrograma similares, los valores de referencia PSD de la señal sintética son conocidos. Este aspecto permitirá evaluar la precisión de los métodos de medición existentes.

Para generar la señal sintética 'SYN_RUIDOCTAXGANERX1F1', hay que describir primero las características de las emisiones elementales que compondrán la señal resultante.

7.2.1 Análisis de la señal grabada e identificación de emisiones elementales

En este subapartado se analiza la señal grabada 'RUIDOCTAXGANERX1F1' y se identifican las emisiones elementales que componen dicha señal.

Por un lado, se observa NIE en forma de emisiones tonales (NIE de banda estrecha) en diferentes frecuencias (por ejemplo, en 128 kHz, en 192 kHz o en 395 kHz). Se han marcado las emisiones tonales con círculos verdes en el espectro (figura 29) y con flechas azules en el espectrograma (figura 30).

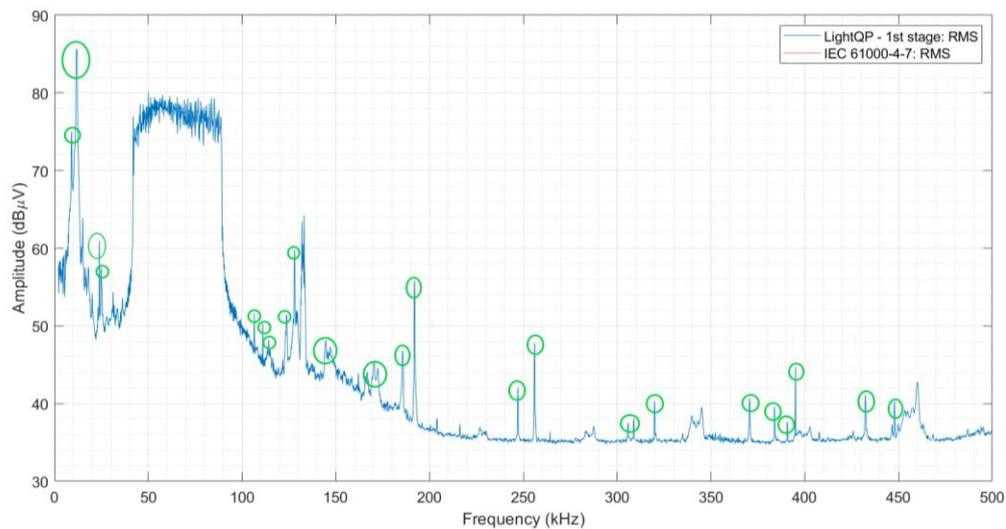


Figura 29: Espectro de la señal 'RUIDOCTAXGANERX1F1' que contiene emisiones tonales

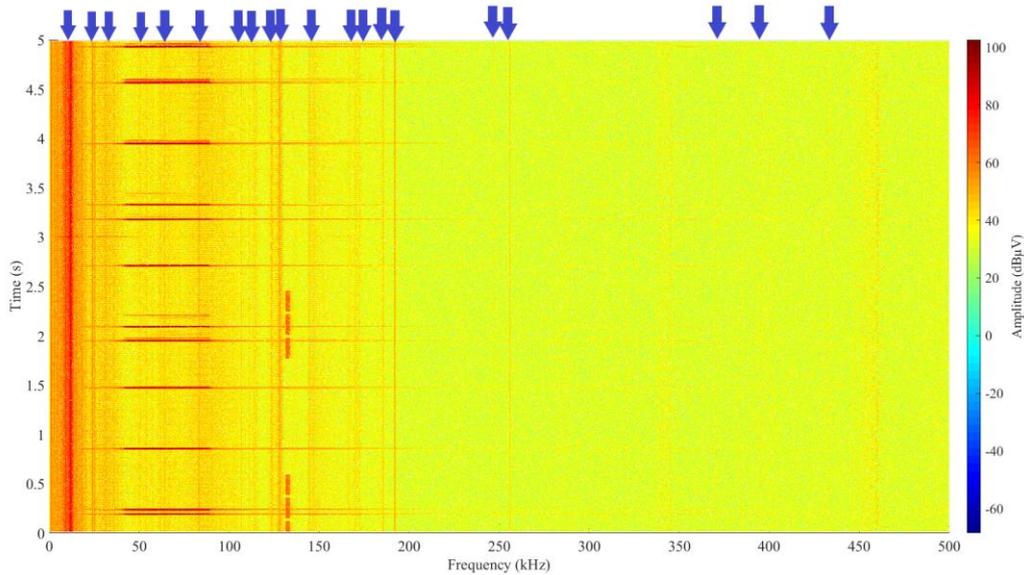


Figura 30: Espectrograma de la señal 'RUIDOCTAXGANERX1F1' que contiene emisiones tonales

Por otro lado, se observa una ráfaga PLC que va de 40 kHz a 100 kHz aproximadamente (frecuencias donde se ven este tipo de emisiones). Se ha marcado la emisión PLC en el espectro (figura 31) con un círculo verde y en azul en el espectrograma (figura 32).

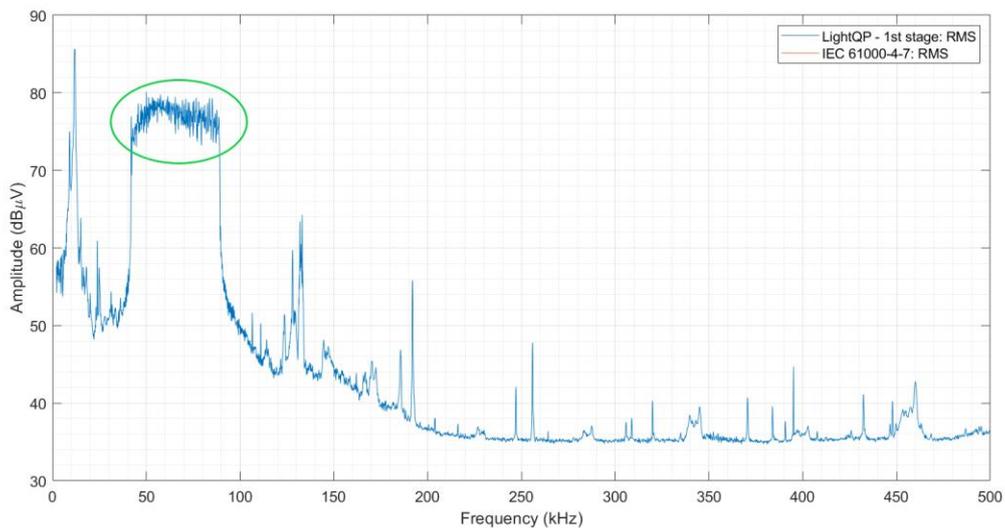


Figura 31: Espectro de la señal 'RUIDOCTAXGANERX1F1' que contiene una emisión PLC

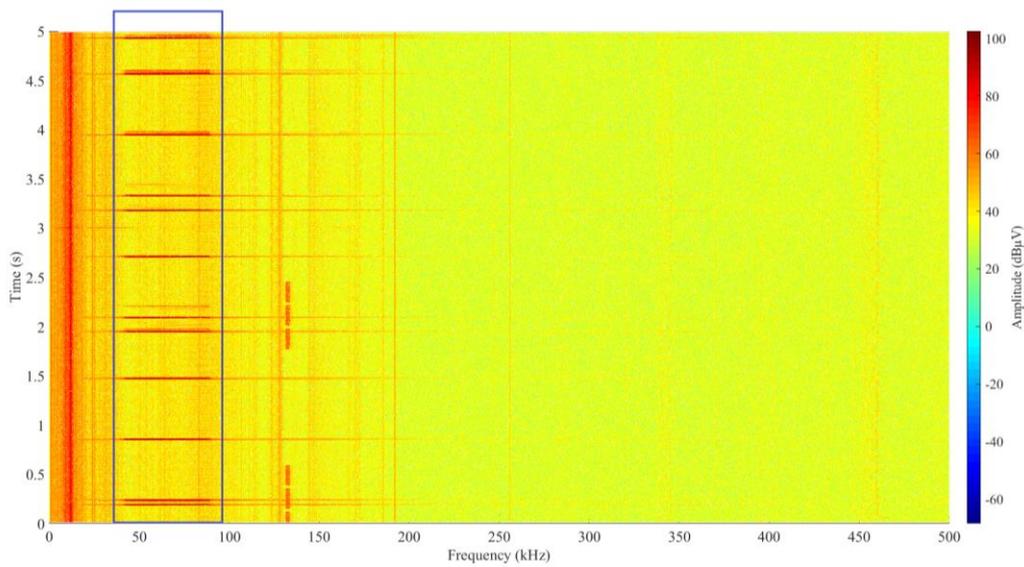


Figura 32: Espectrograma de la señal 'RUIDOCTAXGANERX1F1' que contiene emisiones PLC

A diferencia de las emisiones tonales, las NIE de banda ancha ocupan varias decenas de kHz. En este caso concreto, ocupan aproximadamente 20 kHz y se encuentran en las frecuencias 345 kHz y 456.9 kHz. Se ha marcado en verde las emisiones de banda ancha en el espectro (figura 33) y en azul en el espectrograma (figura 34).

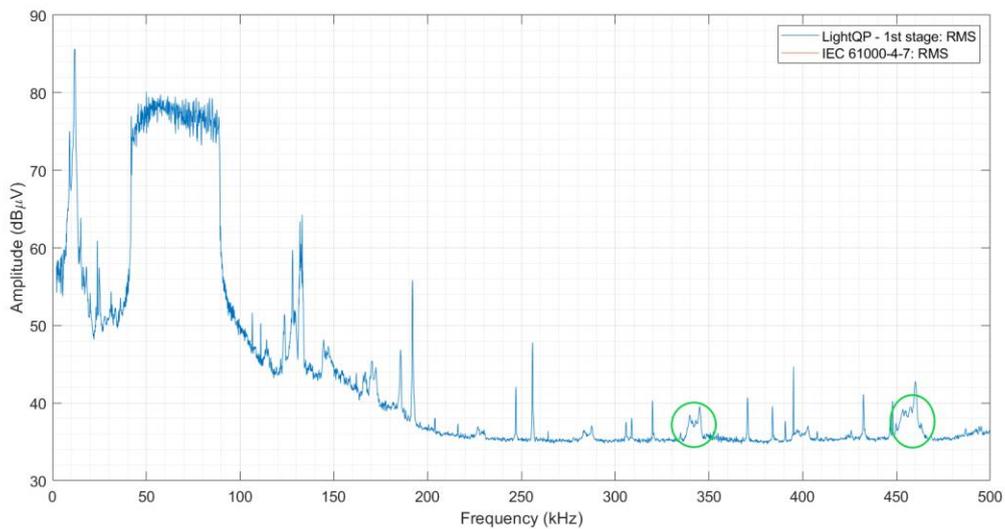


Figura 33: Espectro de la señal 'RUIDOCTAXGANERX1F1' que contiene una emisión de banda ancha

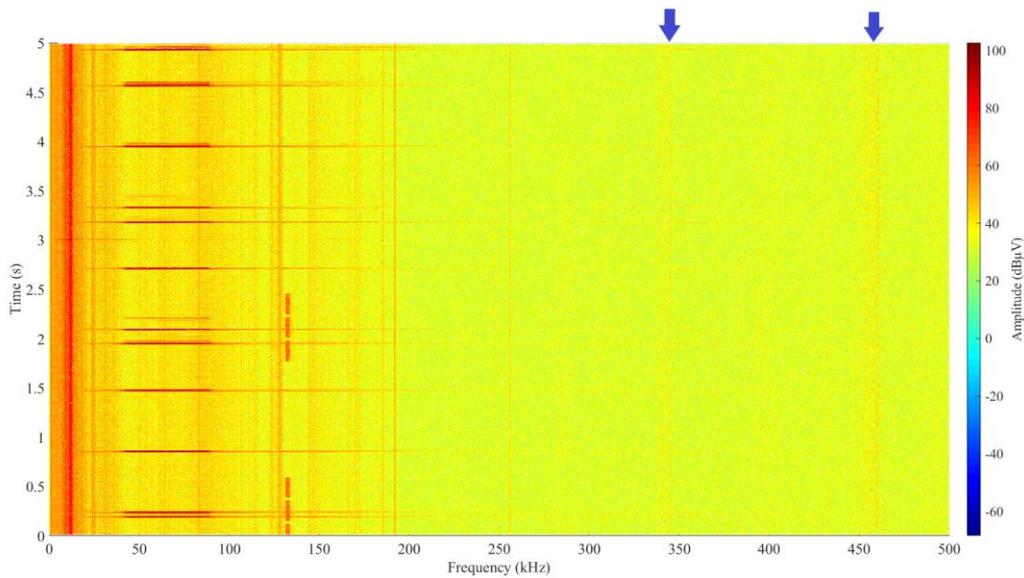


Figura 34: Espectrograma de la señal 'RUIDOCTAXGANERX1F1' que contiene emisiones de banda ancha

La señal 'RUIDOCTAXGANERX1F1' contiene ruido impulsional, que se manifiesta como una emisión tonal de gran amplitud. En este caso concreto se encuentra en 132.2 kHz. Se ha marcado en verde el ruido impulsional en el espectro (figura 35) y en azul en el espectrograma (figura 36).

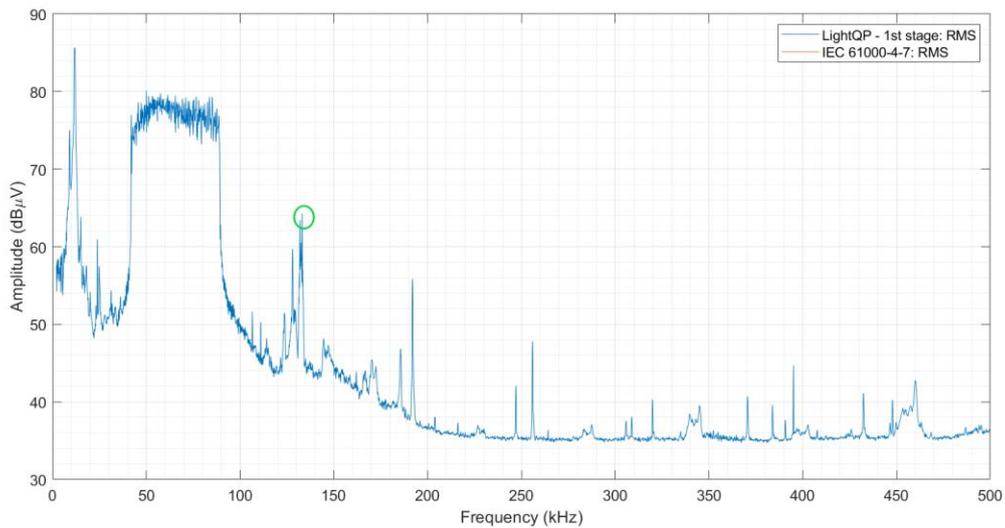


Figura 35: Espectro de la señal 'RUIDOCTAXGANERX1F1' que contiene ruido impulsional

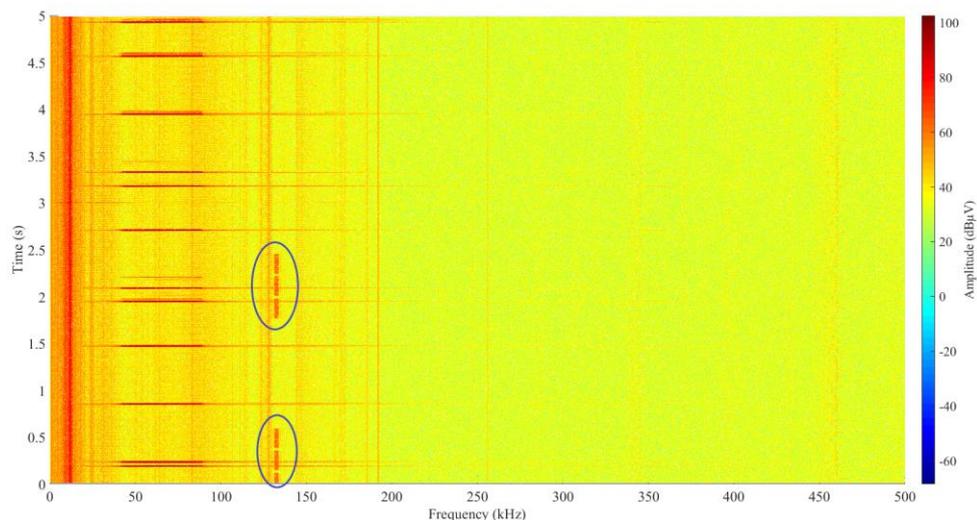


Figura 36: Espectrograma de la señal 'RUIDOCTAXGANERX1F1' que contiene ruido impulsional

Como puede observarse en el espectrograma, son emisiones de corta duración (en este caso 0.2 s) y de gran amplitud.

Por último, se ha marcado en la figura 37 dos ejemplos de réplicas PLC. Las réplicas PLC tienen el mismo patrón espectral y se ubican en frecuencias más altas. Estas réplicas sólo se producen durante las ráfagas de transmisión NB-PLC y duran unos pocos milisegundos.

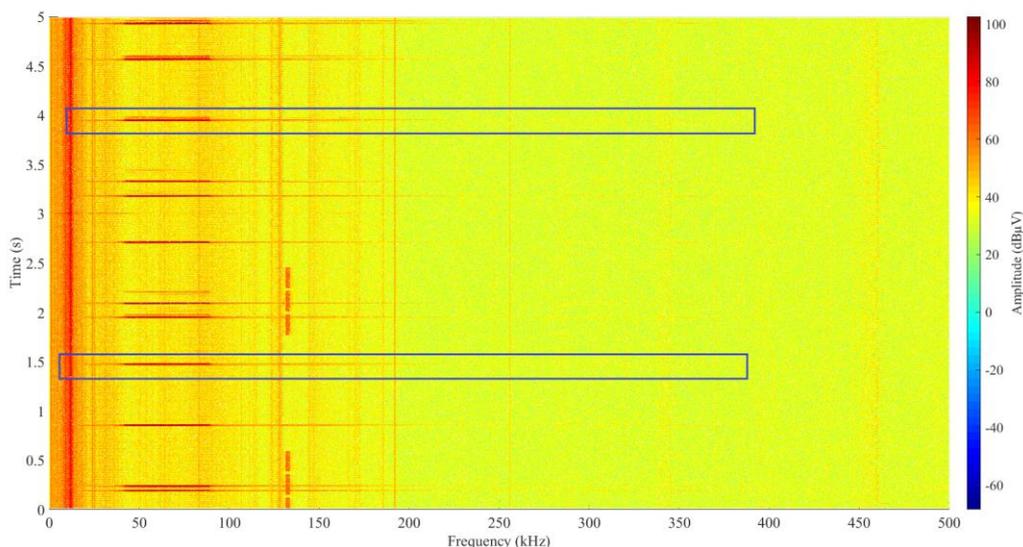


Figura 37: Espectro de la señal 'RUIDOCTAXGANERX1F1' que contiene réplicas PLC

7.2.2 Parametrización de las emisiones elementales y generación de las señales sintéticas elementales

En este subapartado se va a mostrar que parámetros son necesarios fijar y cómo se genera cada una de las señales individuales que conforman la señal.

- Emisiones tonales

Las emisiones tonales se generan a partir de la técnica basada en AWGN. Las formas de onda básicas de la tabla 3 se pueden agrupar en diferentes tipos de tonos, para reproducir los patrones de la señal original "RUIDOCTAXGANERX1F1". Se han definido once grupos de formas de onda (tipo de tono).

A continuación, se describen las características necesarias para generar las emisiones tonales. Se debe fijar los parámetros frecuencia central en kHz, amplitud en dB μ V y tipo de tono.

Parámetros para generar emisiones tonales		
Nivel max (dB μ V)	Frecuencia central (kHz)	Tipo de tono
75.050	9.100	2
67.342	11.000	6
85.500	11.800	2
63.884	15.000	2
61.934	23.950	1
57.478	24.850	2
54.370	31.200	1
50.716	31.800	2
52.648	106.500	1
51.279	111.100	1
43.937	114.200	5
45.195	114.200	11
46.201	123.200	2
51.423	123.700	3
59.716	128.000	2
51.214	128.600	5

43.400	146.100	6
45.088	144.500	11
47.332	147.000	3
45.525	146.100	7
42.904	162.000	2
42.739	165.500	10
43.464	169.300	3
44.446	170.300	10
40.919	172.000	3
44.615	172.400	11
46.851	185.600	3
55.963	191.900	2
42.099	247.100	3
47.800	255.900	2
36.540	305.800	3
37.110	308.800	3
40.328	319.900	3
35.478	339.700	10
36.615	341.500	8
38.721	345.000	10
39.731	370.600	3
38.575	383.000	2
36.690	390.700	3
43.679	395.000	1
41.110	432.300	3
38.166	456.900	9
41.794	460.000	5

Tabla 4. Parámetros para generar las emisiones tonales de 'RUIDOCTAXGANERX1F1'

En la tabla 5 se describen las características de los tipos de tonos. La tabla 4 y 5 están asociadas, se encuentran en diferentes pestañas del mismo fichero Excel.

A continuación, se explican los parámetros que aparecen en la tabla 5.

- **Passband:** Ancho de banda a -3dB del filtro, en kHz
- **Stopband:** Ancho de banda a -10 dB del filtro, en kHz
- **Variabilidad respecto al pico:** Variabilidad de la amplitud en el tiempo que la señal resultante, en %
- **Periodo de variabilidad:** Periodo de variabilidad de la función que modula la señal
- **Tipo var:** Tipo de función que modula la señal (sine wave module o sine wave)
- **Stopband attenuation:** Atenuación mínima que debe garantizarse fuera del stopband, en dB
- **Tipo filtro:** Método de diseño del filtro
- **Respuesta impulsional:** Tipo de respuesta al impulso que debe tener el filtro (FIR o IIR)

Tipos de tonos								
Tono	Passband (kHz)	Stopband (kHz)	Var peak (%)	Period var (ms)	Tipo var	Stopband att	Tipo filtro	Respuesta impulsional
1	0.14	0.13	0.9	10	sine wave module	10	butter	bandpassiir
2	0.3	1	0.9	10	sine wave module	10	butter	bandpassiir
3	1	2	0.9	35	sine wave module	10	butter	bandpassiir
4	2	6	0.9	240	sine wave	10	butter	bandpassiir
5	3	4	0.9	35	sine wave	10	butter	bandpassiir
6	5	6	0.9	35	sine wave	10	butter	bandpassiir
7	6	6.5	0.9	35	sine wave	10	butter	bandpassiir
8	7	7.5	0.9	35	sine wave	10	butter	bandpassiir
9	10	11	0.9	35	sine wave	10	butter	bandpassiir
10	2.5	3.5	0.9	35	sine wave	10	butter	bandpassiir
11	1.2	3.5	0.9	35	sine wave	10	butter	bandpassiir

Tabla 5. Parámetros correspondientes a cada tipo de emisión tonal

En la figura 38 se muestra el conjunto de emisiones tonales que conforman la señal "RUIDOCTAXGANERX1F1" que se ha generado a partir de los parámetros de las tablas 4 y 5.

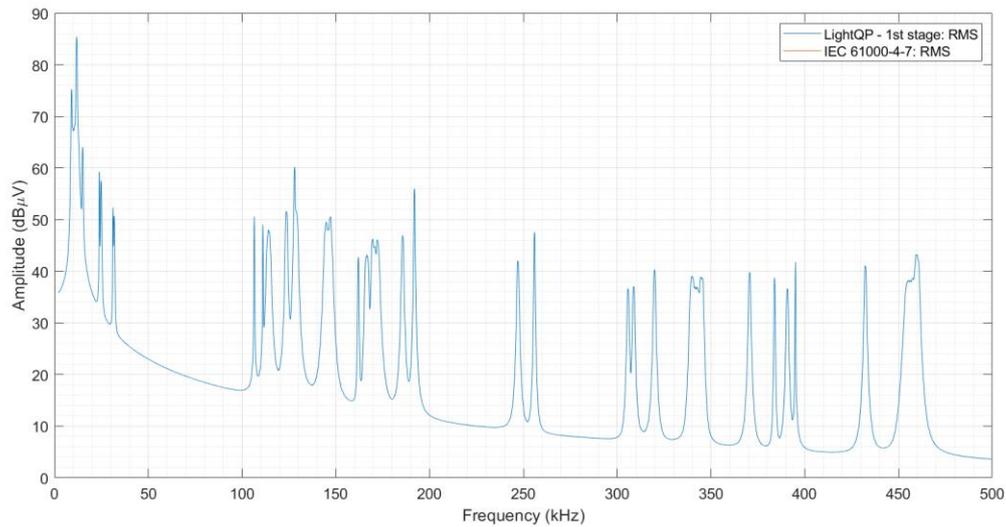


Figura 38: Conjunto de emisiones tonales que conforman la señal 'RUIDOCTAXGANERX1F1'

- Ruido coloreado

La misma técnica (formas de onda basadas en AWGN) se utiliza para generar el ruido de fondo de la señal. Sin embargo, esta emisión es generada por formas de onda filtradas, como en el caso anterior, y una emisión no filtrada. Esto se debe a que el ruido coloreado no es una emisión concentrada en una sola banda, ya que debe cubrir todo el espectro, y no requiere una modulación adicional de la amplitud en el tiempo.

En este caso, el ruido coloreado se compone de seis emisiones filtradas y una no filtrada. Los parámetros para generar esta emisión son los siguientes. En la tabla 6 se muestran los parámetros necesarios para generar el ruido.

Parámetros para generar el ruido coloreado			
Primera forma de onda	Parámetros para el AWGN	Duración de la señal	5.00 s
		Frecuencia de muestreo	2.00 MHz
		Amplitud del AWGN	-17.00 dBm
	Características del filtro	Tipo de respuesta impulsional	IIR-Lowpass
		Método de diseño del filtro	Butter
		Frecuencia central	2.00 kHz
		Banda de paso	15.00 kHz
		Orden del filtro	2
	Segunda forma de onda	Parámetros para el AWGN	Duración de la señal
Frecuencia de muestreo			2.00 MHz
Amplitud del AWGN			-30 dBm
Características del filtro		Tipo de respuesta impulsional	IIR-Bandpass
		Método de diseño del filtro	Butter
		Frecuencia central	85.00 kHz
		Banda de paso	45.00 kHz
		Orden del filtro	2
		Parámetros para el AWGN	Duración de la señal
	Frecuencia de muestreo		2.00 MHz
	Amplitud del AWGN		-44 dBm
	Características del filtro	Tipo de respuesta impulsional	IIR-Bandpass
		Método de diseño del filtro	Butter

Tercera forma de onda		Frecuencia central	120.00 kHz
		Banda de paso	130.00 kHz
		Orden del filtro	2
Cuarta forma de onda	Parámetros para el AWGN	Duración de la señal	5.00 s
		Frecuencia de muestreo	2.00 MHz
		Amplitud del AWGN	-31 dBm
	Características del filtro	Tipo de respuesta impulsional	IIR-Bandpass
		Método de diseño del filtro	Butter
		Frecuencia central	87.00 kHz
		Banda de paso	8.00 kHz
		Orden del filtro	4
Quinta forma de onda	Parámetros para el AWGN	Duración de la señal	5.00 s
		Frecuencia de muestreo	2.00 MHz
		Amplitud del AWGN	-35 dBm
	Características del filtro	Tipo de respuesta impulsional	IIR-Bandpass
		Método de diseño del filtro	Butter
		Frecuencia central	60.00 kHz
		Banda de paso	15.00 kHz
		Orden del filtro	4

Sexta forma de onda	Parámetros para el AWGN	Duración de la señal	5.00 s
		Frecuencia de muestreo	2.00 MHz
		Amplitud del AWGN	-24 dBm
	Características del filtro	Tipo de respuesta impulsional	IIR-Bandpass
		Método de diseño del filtro	Butter
		Frecuencia central	32.00 kHz
		Banda de paso	8.00 kHz
		Orden del filtro	2
Séptima forma de onda	Parámetros para el AWGN	Duración de la señal	5.00 s
		Frecuencia de muestreo	2.00 MHz
		Amplitud del AWGN	-28 dBm

Tabla 6. Parámetros para generar el ruido coloreado de 'RUIDOCTAXGANERX1F1'

El ruido coloreado generado a partir de los parámetros de la tabla 6 se muestra en la figura 39.

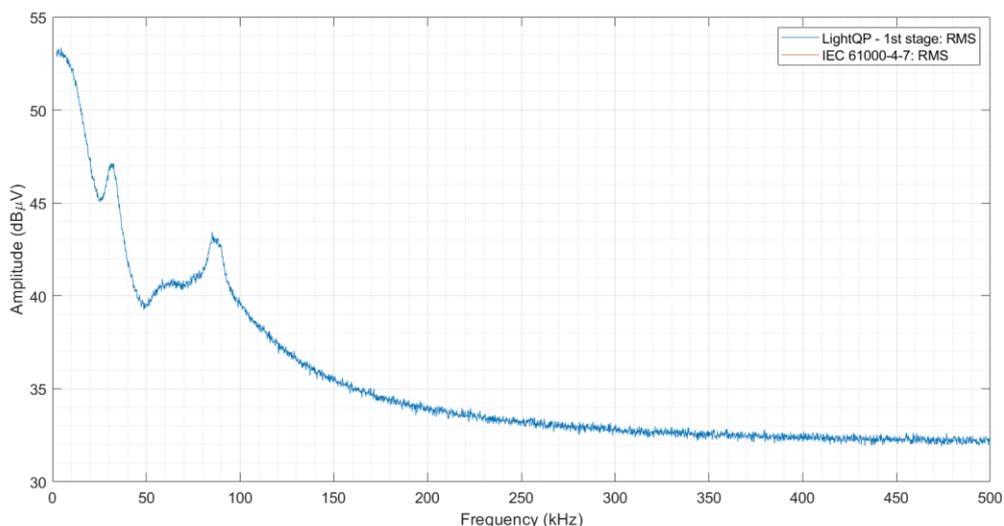


Figura 39: Ruido coloreado de la señal 'RUIDOCTAXGANERX1F1'

- Ráfagas PLC

A continuación, se describe cómo se generan las emisiones correspondientes a las ráfagas del PLC. Estas formas de onda, a diferencia de las anteriores, se generan mediante codificación polar. Para generarlas, además de conocer las características de las transmisiones PRIME PLC, también se deben conocer la duración de las ráfagas y la amplitud de cada subportadora dentro del esquema OFDM.

La tabla 7 contiene los parámetros para generar las ráfagas PLC sintéticas.

Parámetros para generar ráfagas PLC			
N.º ráfaga PLC	Tiempo inicial (s)	Tiempo final (s)	Nivel max (dBµV)
1	0.18399	0.1920	94.616
2	0.2305	0.2405	93.313
3	0.9111	0.9222	94.616
4	1.4675	1.4767	94.917
5	1.9430	1.9500	9.950
6	1.9675	1.9800	60.755
7	2.0850	2.0950	95.085
8	2.2000	2.2067	63.295

9	2.7033	2.7150	95.683
10	3.1733	3.1788	95.710
11	3.3225	3.3325	95.545
12	3.9400	3.9466	93.088
13	3.9725	3.9825	62.328
14	4.5575	4.5666	93.310
15	4.5916	4.6016	75.959
16	4.9233	4.9300	96.385

Tabla 7. Parámetros para la generación de las ráfagas PLC de 'RUIDOCTAXGANERX1F1'

Una vez generadas las ráfagas de PLC, deben ser filtradas para eliminar los lóbulos laterales de las emisiones y no interferir con las frecuencias adyacentes, como hacen los dispositivos comerciales.

Las características del filtro que se ha diseñado son las siguientes:

Característica del filtro paso-banda Butterworth IIR	
Frecuencia central	65.67 kHz
Banda de paso	51.56 kHz
Orden	20

Tabla 8. Característica del filtro paso-banda Butterworth IIR

- Réplicas PLC

Las ráfagas PLC pueden tener réplicas en diferentes frecuencias. Para generar dichas réplicas se deben fijar los siguientes parámetros: nivel de amplitud en dB μ V, frecuencia central en kHz, tipo de tono y var time.

Parámetros para generar las réplicas PLC				
N.º ráfaga	Nivel max (dB μ V)	Frecuencia central (kHz)	Tipo tono	Var time
1	69.616	118.5	13	1
2	58.313	118.5	13	2
3	59.616	118.5	13	3
4	31.917	118.5	13	4
5	63.950	118.5	13	5
6	27.755	118.5	13	6
7	58.085	118.5	13	7
8	30.295	118.5	13	8
9	62.683	118.5	13	9
10	62.710	118.5	13	10
11	62.545	118.5	13	11
12	56.088	118.5	13	12
13	29.328	118.5	13	13
14	56.310	118.5	13	14
15	42.959	118.5	13	15
16	63.385	118.5	13	16
17	56.000	25	14	1
18	56.000	25	14	2
19	56.000	25	14	3
20	56.000	25	14	4
21	56.000	25	14	5
22	56.000	25	14	7
23	56.000	25	14	9
24	56.000	25	14	10
25	56.000	25	14	11

26	56.000	25	14	12
27	56.000	25	14	14
28	56.000	25	14	16
29	50.000	270	15	1
30	50.000	270	15	2
31	50.000	270	15	3
32	50.000	270	15	4
33	50.000	270	15	5
34	50.000	270	15	7
35	50.000	270	15	9
36	50.000	270	15	11
37	50.000	270	15	12
38	50.000	270	15	14
39	50.000	270	15	16
40	40.000	380	15	1
41	40.000	380	15	2
42	40.000	380	15	3
43	40.000	380	15	4
44	40.000	380	15	5
45	40.000	380	15	7
46	40.000	380	15	9
47	40.000	380	15	11
48	40.000	380	15	12
49	40.000	380	15	14
50	40.000	380	15	16
51	50.000	450	15	1
52	50.000	450	15	2
53	50.000	450	15	3
54	50.000	450	15	4
55	50.000	450	15	5
56	50.000	450	15	7

57	50.000	450	15	9
58	50.000	450	15	11
59	50.000	450	15	12
60	50.000	450	15	14
61	50.000	450	15	16

Tabla 9. *Parámetros para generar las réplicas PLC de 'RUIDOCTAXGANERX1F1'*

La tabla 9 está asociada a otras dos tablas, la tabla 10 que define el inicio y final de las réplicas PLC (var time) y la tabla 5 que define el tipo de tono; tablas que se encuentran en otras pestañas del mismo fichero Excel.

Var time	Tiempo inicial (s)	Tiempo final (s)
1	0.1839	0.1920
2	0.2305	0.2405
3	0.9111	0.9222
4	1.4675	1.4767
5	1.9430	1.9500
6	1.9675	1.9800
7	2.0850	2.0950
8	2.2000	2.2067
9	2.7033	2.7150
10	3.1733	3.1788
11	3.3225	3.3325
12	3.9400	3.9466
13	3.9725	3.9825
14	4.5575	4.5666
15	4.5916	4.6016
16	4.9233	4.9300

Tabla 10. *Parámetros tiempo final e inicial de las réplicas PLC de 'RUIDOCTAXGANERX1F1'*

- Ruido impulsional

Para generar el ruido impulsional se sigue el mismo método que para generar las réplicas PLC, por lo que la disposición de las tablas es la misma. En la tabla 11 se muestran los parámetros para generar el ruido impulsional.

Parámetros para generar ruido impulsional				
N.º ráfaga ruido impulsional	Nivel max (dBµV)	Frecuencia central (kHz)	Tipo tono	Var time
1	63.4023	132.2025	2	6
2	58.7205	132.2025	2	5
3	60.4897	132.2025	2	4
4	58.7789	132.2025	2	3
5	64.2698	132.2025	2	2
6	57.0156	132.2025	2	1

Tabla 11. Parámetros para generar el ruido impulsional de 'RUIDOCTAXGANERX1F1'

La tabla 11 está asociada por un lado a la tabla 5 de nuevo, que define el tipo de tono y por otro lado a la tabla 12 que define el tiempo inicial y final de cada ráfaga de ruido impulsional.

Var time	Tiempo inicial (s)	Tiempo final (s)
1	0.0000	0.1219
2	0.1499	0.3579
3	0.3879	0.5939
4	1.7719	1.9779
5	2.0099	2.2179
6	2.2479	2.4558

Tabla 12. Parámetros tiempo final e inicial de las ráfagas de ruido impulsional de 'RUIDOCTAXGANERX1F1'

7.2.3 Señal sintética combinada

Después de generar todas las emisiones, y sus correspondientes valores de referencia, éstas pueden combinarse para crear la señal "SYN_RUIDOCTAXGANERX1F1". El espectro resultante tras combinar las señales elementales se muestra en la figura 40 (subapartado 7.2.4).

7.2.4 Validación de la señal sintética combinada

En este subapartado se describe cómo se debe llevar a cabo el proceso de validación de la señal sintética.

Para llevar a cabo el proceso de validación de la señal sintética resultante es necesario aplicar el mismo tratamiento a las señales sintéticas que a las señales grabadas. Los espectros de las señales grabadas se han calculado mediante la primera etapa del método Light-QP, por lo que para que los valores RMS de ambas señales sean comparables se deberá aplicar el mismo método a las señales sintéticas. Una vez se han obtenido los espectros RMS de las señales sintéticas pueden ser comparadas con su señal grabada análoga. Se debe comprobar que la evolución temporal del espectro y su forma espectral es similar tanto en tiempo como en frecuencia, así como los valores RMS de amplitud. A continuación, se muestran los resultados obtenidos al combinar las señales elementales que se han mencionado en el apartado. Por un lado, las figuras 40 y 41 se corresponden con los espectros de 'SYN_RUIDOCTAXGANERX1F1' y de 'RUIDOCTAXGANERX1F1', respectivamente. Por otro lado, las figuras 42 y 43 muestran los espectrogramas de ambas señales.

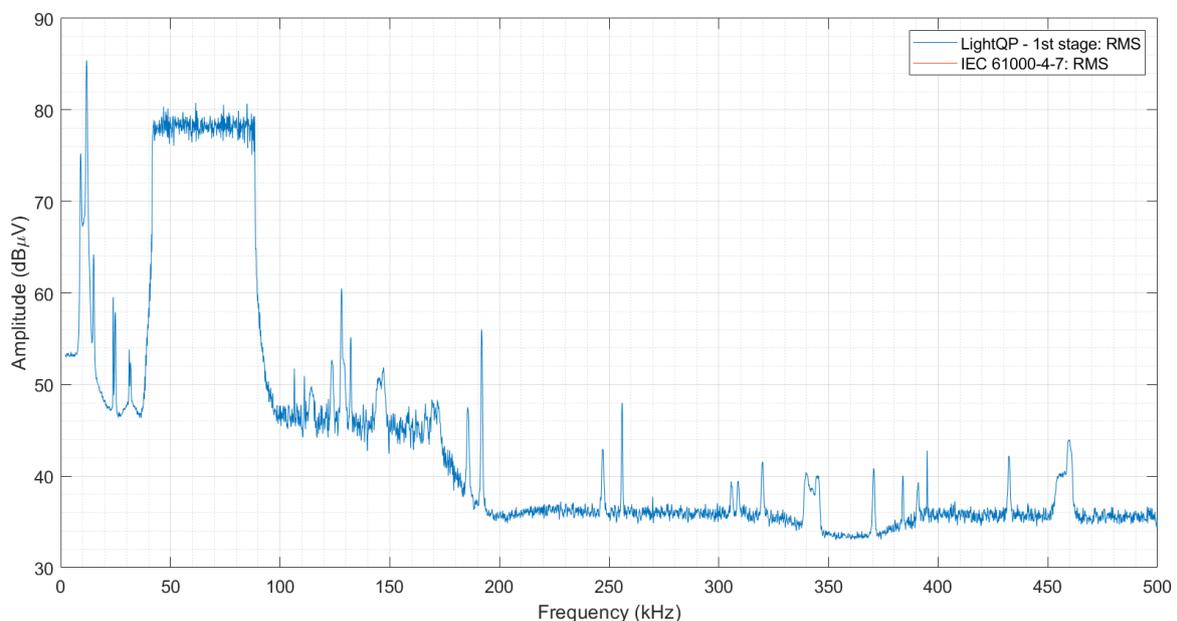


Figura 40: Espectro calculados a partir de la primera etapa del método Light-QP de 'SYN_RUIDOCTAXGANERX1F1'

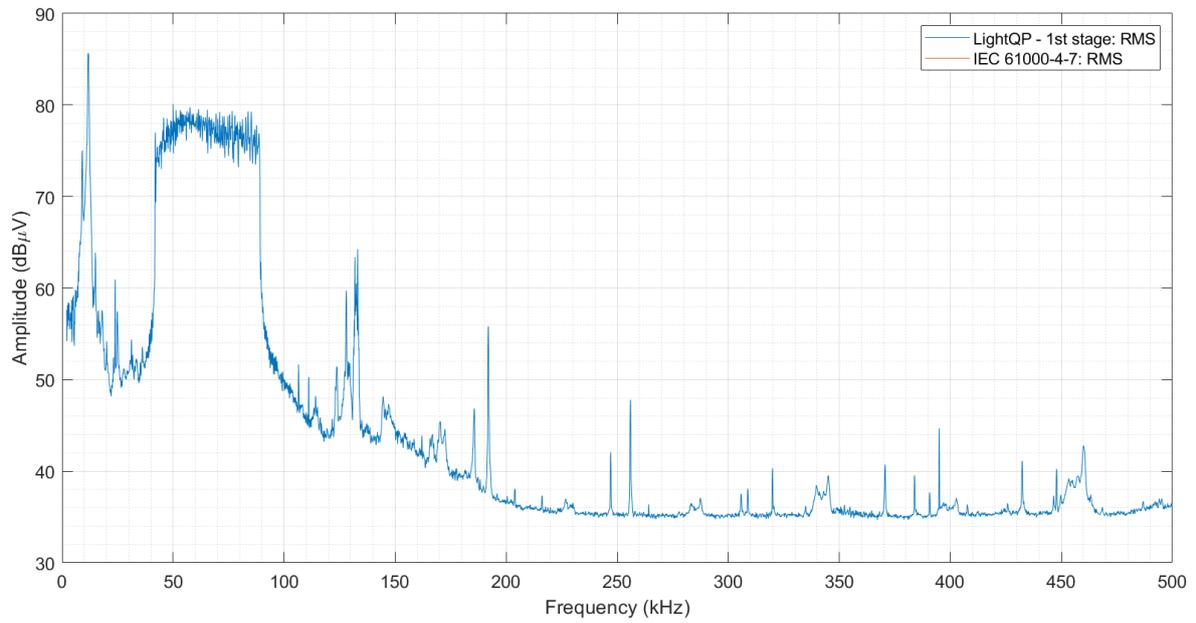


Figura 41: Espectro calculados a partir de la primera etapa del método Light-QP de 'RUIDOCTAXGANERX1F1'

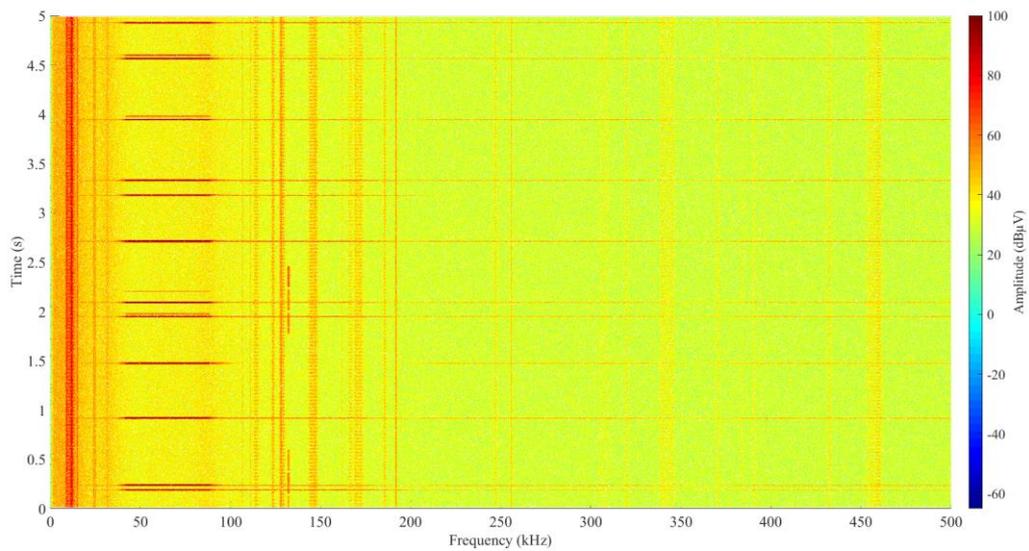


Figura 42: Espectrograma de la señal 'SYN_RUIDOCTAXGANERX1F1'

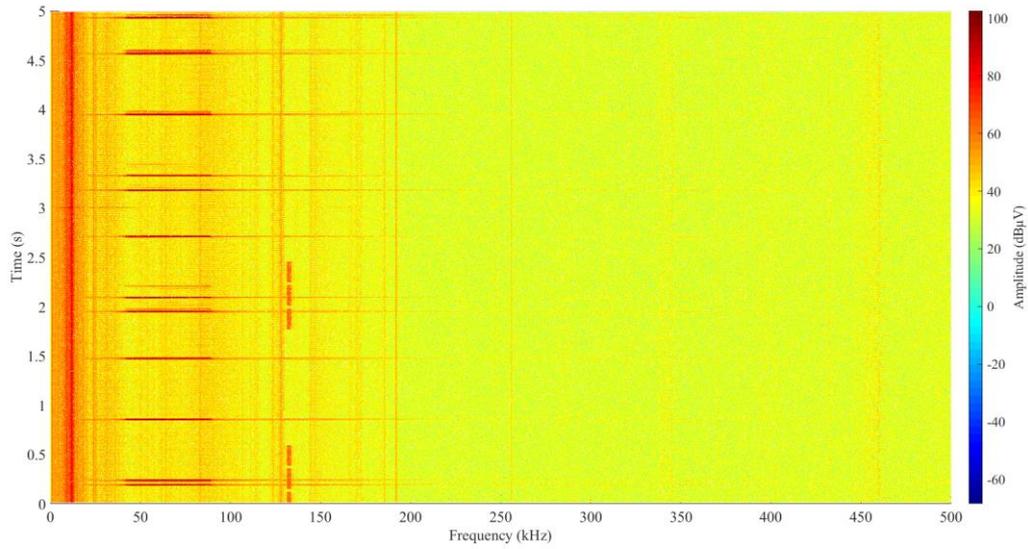


Figura 43: Espectrograma de la señal 'RUIDOCTAXGANERX1F1'

En el anexo 1 se encuentran los espectros y espectrogramas de las demás señales sintéticas que se han generado empleando la misma metodología que para la señal 'RUIDOCTAXGANERX1F1'. Asimismo, en el anexo 2 se encuentra una guía de usuario que explica paso a paso cómo se genera la señal 'RUIDOCTAXGANERX1F1' empleando el software.

8. Planificación

En este apartado se exponen los paquetes de trabajo en los que ha sido organizado el Trabajo de Fin de Máster y las tareas realizadas en cada uno de ellos, además de mostrar el diagrama de Gantt con todas las tareas.

8.1 Fases de trabajo

En la tabla 13 se enumeran las tareas que se han seguido en el desarrollo del Trabajo de Fin de Máster.

Paquetes trabajo	Etiqueta Tarea/Entr	Duración	Tarea	Miembros
WP1	T01	15/02-07/03	Búsqueda bibliográfica de información sobre Smart Grids	Andrea Martínez
WP2	T02	08/03-15/03	Familiarización con el SW heredado	Andrea Martínez Alex Gallarreta
	T03	16/03-21/03	Primeras pruebas de generación de señales elementales empleando el SW heredado	Andrea Martínez Alex Gallarreta
	E01	21/03	Entrega de una señal sintética conformada por dos señales elementales (emisiones tonales y ruido coloreado)	Andrea Martínez
WP3	T04	22/03-25/03	Extensión de los algoritmos existentes hasta 500 kHz	Andrea Martínez
	E02	25/03	Entrega de una señal generada hasta 500 kHz	Andrea Martínez
WP4	T05	28/03-31/03	Estudio del estándar G3-PLC	Andrea Martínez
	T06	01/04-14/04	Desarrollo de código específico para generar ráfagas G3-PLC	Andrea Martínez
	T07	15/04-20/04	Primeras pruebas de generación de ráfagas G3-PLC	Andrea Martínez
	E03	20/04	Entrega de un ejemplo de burst G3-PLC	Andrea Martínez
WP5	T08	21/04-02/05	Desarrollo de código específico para generar ruido impulsional	Andrea Martínez
	T09	03/05-09/05	Primeras pruebas de generación de ruido impulsional	Andrea Martínez
	E04	09/05	Entrega de ejemplo de ruido impulsional	Andrea Martínez

WP6	T10	10/05-29/07	Parametrización de once señales	Andrea Martínez
WP7	T11	10/05-29/07	Generación de las once señales a replicar	Andrea Martínez
WP8	T12	10/05-29/07	Validación de las once señales que conforman la base de datos	David de la Vega Andrea Martínez Alex Gallarreta
WP9	E05	10/06	Entrega de la primera tanda de las señales que conforman la BD	Andrea Martínez
	E06	29/07	Entrega de la segunda tanda de las señales que conforman la BD	Andrea Martínez
WP10	T13	01/08-18/09	Documentación del Trabajo de Fin de Máster	Andrea Martínez

Tabla 13. Fases de trabajo

A continuación, se va a dar una descripción detallada de cada paquete de trabajo y de las tareas que lo componen.

- **WP1: Búsqueda bibliográfica sobre Smart Grids**
 - **T01:** Esta tarea consiste en hacer un trabajo de investigación acerca del contexto general que rodea las Smart Grids.
- **WP2: Familiarización de SW heredado y primeras pruebas**
 - **T02:** Esta tarea consiste en comprender los scripts que componen el SW heredado y cómo se emplea el SW.
 - **T03:** Esta tarea incluye las primeras pruebas empleando el SW. Se hace una prueba de simulación de una señal sintética simple que está compuesta tan sólo por emisiones tonales y ruido coloreado.
 - **E01:** Esta entrega incluye los resultados obtenidos en la tarea T03.
- **WP3: Extensión de los algoritmos hasta 500 kHz**
 - **T04:** En esta tarea se extienden todos los algoritmos del SW heredado hasta 500 kHz. Se modifican ejes y plots en los scripts. A su vez, se hace una prueba de simulación de una señal sintética hasta 500 kHz.
 - **E02:** Esta entrega incluye la simulación realizada en la T04.
- **WP4: Desarrollo del código para generar señales G3-PLC**
 - **T05:** En esta tarea se hace un estudio del estándar G3-PLC. Se identifican los parámetros necesarios para generar las ráfagas G3-PLC.
 - **T06:** En esta tarea se desarrolla el código para la generación de señales según el estándar G3-PLC en MATLAB.
 - **T07:** En esta tarea se hace una primera prueba de simulación de señales G3-PLC para comprobar que el código es correcto.
 - **E03:** Esta tarea incluye la prueba de simulación realizada en la tarea T07.

- **WP5: Desarrollo de código específico para generar ruido impulsional**
 - **T08:** En esta tarea se desarrolla el código específico para generar ruido impulsional. El método que se aplica en el script se basa en AWGN.
 - **T09:** En esta tarea se realizan varias pruebas de simulación de ruido impulsional. Se comprueba si la generación se ha hecho de manera correcta tanto en el espectro de la señal como en el espectrograma.
 - **E04:** Esta entrega incluye las pruebas realizadas en la tarea T09.

- **WP6: Parametrización de las once señales**
 - **T10:** En esta tarea se fijan los parámetros necesarios para generar cada tipo de emisión que compone cada una de las once señales grabadas en la red. Estos parámetros se encuentran en archivos Excel.

- **WP7: Generación de las once señales**
 - **T11:** En esta tarea se genera la base de datos conformada por las once señales sintéticas. Se genera cada señal elemental o tipo de emisión de manera individual y más tarde se combinan formando una señal sintética resultante.

- **WP8: Validación de las once señales sintéticas**
 - **T12:** En esta tarea se lleva a cabo el proceso de validación de las once señales. Se solapan los espectros de la señal sintética y la señal grabada en la red y se verifica que tanto la forma espectral como los valores de amplitud son similares. Además, se comprueba que los espectros de ambas señales son similares.

- **WP9: Entrega de la base de datos de señales sintéticas**
 - **E05:** Esta entrega incluye la mitad de las señales sintéticas. Se entregan la señal sintética resultante, la señal grabada en la red, los ficheros Excel que contienen los parámetros para generar cada tipo de emisión que conforma la señal resultante y los espectros solapados de ambas señales y espectrogramas de la tarea T12.
 - **E06:** Esta entrega incluye la segunda mitad de las señales sintéticas. Se entregan los mismos ficheros que en la entrega E05.

- **WP10: Documentación del Trabajo de Fin de Máster**
 - **T13:** Esta tarea incluye la documentación del Trabajo de Fin de Máster que incluye los resultados, una guía de cómo se genera una señal paso a paso y un manual de usuario del SW. También, se incluyen todos los aspectos teóricos del proyecto en el estado del arte.

Los hitos relacionados con las tareas descritas anteriormente se enumeran en la siguiente tabla.

Etiqueta hito	Fecha	Hito
H01	25/03	Finalización del paquete de trabajo WP3
H02	20/04	Finalización del paquete de trabajo WP4
H03	09/05	Finalización del paquete de trabajo WP5
H04	29/07	Finalización del paquete de trabajo WP8
H05	10/06	Entrega de la primera tanda de las señales que conforman la BD
H06	29/07	Entrega de la segunda tanda de las señales que conforman la BD

Tabla 14. Hitos del proyecto

8.2 Gantt

A continuación, se muestra el Gantt de este Trabajo de Fin de Máster.

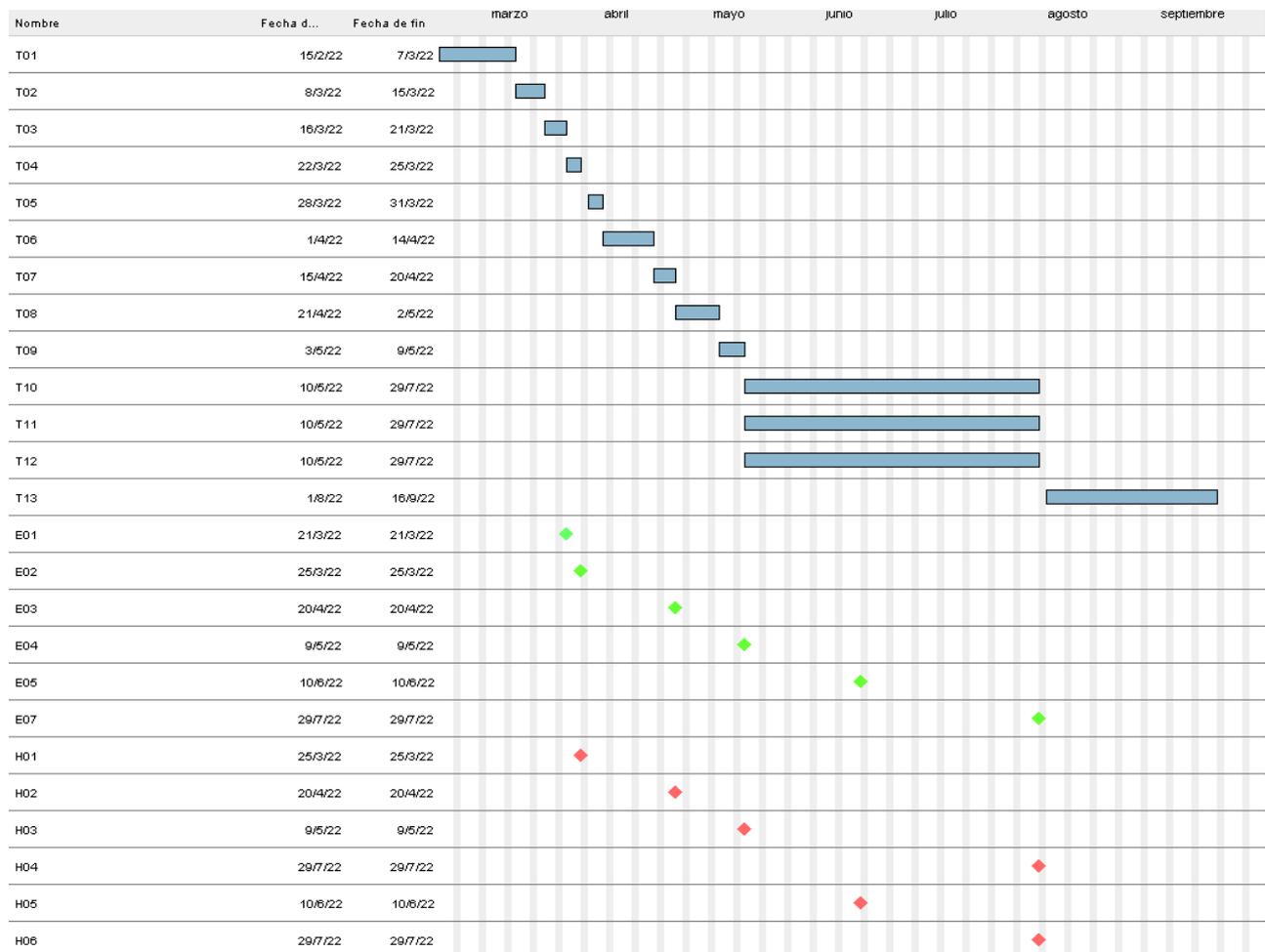


Figura 44: Gantt del proyecto

9. Presupuesto

En este apartado, se expone el coste total del proyecto. Los costes directos del proyecto se dividen en horas internas, amortizaciones y gastos generales.

9.1 Horas internas

En este primer apartado se recoge el coste de la mano de obra necesaria para realizar el proyecto. Se definen como las horas de los miembros del equipo de trabajo para la realización del proyecto.

Nombre	Oficio	Horas (h)	Tasa horaria (€/hora)	Coste total (€)
Andrea Martínez	Desarrolladora del proyecto	600	20	12.000
Alex Gallarreta	Colaborador del proyecto	200	40	8.000
David de la Vega	Director del proyecto	200	55	11.000
			Subtotal	31.000 €

Tabla 15. Presupuesto: horas internas

9.2 Costes indirectos

En este segundo apartado se va a calcular el coste del conjunto de útiles, las herramientas disponibles para poder realizar el trabajo, pero que no han sido adquiridas de forma exclusiva para este proyecto.

Descripción	Coste (€)
Ordenador	2.000
Licencia Matlab	1.000
Subtotal	3.000 €

Tabla 16. Presupuesto: costes indirectos

10. Conclusiones

Este apartado presenta las conclusiones generales de este Trabajo de Fin de Máster. En este proyecto se han desarrollado tres tareas principales: la extensión de los algoritmos hasta 500 kHz, el desarrollo de código específico que permita generar nuevas señales elementales y la creación de una base de datos de señales de test sintéticas; cumpliendo así con los objetivos marcados al inicio del proyecto.

En primer lugar, se han extendido todos los algoritmos, tanto los algoritmos ya desarrollados por el Grupo TSR anteriormente como los nuevos algoritmos generados en este proyecto, hasta la frecuencia de 500 kHz. De este modo, se podrán medir y evaluar las perturbaciones presentes en la red hasta esa frecuencia.

En segundo lugar, se han generado nuevos códigos que permiten generar nuevas señales elementales, en concreto señales según el estándar G3-PLC y ruido impulsional. De esta manera, pueden generarse señales más complejas que contengan una mayor variedad de tipos de emisiones.

Por último, se ha creado una base de datos conformada por once señales sintéticas similares a grabaciones en la red, que han sido seleccionadas previamente. Las grabaciones en la red han sido parametrizadas y replicadas combinando diferentes señales elementales generadas mediante los algoritmos que se han desarrollado. A su vez, las señales sintéticas resultantes han superado un proceso de validación. Para ello, se les ha dado el mismo tratamiento a ambas señales y se ha comprobado que los valores de amplitud, la forma espectral y su evolución temporal sean similares.

11. Bibliografía

- [1] International Electrotechnical Commission, “Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-30: Testing and measurement techniques - Power quality measurement methods”, doc. IEC 61000-4-30 Ed.3, 2015.
- [2] IEC, Electromagnetic compatibility (EMC) Part 4-7: Testing and measurement techniques - General guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation, for power supply systems and equipment connected thereto. IEC 61000-4-7:2002/AMD1:2008. 2002.
- [3] Electromagnetic compatibility (EMC) - Environment - Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signaling in public low-voltage power supply systems, IEC 61000-2-2:2002+A2:2019 Ed. 2.2, 2002
- [4] A. Gallarreta et al., "A Light Measurement Method for 9–150 kHz Disturbances in Power Grids Comparable to CISPR Quasi-Peak," in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 71, pp. 1-10, 2022, Art no. 9005410, doi: 10.1109/TIM.2022.3195255
- [5] V. Khokhlov, J. Meyer, A. Greverer, T. Busatto, and S. Ronnberg, “Comparison of measurement methods for the frequency range 2-150 kHz (Supraharmonics) based on the present standards framework,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 77618–77630, 2020, doi:10.1109/ACCESS.2020.2987996.
- [6] G. Anne, M. Jan, and R. Sarah, “Comparison of Measurement Methods for the Frequency Range 2-150 kHz (Supraharmonics),” Oct. 2018, doi: 10.1109/AMPS.2018.8494879.
- [7] I. Fernandez et al., “Characterization of non-intentional emissions from distributed energy resources up to 500 kHz: A case study in Spain,” *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 105, pp. 549–563, Feb. 2019, doi: 10.1016/j.ijepes.2018.08.048.
- [8] I. Fernández, D. de la Vega, A. Arrinda, I. Angulo, N. Uribe-Pérez, and A. Llano, “Field trials for the characterization of non-intentional emissions at low-voltage grid in the frequency range assigned to NB-PLC technologies,” *Electronics (Switzerland)*, vol. 8, no. 9, p. 1044, Sep. 2019, doi: 10.3390/electronics8091044.
- [9] PRIME Alliance. Advanced Meter Reading & Smart Grid Standard. Available online: <http://www.prime-alliance.org/>
- [10] The G3-PLC Alliance. Available online: <http://www.g3-plc.com/>
- [11] CENELEC. CLC/TR 50627. Study report on electromagnetic interference between electrical equipment/systems in the frequency range below 150 kHz. In CENELEC SC 205A Mains Communicating Systems; CENELEC: Brussels, Belgium, 2015.
- [12] Standardization in the Field of Electromagnetic Compatibility with Regard to Low Frequency Phenomena, IEC SC 77A. Available online: <https://www.iec.ch/dyn/www/f?p=103:7:16479330001452>
- [13] IEEE EMC. On the Aim and Scope of TC 7—Document for the TC 7. In *Proceedings of the Inaugural Annual Meeting*, Santa Ana Pueblo, NM, USA, 13–15 August 2012. IEEE EMC Society Agenda Report.
- [14] IEEE Guide for Identifying and Improving Power Quality in Power Systems. IEEE 1250–2018. Available online: <https://standards.ieee.org/content/ieee-standards/en/standard/1250-2018.html>
- [15] JWG C4.24/CIREC. Power Quality and EMC Issues with Future Electricity Networks. CIGRE Technical Brochure 719. 2018. Available online: www.e-cigre.org

- [16] IEC. Establishment of a Joint Working Group between CISPR SC/H and IEC SC77A on the Introduction of Requirements in the Frequency range 9–150 kHz; TC77A/987/INF; IEC: Geneva, Switzerland, 2017; Available online: https://www.iec.ch/dyn/www/f?p=103:52:0:::FSP_ORG_ID,FSP_DOC_ID,FSP_DOC_PIECE_ID:1384,1009394,317392
- [17] Rönnberg, S.K.; de Castro, A.G.; Delgado, A.E. Variations in supraharmmonic levels in low voltage networks. In Proceedings of the 25th International Conference on Electricity Distribution CIRED, Madrid, Spain, 3–6 June 2019.
- [18] Rönnberg, S.K.; Gil-De-Castro, A.; Medina-Gracia, R. Supraharmonics in European and North American Low-Voltage Networks. In Proceedings of the 2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe), Palermo, Italy, 12–15 June 2018; pp. 1–6.
- [19] Klatt, M.; Meyer, J.; Schegner, P.; Koch, A.; Myrzik, J.; Körner, C.; Darda, T.; Eberl, G. Emission Levels above 2 kHz - Laboratory Results and Survey Measurements in Public Low Voltage Grids. In Proceedings of the 22nd International Conference on Electricity Distribution, CIRED, Stockholm, Sweden, 10–13 June 2013.
- [20] Fernandez, I.; Uribe-Pérez, N.; Eizmendi, I.; Angulo, I.; de la Vega, D.; Arrinda, A.; Arzuaga, T. Characterization of non-intentional emissions from distributed energy resources up to 500 kHz: A case study in Spain. *Int. J. Electr. Power Energy Syst.* 2019, 105, 549–563.
- [21] Uribe-Pérez, N.; Angulo, I.; Hernández, L.; Arzuaga, T.; de la Vega, D.; Arrinda, A. Study of Unwanted Emissions in the CENELEC-A Band Generated by Distributed Energy Resources and Their Influence over Narrow Band Power Line Communications. *Energies* 2016, 9, 1007.
- [22] Meters and More-Open Technologies. Available online: <http://www.metersandmore.com/>
- [23] ITU-T Rec. G.9903. Narrowband Orthogonal Frequency Division Multiplexing Power Line Communication Transceivers for G3-PLC Networks. February 2014. Available online: <http://www.itu.int/rec/T-REC-G.9903>
- [24] IEEE Standard 1901.2–2013. Standard for Low Frequency (Less Than 500 kHz) Narrow Band Power Line Communications for Smart Grid Applications; IEEE Standard: New York, NY, USA, 2013.
- [25] PRIME Alliance Technical Working Group. Draft Specification for PoweRline Intelligent Metering Evolution. Available online: http://www.prime-alliance.org/wp-content/uploads/2013/04/PRIME-Spec_v1.3.6.pdf
- [26] D. Ritzmann et al., “Comparison of Measurement Methods for 2-150-kHz Conducted Emissions in Power Networks,” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 70, 2021, doi: 10.1109/TIM.2020.3039302.
- [27] Gallarreta, A; Fernández, I; Ritzmann, D; Lodetti, S; Khokhlov, V; Wright, P; Meyer, P; de la Vega, D. Adaptation of the IEC 61000-4-7 Measurement Method to CISPR BandA(9-150 kHz), Spain
- [28] Gallarreta, A. Master’s Thesis. AppQP: New measurement method for non-intentional emissions in low voltage grid from 2 kHz TO 150 kHz. University of the Basque Country (2021)
- [29] S. K. Rönnberg, M. H. J. Bollen, H. Amaris, G. W. Chang, I. Y. H. Gu, Ł. H. Kocewiak, J. Meyer, M. Olofsson, P. F. Ribeiro, and J. Desmet, “On waveform distortion in the frequency range of 2 kHz–150 kHz—Review and research challenges,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 150, pp. 1–10, Sep. 2017.

- [30] G. F. Bartak and A. Abart, "EMI of emissions in the frequency range 2 kHz–150 kHz," in Proc. 22nd Int. Conf. Exhib. Electr. Distrib., Jun. 2013, pp. 1–4
- [31] E. O. A. Larsson and M. H. J. Bollen, "Measurement result from 1 to 48 fluorescent lamps in the frequency range 2 to 150 khz," in Proc. 14th Int. Conf. Harmon. Qual. Power (ICHQP), Sep. 2010, pp. 1–8.
- [32] A. Larsson, "On high-frequency distortion in low-voltage power systems," Ph.D. dissertation, Luleå Tekniska Univ., Luleå, Sweden, 2011.
- [33] S. Rönnberg, M. Bollen, and A. Gil-de-Castro, "Harmonic distortion from energy-efficient equipment and production in the low-voltage network," Tech. Rep., 2014. [Online]. Available: <https://www.divaportal.org/smash/get/diva2:996504/FULLTEXT01.pdf>
- [34] G. López, J. I. Moreno, E. Sánchez, C. Martínez, and F. Martín, "Noise sources, effects and countermeasures in narrowband power-line communications networks: A practical approach," *Energies*, vol. 10, no. 8, p. 1238, 2017.
- [35] S. Hong, "Harmonics and noise in photovoltaic (PV) inverter and the mitigation strategies," Solectria Renewables, Lawrence, MA, USA, Tech. Rep., 2010.

Anexo 1: Base de datos de señales sintéticas

En este anexo se presentan todos los resultados obtenidos en este Trabajo de Fin de Máster, que se componen de los espectros y espectrogramas de las señales sintéticas resultantes. A su vez, a cada espectro y espectrograma de cada señal le acompaña el espectro y espectrograma de la señal grabada análoga.

Inverter

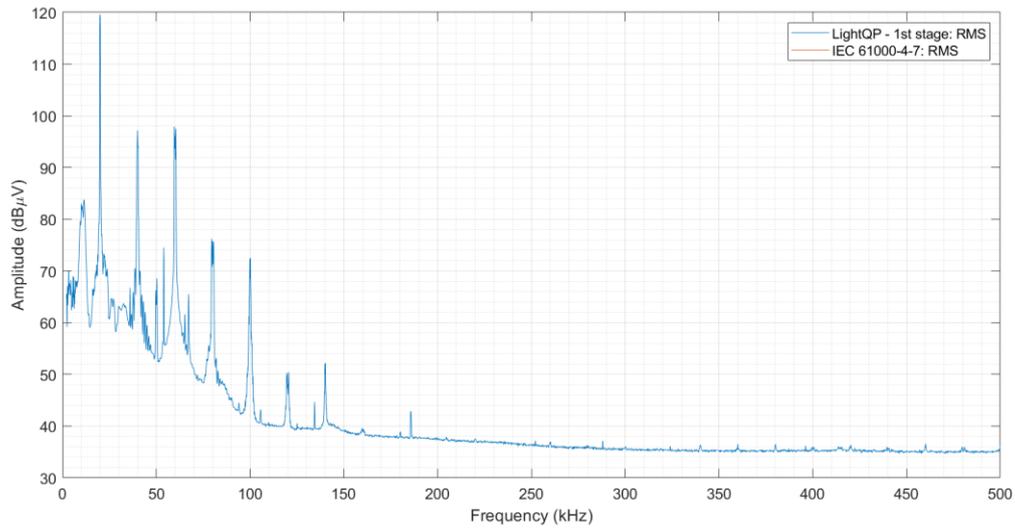


Figura 45: Espectro de la señal 'Inverter'

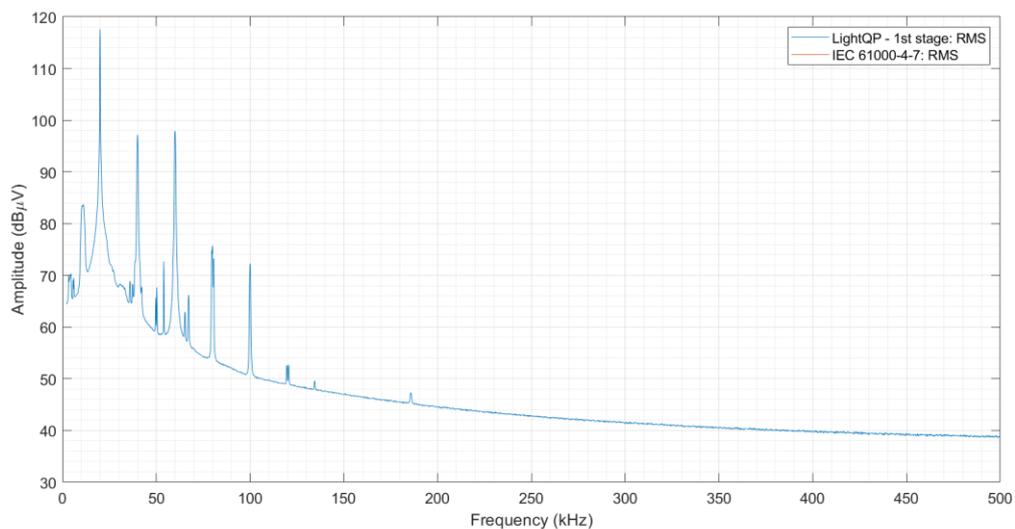


Figura 46: Espectro de la señal 'SYN Inverter'

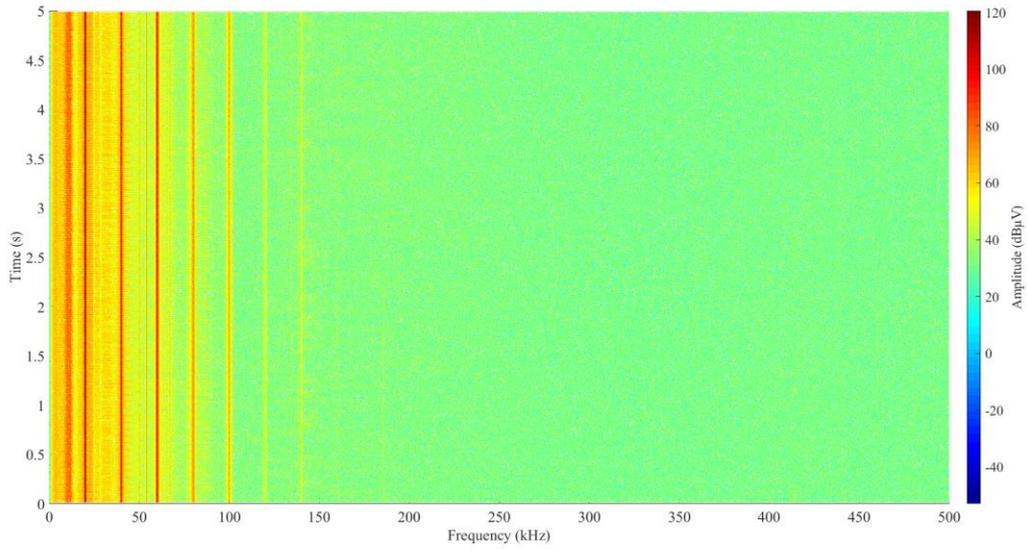


Figura 47: Espectrograma de la señal 'Inverter'

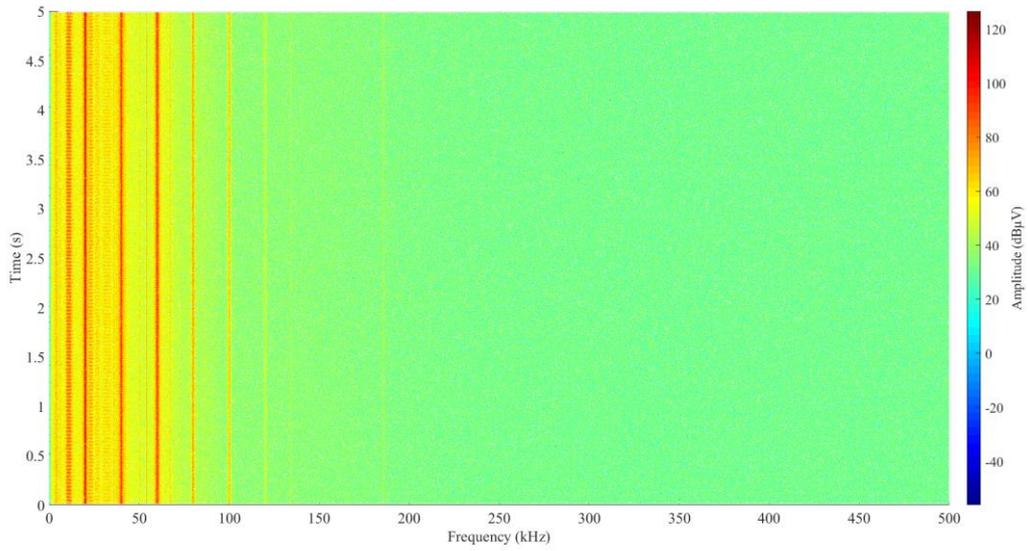


Figura 48: Espectrograma de la señal 'SYN_Inverter'

leaf 12A 1 oscviejo

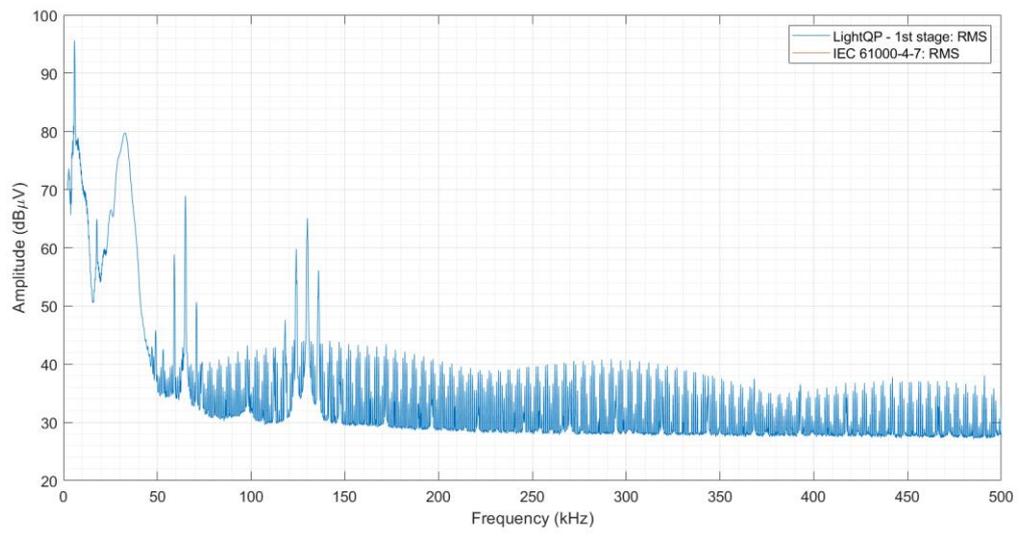


Figura 49: Espectro de la señal 'leaf_12A_1_oscviejo'

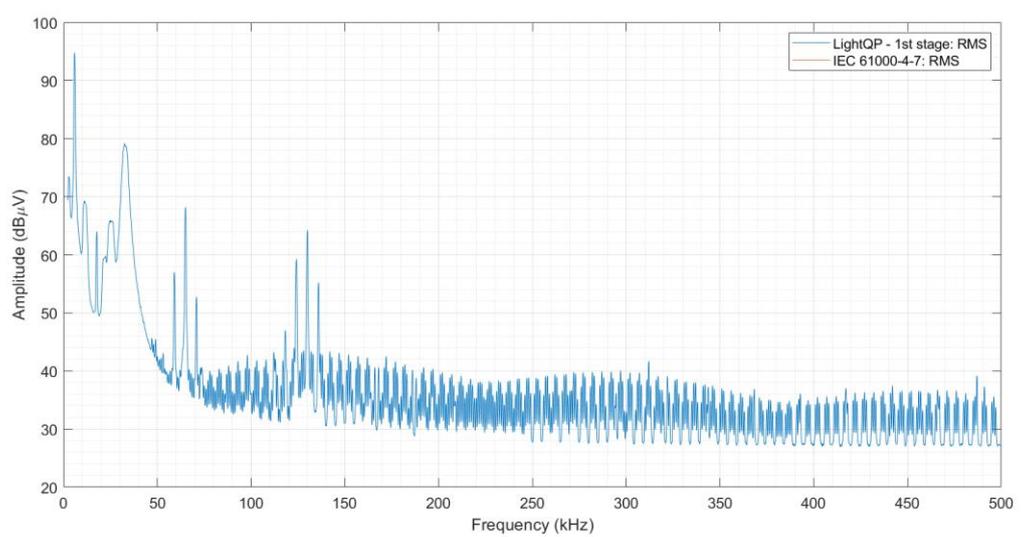


Figura 50: Espectro de la señal 'SYN_leaf_12A_1_oscviejo'

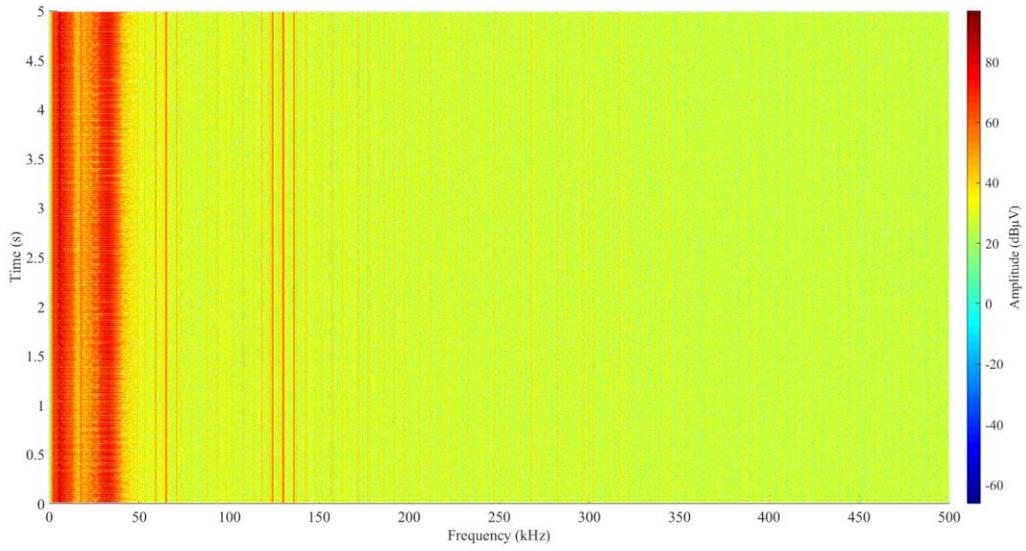


Figura 51: Espectrograma de la señal 'leaf_12A_1_oscviejo'

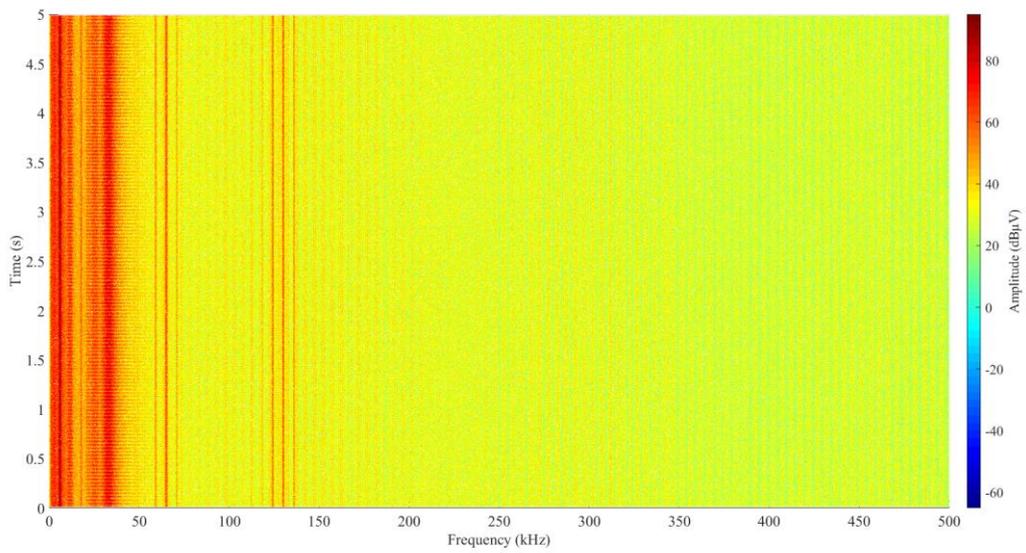


Figura 52: Espectrograma de la señal 'SYN_leaf_12A_1_oscviejo'

NIE 500 EV2 NISSAN H2H3H5 H2

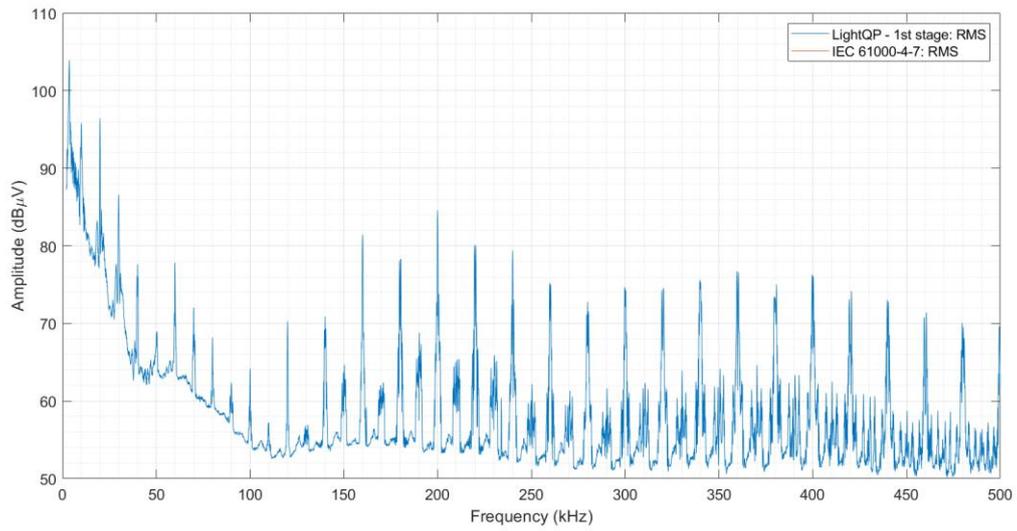


Figura 53: Espectro de la señal 'NIE_500_EV2_NISSAN_H2H3H5_H2'

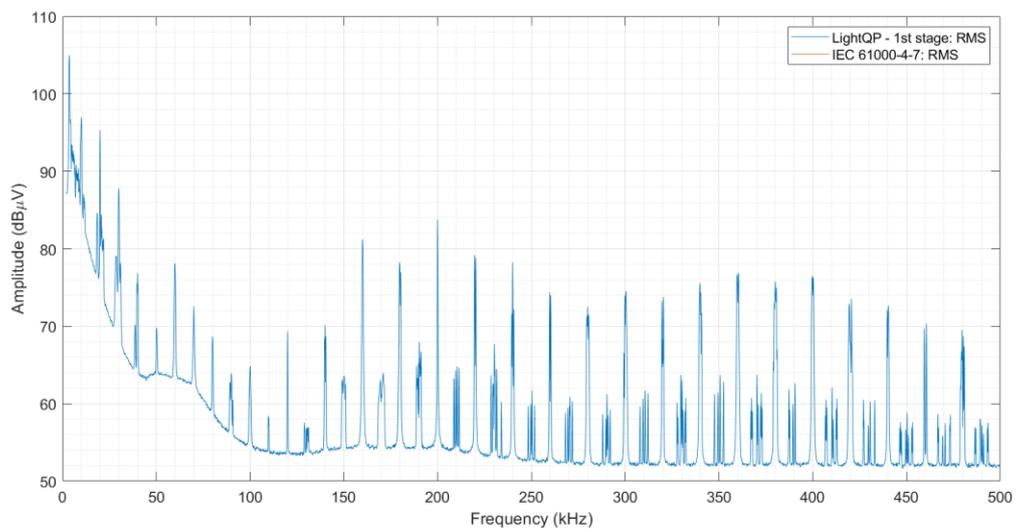


Figura 54: Espectro de la señal 'SYN_NIE_500_EV2_NISSAN_H2H3H5_H2'

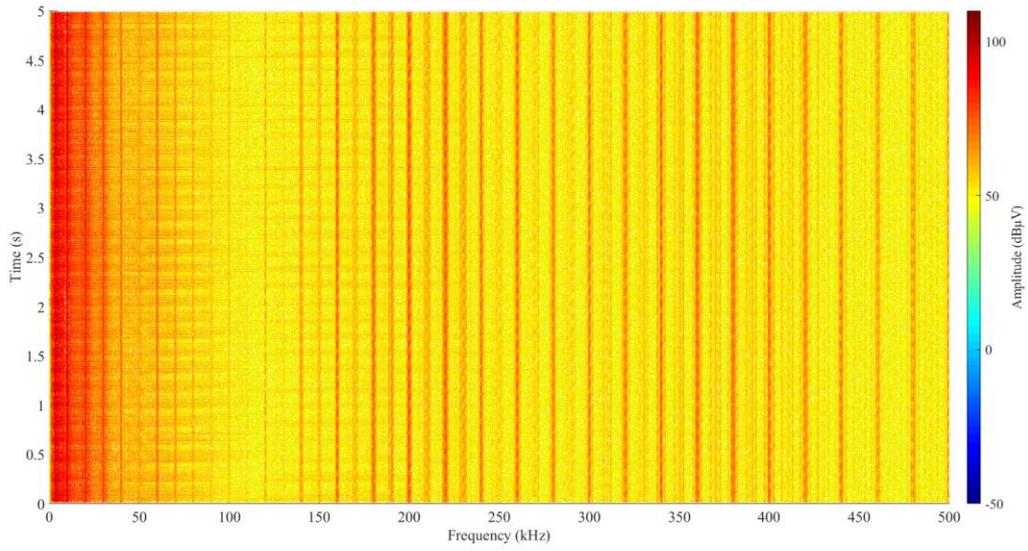


Figura 55: Espectrograma de la señal 'NIE_500_EV2_NISSAN_H2H3H5_H2'

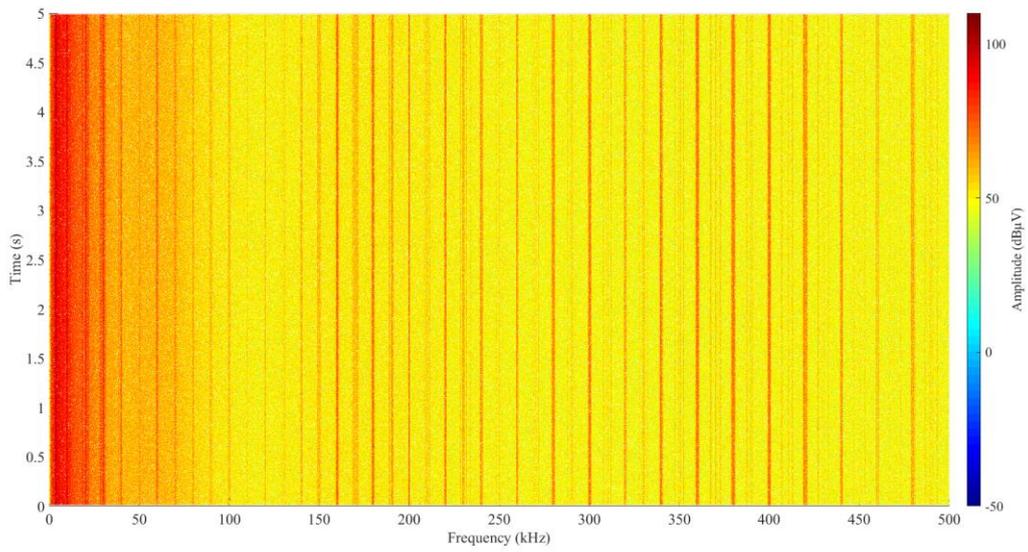


Figura 56: Espectrograma de la señal 'SYN_NIE_500_EV2_NISSAN_H2H3H5_H2'

NIE 500 EV3 CAMION75 H2H3H5 H2

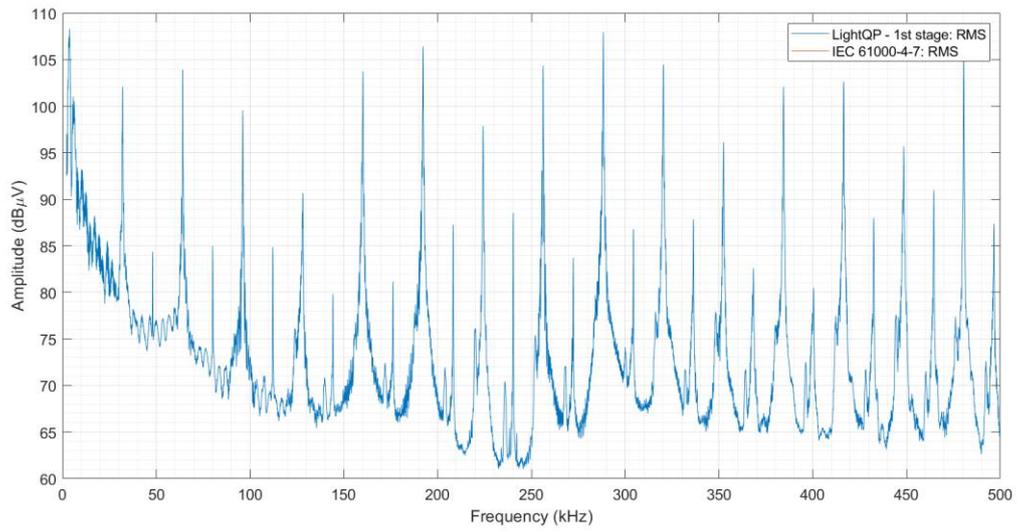


Figura 57: Espectro de la señal 'NIE_500_EV3_CAMION75_H2H3H5_H2'

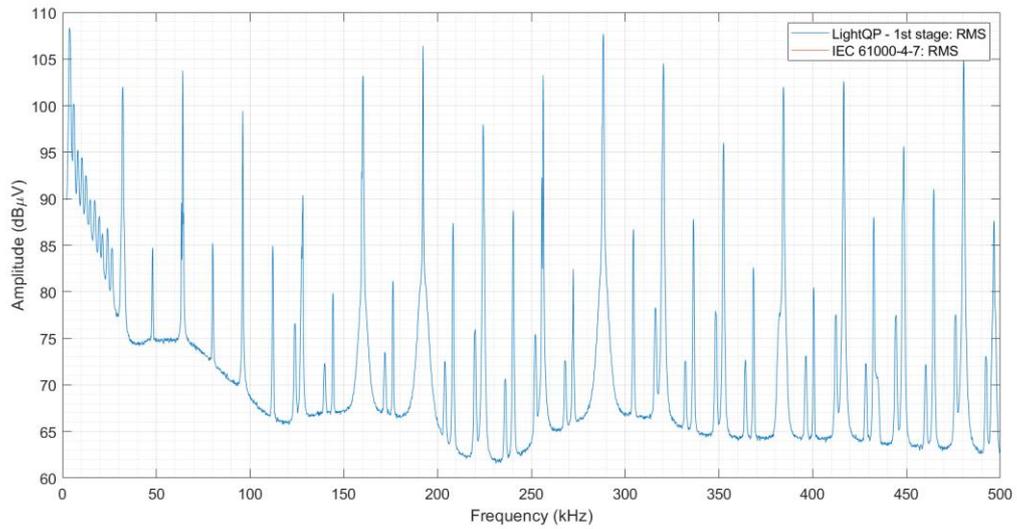


Figura 58: Espectro de la señal 'SYN_NIE_500_EV3_CAMION75_H2H3H5_H2'

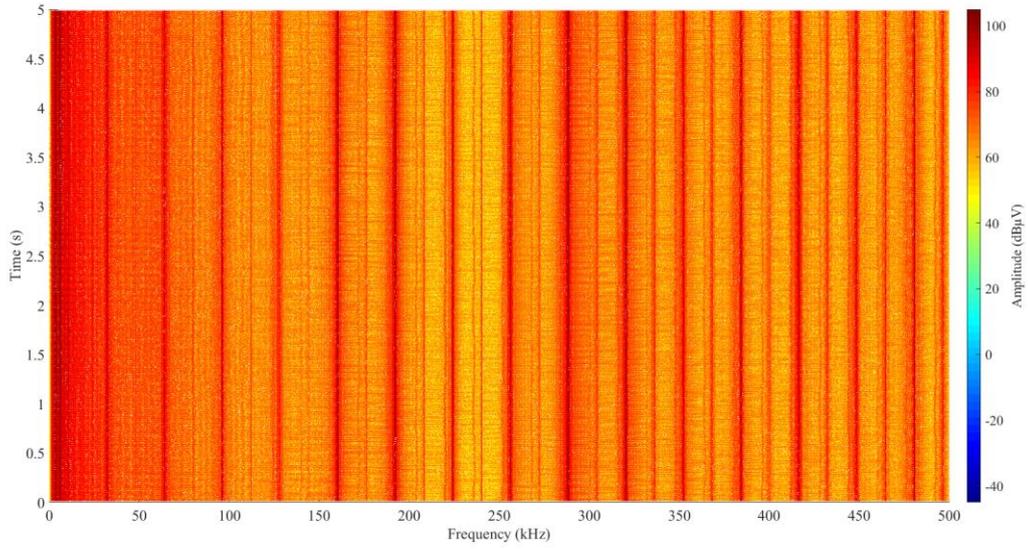


Figura 59: Espectrograma de la señal 'NIE_500_EV3_CAMION75_H2H3H5_H2'

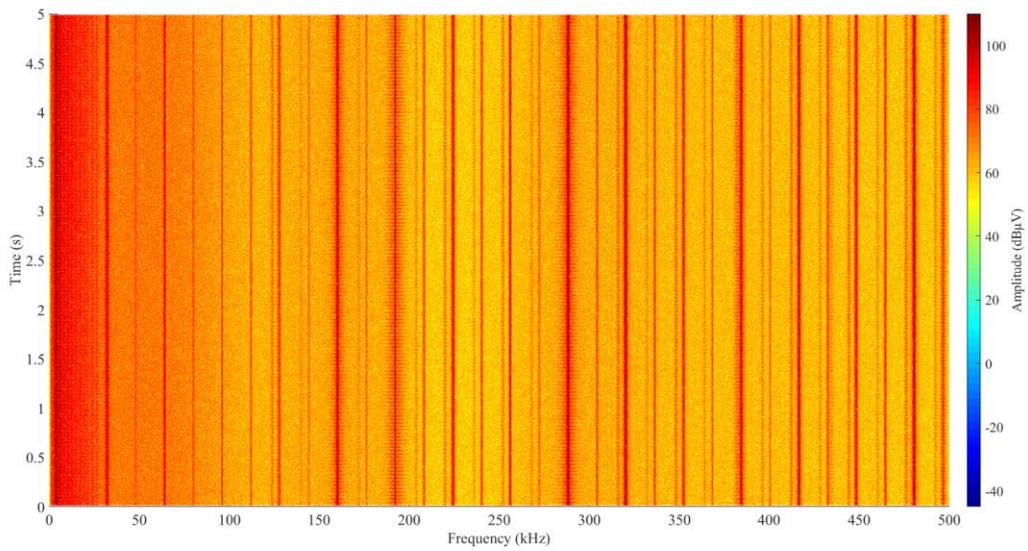


Figura 60: Espectrograma de la señal 'SYN_NIE_500_EV3_CAMION75_H2H3H5_H2'

NIE 500 EV5 ZOE H2H3H5 H5

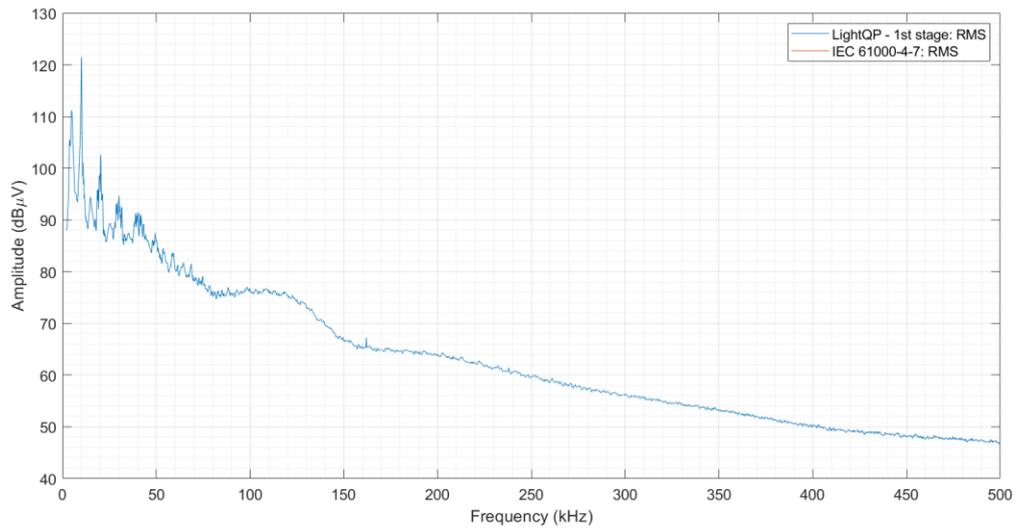


Figura 61: Espectro de la señal 'NIE_500_EV5_ZOE_H2H3H5_H5'

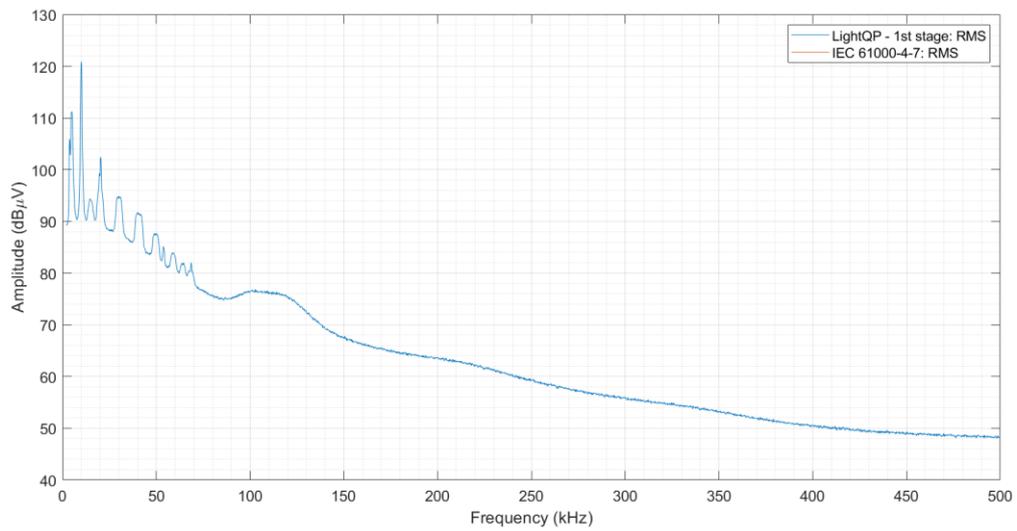


Figura 62: Espectro de la señal 'SYN_NIE_500_EV5_ZOE_H2H3H5_H5'

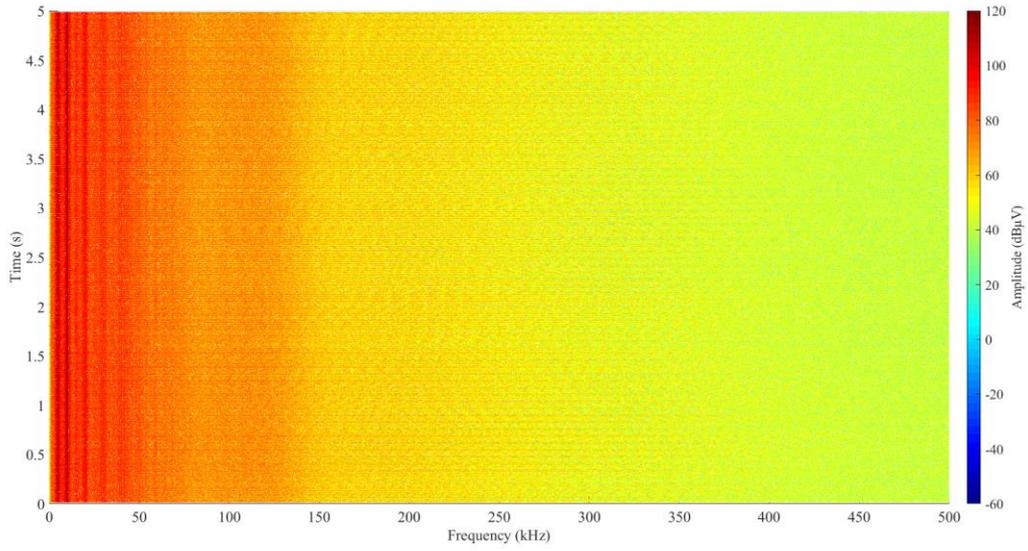


Figura 63: Espectrograma de la señal 'NIE_500_EV5_ZOE_H2H3H5_H5'

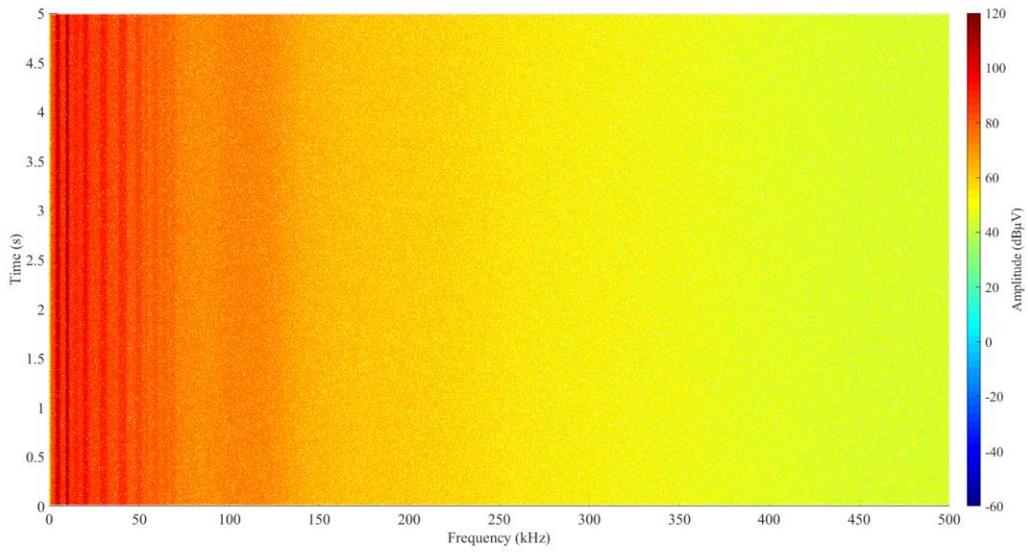


Figura 64: Espectrograma de la señal 'SYN_NIE_500_EV5_ZOE_H2H3H5_H5'

PV-N18APEXANAUTB12230LC

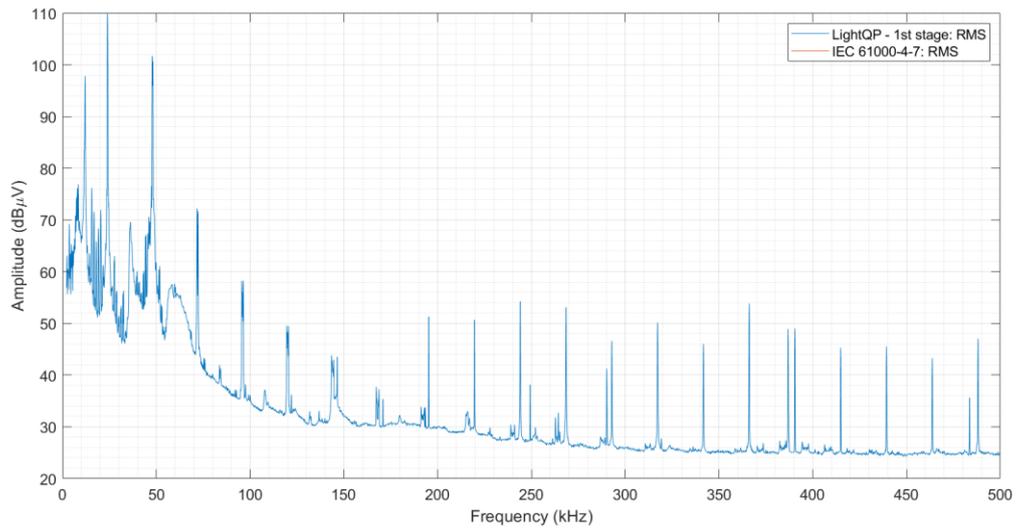


Figura 65: Espectro de la señal PV-N18APEXANAUTB12230LC

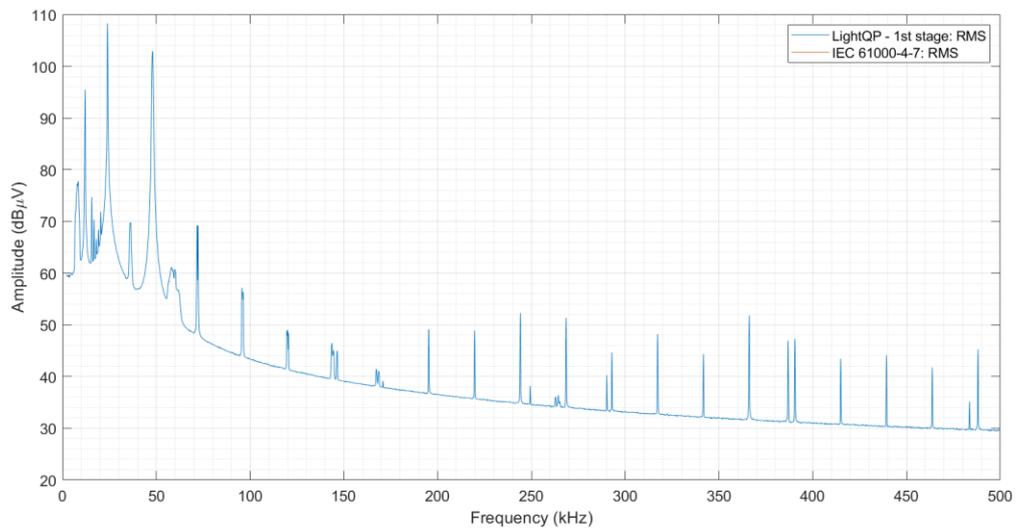


Figura 66: Espectro de la señal 'SYN_PV-N18APEXANAUTB12230LC'

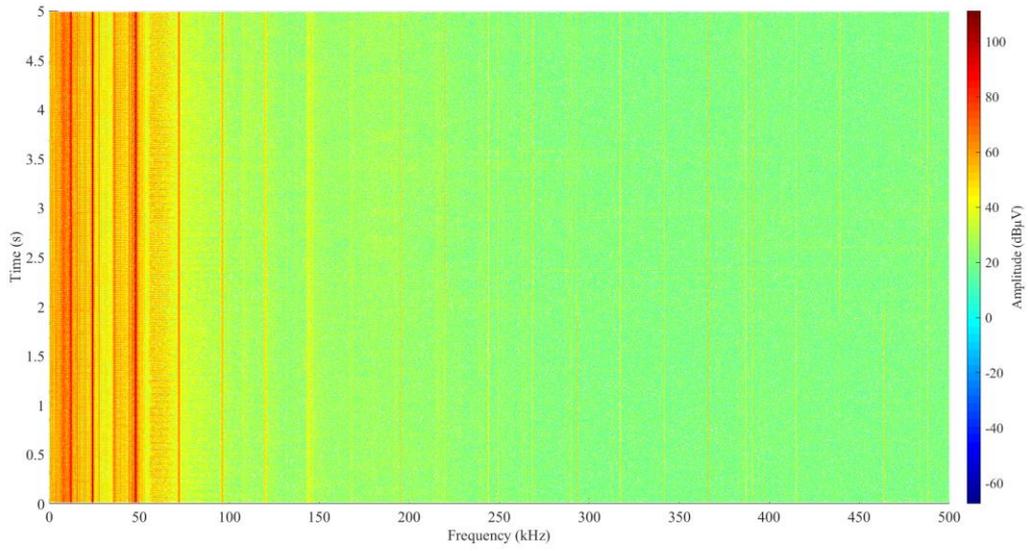


Figura 67: Espectrograma de la señal PV-N18APEXANAUTB12230LC

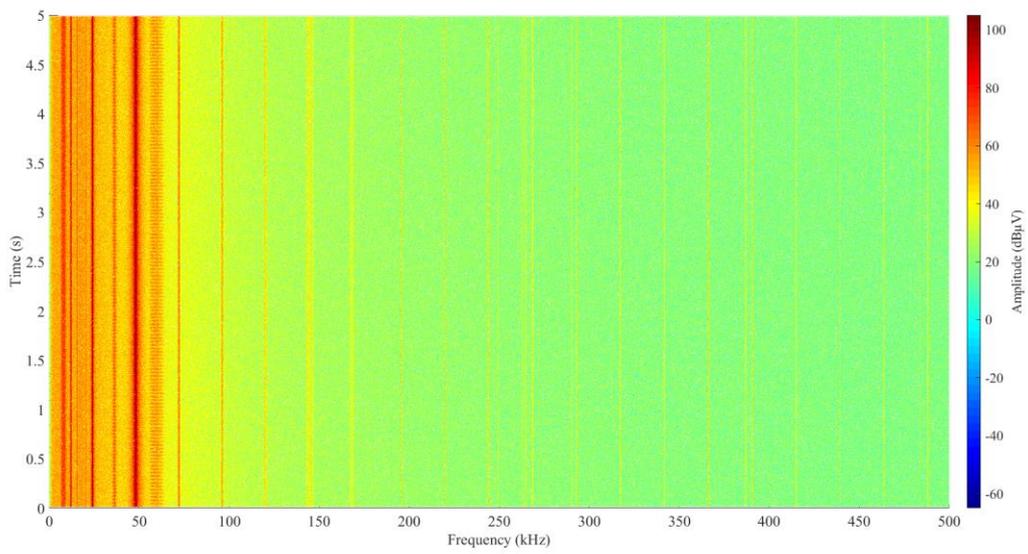


Figura 68: Espectrograma de la señal 'SYN_PV-N18APEXANAUTB12230LC'

RUIDO TAXGANERX5F2

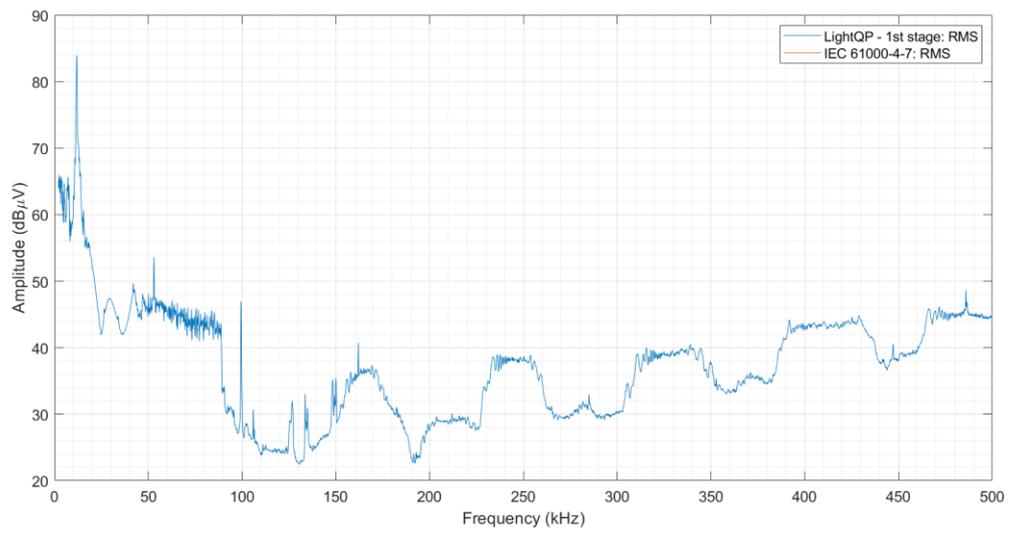


Figura 69: Espectro de la señal 'RUIDO TAXGANERX5F2'

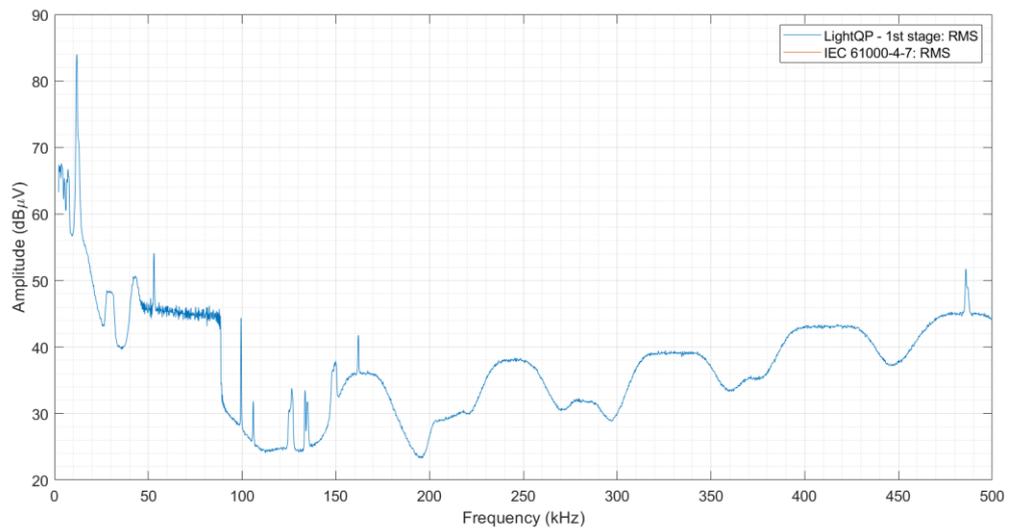


Figura 70: Espectro de la señal 'SYN_RUIDO TAXGANERX5F2'

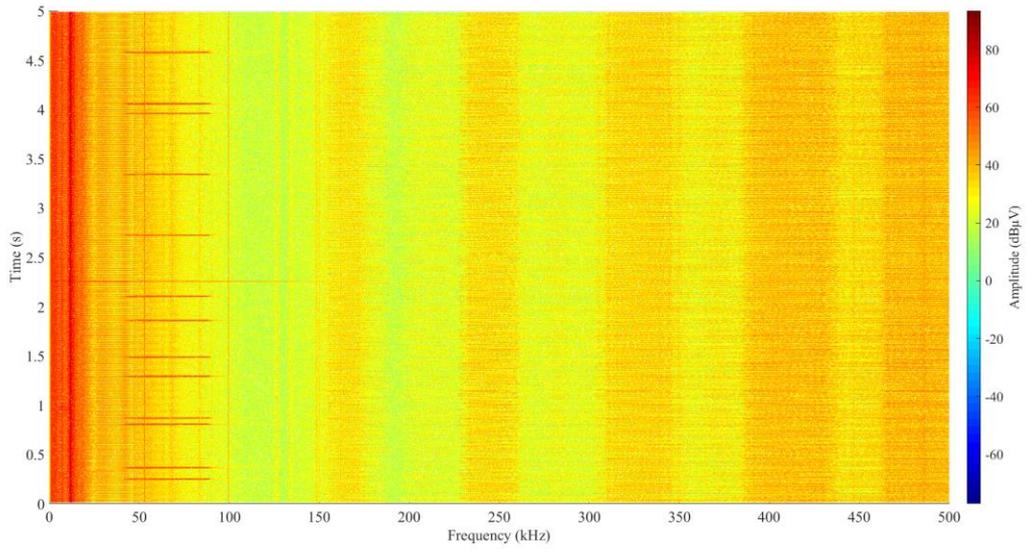


Figura 71: Espectrograma de la señal 'RUIDOCTAXGANERX5F2'

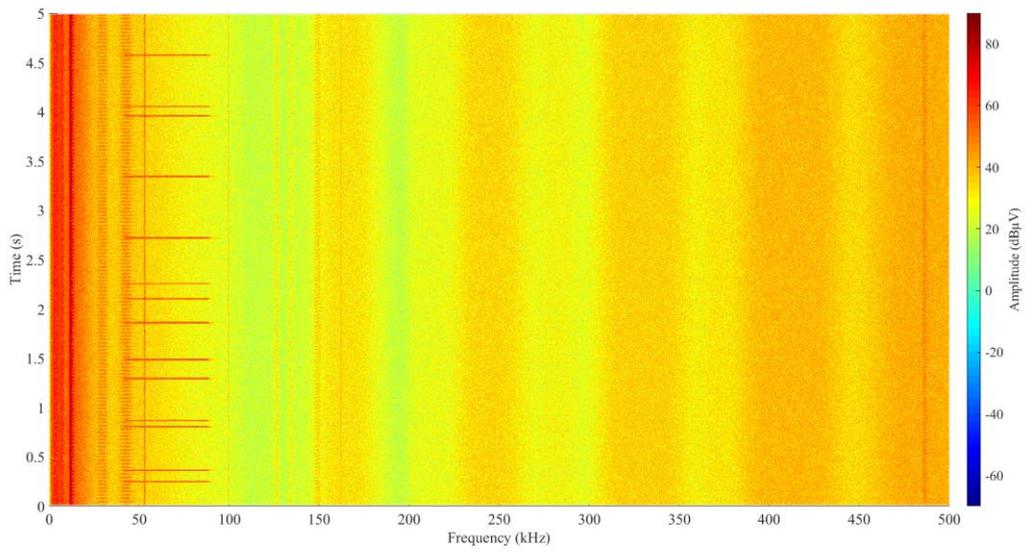


Figura 72: Espectrograma de la señal 'SYN_RUIDOCTAXGANERX5F2'

RUIDOCTEREDUNEF2

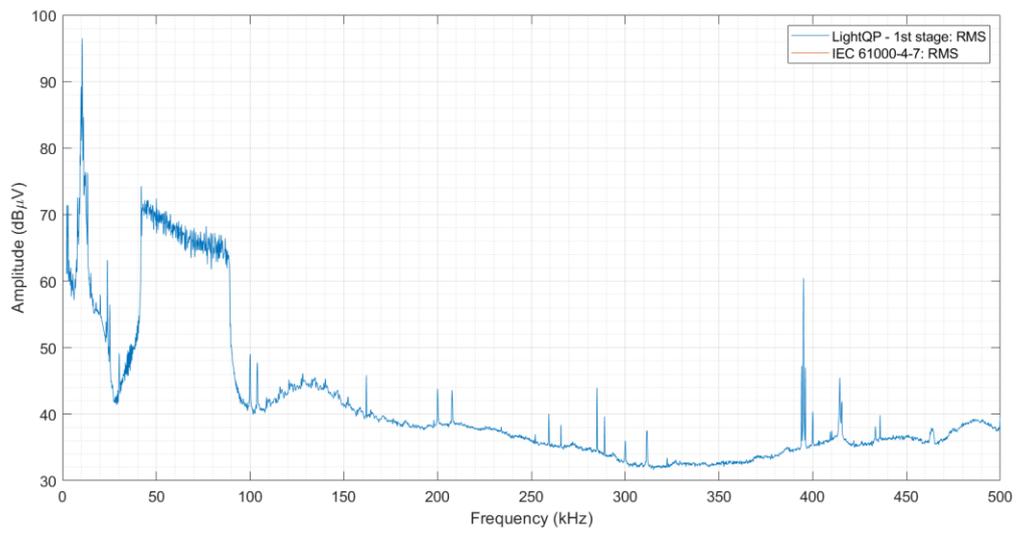


Figura 73: Espectro de la señal 'RUIDOCTEREDUNEF2'

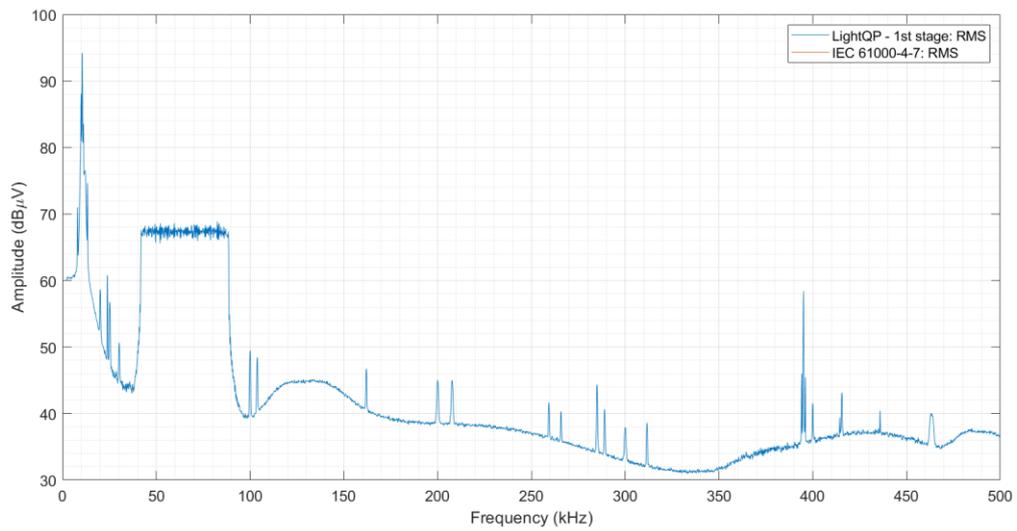


Figura 74: Espectro de la señal 'SYN_RUIDOCTEREDUNEF2'

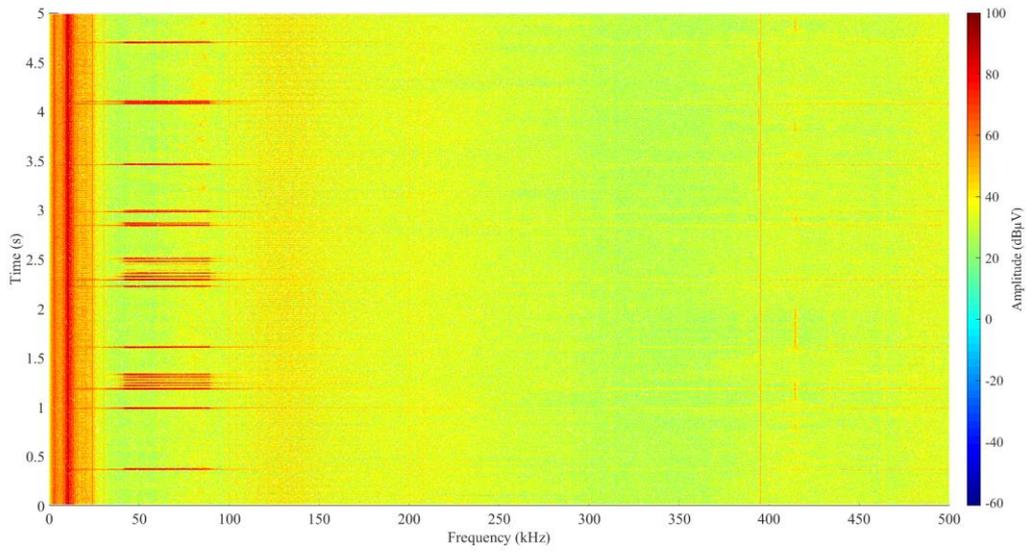


Figura 75: Espectrograma de la señal 'RUIDOCTEREDUNEF2'

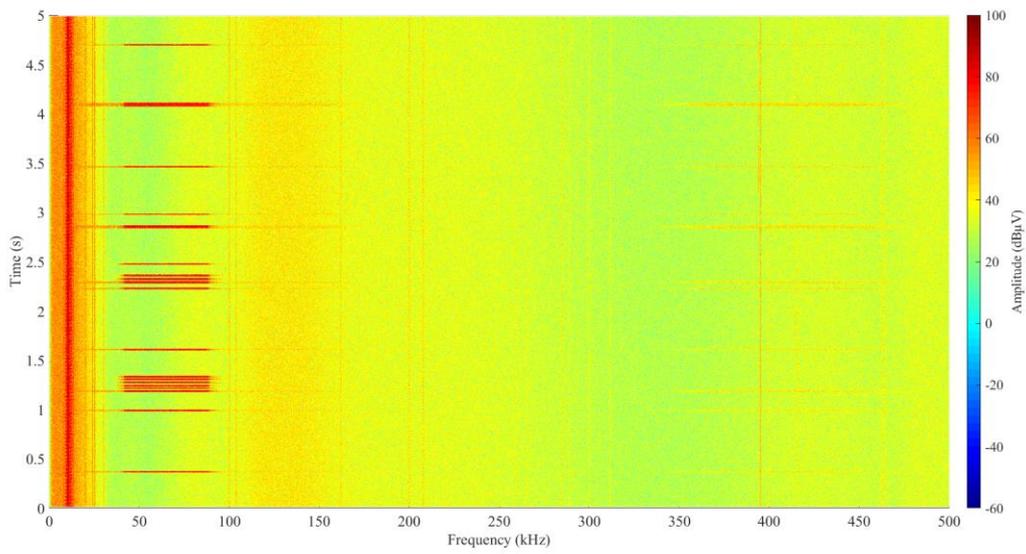


Figura 76: Espectrograma de la señal 'SYN_RUIDOCTEREDUNEF2'

RUIDOCTEREDUNEF3

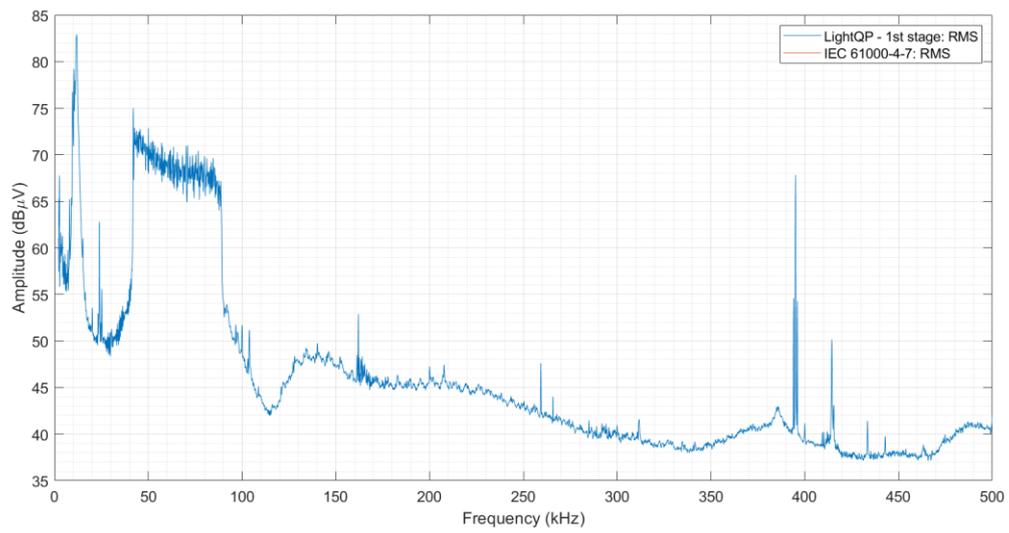


Figura 77: Espectro de la señal 'RUIDOCTEREDUNEF3'

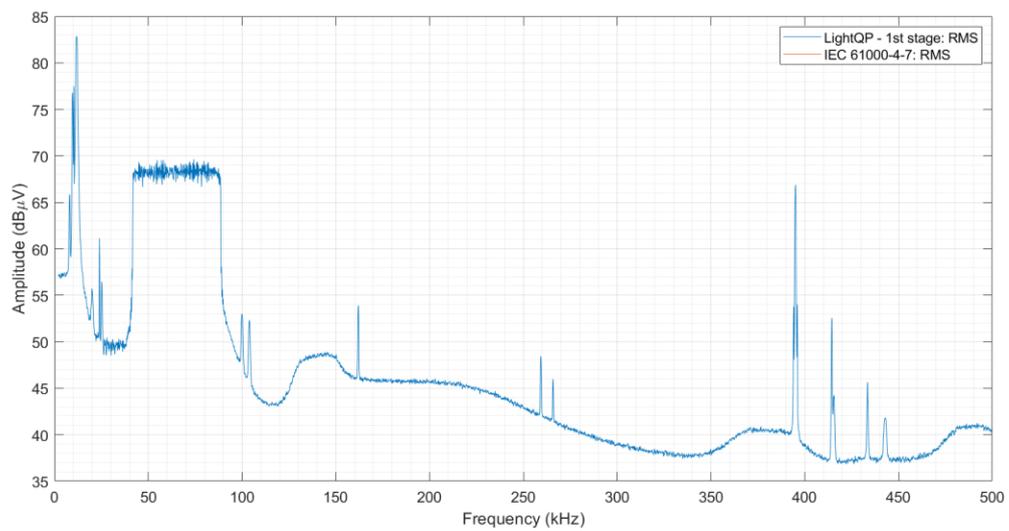


Figura 78: Espectro de la señal 'SYN_RUIDOCTEREDUNEF3'

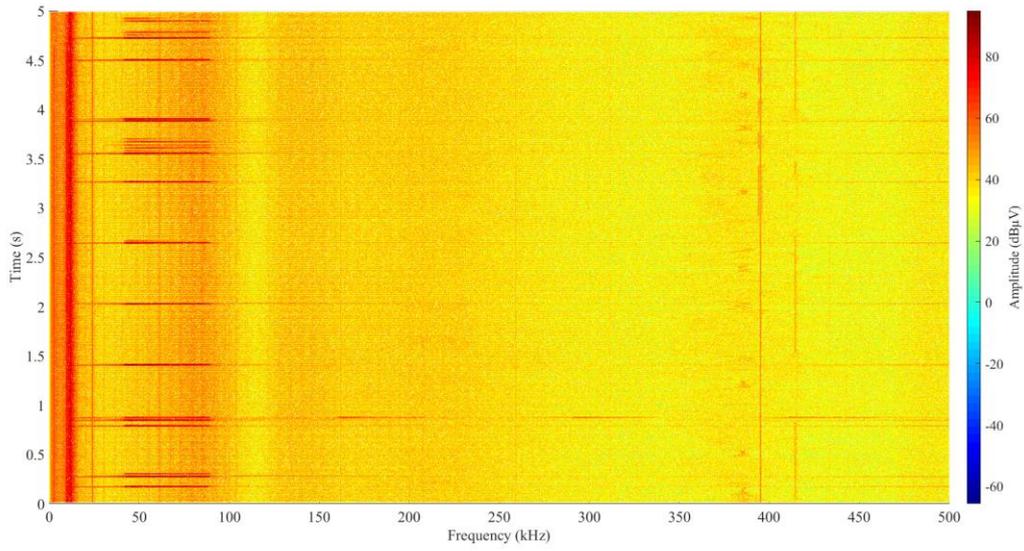


Figura 79: Espectrograma de la señal 'RUIDOCTEREDUNEF3'

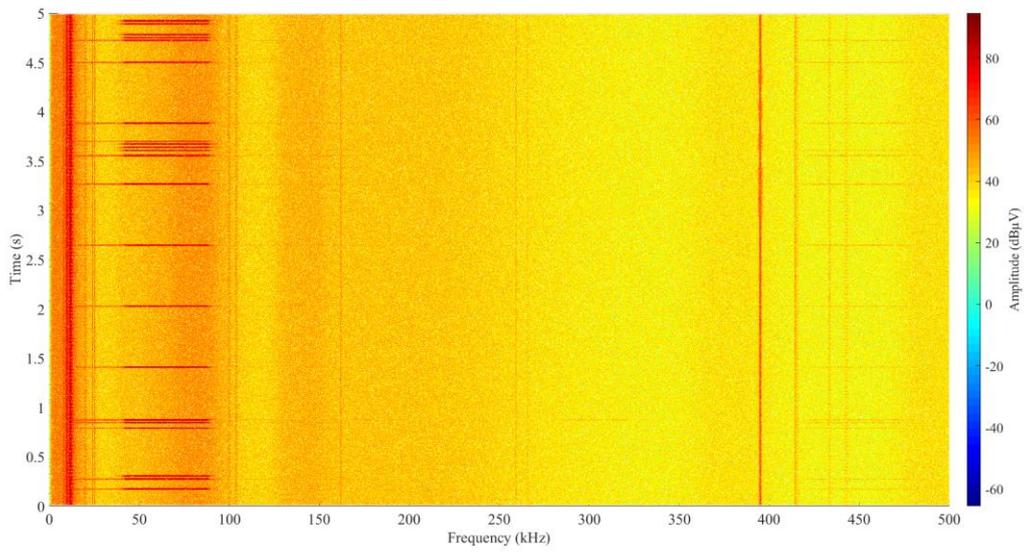


Figura 80: Espectrograma de la señal 'SYN_RUIDOCTEREDUNEF3'

RUIDOCTOLARETXEF2

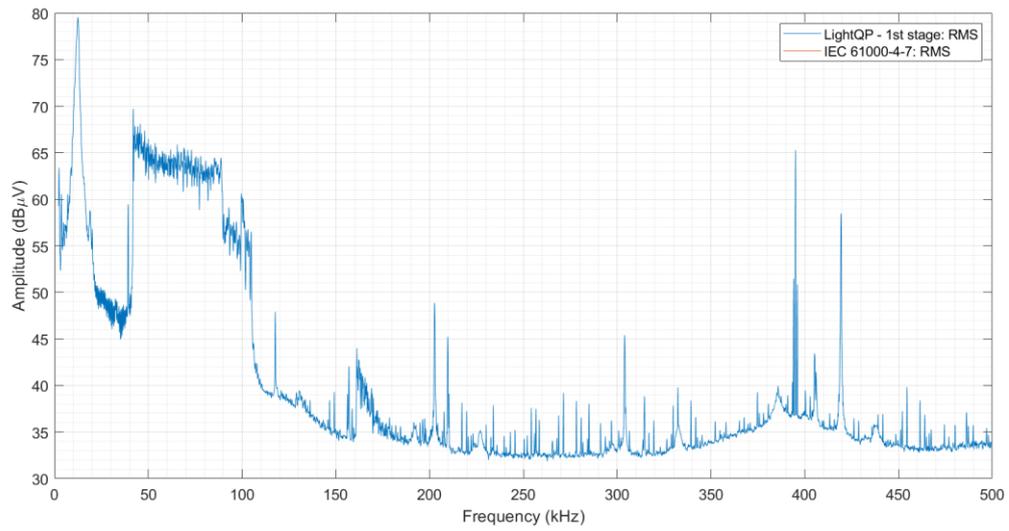


Figura 81: Espectro de la señal 'RUIDOCTOLARETXEF2'

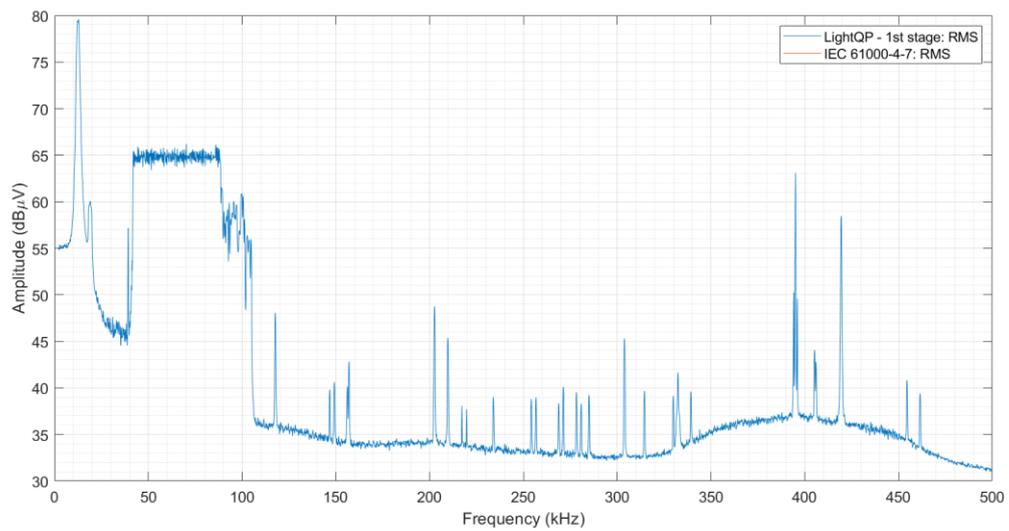


Figura 82: Espectro de la señal 'SYN_RUIDOCTOLARETXEF2'

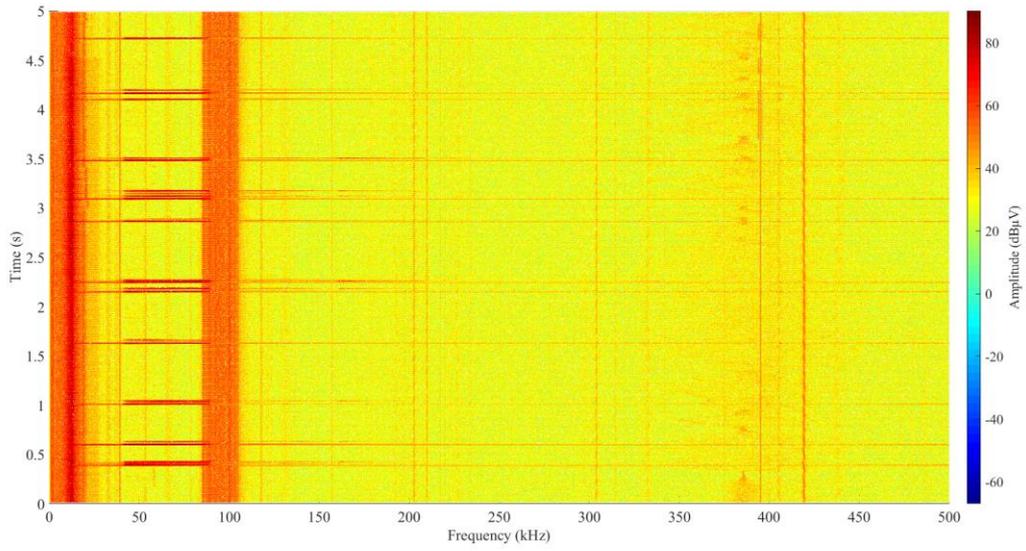


Figura 83: Espectrograma de la señal 'RUIDOCTOLARETXEF2'

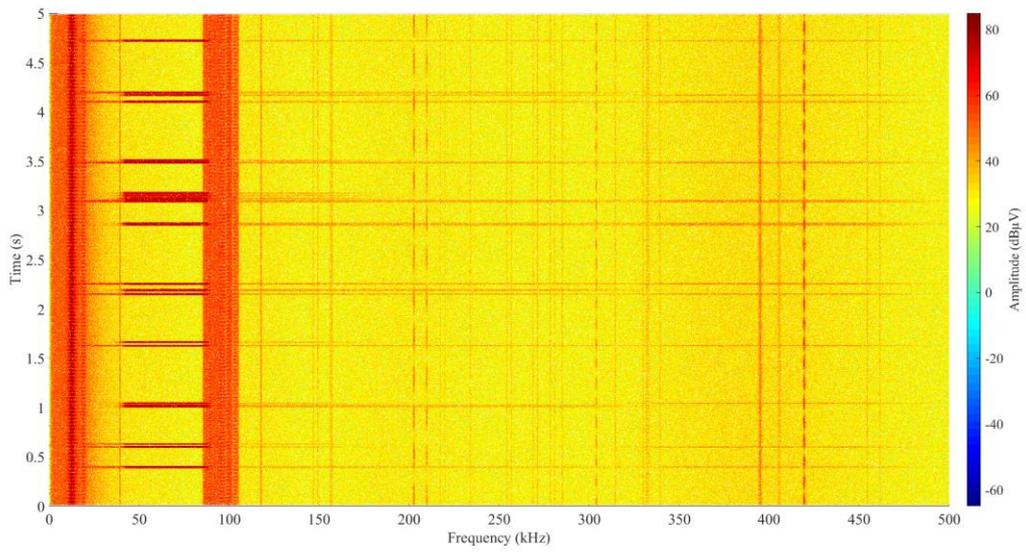


Figura 84: Espectrograma de la señal 'SYN_RUIDOCTOLARETXEF2'

Anexo 2: Guía de usuario del SW

En este apartado se va a describir cómo generar paso a paso la señal 'SYN_RUIDOCTAXGANERX1F1' empleando el software en MATLAB.

El software se maneja desde el script 'Syn_sig_gen_menu' del que cuelgan el resto de scripts que contienen los códigos específicos para generar las señales elementales sintéticas. En la figura 86 se muestra el menú principal de software.

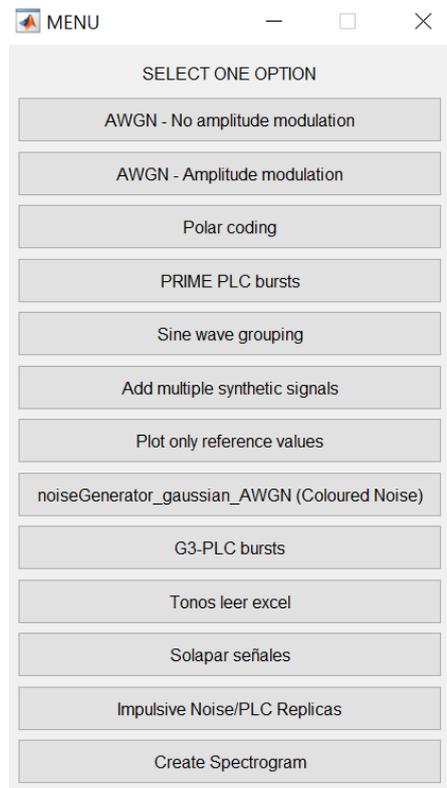


Figura 85: Menú del SW

A continuación, se va a explicar cómo se genera cada tipo de emisión que conforma la señal 'RUIDOCTAXGANERX1F1'.

- Emisiones tonales

Para generar las emisiones tonales se debe seleccionar el botón 'tonos leer excel'. Este script permite seleccionar un fichero Excel que contiene los parámetros necesarios para generar ese tipo de emisiones. Después, aparece la siguiente pestaña donde se deben fijar los parámetros de la señal. Se han fijado por defecto los parámetros correctos. También, se debe nombrar la señal.

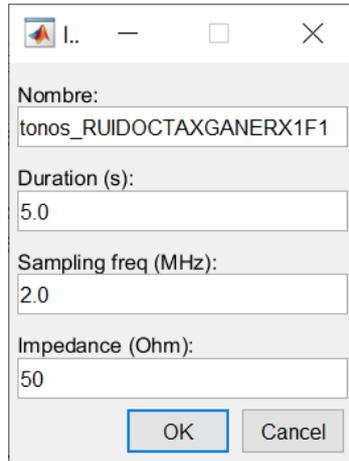


Figura 86: Parámetros para la generación del AWGN

En la pestaña de comandos aparecen las siguientes líneas de código que te permite saber qué tono se está ejecutando en ese momento. También, se visualiza la potencia en dBm de la señal AWGN y la potencia final que se necesita para generar la señal resultante en dBm.

```
Power of original AWGN 1: 5.05 dBm  
  
Power of resulting AWGN 1: 7.81 dBm
```

Figura 87: Pestaña de comando en el momento de la ejecución

Como resultado de la ejecución, el SW devuelve el espectro del conjunto de tonos calculado por el método IEC 61000-4-7 (RMS) y la primera etapa del método Light-QP. A su vez se muestran los espectros de las señales de referencia para el ancho de banda de resolución de 1 Hz y 200 Hz.

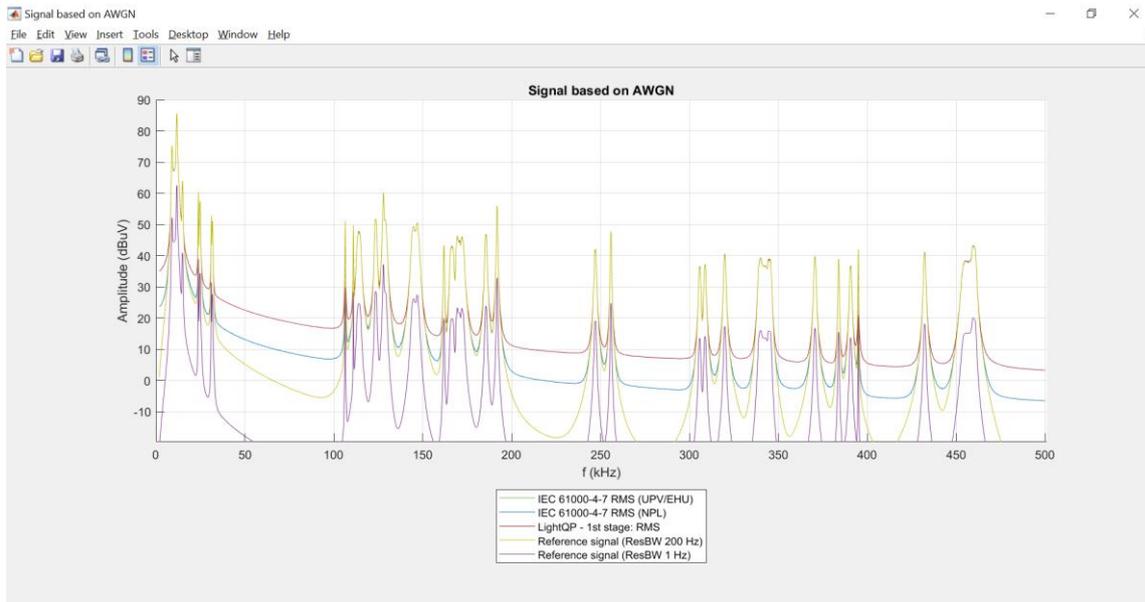


Figura 88: Espectro del conjunto de emisiones tonales de la señal 'SYN_RUIDOCTAXGANERX1F1' calculado a partir de los métodos IEC 61000-4-7 y Light-QP (primera etapa) y las señales de referencia para ResBW 200 Hz y 1 Hz

- Ruido coloreado

Para generar las emisiones tonales se debe seleccionar el botón 'noiseGenerator_gaussian_AWGN (coloured noise)'.

El primer paso, es seleccionar el número de formas de onda que se necesitan para generar el ruido coloreado, en este caso se necesitan siete formas de onda. Las primeras seis formas de onda se filtrarán y la última forma de onda no será filtrada y definirá el suelo del ruido coloreado.

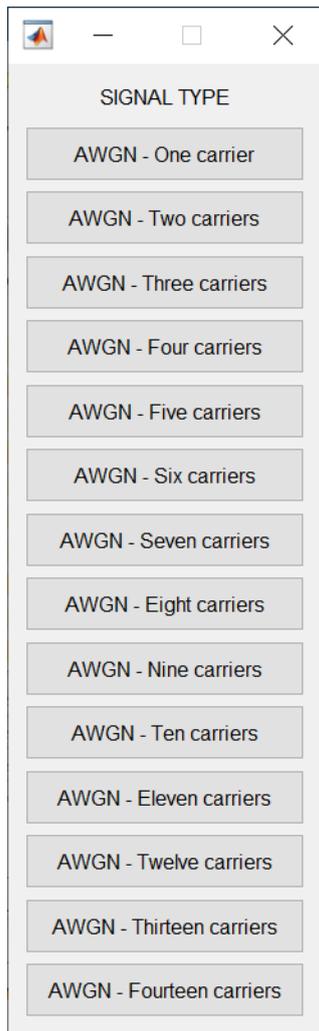


Figura 89: Número de formas de onda que conforman el ruido coloreado

El siguiente paso, es fijar los parámetros del AWGN, entre ellos el nivel de amplitud. En este caso la primera forma de onda tiene un nivel de amplitud de -17dBm.

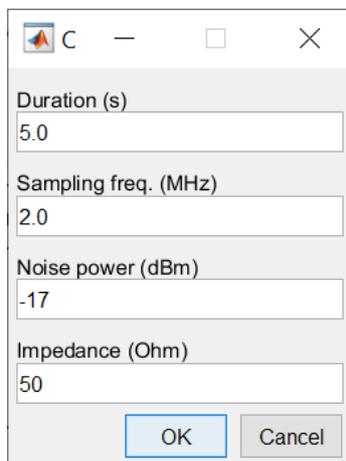


Figura 90: Parámetros para la generación del AWGN

A continuación, el SW nos muestra el espectro del AWGN que se ha generado calculado a partir del método IEC 61000-4-7 (RMS) y de la primera etapa del método Light-QP. También se visualizan los valores máximos y mínimos del AWGN. Además, aparece una pestaña preguntando si el AWGN se ha generado de manera correcta.

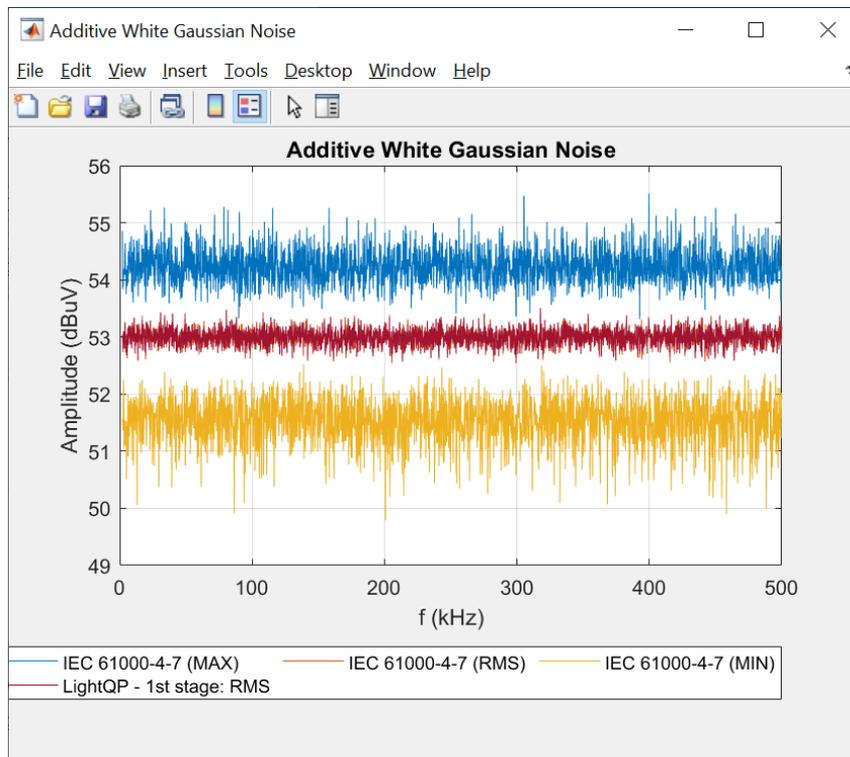


Figura 91: Espectro del AWGN (RMS) y sus valores máximos y mínimos calculados a partir de los métodos IEC 61000-4-7 y Light-QP (primera etapa)

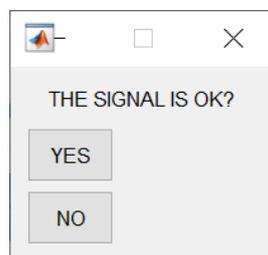


Figura 92: Comprobación de que la señal se ha generado correctamente

En caso de que la señal se haya generado de manera correcta, salta la siguiente pestaña preguntando si se quiere filtrar la señal. Si no se ha generado correctamente vuelve a saltar la pestaña donde se deben fijar los parámetros de la forma de onda (figura 91).

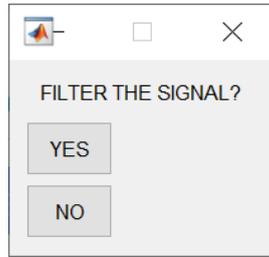


Figura 93: Pestaña de inicio de filtrado

A continuación, se piden los parámetros del filtro. Se deben fijar los parámetros de passband en kHz, de frecuencia central en kHz y el orden del filtro. Además, se deben seleccionar el tipo de respuesta impulsional y el método de diseño del filtro, en este caso 'lowpassiir' y 'butter' respectivamente.

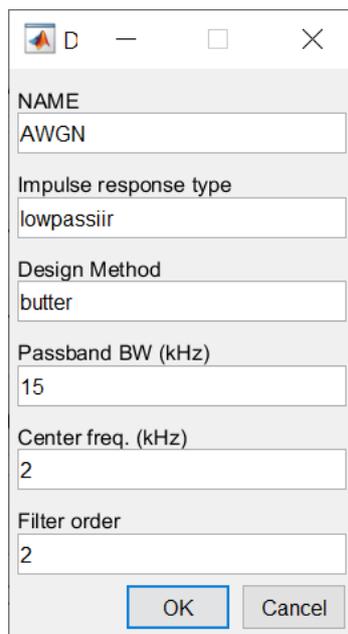


Figura 94: Parámetros del filtro

Una vez se ha filtrado la señal, el SW devuelve el espectro calculado a partir del método IEC 61000-4-7 y de la primera etapa del método Light-QP de la forma de onda que se ha generado con esos parámetros. Asimismo, se muestra la señal de referencia con ancho de resolución de 1 Hz de la señal. También, salta una pestaña preguntando si la señal se ha filtrado correctamente.

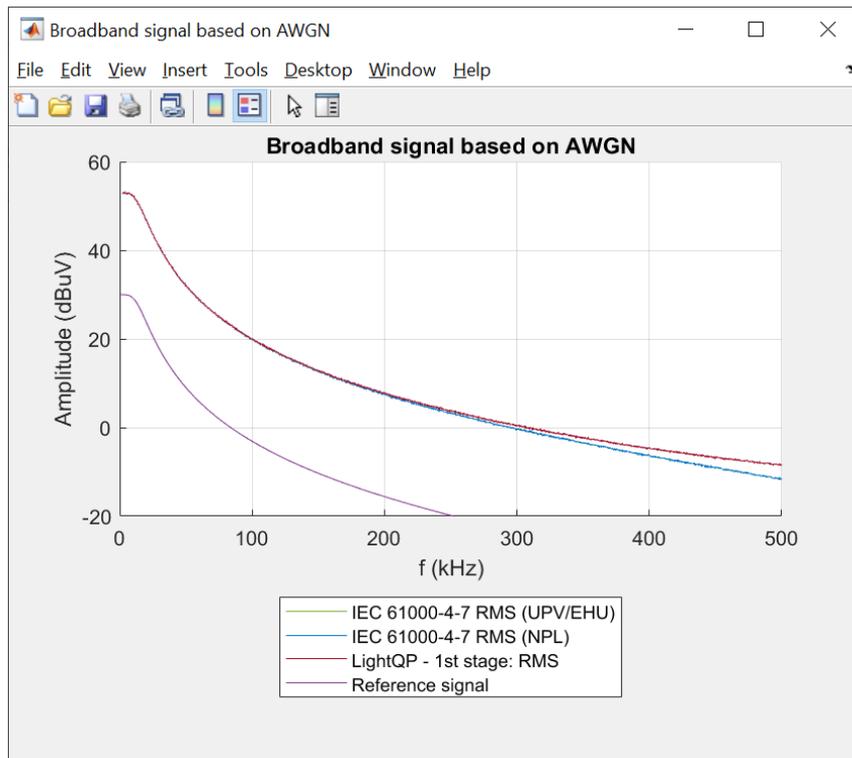


Figura 95: Espectro de la primera forma de onda



Figura 96: Menú de inicio de filtrado

Si la señal se ha filtrado correctamente vuelve a saltar la pestaña donde se fijan los parámetros del AWGN donde ahora se fijarán los parámetros de la segunda forma de onda. Una vez se han generado todas las formas de onda, el SW nos devuelve el espectro del ruido coloreado de la señal que se ha generado combinando todas las formas de ondas.

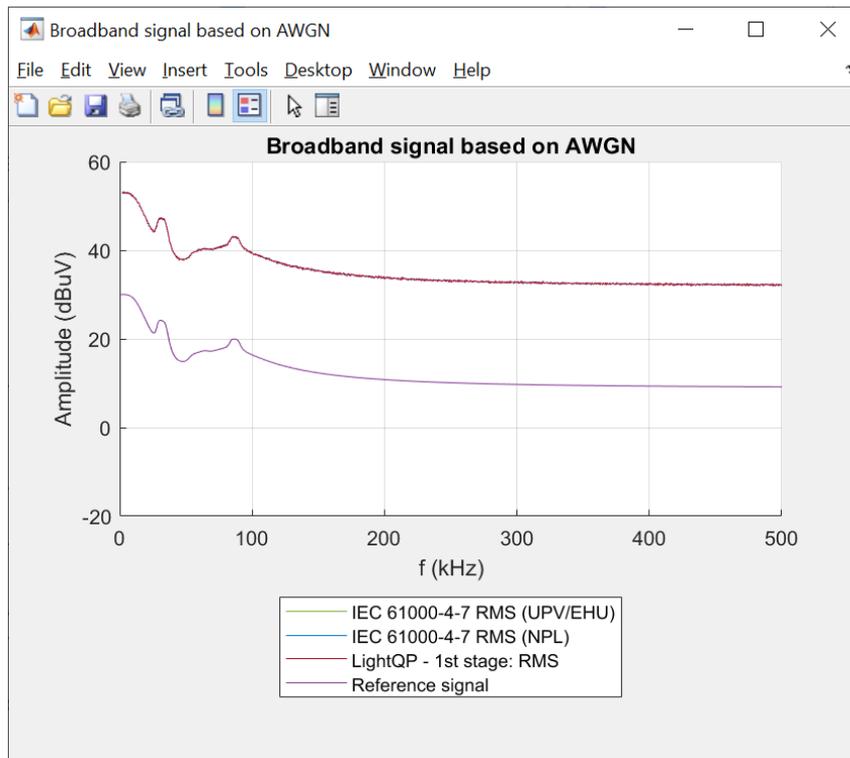


Figura 97: Ruido coloreado de la señal 'SYN_RUIDOCTAXGANERX1F1'

- Ráfagas PLC

Para generar las ráfagas PLC según el estándar PLC se debe seleccionar el botón 'PRIME PLC bursts' y para generar ráfagas según el estándar G3-PLC debes seleccionar el botón 'G3-PLC bursts'. En este caso se van a generar bursts según el estándar PRIME.

El primer paso es fijar los parámetros del estándar PRIME. Los parámetros correctos se han fijado por defecto y son los siguientes.

A screenshot of a software dialog box titled 'C'. The dialog box contains several input fields for configuring parameters. The parameters and their values are as follows:

Parameter	Value
Duration of the signal (s)	5
Duration of the pulses (us)	2240
Sampling freq. (MHz)	2.0
Start freq. (kHz)	41.992
Number of subcarriers	97
Subcarriers spacing (Hz)	488.28125
Impedance (Ohm)	50

At the bottom of the dialog box, there are two buttons: 'OK' and 'Cancel'.

Figura 98: Parámetros del estándar PLC PRIME

A continuación, se debe seleccionar el fichero Excel que contiene los parámetros para la generación del burst PRIME. Cuando finaliza la ejecución, el SW devuelve el espectro del burst PRIME calculado a partir del método IEC 61000-4-7 y de la primera etapa del método Light-QP, así como el espectro de la señal de referencia con un ancho de banda de resolución de 1 Hz. También salta una pestaña preguntando si la señal se ha generado correctamente, de ser así salta a la pestaña de inicio de filtrado.

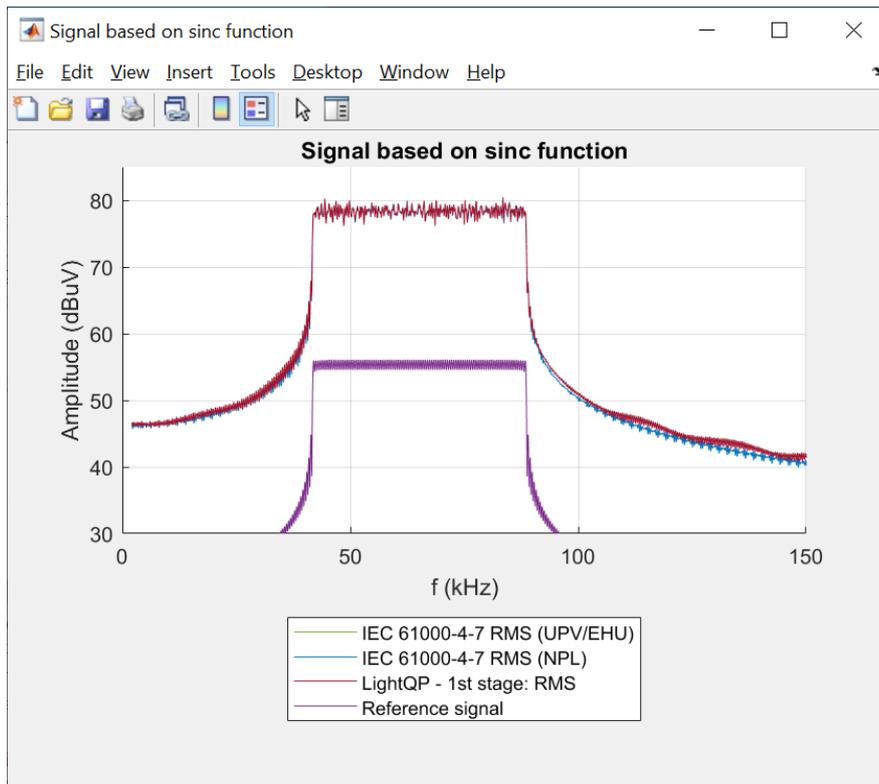


Figura 99: Espectro del burst PLC según el estándar PRIME calculado a partir de los métodos IEC 61000-4-7 y Light-QP (primera etapa) y su señal de referencia

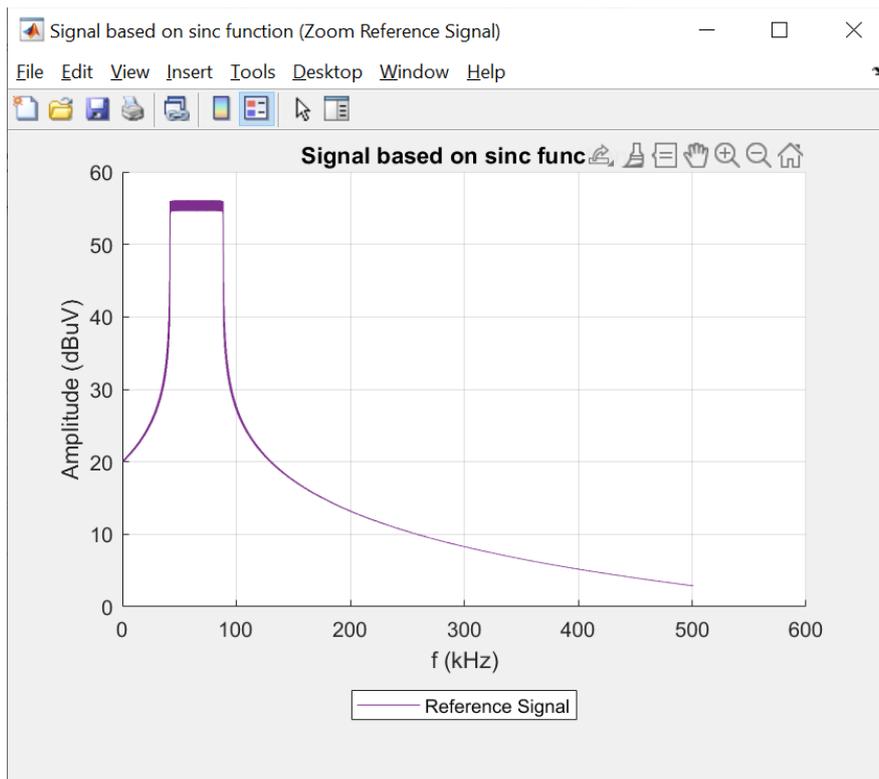


Figura 100: Señal de referencia del burst PLC según el estándar PRIME

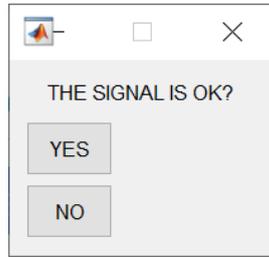


Figura 101: Comprobación de que la señal se ha generado correctamente

En caso que la señal se haya generado correctamente, el siguiente paso es filtrarla. En la siguiente pestaña se debe fijar los parámetros del filtro. Los valores de los parámetros que aparecen en la pestaña por defecto ya son correctos. También salta una pestaña preguntando si la señal se ha filtrado correctamente.

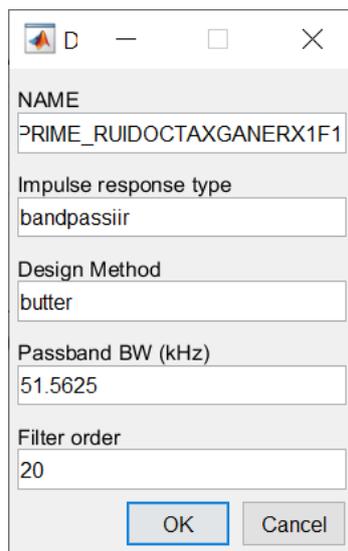


Figura 102: Parámetros del filtro



Figura 103: Menú de inicio de filtrado

Una vez se ha filtrado la señal, el SW muestra el espectro del burst PRIME ya filtrado, calculado mediante el método IEC 61000-4-7 y la primera etapa del método Light-QP. También se muestra un zoom de la señal de referencia (ResBW 1 Hz) y la respuesta impulsional del filtro. La señal se guarda automáticamente con el nombre del fichero Excel.

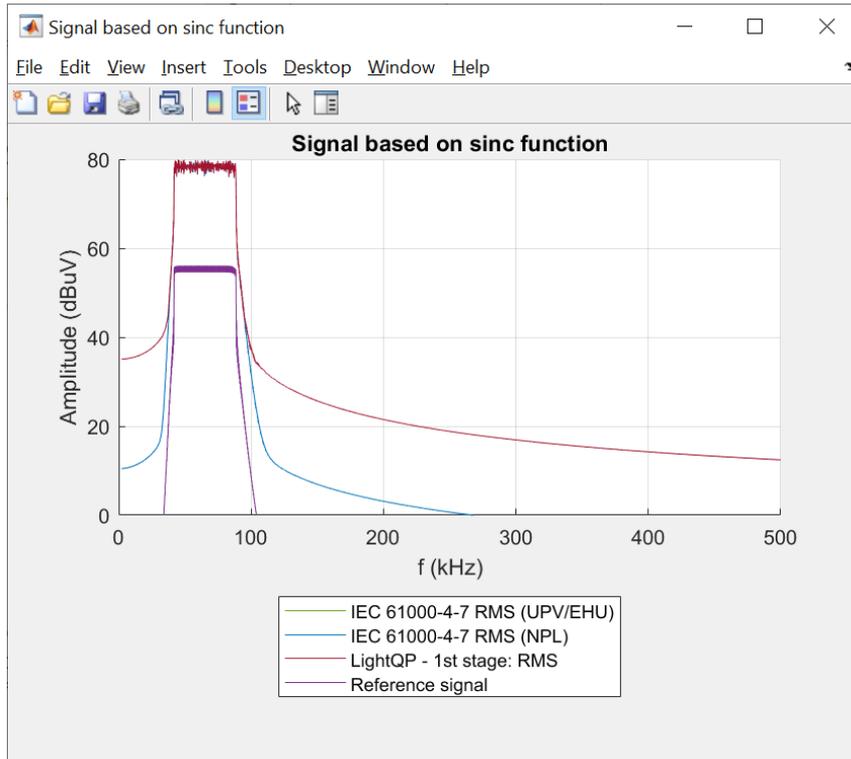


Figura 104: Espectro del burst PLC según el estándar PRIME calculado a partir de los métodos IEC 61000-4-7 y Light-QP (primera etapa) y su señal de referencia

- Réplicas PLC

Para generar las réplicas PLC se debe seleccionar el botón 'Impulsive Noise/PLC Replicas'. El primer paso es fijar los parámetros del AWGN. Los parámetros que aparecen en la pestaña por defecto son correctos.

Figura 105: Parámetros para la generación del AWGN

A continuación, se debe seleccionar el fichero que contenga los parámetros necesarios para la generación de las réplicas PLC.

El resultado de la ejecución del anterior fichero Excel es el espectro de cada réplica PLC, así como la respuesta impulsional de cada filtro.

- Ruido impulsional

Para generar el ruido impulsional se selecciona el botón 'Impulsive Noise/PLC Replicas'. El primer paso es fijar los parámetros del AWGN. Los parámetros que aparecen en la pestaña por defecto son correctos.

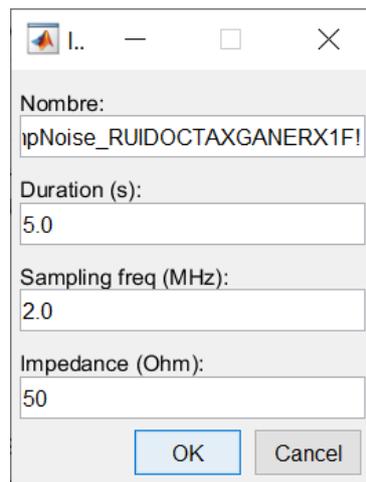


Figura 106: Parámetros para la generación del AWGN

A continuación, se debe seleccionar el fichero que contenga los parámetros necesarios para la generación del ruido impulsional.

El resultado de la ejecución del anterior fichero Excel es el espectro de cada ráfaga del ruido impulsional, así como la respuesta impulsional de cada filtro.

- Combinar señales

Para combinar todas las señales elementales se debe seleccionar el botón 'Add multiple synthetic signals'. Se debe fijar el número de señales elementales que se van a sumar.

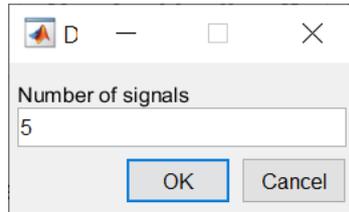


Figura 107: Número de formas de onda

A continuación, se deben seleccionar las cinco señales que se quieren combinar. Una vez seleccionadas, salta la siguiente pestaña donde se va a nombrar a la señal sintética resultante.

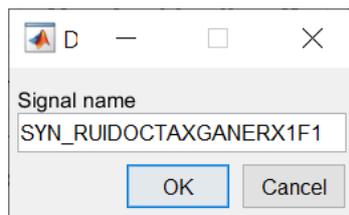


Figura 108: Nombre de la señal sintética

El resultado de la ejecución es el espectro de la señal sintética 'SYN_RUIDOCTAXGANERX1F1' calculado mediante el método IEC 61000-4-7, así como su señal de referencia.

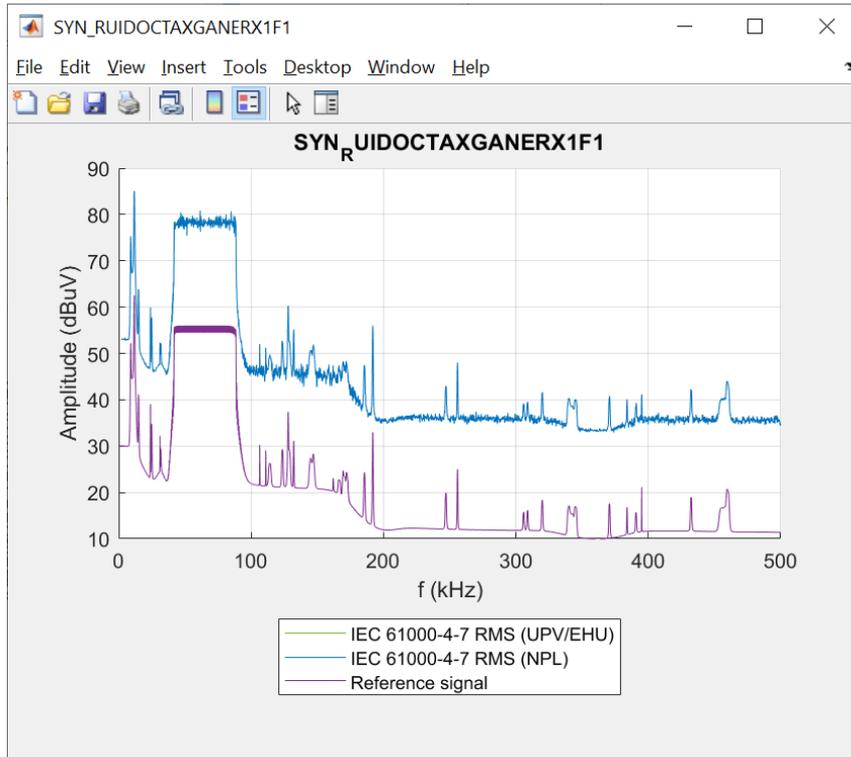


Figura 109: Espectro de la señal 'SYN_RUIDOCTAXGANERX1F1' calculado a partir del método IEC 61000-4-7 y de la señal de referencia

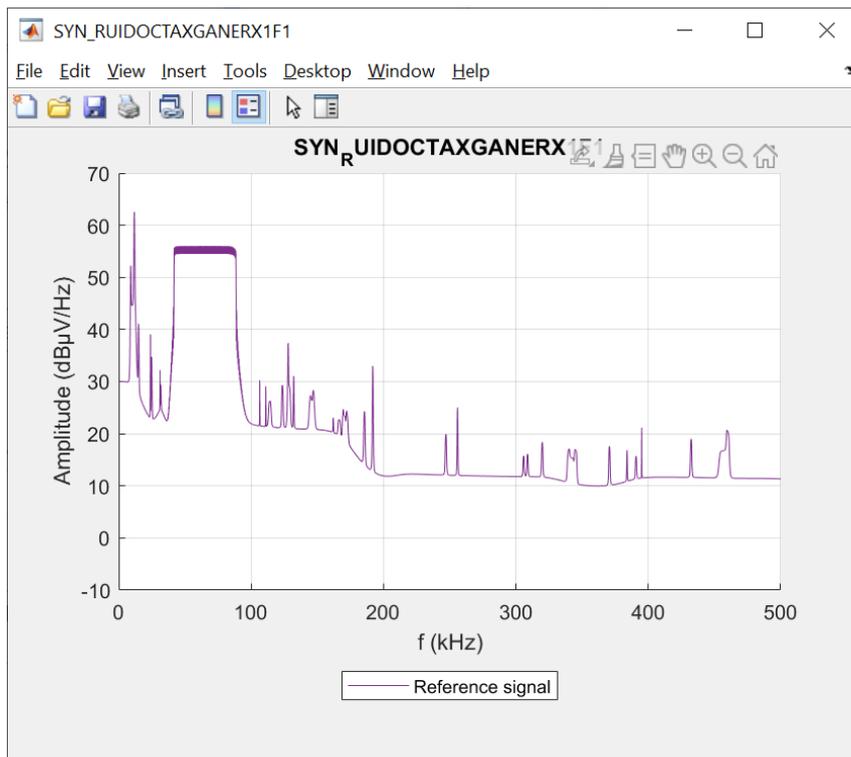


Figura 110: Espectro de la señal de referencia de 'SYN_RUIDOCTAXGANERX1F1'

- Proceso de validación

Las señales sintéticas deben superar un proceso de evaluación. En primer lugar, se debe aplicar el mismo método que a las señales grabadas en la red cuyos espectros se han calculado a partir de la primera etapa del método Light-QP. Para ello, seleccionamos el botón 'Solapar señales'. Si seleccionamos 'one spectrum' se calculará el espectro de la señal que seleccionaremos mediante la primera etapa del método Light-QP. En cambio, si seleccionamos 'two spectra and compare' se solaparán los espectros de ambas señales que se calcularán a partir de la primera etapa del método Light-QP.

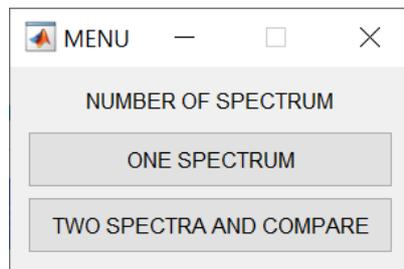


Figura 111: Menú del botón 'Add multiple synthetic signals'

En este caso seleccionaremos la segunda opción. Primero seleccionaremos la señal grabada en la red y después la señal sintética. Como resultado, se obtienen dos figuras. En unas de ellas se muestran los espectros solapados de ambas señales que han sido calculados mediante el método CISPR 16 y en la otra figura, se muestran de nuevos los espectros solapados de ambas señales, esta vez calculados a partir del método Light-QP y IEC 61000-4-7. En ambas figuras se muestra la señal de referencia (ResBw 200 Hz).

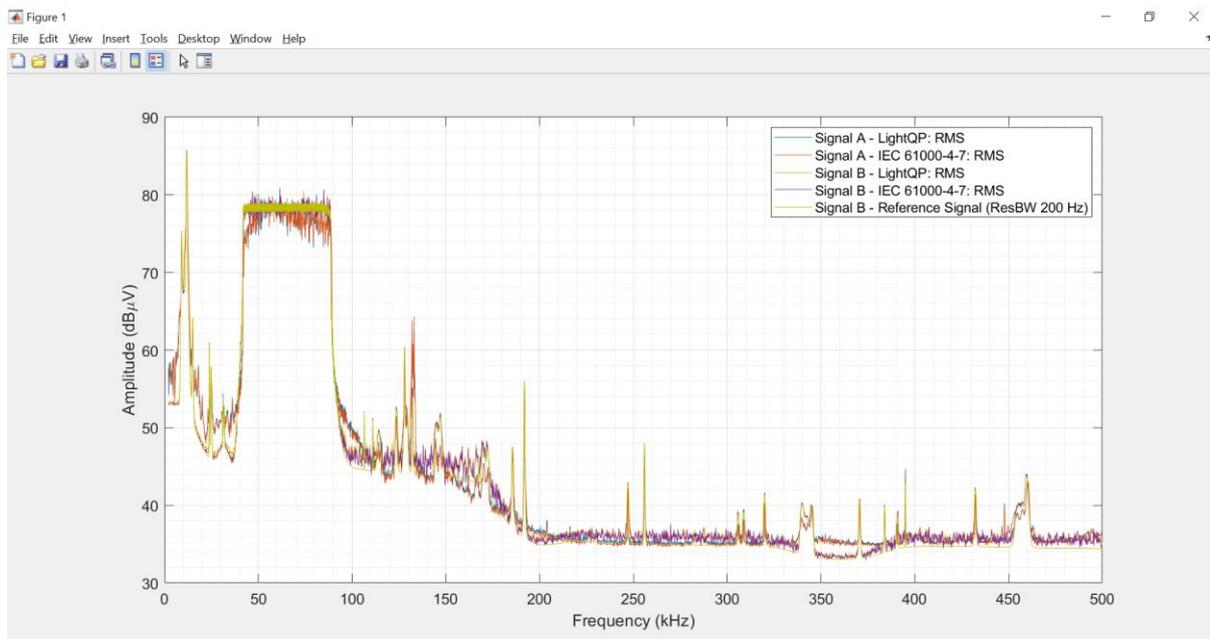


Figura 112: Espectros solapados de la señal grabada y la sintética calculados a partir de los métodos IEC 61000-4-7 y Light-QP (primera etapa) y la señal de referencia (ResBW 200 Hz)

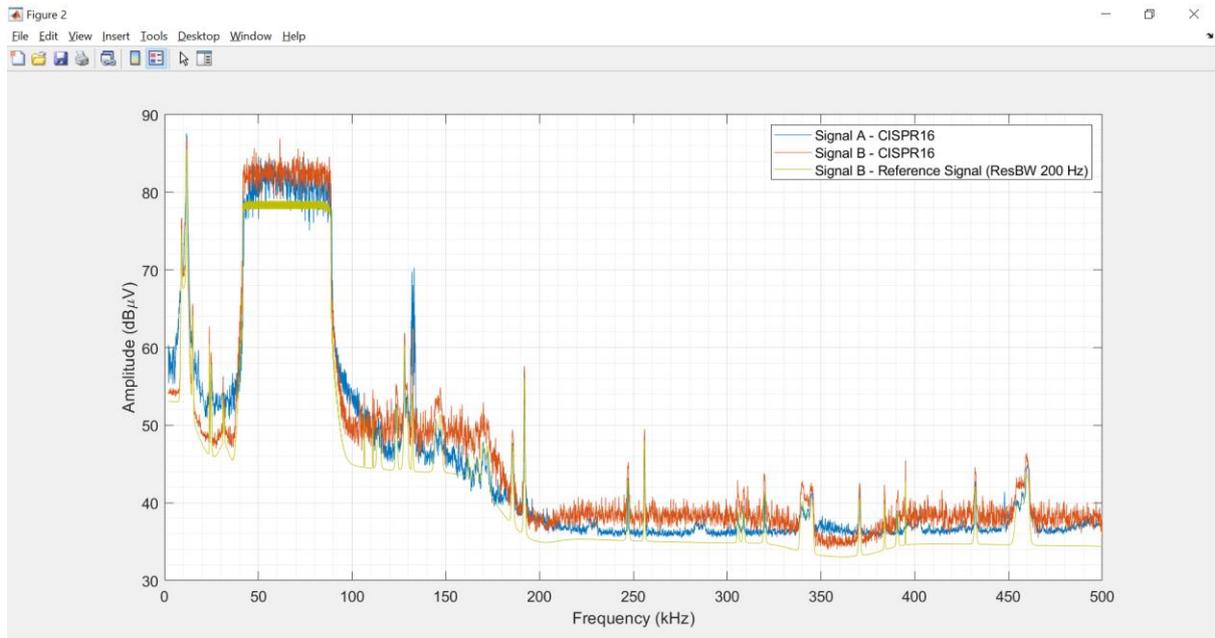


Figura 113: Espectros solapados de la señal grabada y la sintética calculados a partir del método CISPR 16 y la señal de referencia (ResBW 200 Hz)

También se debe generar los espectrogramas de ambas señales y comparar. Para ello, se debe seleccionar el botón 'Create Spectrogram' y seleccionar la señal de la cual se quiere calcular su espectrograma.