



Universidad
del País Vasco

Euskal Herriko
Unibertsitatea



Máster en Ingeniería de Telecomunicación

Trabajo Fin de Máster

***Caracterización de la red eléctrica de baja
tensión como medio de comunicación
hasta 500 kHz***

Alumno: Mikel García Gómez

Directores de Proyecto: David de la Vega Moreno, Igor Fernández Pérez

Octubre 2017

Contenido

Resumen	4
Lista de figuras	5
Lista de tablas	8
1. Introducción.....	9
2. Objetivos y alcance.....	14
3. Beneficios	15
4. Estado del arte	16
4.1. NB-PLC (rangos de frecuencias, estudios realizados, normas y especificaciones).....	16
4.2. Modelos de canal	19
4.3. Modelos de ruido	21
5. Desarrollo	26
5.1. Equipamiento de medida y caracterización	26
5.2. Metodología de medida.....	36
5.3. Procesado de medida.....	40
5.4. Representación de los resultados	41
5.5. Análisis de resultados	42
6. Plan de trabajo	44
6.1. Equipo de trabajo	44
6.2. Definición de fases, paquetes de trabajo y tareas	45
6.3. Diagrama de Gantt	47
7. Desglose de gastos.....	48
7.1. Costes unitarios.....	48
7.2. Cálculo de gastos	49
7.3. Resumen Económico	53
8. Conclusiones.....	54
9. Bibliografía.....	55

Anexo 1: Resultados.....	57
Campaña de medidas 1.....	57
Campaña de medidas 2.....	76

Resumen

En este trabajo se ha realizado una caracterización de la red eléctrica de baja tensión como medio de transmisión de las comunicaciones de las Smart Grids. Esta caracterización se ha realizado en base a medidas de las emisiones no deseadas y de la impedancia característica en el rango frecuencial 10-500 kHz. Para ello se han realizado dos campañas de medidas; la primera de ellas en la red de baja tensión en el barrio de Miribilla (Bilbao) y la segunda de ellas en el interior de un edificio, concretamente, en la Escuela de Ingeniería de Bilbao.

Los resultados de las emisiones no deseadas han sido procesados y comparados con los niveles límite definidos en la especificación EN 50065-1. El análisis de los resultados obtenidos permite conocer las características de la red eléctrica como medio de transmisión en dos entornos reales y representativos para el uso de las Smart Grids.

This work a characterization of a low tension electric grid has been performed as a mean for the transmission of Smart Grids' communications. This characterization has been made based on non-desirable emission measurements and on the 10-500 kHz frequency range characteristic impedance. Two measurements campaigns have been performed for this purpose; firstly in the low tension grid of Miribilla's Quarter (Bilbao) and secondly inside one lone building, namely Faculty of Engineering in Bilbao.

The non-desirable emissions' results have been processed and compared with the limits defined in the EN 50065-1 specifications. The analysis of the results obtained allows us to understand the characteristic of the electricity grid as a mean of transmission within two real and representative environments for Smart Grids' employment.

Lan honetan behe-tentsioko sare-elektrikoaren karakterizazio bat egin da Smar Grid-etako komunikazio-transmisioen bitarteko gisa. Karakterizazio hori egiteko, ez desiratutako igorpenen eta 10-500kHz frekuentzia-heinaren ohiko inpedantziaren neurketak hartu dira oinarritzat. Horretarako, bi neurketa-saio egin dira. Lehena Bilboko Miribilla auzoko behe-tentsioko sarean eta bigarrena eraikin baten barruan, hain zuzen ere, Bilboko Ingeniaritza Eskolan.

Ez desiratutako igorpenen emaitzak prozesatu eta konparatu egin dira EN 50065-1 arauan zehaztutako muga-mailekin. Lortutako emaitzen azterketak bi gune erreal eta esaguratsuetan, sare elektrikoan Smart Grid-en erabileran transmisio-ezaugarriak ezagutzeko aukera eman digu.

Lista de figuras

Figura 1: Banda de frecuencias según las diferentes normas (Fuente: [1]).....	10
Figura 2: Esquema de la red de acceso en baja tensión típica (Fuente: [2]).....	11
Figura 3: Extensión de la banda de frecuencia PRIME v1.4 (Fuente: [5])	13
Figura 4: Límites de tensión del detector quasi-pico y average de la norma EN 50065-1	17
Figura 5: Comparación gráfica de los niveles de tensión de medidas de emisiones producidas por bombillas LED (tipo A) con los límites fijados por la especificación EN 50065-1(Fuente: [6]).....	18
Figura 6: Comparación gráfica de los niveles de tensión de medidas de emisiones producidas por bombillas LED (tipo B) con los límites fijados por la especificación EN 50065-1(Fuente: [6]).....	18
Figura 7: Parámetros ABCD para una red estándar de dos puertos(Fuente: [15])	19
Figura 8: Canal MV-LV (Fuente: [15])	20
Figura 9: División del periodo de ruido en 3 regiones (Fuente: [15]).....	22
Figura 10: Generación muestras de ruido (Fuente: [15])	22
Figura 11: Modelo de ruido impulsivo: representación de los parámetros que modelan la amplitud y la distribución temporal de los impulsos de ruido (Fuente: [15])	23
Figura 12: Medida de ruido realizada en una prueba de campo (Fuente: [15]).....	24
Figura 13: Forma de onda creada con las 3 componentes de ruido (Fuente: [15])	25
Figura 14: Analizador de señal Anritsu MS2690A.....	27
Figura 15: Osciloscopio PicoScope 5000	27
Figura 16: Analizador de redes R&S®ZVL	28
Figura 17: Sonda de impedancia 50 Ω	29
Figura 18: Respuesta frecuencial hasta 500 kHz de la sonda con impedancia 12.5 Ω ...	30
Figura 19: Respuesta frecuencial hasta 20 kHz de la sonda con impedancia 12.5 Ω ...	30
Figura 20: Respuesta frecuencial hasta 500 kHz de la sonda con impedancia 50 Ω	31
Figura 21: Respuesta frecuencial hasta 20 kHz de la sonda de impedancia 50 Ω	31
Figura 22: Filtro Paso Bajo.....	32
Figura 23: Filtro Paso Alto	33
Figura 24: Respuesta frecuencial de la sonda y el filtro Paso Bajo hasta 6 MHz	34
Figura 25: Respuesta frecuencial de la sonda y el filtro Paso Bajo hasta 500 kHz.....	34
Figura 26: Respuesta frecuencial de la sonda, el filtro Paso Bajo y el filtro Paso Alto	

hasta 6 MHz.....	35
Figura 27: Respuesta frecuencial de la sonda, el filtro Paso Bajo y el filtro Paso Alto hasta 500 kHz	35
Figura 28: Mapa de situación de los puntos de medida.....	36
Figura 29: Punto de medida B: Caja de fusibles ubicada en el cuarto de contadores de un edificio residencial.....	37
Figura 30: Puntos de medida en la segunda campaña	39
Figura 31: Diagrama de Gantt	47
Figura 32: Espectrograma medida CT fase R concentrador ON Sonda 50 Ω	57
Figura 33: Emisiones medida CT fase R concentrador ON Sonda 50 Ω	58
Figura 34: Comportamiento de la impedancia en la fase R con el concentrador ON	59
Figura 35: Espectrograma medida CT fase R concentrador OFF Sonda 50 Ω	60
Figura 36: Emisiones medida CT fase R concentrador OFF Sonda 50 Ω	60
Figura 37: Comportamiento de la impedancia en la fase R con el concentrador OFF ...	61
Figura 38: Espectrograma medida CT fase S Sonda 50 Ω	62
Figura 39: Emisiones medida CT fase S Sonda 50 Ω	62
Figura 40: Comportamiento de la impedancia en la fase S	63
Figura 41: Espectrograma medida CT fase T Sonda 50 Ω	64
Figura 42: Emisiones medida CT fase T Sonda 50 Ω	64
Figura 43: Espectrograma medida CT fase R Sonda 12.5 Ω	66
Figura 44: Emisiones medida CT fase R Sonda 12.5 Ω	66
Figura 45: Espectrograma medida CT fase S Sonda 12.5 Ω	68
Figura 46: Emisiones medida CT fase S Sonda 12.5 Ω	68
Figura 47: Espectrograma medida CT fase T Sonda 12.5 Ω	69
Figura 48: Emisiones medida CT fase T Sonda 12.5 Ω	70
Figura 49: Espectrograma medida Cuadro Contadores fase 1 Sonda 50 Ω	71
Figura 50: Emisiones medida Cuadro Contadores fase 1 Sonda 50 Ω	72
Figura 51: Espectrograma medida Cuadro Contadores fase 2 Sonda 50 Ω	73
Figura 52: Emisiones medida Cuadro Contadores fase 2 Sonda 50 Ω	73
Figura 53: Espectrograma medida Cuadro Contadores fase 3 Sonda 50 Ω	74
Figura 54: Emisiones medida Cuadro Contadores fase 3 Sonda 50 Ω	75
Figura 55: Espectrograma medida 1 en aula TSR	76
Figura 56: Emisiones medida 1 aula TSR	77
Figura 57: Espectrograma medida 2 aula TSR.....	78

Figura 58: Emisiones medida 2 aula TSR	78
Figura 59: Espectrograma medida 3 aula TSR	79
Figura 60: Emisiones medida 3 aula TSR	80
Figura 61: Espectrograma medida 4 aula TSR	81
Figura 62: Emisiones medida 4 aula TSR	81
Figura 63: Espectrograma medida 5 aula TSR	82
Figura 64: Emisiones medida 5 aula TSR	83
Figura 65: Espectrograma medida 6 aula TSR	84
Figura 66: Emisiones medida 6 aula TSR	84
Figura 67: Espectrograma medida 7 aula TSR	85
Figura 68: Emisiones medida 7 aula TSR	86
Figura 69: Espectrograma medida 8 laboratorio Atlantis	87
Figura 70: Emisiones medida 8 laboratorio Atlantis	87
Figura 71: Espectrograma medida 10 laboratorio Atlantis	88
Figura 72: Emisiones medida 9 laboratorio Atlantis	89
Figura 73: Espectrograma medida 10 laboratorio Atlantis	90
Figura 74: Emisiones medida 10 laboratorio Atlantis	90
Figura 75: Espectrograma medida 11 laboratorio Atlantis	91
Figura 76: Emisiones medida 11 laboratorio Atlantis	92

Lista de tablas

Tabla 1: Medidas realizadas en el centro de transformación en la primera campaña de medidas.....	38
Tabla 2: Medidas realizadas en el cuarto de contadores en la primera campaña de medidas.....	38
Tabla 3: Equipo de trabajo.....	44
Tabla 4: Paquete de trabajo 1.....	45
Tabla 5: Paquete de trabajo 2.....	45
Tabla 6: Paquete de trabajo 3.....	45
Tabla 7: Paquete de trabajo 4.....	46
Tabla 8: Paquete de trabajo 5.....	46
Tabla 9: Paquete de trabajo 7.....	46
Tabla 10: Mano de obra.....	48
Tabla 11: Recursos materiales amortizables.....	49
Tabla 12: Desglose de gastos Paquete de trabajo 1.....	49
Tabla 13: Desglose de gastos Paquete de trabajo 2.....	50
Tabla 14: Desglose de gastos Paquete de trabajo 3.....	50
Tabla 15: P Desglose de gastos Paquete de trabajo 4.....	50
Tabla 16: Desglose de gastos Paquete de trabajo 5.....	50
Tabla 17: Desglose de gastos Paquete de trabajo 6.....	50
Tabla 18: Desglose de gastos total por tareas.....	51
Tabla 19: Resumen recursos humanos.....	51
Tabla 20: Relación de gastos de recursos materiales.....	52
Tabla 21: Coste total recursos materiales.....	52
Tabla 22: Resumen económico.....	53

1. Introducción

La red eléctrica es la red más extensa del mundo y la única que llega, tanto a lugares remotos, como a los hogares de los usuarios. Esta red llega a cientos de millones de personas y está formada por cientos de miles de kilómetros de cable. Por ello, es una infraestructura muy interesante para otros usos, como las transmisiones de datos. Las diversas tecnologías agrupadas bajo el término PLC (Power Line Communications) responden a este uso de la red eléctrica como canal de comunicaciones.

En función de la frecuencia de transmisión se puede distinguir entre NB-PLC (Narrowband PLC) y BB-PLC (Broadband PLC).

BB-PLC está definida para un rango de frecuencias entre 2 MHz y 30 MHz y su uso principal son las conexiones a Internet de alta velocidad.

NB-PLC está definida actualmente en Europa para un rango de frecuencias entre 3 kHz y 148.5 kHz y hasta 500 kHz para el resto del mundo. Su máxima velocidad de transmisión está cerca de los 100 kbps. Los dispositivos suelen tener un alcance máximo de cientos de metros o unos pocos kilómetros en función de la tecnología o la topología. Se usa principalmente en domótica, servicios relacionados con la energía y la lectura de contadores.

Estas tecnologías deben solventar los problemas que presenta el uso de una red que no fue concebida para la transmisión de comunicaciones, como son la atenuación de las señales transmitidas con la frecuencia, las variaciones del comportamiento del canal de comunicaciones con la impedancia, el multitrayecto o la presencia de ruido radioeléctrico y emisiones de los dispositivos conectados dentro de las bandas de frecuencia asignadas a NB-PLC. Los principales mecanismos para superar estas adversidades son el uso de transmisiones multiportadora (OFDM), la utilización de modulaciones robustas y la inclusión de algoritmos de codificación para protección frente a errores. En el caso de NB-PLC, las modulaciones más utilizadas son ASK, FSK y PSK.

En cuanto a la regulación internacional, las bandas de frecuencias asignadas a NB-PLC no son iguales en todas las regiones del mundo, y están especificadas por los organismos FCC (EE.UU.), CENELEC (Europa) y ARIB (Asia). La figura 1 muestra las bandas de frecuencia asignadas a NB-PLC en cada región.

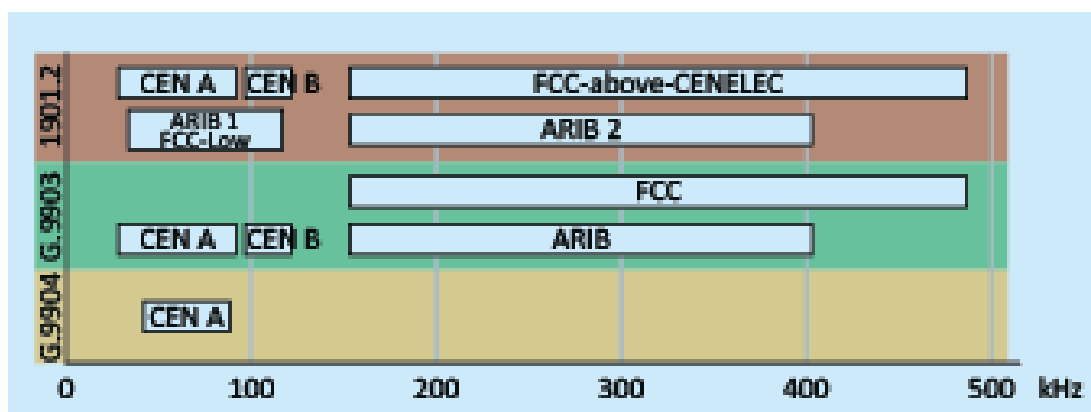


Figura 1: Banda de frecuencias según las diferentes normas (Fuente: [1])

En Norteamérica la banda de frecuencias asignada a NB-PLC va desde 10 kHz hasta 490 kHz, en Asia llega hasta 450 kHz y en China concretamente desde 3 kHz a 500 kHz. Sin embargo, en Europa NB-PLC sólo tiene asignado el rango hasta 148.5 kHz, de los cuales el uso por parte de las compañías eléctricas queda limitado en los 95 kHz. Actualmente hay una previsión de que se extienda esta banda de frecuencia hasta los 500 kHz, como en Norteamérica y China.

Esta posible ampliación en Europa de las comunicaciones NB-PLC, en las bandas de frecuencia hasta 500 kHz, es la razón principal por la que se busca caracterizar la red de baja tensión como medio de propagación en ese rango de frecuencias. Para ello, es necesario caracterizar, al menos, los tipos de ruido y las emisiones existentes en el medio y la variación de la impedancia del canal de propagación.

La caracterización básica de la red eléctrica en ese rango de frecuencias requiere utilizar, en primer lugar, modelos del cable eléctrico como medio de propagación, basados en el uso adecuado de parámetros como la impedancia, la función de transferencia y parámetros de propagación. En segundo lugar, se requieren modelos que definan la tipología de diferentes tipos de ruido y emisiones radioeléctricas, así como su comportamiento en función del tiempo y de la frecuencia. Todo ello, teniendo en cuenta que las características de este medio en el rango de frecuencias hasta 150 kHz no son directamente aplicables al rango de frecuencias 150 kHz – 500 kHz.

El ruido y los diferentes tipos de emisiones e interferencias son una parte importante del canal de propagación. El escenario de interferencia es complicado, ya que hay varios posibles tipos de ruidos que pueden producirse, y todos ellos son de diferente

tipología y características.

En la figura 2, la respuesta impulsional del canal está representada por $h(t)$, mientras que los diferentes tipos de ruido $n(t)$ se suman a la señal transmitida, antes de que la señal llegue al receptor $r(t)$.

Los principales tipos de ruido son: ruido de fondo coloreado, ruido de banda estrecha, ruido impulsivo periódico síncrono o asíncrono a la frecuencia de red (normalmente 50 o 60 Hz) y ruido impulsivo no periódico asíncrono [2].

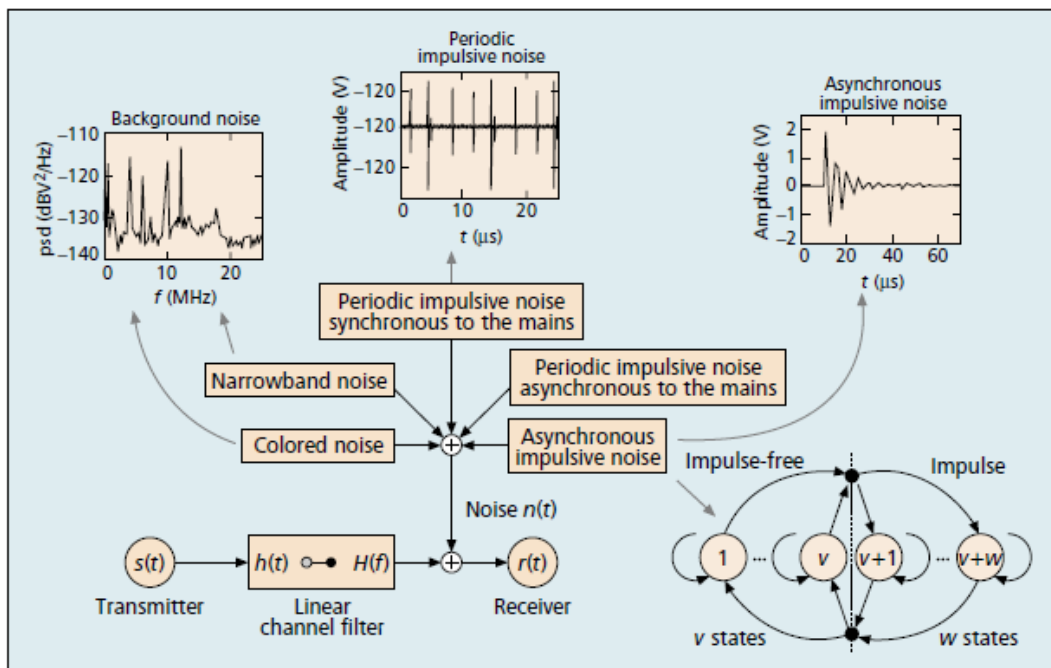


Figura 2: Esquema de la red de acceso en baja tensión típica (Fuente: [2])

A continuación se explican estos tipos de ruido.

- Ruido coloreado: se caracteriza por una densidad espectral de potencia relativamente baja, que aumenta significativamente en las frecuencias más bajas. Es causada por electrodomésticos como ordenadores o secadores de pelo, que pueden causar perturbaciones en la gama de frecuencia hasta 30 MHz.
- Interferencia de banda estrecha: consiste en señales moduladas, cuyo origen son emisoras de radiodifusión en el rango de frecuencias de 1-22 MHz.
- Ruido impulsivo periódico: se divide en interferencia sincrónica o asíncrona a la frecuencia de red. Las partes síncronas son causadas principalmente por rectificadores dentro de fuentes de alimentación de DC y aparatos como

reguladores de luz basados en tiristores. Normalmente están compuestos de armónicos en sus múltiplos de frecuencia. Las porciones asíncronas periódicas exhiben tasas de repetición considerablemente más altas de 50-200 kHz.

- Ruido impulsivo no periódico: es causado por los transitorios de conmutación que ocurren a lo largo de una red de suministro de energía en intervalos irregulares.
- Ruido impulsivo no periódico asíncrono: se caracteriza por tres variables aleatorias: amplitud, ancho del impulso, y el tiempo entre la llegada de dos impulsos. Se trata de un tipo de ruido poco común, ya que incluso en entornos muy ruidosos como las zonas industriales, tiene lugar en un porcentaje de tiempo limitado.

Por otra parte la tecnología NB-PLC utilizada en el análisis es PRIME v1.4, definida para su uso hasta 500 kHz. La tecnología PRIME (Powerline Intelligent Metering Evolution) [3] ha sido desarrollada por PRIME Alliance y está recogida en la Rec. G.9904 de la ITU (Unión Internacional de Telecomunicaciones) [4].

PRIME (v1.4.) supone una gran evolución en el rendimiento del sistema respecto a la versión anterior v1.3.6. Dentro de la capa física, destacan dos aspectos importantes: los modos robustos y la extensión de la banda FCC / ARIB, lo cual supone la ampliación del rango de frecuencias hasta 500 kHz, para lograr una mayor tasa de transmisión de datos [5].

Con el fin de hacer frente a entornos hostiles, que pueden encontrarse en países específicos y en condiciones especiales, se han introducido modos de transmisión adicionales. Estos modos han sido diseñados para mejorar la robustez del sistema frente a ruidos impulsivos e interferencias de banda estrecha.

PRIME v1.4 está preparado para el uso de la banda de frecuencias de 41.992 kHz a 471.679 kHz. Esta tecnología divide este intervalo en ocho canales, que pueden ser utilizados ya sea, como canales independientes individuales, o varios de ellos agrupados como una única banda de transmisión - recepción, tal como se muestra en la figura 3.

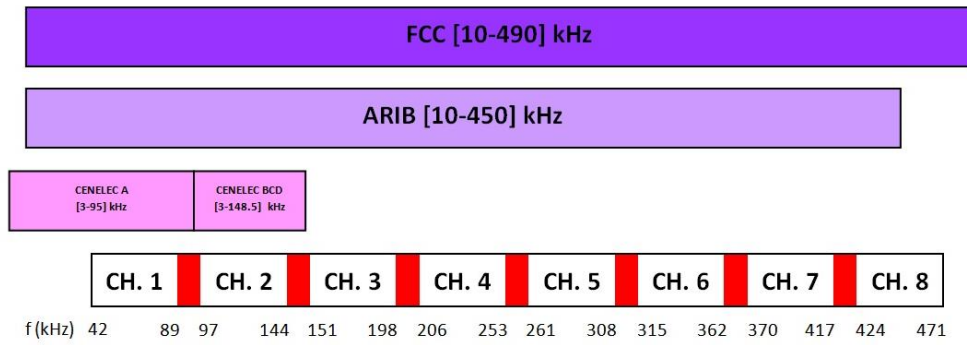


Figura 3: Extensión de la banda de frecuencia PRIME v1.4 (Fuente: [5])

La combinación de varios canales lógicos en un único canal de transmisión permite a PRIME v1.4 lograr velocidades de transmisión que van desde un mínimo de 5,4 kbps (un único canal lógico en el modo más robusto) a un máximo de 1028.8 kbps (ocho canales lógicos, agrupados en un canal de transmisión, en el modo menos robusto).

2. Objetivos y alcance

El objetivo principal del trabajo es la caracterización de la red eléctrica de baja tensión como medio de transmisión de las comunicaciones de las Smart Grids, en el rango frecuencial 10-500 kHz, incluyendo el rango 150-500 kHz, en el que los estudios realizados hasta la fecha son muy escasos.

Como resultado final de este proyecto, se ha elaborado un documento que recoge el estudio realizado sobre la caracterización de la red de baja tensión, con hincapié en las emisiones no deseadas en el rango frecuencial de 150 kHz a 500 kHz, tras la realización de dos campañas de medidas en diferentes entornos.

3. Beneficios

En este proyecto, los beneficios obtenidos son principalmente de carácter técnico. Hasta ahora, la caracterización de las emisiones no deseadas de la red eléctrica se han limitado al rango frecuencial entre los 10 y los 150 kHz, sin embargo, en nuestro trabajo esta caracterización se extiende hasta la frecuencia de 500 kHz. Los resultados obtenidos tienen una gran importancia debido a la escasez de datos asociados al comportamiento de la red eléctrica europea como medio de propagación en este rango de frecuencias. Los resultados servirán para ayudar a decidir sobre el interés actual existente en ampliar el rango de frecuencias de NB-PLC (Narrow Band-Power Line Communications) hasta los 500 kHz, y poder utilizar esta nueva banda de frecuencia en Europa. El mayor ancho de banda disponible proporcionaría una mayor tasa de transmisión, un mayor número de transmisiones simultáneas, y por tanto, nuevas aplicaciones basadas en unas comunicaciones con mejores prestaciones.

4. Estado del arte

Como sabemos, el cable utilizado en la red eléctrica está pensado para la distribución de la energía eléctrica y no para la transmisión de comunicaciones. Los problemas detectados de emisiones pueden causar interferencias, y por tanto, limitar el uso de la red como medio de propagación.

4.1. NB-PLC (rangos de frecuencias, estudios realizados, normas y especificaciones)

En los últimos años, se han realizado varios estudios tanto en Europa como en otros continentes sobre la tecnología NB-PLC, centrándose en la caracterización de la red eléctrica para su uso en las comunicaciones en la banda 10-150 kHz. Sin embargo, es necesario caracterizar la red eléctrica en la banda 150-500 kHz con medidas realizadas en entornos reales.

Hasta ahora, como se ha comentado en la introducción, en Europa NB-PLC tiene asignado el rango hasta 148.5 kHz, y el uso para las compañías eléctricas se limita a los 95 kHz. Por tanto, los estudios realizados hasta ahora se han centrado en el rango frecuencial utilizable para dichas comunicaciones.

En el documento SC 205 A del CENELEC [6] se recogen varios estudios realizados en diferentes países europeos. En ellos, se detallan los problemas de las emisiones no deseadas en el rango de frecuencias 2-150 kHz.

Los niveles de tensión de las emisiones están medidos siguiendo las especificaciones CISPR (Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques) [7] - [9] y comparados con los diferentes límites que están definidos según el tipo de equipamiento por las normas definidas por el Comité Europeo de Estandarización (EN):

- Límites para emisiones no deseadas generadas por equipos de iluminación (CISPR15, EN 55015) [10].
- Límites para emisiones no deseadas generadas por equipos de cocina de inducción (CISPR11, EN 55011) [11].
- Límites para emisiones deseadas generadas por equipos de comunicación de

red (EN 50065-1)[12].

- Límites para emisiones no deseadas generadas por equipos de comunicación de red (EN 50065-1)[12].

Estas normas fijan dos tipos de límites diferentes. Por un lado, el límite de emisiones en tensión, medidas con un detector average. Se trata de un límite que determina el valor medio de la envolvente. El otro tipo de límite, el del detector quasi-pico, mide también el límite de emisiones en tensión. Se trata de un detector que es combinación del detector pico y el average. Se trata de un filtro formado por dos resistencias y un condensador. Las resistencias no permiten que el condensador se cargue hasta su valor máximo y tienen además un tiempo de descarga. Los tiempos de carga (1 ms) y de descarga (160 ms) están especificados en la norma CISPR 16-1-1.

Cabe destacar que en entornos donde el equipamiento es de origen desconocido, y por lo tanto, no se tienen aislados completamente los equipos a medir en la red eléctrica, se utiliza la norma EN 50065-1 debido a que es la más restrictiva de todas ellas. En la siguiente figura se muestran los límites.

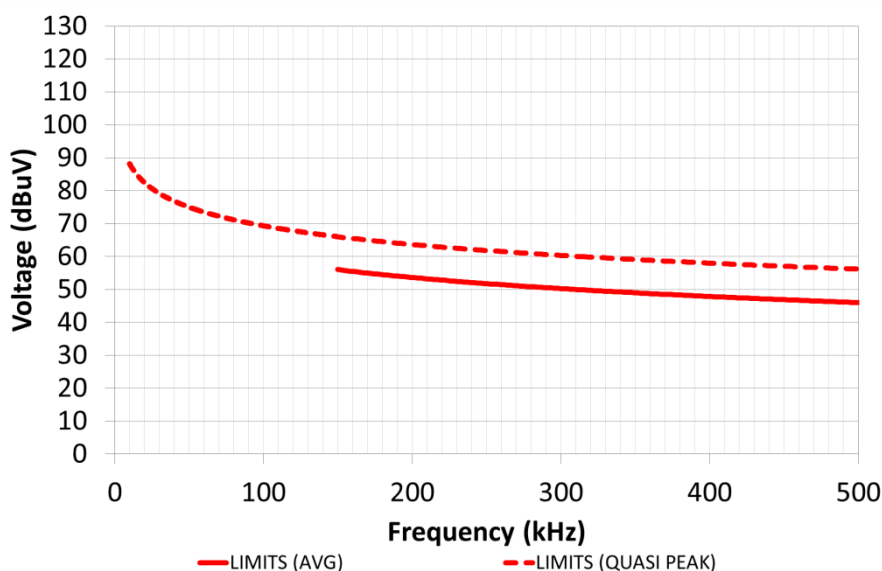


Figura 4: Límites de tensión del detector quasi-pico y average de la norma EN 50065-1

Como ejemplo, en Austria se realizaron en un hogar con hasta 30 bombillas LED conectadas a la red eléctrica, diferentes tipos mediciones que mostraron que en la banda de frecuencias de 20 a 100 kHz había emisiones con una tensión elevada. Concretamente cuando se utilizaron las bombillas de un determinado tipo (A),

realizando las pruebas, tanto con una, como con 30 bombillas conectadas al mismo tiempo, las emisiones se encontraban por debajo de los límites marcados por la especificación EN 50065-1. Sin embargo, al utilizar las bombillas de otro tipo (B), las emisiones eran muy elevadas, superando en determinadas frecuencias los límites fijados. Estas se observan gráficamente en las figuras 5 y 6.

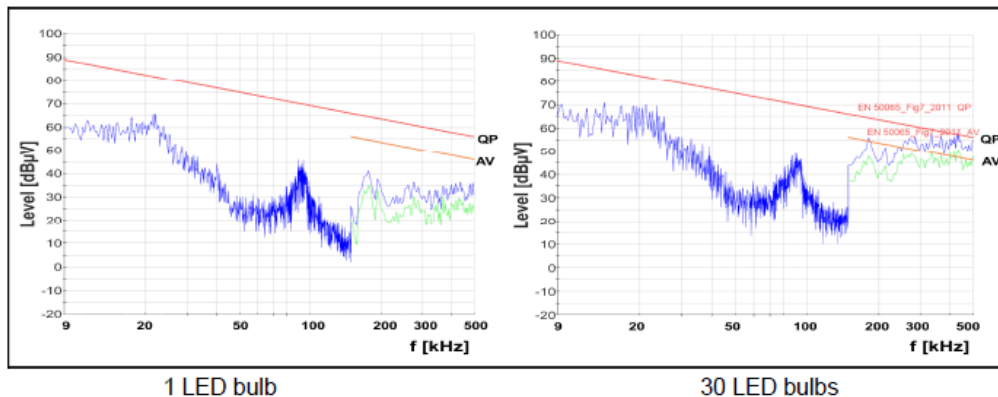


Figura 5: Comparación gráfica de los niveles de tensión de medidas de emisiones producidas por bombillas LED (tipo A) con los límites fijados por la especificación EN 50065-1(Fuente: [6])

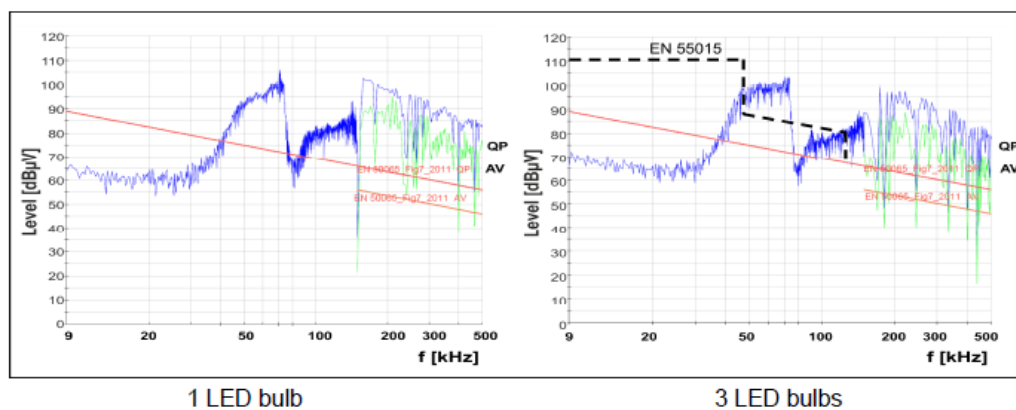


Figura 6: Comparación gráfica de los niveles de tensión de medidas de emisiones producidas por bombillas LED (tipo B) con los límites fijados por la especificación EN 50065-1(Fuente: [6])

En estos estudios, y como se ha observado en el ejemplo anterior, destacan varios tipos de equipos eléctricos que muestran altas emisiones en el rango de frecuencias en el que se realizan las comunicaciones, superando los valores de tensión límites fijados en las recomendaciones. Estas emisiones pueden causar interferencias electromagnéticas con otros equipamientos que no se utilizan para las comunicaciones y que no son inmunes a estas emisiones, fallos en las mediciones de la energía eléctrica o deterioro en los equipos de comunicaciones.

4.2. Modelos de canal

Por otro lado, también se han realizado diferentes trabajos de modelado de canal.

Los modelos de canal se han creado a partir de modelos estadísticos cuyos parámetros se han ido ajustando con procedimientos de optimización basados en datos obtenidos de medidas. Philipps [13] y Zimmermann [14] propusieron enfoques de propagación incluyendo trayectos múltiples, que sí eran adecuados para describir los canales de transmisión de la línea eléctrica.

El modelo de Philipps [13] describe la respuesta de impulso de canal como una superposición de N pulsos de Dirac, que representan la superposición de señales de N caminos diferentes. Cada uno de estos impulsos se multiplica por un factor complejo ρ_i y retardado por el tiempo τ_i . Los factores ρ_i representan el producto de los factores de reflexión y transmisión a lo largo de cada trayecto de eco.

$$H(f) = \sum_{i=1}^N \rho_i e^{-j2\pi f t_i} \quad (1)$$

Zimmermann [14] propone un modelo adaptado compuesto por un número de tramos de líneas de transmisión, donde se calculan los ecos de su respuesta al impulso y finalmente se ajustan los parámetros finales.

Otro tipo de modelado es el utilizado haciendo uso de los parámetros ABCD. El uso de los parámetros S y de los parámetros ABCD para los diferentes componentes de la red permite el análisis extremo a extremo del sistema para redes MV / LV. En la figura 7 se muestran los parámetros ABCD para una red estándar de dos puertos.

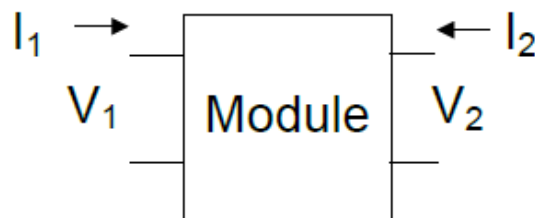


Figura 7: Parámetros ABCD para una red estándar de dos puertos(Fuente: [15])

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_2 \\ -I_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Los parámetros ABCD son una buena herramienta para una comprensión conceptual de la red, mientras que los parámetros S son más apropiados para utilizar en un

simulador de RF, como ADS o SPICE.

Como ejemplo del uso de este tipo de modelado, se detalla un canal de media a baja tensión.

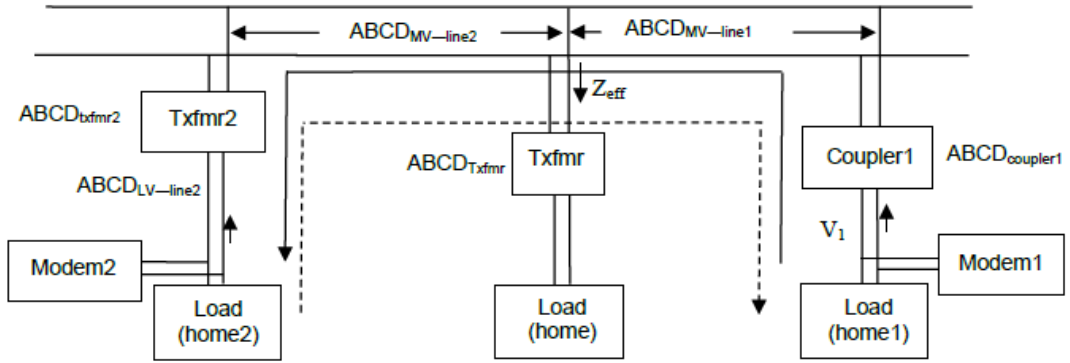


Figura 8: Canal MV-LV (Fuente: [15])

Los parámetros ABCD del módem en el transmisor del lado MT al módem del lado izquierdo para los parámetros V_1 , I_1 , V_2 e I_2 están dados por las siguientes ecuaciones:

$$\text{Net}_{\text{ABCD,MV} \rightarrow \text{LV}} = \text{invABCD}_{\text{coupler1}} * \text{ABCD}_{\text{MV-line1}} * \text{ABCD}_{\text{txfmr-eff}} * \text{ABCD}_{\text{MV-line2}} * \text{ABCD}_{\text{txfmr2}} * \text{ABCD}_{\text{LV-line2}} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \text{Net}_{\text{ABCD,MV} \rightarrow \text{LV}} \begin{bmatrix} V_2 \\ -I_2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$I_2 = -\frac{V_2}{Z_{\text{eff}}} \quad (5)$$

Dónde:

$$Z_{\text{eff}} = \frac{Z_{\text{modem2}}}{Z_{\text{Home2}}} \quad (6)$$

Para el módem del transmisor lateral LV al módem del lado MV, que es el enlace MV-LV los parámetros V_1 , I_1 , V_2 e I_2 están dados por las siguientes ecuaciones:

$$\text{Net}_{\text{ABCD,LV} \rightarrow \text{MV}} = \text{ABCD}_{\text{LV-line2}} * \text{invABCD}_{\text{txfmr2}} * \text{ABCD}_{\text{MV-line2}} * \text{ABCD}_{\text{txfmr-eff}} *$$

$$ABCD_{MV-line1} * ABCD_{coupler1} \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} V_2 \\ I_2 \end{bmatrix} = \text{Net}_{ABCD,LV \rightarrow MV} \begin{bmatrix} V_1 \\ -I_1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$I_1 = -\frac{V_1}{Z_{\text{eff}}} \quad (9)$$

$$Z_{\text{eff}} = \frac{Z_{\text{modem1}}}{Z_{\text{Home1}}} \quad (10)$$

4.3. Modelos de ruido

Además de modelos de canal, también se han realizado modelos de ruido.

En cuanto al modelado del ruido destacan dos propuestas. La primera de ellas se trata del modelo CGM (Gaussian Cyclostationary) [15]. En él, las muestras de ruido se modelan como variables aleatorias gaussianas de media cero con una varianza que varía en el tiempo. La varianza determina el comportamiento de la envolvente del ruido. Como resultado, la varianza $\sigma(t)$ es una función periódica con un periodo igual a $TAC/2$. Una muestra de ruido de PLC en el tiempo t tiene una distribución gaussiana dada por la ec. (11):

$$n_t \sim N(0; \sigma^2(t)) \quad (11)$$

A continuación se describen los pasos necesarios para proceder al modelado del ruido:

- a) Dibujar la gráfica del ruido a lo largo del tiempo y del espectrograma.
- b) División de cada período del ruido en N regiones $\mathfrak{R}_1, \mathfrak{R}_2, \dots, \mathfrak{R}_N$. Por ejemplo, en la figura 9 en 3 regiones.
- c) Para cada región $\mathfrak{R}_i, i \in \{1, \dots, N\}$, se calculan los siguientes parámetros utilizando datos de todos los ciclos disponibles del periodo de ruido:
 - Los límites de la región $[t_i, t_{i+1}]$
 - El PSD (Power Spectral Density) del ruido $S_i(z)$

d) Descomposición $S_i(z)$ en $H_i(z)$.

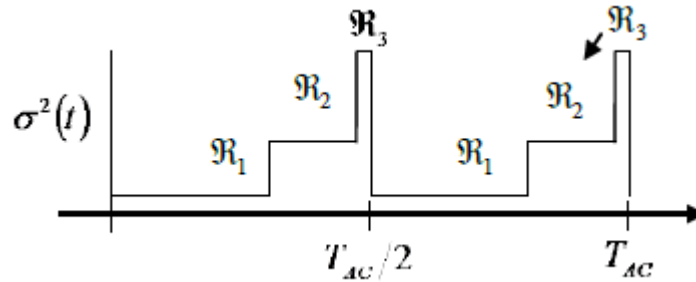


Figura 9: División del periodo de ruido en 3 regiones (Fuente: [15])

A continuación se describe cómo generar muestras de ruido basadas en el modelo descrito anteriormente.

- Generación de las muestras cíclicas de la corriente alterna media de AWGN (Additive white Gaussian noise) con varianza unidad, de acuerdo con la frecuencia de muestreo.
- Dado un tiempo "t", un elemento de $(t_{i+1} - t_i)$ selecciona la respuesta del impulso apropiada para que el filtro $H_i(z)$ genere el ruido en ese instante de tiempo.
- Se procede a la siguiente muestra de tiempo "t + 1".

A continuación se muestra un ejemplo para N=3:

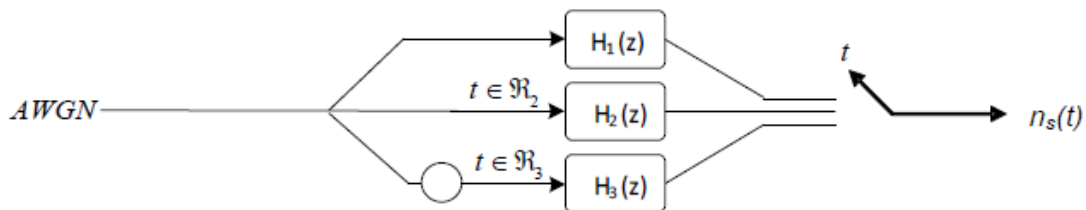


Figura 10: Generación muestras de ruido (Fuente: [15])

El segundo modelo [15] consiste en dividir la señal en el dominio del tiempo en diferentes partes en función del tipo de ruido que presenta cada intervalo.

$$\eta_{imp}(t) = \sum_{i=0}^N A_i imp \frac{(t-t_{a,i})}{t_{w,i}} \quad (12)$$

Dónde:

imp: pulso rectangular con duración variable que representa una ráfaga de ruido.

N : número total de impulsos de ráfagas de ruido en la ventana de observación.

$t_{a,i}$: tiempo medio de llegada de las N ráfagas de ruido.

$t_{w,i}$: ancho promedio de ráfagas de ruido.

A_i : amplitud del ruido impulsivo. Normalmente se elige entre 5 y 10 veces la amplitud de ruido de fondo

En este modelo, el tiempo entre dos ráfagas $t_{a,i}$ es una variable aleatoria con distribución exponencial. La duración de cada ráfaga es otra variable aleatoria con distribución exponencial que tiene el mismo $t_{w,i}$. Estos parámetros se calculan basándose en datos de pruebas de campo.

Existen dos tipos de ruidos impulsivos típicos en una línea de potencia: periódico y aleatorio. La amplitud A_i se modela mediante una función exponencial de la forma $A_i \times \exp(-B \times t)$ donde B es el parámetro usado para el control del decaimiento de velocidad del ruido impulsivo periódico. En la figura 11 se muestra visualmente la ec. (12):

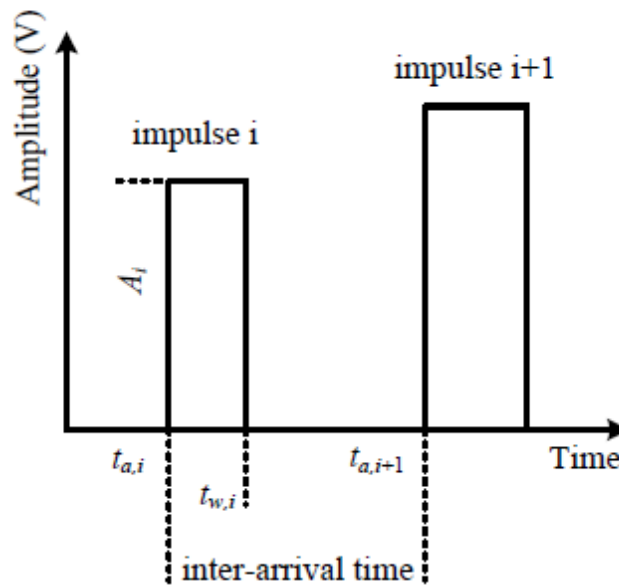


Figura 11: Modelo de ruido impulsivo: representación de los parámetros que modelan la amplitud y la distribución temporal de los impulsos de ruido (Fuente: [15])

Los datos están conformados en el dominio de la frecuencia por la siguiente función exponencial:

$$\eta_c(f) = 10^{(k-\beta f)} \quad (13)$$

Dónde:

K es una distribución normal $N(\mu, \sigma)$ con $\mu = 5.64$, $\sigma = 0.5$

f es la frecuencia en Hz

En la figura 12 se muestra una medida de ruido realizada en una prueba de campo. En ella se diferencia tres tipos de ruidos diferentes. En primer lugar una fuerte y estrecha ráfaga de ruido que decae exponencialmente, en segundo lugar una ráfaga plana de ruido y por último, un ruido de fondo.

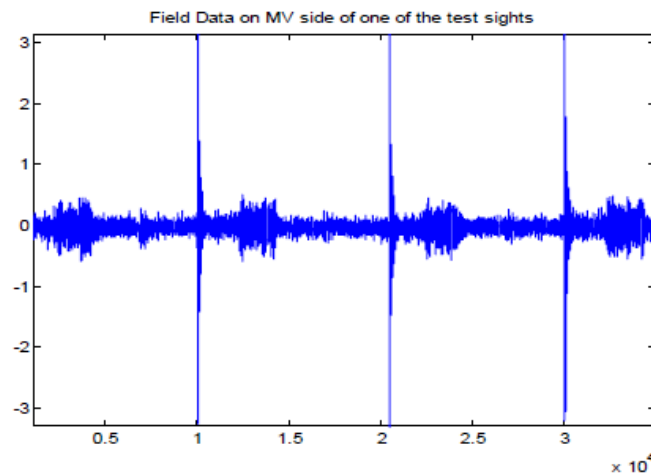


Figura 12: Medida de ruido realizada en una prueba de campo (Fuente: [15])

Cada uno de estos ruidos se genera de forma independiente en el modelo: el primero de ellos se modela generando un ruido blanco, que se multiplica por una función que decae exponencialmente con el parámetro B , que se calcula a partir de los datos de las pruebas de campo ($10^{(K - \beta \times f)}$). El segundo se modela siguiendo el mismo proceso que el anterior, pero con el parámetro B igualado a 0. En el caso que los datos de las pruebas de campo no muestren este tipo de ráfaga, no se debe hacer. El tercero se modela mediante un ruido blanco con una forma frecuencial que sigue la función exponencialmente negativa ($10^{(K - \beta \times f)}$). En el caso de existir fuertes interferencias en los datos sacados de las pruebas de campo, se deberán añadir al ruido generado antes de multiplicar por la función exponencial anterior. A continuación, se observa la forma de la señal resultante, después de combinar las 3 componentes de ruido.

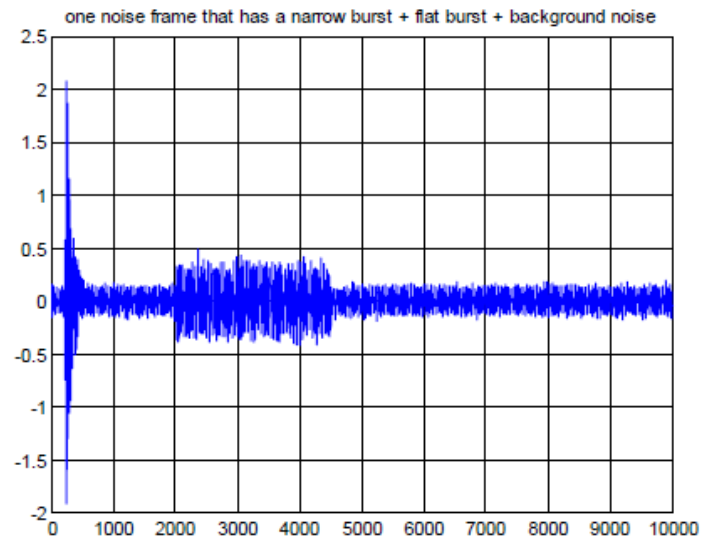


Figura 13: Forma de onda creada con las 3 componentes de ruido (Fuente: [15])

5. Desarrollo

La caracterización básica de la red eléctrica, como se ha introducido anteriormente, requiere por un lado modelos del cable eléctrico como medio de propagación, basados en el uso adecuado de parámetros como la impedancia, la función de transferencia y parámetros de propagación. Por otro lado, modelos que definan la tipología de los diferentes tipos de ruido y emisiones radioeléctricas, así como su comportamiento en función del tiempo y de la frecuencia. En este trabajo se va a realizar un estudio las emisiones radioeléctricas y la impedancia característica.

5.1. Equipamiento de medida y caracterización

Para la medida de las emisiones y de la impedancia característica se ha utilizado diferente equipamiento. En el caso de las emisiones radioeléctricas se han utilizado para su medida dos equipos con el objetivo de compararlos entre ellos: un analizador de señal (Anritsu MS2690A [16]) y un osciloscopio (PicoScope 5000 [17]). Además de estos dos equipos, se ha necesitado otro tipo de equipamiento como apoyo a estos; sondas, cuyo objetivo ha sido filtrar la componente continua y la señal de 50 Hz, y un generador de señal y un analizador de espectros para caracterizar las sondas.

5.1.1. Anritsu MS2690A

El Anritsu MS2690A es un analizador de señal que trabaja desde los 50 Hz a los 6 GHz, con una gran precisión de medida. Nos ha permitido medir las emisiones no deseadas de la red, digitalizando la señal recibida y registrando los valores IQ (muestras del equivalente Paso Bajo) necesarios para su posterior procesamiento y análisis tanto temporal como espectral.



Figura 14: Analizador de señal Anritsu MS2690A

Con ayuda de un generador de señal, se realizaron diferentes pruebas en el rango de 10 a 500 kHz, que como se ha introducido, es el rango en el cual se quiere realizar la caracterización de la red. Estas pruebas fueron emisiones de ruido blanco en todo el rango de frecuencias o tonos a una determinada frecuencia. Los objetivos de estas pruebas eran dos; adaptarse al equipamiento de medida y, adaptar el software necesario para el procesado de las medidas al tipo de datos y resultados que proporcionaba el equipo.

5.1.2. PicoScope 5000

Por otro lado, el PicoScope 5000 es un osciloscopio que trabaja desde 10 Hz hasta 200 MHz y el cual también permite medir las emisiones no deseadas de la red.



Figura 15: Osciloscopio PicoScope 5000

En el caso de este equipo se realizaron diferentes pruebas para conseguir la mejor configuración posible para la realización de las medidas. El número de bits usado para el muestreo que se determinó en 16 bits, que era el máximo disponible y, el tiempo de medida, se determinó en 5 segundos al ser un tiempo suficiente de medida para que

esta fuera estable. Esto quedó demostrado en campañas de medidas realizadas anteriormente, concretamente en la realizada en el Centro Investigaciones Energéticas Medioambientales y Tecnológicas (CEDER-CIEMAT), en Soria [18]. El rango dinámico podía variar en función de la amplitud de la señal medida, por lo tanto, en cada medida era diferente.

5.1.3. R&S®ZVL

En el caso de la impedancia característica, el equipo principal utilizado ha sido un analizador de redes R&S®ZVL [19], el cual permite medir la impedancia característica de la red eléctrica mediante el uso de los parámetros S, concretamente del S_{11} , que representa el coeficiente de reflexión.

$$S_{11} = \frac{Z_{IN} - Z_0}{Z_{IN} + Z_0} \quad (14)$$



Figura 16: Analizador de redes R&S®ZVL

Además de estos 3 equipos principales necesarios para realizar las medidas de emisiones e impedancias, hay otro tipo de equipamiento que se ha tenido que utilizar. Concretamente son unas sondas y unos filtros, cada uno de estos elementos con un objetivo diferente.

5.1.4. Sondas

Las sondas son necesarias para el filtrado de la componente continua y la señal de 50 Hz de la red eléctrica. Se utilizan dos sondas de la empresa ZIV [20]; una de impedancia 12.5 Ω y una de 50 Ω . Con el objetivo de comprobar el funcionamiento de estas se han caracterizado en el dominio frecuencial hasta una frecuencia de 20 MHz. Esta

caracterización se ha realizado con la ayuda de un generador de señal, un analizador de espectros y un osciloscopio.



Figura 17: Sonda de impedancia 50 Ω

En el rango desde 0 a los 20 kHz se han emitido tonos en saltos de un kHz, y con ayuda del osciloscopio, se ha medido la diferencia en dB entre la tensión que se emitía y se recibía para comprobar el comportamiento de la sonda. Lo mismo se ha realizado a partir de 20 kHz utilizando el analizador de espectros para medir la señal recibida. No se ha utilizado dicho analizador en las bajas frecuencias debido a que solo trabaja a partir de los 9 kHz.

El proceso anteriormente descrito se ha realizado para la sonda de impedancia 12.5 Ω y para la sonda de impedancia 50 Ω .

Los resultados de esta caracterización para cada una de las sondas de 12.5 Ω y de 50 Ω se muestran a continuación. Para cada sonda se muestran dos figuras: una en todo el rango de frecuencias en el que se ha realizado el estudio de medidas, es decir, hasta 500 kHz, y otra, hasta los 20 kHz para comprobar el filtrado en las bajas frecuencias.

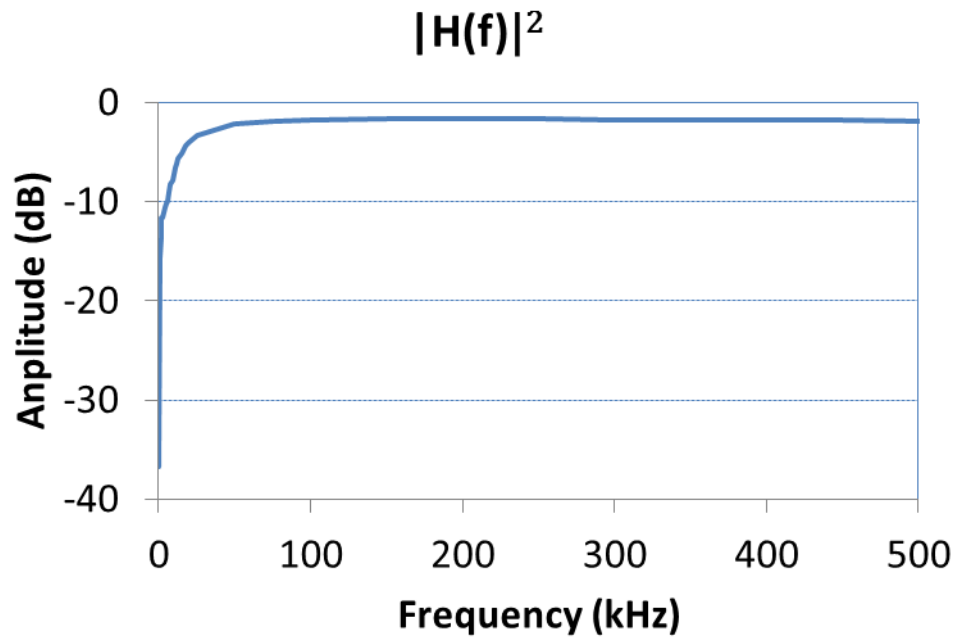


Figura 18: Respuesta frecuencial hasta 500 kHz de la sonda con impedancia 12.5 Ω

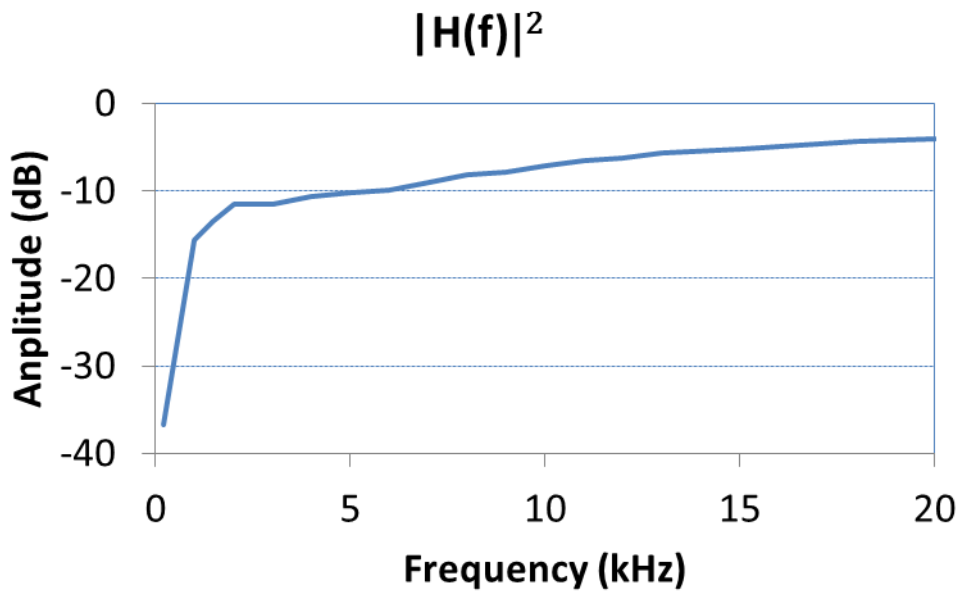


Figura 19: Respuesta frecuencial hasta 20 kHz de la sonda con impedancia 12.5 Ω

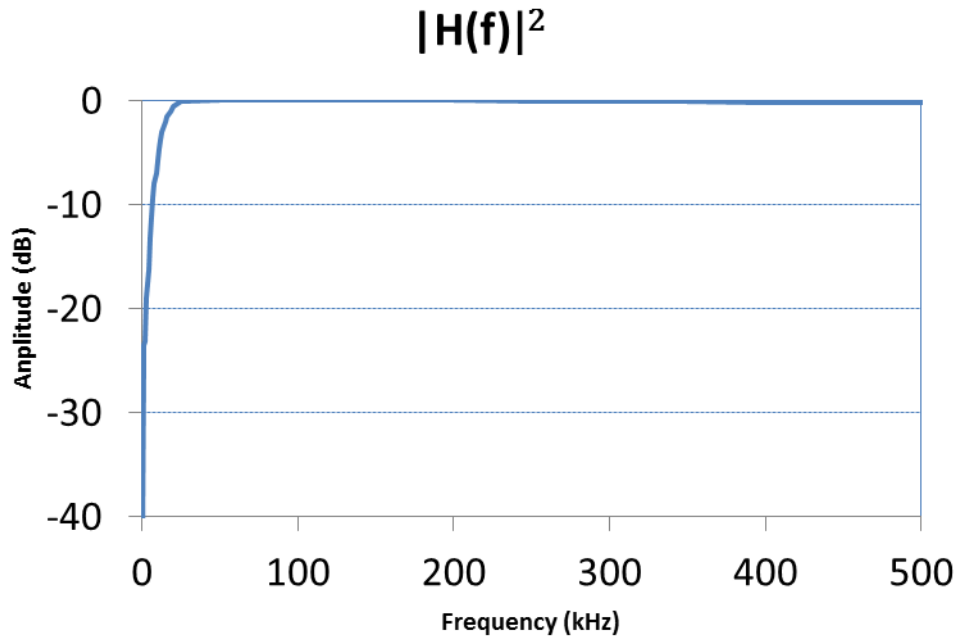


Figura 20: Respuesta frecuencial hasta 500 kHz de la sonda con impedancia 50 Ω

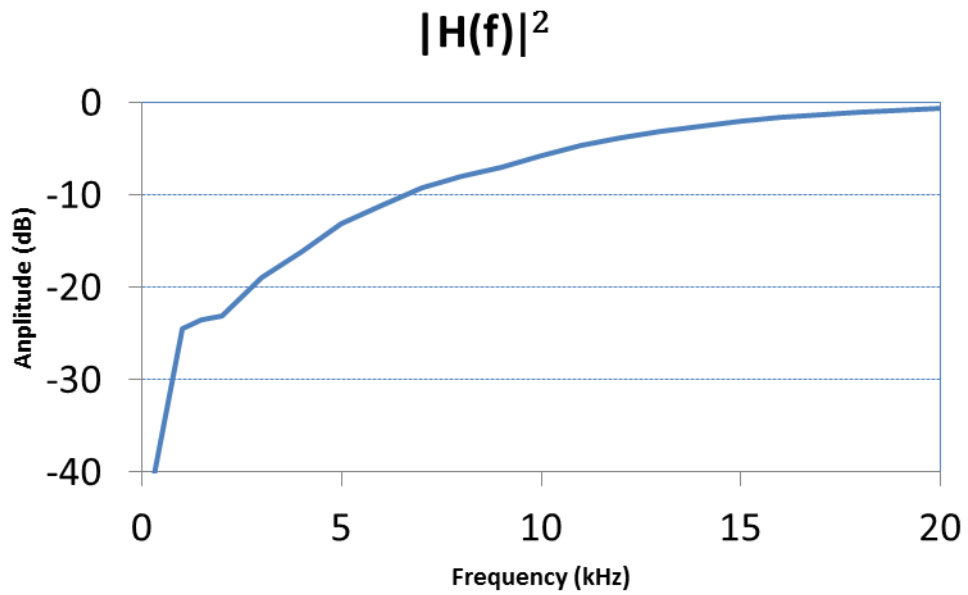


Figura 21: Respuesta frecuencial hasta 20 kHz de la sonda de impedancia 50 Ω

En las figuras que se muestra el rango de frecuencias hasta los 20 kHz se observa cómo a muy bajas frecuencias las sondas filtran la señal completamente (entre -40 y -30 dB), por lo tanto, quedarían filtradas la señal de 50 Hz y la componente continua.

4.1.5. Filtros

Además de las sondas, se ha realizado el diseño y fabricación de filtros. El motivo ha sido la necesidad de filtrar por un lado las altas frecuencias, debido a que los cables de las sondas actuaban como antenas e introducían señales de altas frecuencias, produciendo aliasing con las señales de baja frecuencia que deseábamos medir. Por otro lado, la necesidad de filtrar las bajas frecuencias, concretamente hasta 150 kHz para las mediciones realizadas entre los 150 y los 500 kHz. Esto es debido a que, por el tipo de procesado marcado por la normativa, las medidas en el rango hasta 150 kHz enmascaraban las señales del intervalo de 150 a 500 kHz al ser de una tensión más elevada. El diseño de los filtros ha sido realizado con ayuda del software ADS (Advanced Design System). Tras diferentes pruebas y diseños, los dos filtros definitivos se muestran en las siguientes figuras.

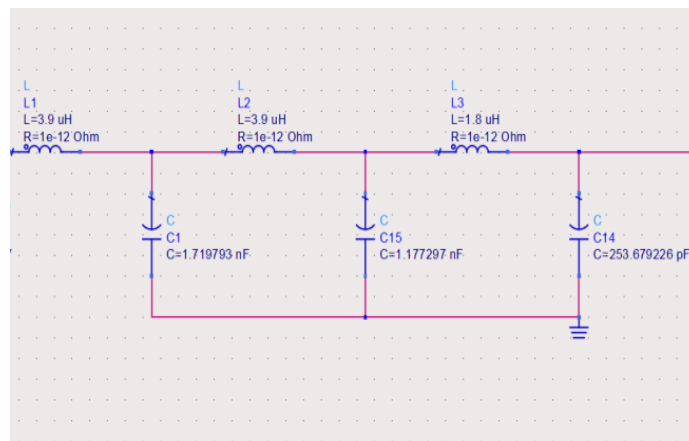


Figura 22: Filtro Paso Bajo

El filtro anterior se trata de un Paso Bajo con frecuencia de corte a 6 dB de 1.5 MHz. Se compone de dos bobinas de 3.9 uH, una bobina de 1.8 uH, dos condensadores de 1.7 nF y otro condensador de 253 pF.

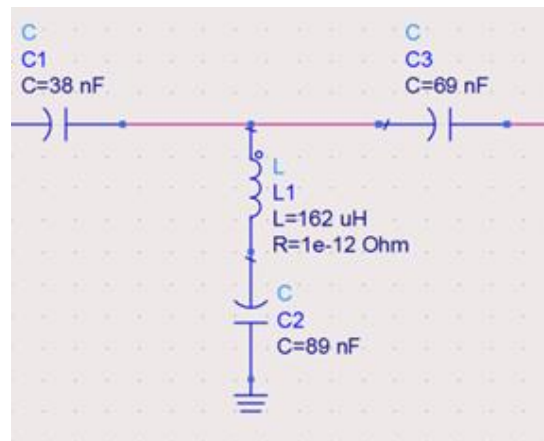


Figura 23: Filtro Paso Alto

Este filtro se trata de un Paso Alto con frecuencia de corte de 150 kHz. Está compuesto por tres condensadores de 38 nF, 69 nF y 89 nF y una bobina de 162 uH.

Ambos filtros, junto a la sonda de 50 Ω , han sido caracterizados para comprobar su comportamiento.

En el primer caso se ha caracterizado la sonda junto al filtro Paso Bajo. En el segundo caso, se le ha añadido el filtro Paso Alto haciendo que se comporte como un filtro Paso Banda.

Para cada caso se muestran dos figuras: una en el rango de frecuencias hasta 6 MHz, y otra hasta 500 kHz. Su objetivo es comprobar el comportamiento en la banda de frecuencias en el que se realiza el estudio.

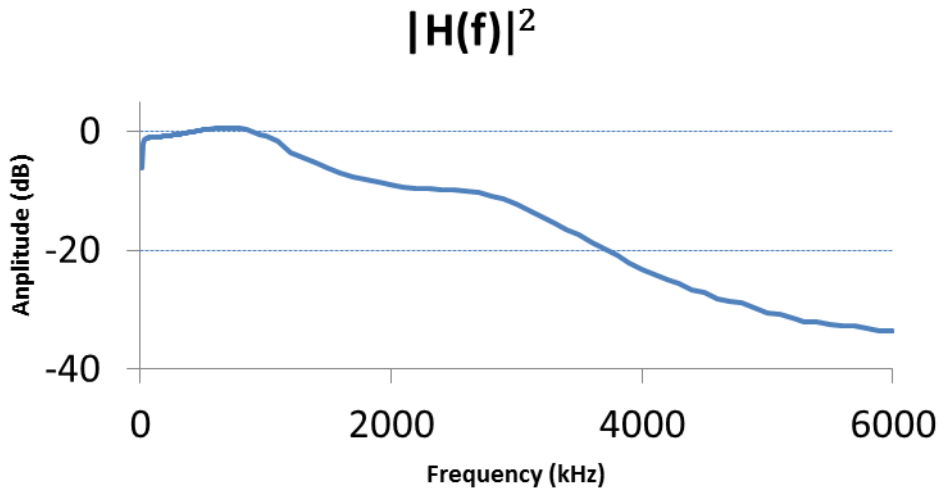


Figura 24: Respuesta frecuencial de la sonda y el filtro Paso Bajo hasta 6 MHz

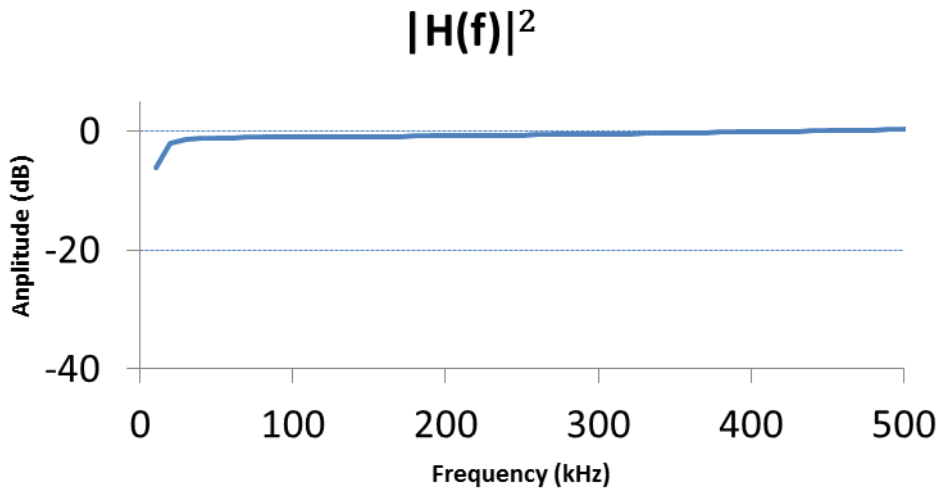


Figura 25: Respuesta frecuencial de la sonda y el filtro Paso Bajo hasta 500 kHz

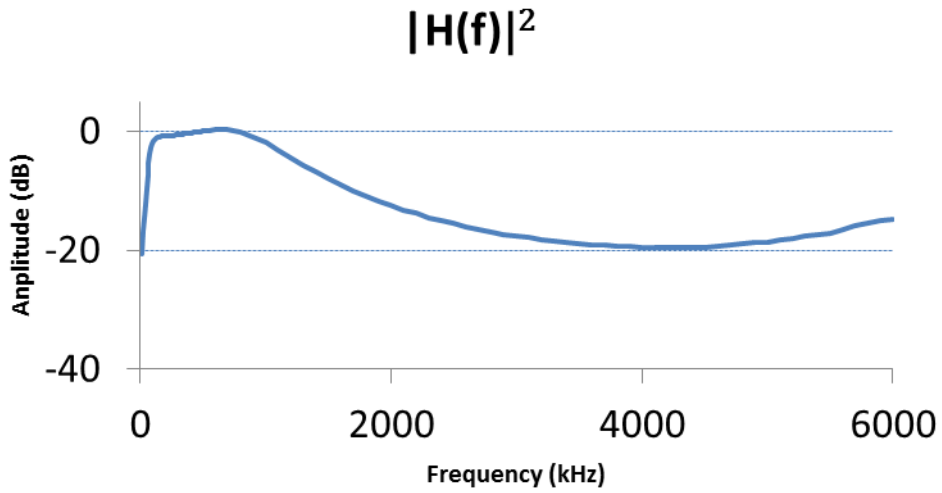


Figura 26: Respuesta frecuencial de la sonda, el filtro Paso Bajo y el filtro Paso Alto hasta 6 MHz

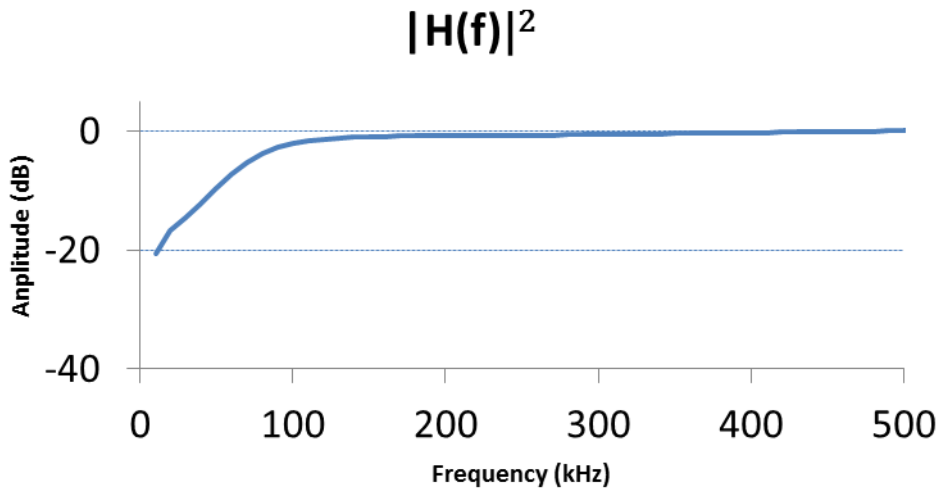


Figura 27: Respuesta frecuencial de la sonda, el filtro Paso Bajo y el filtro Paso Alto hasta 500 kHz

5.2. Metodología de medida

Tras la explicación y caracterización del equipamiento de medida, a continuación se detalla el conexionado de estos, los valores que se recogen, el lugar y el tiempo de cada medida.

En el proyecto se han realizado dos campañas de medidas diferentes, en la primera de ellas, las medidas se han realizado en dos puntos de la red de baja tensión en un entorno urbano denso, concretamente en el barrio de Miribilla, situado en la ciudad de Bilbao (España). En este entorno hay un gran número de smart meters, un elevado número de electrodomésticos y aparatos eléctricos conectados a la red.

Los smart meters ubicados en esta zona son gestionados por un concentrador de datos PLC al cual están conectados siguiendo una topología de red en forma de árbol. El primer punto de medida es este concentrador de datos PLC situado en el interior del centro de transformación, situado en la calle Gernika Lorategia, junto al portal 11, cuyas coordenadas son ($43^{\circ}15'04.5''N$ $2^{\circ}55'44.6''W$) (punto A).

El segundo lugar de medida es la caja de fusibles situada en el interior del cuarto de contadores del portal número 13 de la misma calle (punto B), aproximadamente a 50 metros del centro de transformación. En este edificio hay alrededor de 30 smart meters como se puede observar en la figura 29.



Figura 28: Mapa de situación de los puntos de medida



Figura 29: Punto de medida B: Caja de fusibles ubicada en el cuarto de contadores de un edificio residencial

En esta campaña el equipamiento utilizado ha sido el Anritsu MS2690A, las sondas y el analizador de redes R&S®ZVL.

Para las medidas de emisiones el conexionado utilizado ha sido el siguiente: a la red eléctrica se ha conectado una de las sondas; uno de los cables de la sonda al neutro y otro a una de las fases correspondientes que se quiere medir, dicha sonda se ha llevado hasta el analizador de señal Anritsu MS2690A. En este analizador se ha programado un tiempo total para cada medida de 5 segundos, tiempo suficiente para observar variabilidad de la señal en el tiempo. Este equipo se encarga de digitalizar la señal recibida y registrar los valores IQ, necesarios para su posterior procesamiento.

En el centro de transformación se han realizado 7 medidas de emisiones no deseadas diferentes, con tres puntos de medida diferentes como son las fases 'R', 'S' y 'T' de la red eléctrica y utilizando los dos tipos de sondas (con impedancias de 12.5 Ω y 50 Ω , respectivamente). La séptima medida ha sido realizada apagando el concentrador PLC, con el objetivo de cuantificar las emisiones que inserta en la red. En la siguiente tabla se observa de forma esquematizada las medidas realizadas en este lugar.

Sonda\Fase	R		S	T
50 Ω	ON	OFF	ON	ON
12.5 Ω	ON		ON	ON

Tabla 1: Medidas realizadas en el centro de transformación en la primera campaña de medidas

En la caja de fusibles del cuarto de contadores del edificio residencial se han vuelto a realizar 3 medidas, una medida para cada fase utilizando en este caso únicamente la sonda de 50 Ω . En la siguiente tabla se observan las medidas realizadas en este lugar.

Sonda\Fase	R	S	T
50 Ω	ON	ON	ON

Tabla 2: Medidas realizadas en el cuarto de contadores en la primera campaña de medidas

Para las medidas de la impedancia característica se ha utilizado la sonda de 50 Ω y el analizador de redes.

Tras calibrar el equipo, el conexionado realizado ha sido el siguiente: la sonda se ha conectado por un lado a la red eléctrica y por el otro a uno de los puertos del analizador. De esta forma el analizador de redes ha medido la impedancia característica en el rango frecuencial determinado, en nuestro caso de 0 a 500 kHz. Se han realizado 3 medidas de impedancia, una con cada una de las fases en el centro de transformación.

La segunda de las campañas de medida está realizada en dos laboratorios del edificio B de la Escuela de Ingeniería de Bilbao. El primero de ellos el laboratorio de investigación del Grupo TSR (punto A) y el segundo el laboratorio docente Atlantis (punto B). En la figura 30 se muestra el plano donde se sitúan estos laboratorios.

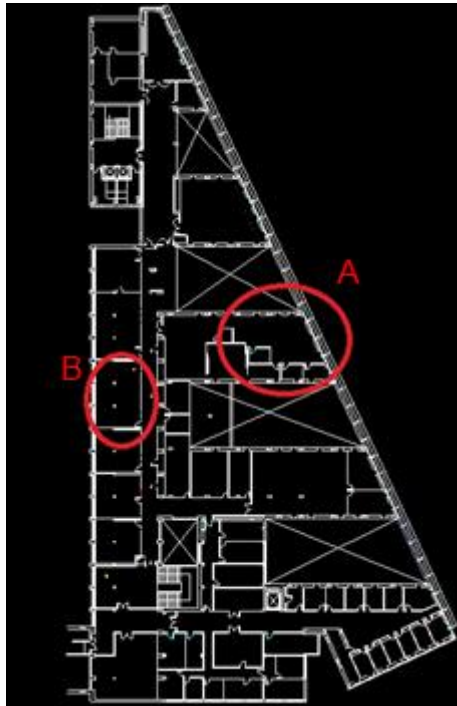


Figura 30: Puntos de medida en la segunda campaña

En el primero de los laboratorios hay diferente equipamiento electrónico conectado a la red, destacando un elevado número de ordenadores. En el segundo de ellos hay, además de ordenadores, otro tipo de equipos como analizadores de redes, analizadores de espectros, soldadores y generadores de señal. Cabe destacar que en el momento de las medidas, en este laboratorio tan solo estaba encendido uno de los analizadores de espectros además del propio equipamiento de medida utilizado. Otro punto importante a destacar es que ambos laboratorios no están aislados de la red eléctrica, por lo que las fuentes de ruido también pueden provenir del exterior.

En esta campaña, el equipamiento utilizado ha sido el osciloscopio PicoScope, la sonda de 50 Ω y los filtros Paso Bajo y Paso Alto fabricados.

Para las medidas de emisiones el conexionado utilizado ha sido el siguiente: se ha conectado la sonda por un extremo a la fuente de corriente y, por el otro extremo, se ha puesto en serie el filtro Paso Bajo para las mediciones en el rango frecuencial de 10 a 150 kHz. En el caso de las mediciones en el rango frecuencial de 150 a 500 kHz se ha añadido el filtro Paso Alto en serie, con el objetivo de filtrar las frecuencias hasta 150 kHz. Por último este se ha conectado al osciloscopio PicoScope.

Cabe destacar que en este caso ha sido necesario medir las medidas en ambos rangos

frecuenciales por separado debido a que, con este osciloscopio, al ser los valores en el rango frecuencial de 10 a 150 kHz muy superiores y debido al tipo de procesado, los valores en el rango frecuencial de 150 a 500 kHz quedaban enmascarados.

En esta campaña se han realizado medidas en 11 puntos diferentes de la red eléctrica: 7 de ellos en el laboratorio de investigación del grupo TSR y los 4 restantes en el laboratorio docente Atlantis.

El tiempo de cada medida, al igual que en la primera campaña de medidas, ha sido de 5 segundos.

5.3. Procesado de medida

El resultado de las medidas realizadas se ha registrado de formas diferentes en función del equipo de medida: en el caso del Anritsu MS2690A se han registrado las muestras IQ, por ello el análisis espectral se ha llevado a cabo aplicando la FFT (Fast Fourier Transform), lo que ha permitido reducir significativamente el tiempo de medición, sin empeorar la precisión de los resultados obtenidos. Este método cumple con los requisitos de la especificación publicada en CISPR 16-1-1, que incluye el uso de instrumentos basados en la FFT en medidas estándar. En el caso del osciloscopio PicoScope, se han recogido las muestras en banda base.

El procesado de los datos recogidos se ha realizado de acuerdo a las especificaciones marcadas por el CISPR [7] - [9]:

- Recomienda una ventana gaussiana, con un ancho de banda a 6 dB de 9 kHz en el rango de 150-500 kHz y un ancho de banda a 6 dB de 200 Hz en el rango de 10-150 kHz.
- Para garantizar que la incertidumbre de la medida de la amplitud del impulso permanece dentro del rango $\pm 1,5$ dB, se requiere un solapamiento de más del 75%. En nuestro caso se ha empleado un solapamiento del 93% con el fin de asegurar que se cumpliera esta condición.
- El tamaño de paso de frecuencia debe ser igual o menor a la mitad del ancho de banda a 6 dB. Por ello, en este caso el número de puntos de la FFT se ha seleccionado para que sea un cuarto del ancho de banda requerido (50 Hz para

el intervalo de 10-150 kHz y 2,25 kHz para el intervalo 150-500 kHz) de forma que cumpliera la condición.

- Las constantes de tiempo de carga y descarga requeridas y las constantes de tiempo para los detectores de quasi-pico y media respectivamente se implementaron digitalmente mediante filtros IIR. Estos solo se han aplicado en los intervalos de tiempo en los que no existían ráfagas de señales PRIME, con el objetivo de evitar que las señales de comunicación distorsionasen los resultados obtenidos y asegurarnos que solo se evaluaban las emisiones no deseadas. En la primera campaña de medidas, un total de un segundo de los 5 recogidos en cada medida y en la segunda campaña 2 segundos.
- Para la banda de frecuencias 10-150 kHz el tiempo mínimo de medición es de 10 ms y para la banda de 150-500 kHz es de 0,5 ms. En nuestro caso se han utilizado intervalos de medición más largos con el objetivo de caracterizar la variabilidad de la señal en el tiempo.

5.4. Representación de los resultados

Los resultados de este procesado se muestran gráficamente; en el caso de las emisiones no deseadas de dos formas diferentes y de una forma en el caso de la impedancia característica.

En el caso de las emisiones no deseadas, se ha realizado una representación gráfica comparando los niveles de tensión del detector average y del detector quasi-pico con los límites definidos por la especificación EN-50065-1 que, como se ha detallado anteriormente, es la más restrictiva. Dicha especificación detalla límites de tensión del detector quasi-pico para todo el intervalo de frecuencias (10-500 kHz), y sin embargo, para los niveles de tensión del detector average solo se detalla en el intervalo 150-500 kHz.

Por otro lado, la variabilidad temporal de las emisiones se ha representado gráficamente por medio de espectrogramas que muestran la evolución en el tiempo de los valores de PSD (Power Spectral Density). Para este fin, se ha utilizado la ventana de tiempo gaussiana empleada para el ancho de banda de 200 Hz, manteniendo el

tamaño de paso de 50 Hz.

Los resultados se muestran en el Anexo 1, al final del documento.

5.5. Análisis de resultados

En este punto se analizan los resultados obtenidos en el trabajo realizado, concretamente, de las emisiones no deseadas y de las impedancias.

En el análisis frecuencial se han observado diferentes tipos de emisiones no deseadas:

- Señales de banda estrecha a frecuencias armónicas de determinadas frecuencias.
- Ruido coloreado.

Las emisiones no deseadas que se encuentran en frecuencias armónicas a una frecuencia fundamental se encuentran principalmente en el rango 10-150 kHz como se observa en la figura 42 (medida 4 de la primera campaña de medidas). La frecuencia fundamental se encuentra en la mayoría de los casos en el intervalo de frecuencias 0-12 kHz. Estas emisiones son de picos de amplitud muy altos, la cual disminuye progresivamente a medida que aumenta la frecuencia. En el rango frecuencial 150-500 kHz el número de emisiones de este tipo es muy bajo.

El ruido coloreado se encuentra a lo largo de todo el rango frecuencial y es complicado caracterizarlo debido a que es diferente para cada dispositivo. En nuestro caso, al no saber que equipamiento hay conectado y funcionando en cada medida, su caracterización sería muy compleja. Analizando los resultados anteriores, se observa que este tipo de ruido está presente con valores de gran amplitud en el rango de frecuencias 150-500 kHz y sin embargo, con valores más pequeños en el rango 10-150 kHz. En muchos de los casos, como por ejemplo, en la medida 6 de la segunda campaña (figura 66) los valores obtenidos en determinadas frecuencias superan los límites asociados al detector quasi-pico y al detector average recomendados en EN-50065-1.

Visualizando los espectrogramas se demuestra que, en el intervalo de duración de las medidas, no existe variación a lo largo del tiempo del nivel de tensión de las emisiones no deseadas. En el caso de la primera campaña, al haber realizado las medidas en un

entorno donde no se ha podido controlar los diferentes dispositivos conectados a la red eléctrica, no se han podido estudiar variaciones que pudiesen surgir en los periodos de transición de estos. Cabe destacar las emisiones existentes con amplitudes muy altas en todas las medidas realizadas a la frecuencia de 392 kHz. Se trata de una frecuencia utilizada en navegación marítima.

En la primera campaña, los resultados obtenidos en cada una de las 3 fases medidas en un mismo lugar de medida, ya sea el centro de transformación o el cuarto de contadores del edificio residencial, son similares entre ellos, no observando diferencias destacables ni en el dominio temporal ni frecuencial.

En la segunda campaña los resultados obtenidos al realizarse en 11 puntos de medida diferentes, aun estando cercanos entre ellos, se observa que hay diferencia en el dominio frecuencial.

Por otro lado, estos resultados muestran cómo los niveles de las emisiones no deseadas son más altos en las medidas realizadas en el cuarto de contadores del edificio residencial y en las medidas realizadas en las aulas de la Universidad que en el centro de transformación. Esto es debido a la cercanía de los dispositivos conectados a la red eléctrica.

Los resultados de las impedancias medidas muestran unos valores bajos que varían con la frecuencia. Estos no son estables en el tiempo debido a que dependen de los equipos conectados a la red.

6. Plan de trabajo

En este apartado se detallan las personas que componen el equipo de trabajo para la realización del proyecto, los paquetes de trabajo de los que consta el proyecto así como sus respectivas tareas. También se representan las tareas y paquetes de trabajo de forma gráfica en el diagrama de Gantt.

6.1. Equipo de trabajo

Para la realización del proyecto ha habido un equipo de trabajo compuesto por 3 personas.

Nombre	Cargo	Perfil
David de la Vega	Supervisor de documentación	Ingeniero Senior
Igor Fernández	Supervisor del trabajo práctico	Ingeniero Senior
Mikel García	Realizador del proyecto	Ingeniero Junior

Tabla 3: Equipo de trabajo

6.2. Definición de fases, paquetes de trabajo y tareas

PT1	Fecha inicio: 03/10/2016	Fecha fin: 15/09/2017
COORDINACION, GESTION Y SUPERVISIÓN DEL PROYECTO		
<p>Tarea 1.1: Gestión y seguimiento del trabajo</p> <p>Esta parte corresponde a la gestión y seguimiento continuo del proyecto. En esta tarea se incluyen las reuniones que se han tenido cada semana con los supervisores del proyecto para que este evaluase el correcto avance del proyecto.</p>		
Objetivo: coordinar y gestionar el proyecto.		

Tabla 4: Paquete de trabajo 1

PT2	Fecha inicio: 03/10/2016	Fecha fin: 19/12/2016
CONTEXTUALIZACIÓN		
<p>Tarea 2.1: Recopilación de información</p> <p>En esta tarea se ha recopilado y adquirido los conocimientos necesarios para poder desarrollar de manera adecuada posteriormente el proyecto.</p>		
<p>Tarea 2.2: Documentación</p> <p>Se ha realizado un documento con toda la información recopilada que ha servido de guía para las siguientes fases del proyecto.</p>		
Objetivo: Recopilar información y adquirir conocimientos sobre el tema.		

Tabla 5: Paquete de trabajo 2

PT3	Fecha inicio: 09/01/2017	Fecha fin: 26/06/2017
EQUIPAMIENTO Y PROCESADO		
<p>Tarea 3.1: Estudio del procesado y equipamiento de medida</p> <p>En esta tarea se hecho un estudio del equipamiento disponible para la realización de las medidas y el procesado necesario para el tipo de medidas que se van a realizar.</p>		
<p>Tarea 3.2: Fabricación de filtros</p> <p>En esta tarea se han fabricado diferentes filtros y se ha probado el correcto funcionamiento de estos.</p>		
Objetivo: Definir el procesado y el equipamiento de medida.		

Tabla 6: Paquete de trabajo 3

PT4	Fecha inicio: 06/02/2017	Fecha fin: 06/03/2017
DESARROLLO DEL SOFTWARE		
<p>Tarea 4.1: Desarrollo del software</p> <p>En esta tarea se ha desarrollado el software para el procesado de las medidas con las especificaciones marcadas.</p>		
Objetivo: Desarrollo software.		

Tabla 7: Paquete de trabajo 4

PT5	Fecha inicio: 06/03/2017	Fecha fin: 01/05/2017
CAMPAÑA DE MEDIDAS 1		
<p>Tarea 5.1: Realización medidas</p> <p>En esta tarea se ha realizado la campaña de medidas de emisiones no deseadas y de impedancias.</p>		
<p>Tarea 5.2: Procesado de medidas</p> <p>En esta tarea se han procesado las medidas realizadas, se han sacado unas conclusiones y se elaborado un documento con los resultados obtenidos.</p>		
Objetivo: Realización de medidas y elaborar documento con las conclusiones obtenidas.		

Tabla 8: Paquete de trabajo 5

PT6	Fecha inicio: 26/06/2017	Fecha fin: 14/08/2017
CAMPAÑA DE MEDIDAS 2		
<p>Tarea 6.1: Realización medidas</p> <p>En esta tarea se ha realizado la campaña de medidas de emisiones no deseadas.</p>		
<p>Tarea 6.2: Procesado de medidas</p> <p>En esta tarea se han procesado las medidas realizadas, se han sacado unas conclusiones y se ha elaborado un documento con los resultados obtenidos.</p>		
Objetivo: Realización de medidas y elaborar documento con las conclusiones obtenidas.		

Tabla 9: Paquete de trabajo 7

6.3. Diagrama de Gantt

En este apartado se muestra una representación gráfica del tiempo consumido por cada paquete de trabajo anteriormente citado. El tiempo está dividido en el número de semanas que han sido necesarias para la consecución del proyecto. El inicio corresponde al día 3 de octubre de 2016, siendo este el día 0.

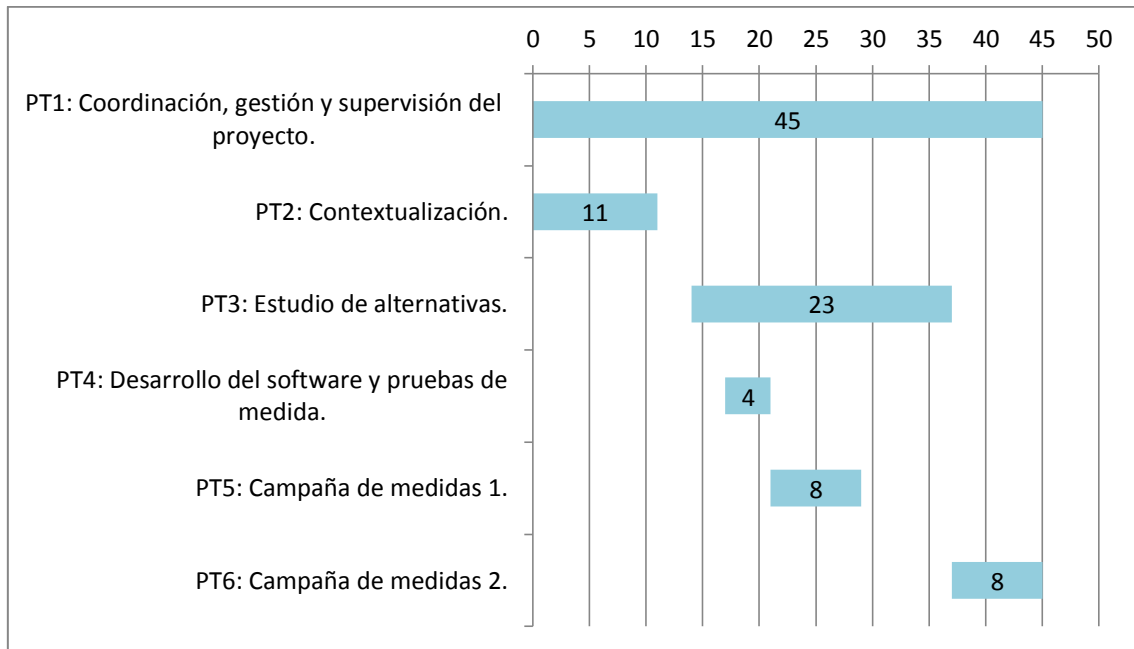


Figura 31: Diagrama de Gantt

7. Desglose de gastos

7.1. Costes unitarios

Mano de obra

A continuación se muestra una tabla con la relación integrante del proyecto – coste unitario de mano de obra por hora.

Identificador	Nombre	Cargo	Precio unitario (€/h)
P1	David de la Vega	Supervisor de documentación	60,00
P2	Igor Fernández	Supervisor del trabajo práctico	60,00
P3	Mikel García	Realizador del proyecto	30,00

Tabla 10: Mano de obra

Recursos materiales

En este apartado se muestra la relación existente entre los recursos materiales empleados para la elaboración del proyecto y el coste de cada uno.

Los recursos materiales se dividen en dos grupos:

- Amortizables: recursos materiales ya existentes en la empresa.

Identificador	Descripción	Precio	Amortización	Coste (€/semana)
MA01	Ordenador	1000	24 meses	9,61
MA02	Anritsu MS2690A	32600	120 meses	62,64
MA03	Analizador de Redes Vectoriales R&S®ZVL	18000	120 meses	34,59
MA04	PicoScope 5000	885	120 meses	1,70
MA05	Analizador de espectro Rohde&Swartz FSC3	5000	120 meses	9,61
MA06	Generador de señal RF	5000	120 meses	9,61
MA07	Microsoft Office 2007	130	12 meses	2,50
MA08	Windows 7	370	12 meses	7,12
MA09	Cables, sondas y conectores	300	84 meses	0,81

Tabla 11: Recursos materiales amortizables

- Fungibles: aquellos recursos materiales que no van a ser reutilizados tras el proyecto. El coste de estos materiales para nuestro proyecto lo hemos estimado en 100,00 euros.

7.2. Cálculo de gastos

Recursos humanos

Las siguientes tablas muestran el desglose de gastos asociado a la mano de obra que ha sido requerida para la ejecución del proyecto.

PT1					TOTAL
Mano de obra	Días	Horas/día	Coste(€)		9600,00
P1	40	2	4800,00		
P2	40	2	4800,00		
P3	0	0	0,00		

Tabla 12: Desglose de gastos Paquete de trabajo 1

PT2					TOTAL
Mano de obra	Días	Horas/día	Coste(€)	6000,00	
P1	5	2	600,00		
P2	5	2	600,00		
P3	40	4	4800,00		

Tabla 13: Desglose de gastos Paquete de trabajo 2

PT3					TOTAL
Mano de obra	Días	Horas/día	Coste(€)	10080,00	
P1	10	2	1200,00		
P2	24	3	4320,00		
P3	38	4	4560,00		

Tabla 14: Desglose de gastos Paquete de trabajo 3

PT4					TOTAL
Mano de obra	Días	Horas/día	Coste(€)	3420,00	
P1	1	3	180,00		
P2	6	3	1080,00		
P3	18	4	2160,00		

Tabla 15: P Desglose de gastos Paquete de trabajo 4

PT5					TOTAL
Mano de obra	Días	Horas/día	Coste(€)	6480,00	
P1	2	4	480,00		
P2	6	4	1440,00		
P3	38	4	4560,00		

Tabla 16: Desglose de gastos Paquete de trabajo 5

PT6					TOTAL
Mano de obra	Días	Horas/día	Coste(€)	7200,00	
P1	2	3	360,00		
P2	10	5	3000,00		
P3	32	4	3840,00		

Tabla 17: Desglose de gastos Paquete de trabajo 6

Tareas		TOTAL(€)
PT1	Coordinación, gestión y supervisión del proyecto.	9600,00
PT2	Contextualización.	6000,00
PT3	Estudio de alternativas.	10080,00
PT4	Desarrollo del software y pruebas de medida.	3420,00
PT5	Campaña de medidas 1.	6480,00
PT6	Campaña de medidas 2.	7200,00
TOTAL		42780,00

Tabla 18: Desglose de gastos total por tareas

El resumen del desglose de gastos de los recursos humanos se muestra en la siguiente tabla:

Identificador	Nombre	Cargo	Horas	Importe(€)
P1	David de la Vega	Jefe y supervisor del proyecto	127	7620,00
P2	Igor Fernández	Jefe y supervisor del proyecto	254	15240,00
P3	Mikel García	Realizador del proyecto	664	19920,00
TOTAL				42780,00

Tabla 19: Resumen recursos humanos

El coste total de recursos humanos ha sido de 42780,00 euros.

Recursos materiales

Calculamos el coste de los recursos materiales amortizables del proyecto, indicando los gastos que han sido necesarios por cada material y el total.

Identificador	Descripción	Semanas	Coste (€/semana)	Coste total (€)
MA01	Ordenador	45	9,61	432,45
MA02	Anritsu MS2690A	5	62,64	313,25
MA03	Analizador de Redes Vectoriales R&S®ZVL	5	34,59	172,95
MA04	PicoScope 5000	7	1,70	11,90
MA05	Analizador de espectro Rohde&Swartz FSC3	9	9,61	86,49
MA06	Generador de señal RF	5	9,61	48,05
MA07	Microsoft Office 2007	40	2,50	100,00
MA08	Windows 7	45	7,12	320,40
MA09	Cables, sondas y conectores	12	0,81	9,72
TOTAL				1495,21

Tabla 20: Relación de gastos de recursos materiales

El gasto total de los recursos materiales será la suma de los materiales amortizables y de los fungibles.

Concepto	Coste
Material amortizable	1495,21
Material fungible	100,00
TOTAL	1595,21

Tabla 21: Coste total recursos materiales

El gasto total debido a recursos materiales ha sido de 1595,21 euros.

7.3. Resumen Económico

Para finalizar, se presenta una tabla resumen en la que se muestran el desglose de gastos relativos a recursos humanos y recursos materiales, así como el coste total que ha sido necesario para la elaboración del proyecto.

Concepto	Importe(€)
Recursos humanos	42780,00
Recursos Materiales	1495,21
Total Recursos	44275,21
I.V.A. (21%)	9297,79
Coste Total	53573,00

Tabla 22: Resumen económico

El coste total que ha tenido el proyecto ha sido de 53573,00 euros.

8. Conclusiones

El estudio de las medidas realizadas, tanto en la primera como en la segunda campaña, concluye que los valores de las emisiones no deseadas en el rango de frecuencias 150-500 kHz pueden superar los límites establecidos por la recomendación EN-50065-1 para emisiones generadas por equipos de comunicación de red. Esto está influenciado por el ancho de banda de los detectores para el rango de frecuencias 150-500kHz, y a su vez, por los límites más restrictivos fijados por la especificación para este rango de frecuencias. Cabe destacar que las pérdidas de propagación son más elevadas cuanto mayor sea la frecuencia y, por lo tanto, un determinado ruido puede causar una mayor degradación en las comunicaciones a frecuencias más altas.

Por último, con este trabajo queda demostrada la necesidad de la caracterización de las emisiones no deseadas en el rango frecuencial de 150 a 500 kHz y la realización de nuevos estudios y pruebas de campo, con el objetivo de garantizar el correcto funcionamiento tanto de los servicios de Medición Avanzada como de futuras aplicaciones Smart Grid basadas en comunicaciones en dicho rango de frecuencias.

9. Bibliografía

- [1] Stefano Galli, Thierry Lys. “Next Generation Narrowband (Under 500 kHz) Power Line Communications (PLC) Standards”. China Communications, Marzo 2015.
- [2] Matthias Götz, Manuel Rapp, and Klaus Dostert. “Power Line Channel Characteristics and Their Effect on Communication System Design”. IEEE Communications Magazine, Abril 2004.
- [3] Prime-alliance.org. (2017). PRIME Alliance | Advanced Meter Reading & Smart Grid Standard. [online] Available at: <http://www.prime-alliance.org/>.
- [4] ITU Unión Internacional de Telecomunicaciones. “G.9904: Transceptores de comunicación de banda estrecha por la red de suministro eléctrico con multiplexación por división ortogonal de frecuencia - PRIME”. 2012.
- [5] PRIME Alliance Technical Working Group. “PRIME v1.4 White Paper”. IEEE Communications Society. “IEEE Standard for low frequency (less than 500 kHz) Narrowband Power Line Communications for Smart Grid Applications”. 2013.
- [6] CENELEC SC 205A Mains communicating systems, TF EMI. “Study report on electromagnetic interference between electrical equipment/systems in the frequency range below 150 kHz,” ed. 3.October 2015.
- [7] CISPR16-1-1, Ed. 3.1 Am. 1, Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods. Part 1-1: Radio disturbance and immunity measuring apparatus – Measuring apparatus. 2010.
- [8] CISPR16-2-1, Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods. Part 2: Methods of measurement of disturbances and immunity. Conducted disturbance measurements 2014.
- [9] CISPR16-2-2, Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods. Part 2: Methods of measurement of disturbances and immunity. Measurement of disturbance power. 2010.
- [10] CENELEC EN 55015:2006 + A1:2007 + A2:2009 Limits and methods of measurement of radio disturbance characteristics of Electrical lighting and similar equipment (identical with CISPR 15: 2005 + A1:2006 + A2:2008).
- [11] CENELEC EN 55011:2007 Industrial, Scientific and Medical (ISM) Radio-Frequency Equipment – Electromagnetic Disturbance Characteristics -- Limits and Methods of Measurement (CISPR 11:2003 + A1:2004, modified + A2:2006).

- [12] CENELEC EN 50065-1, Signalling on low-voltage installations in the frequency range 3 kHz to 148,5 kHz – Part 1: General requirements, frequency bands and electromagnetic disturbances, 2011.
- [13] H. Philipps, “Modelling of Powerline Communication Channels,” Proc. 3rd Int’l. Symp. Power-Line Commun. and its Applications, Lancaster, UK, 1999, pp. 14–21.
- [14] M. Zimmermann and K. Dostert, “A Multipath Model for the Power line Channel,” IEEE Trans. Commun., vol. 50, no. 4, Apr. 2002, pp. 553–59.
- [15] Power Line Communications Standards Committee of the IEEE Communications Society. “IEEE Standard for Low-Frequency (less than 500 kHz) Narrowband Power Line Communications for Smart Grid Applications”. Anexo D. IEEE-SA Standards Board, Octubre 2013.
- [16] Anritsu.com. (2017). Signal Analyzers MS2690A- Anritsu America. [online] Available at: <https://www.anritsu.com/en-us/test-measurement/products/ms2690a>.
- [17] Rohde-schwarz.com. (2017). R&S®ZVL Vector Network Analyzers - Información general. [online] Available at: https://www.rohde-schwarz.com/es/producto/zvl-pagina-de-inicio-producto_63493-9014.html.
- [18] I. Fernandez, N. Uribe-Pérez, I. Eizmendi, T. Arzuaga, I. Angulo, D. de la Vega, A. Arrinda, “Characterization of non-intentional emissions from distributed energy resources in the 10-500 kHz range: a case study in Spain”. 2017
- [19] Picotech.com. (2017). Flexible (high) resolution oscilloscopes. [online] Available at: <https://www.picotech.com/oscilloscope/5000/flexible-resolution-oscilloscope>.
- [20] Ziv.es. (2017). TABT-2 – Acoplador Aislado para BT – ZIV. [online] Available at: https://www.ziv.es/es/distribution_automation/comunicaciones/acopladores/tabt-2-acoplador-aislado-para-bt/.

Anexo 1: Resultados

Los resultados obtenidos en las dos campañas de medidas se muestran a continuación.

Campaña de medidas 1

Medida 1

Esta medida se corresponde a la realizada en el centro de transformación, concretamente en la Fase 'R' de la red eléctrica. Para el filtrado de la componente continua y la señal de 50 Hz se ha utilizado una de las sondas de 50 Ω .

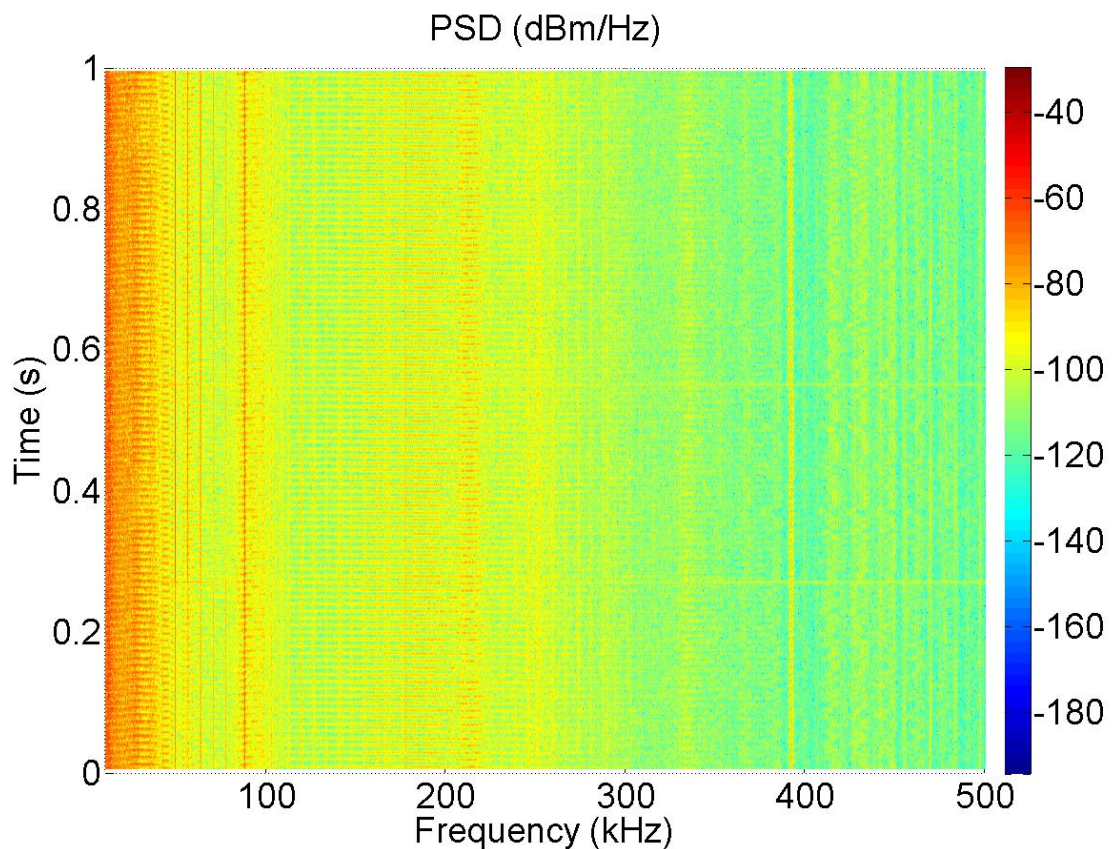


Figura 32: Espectrograma medida CT fase R concentrador ON Sonda 50 Ω

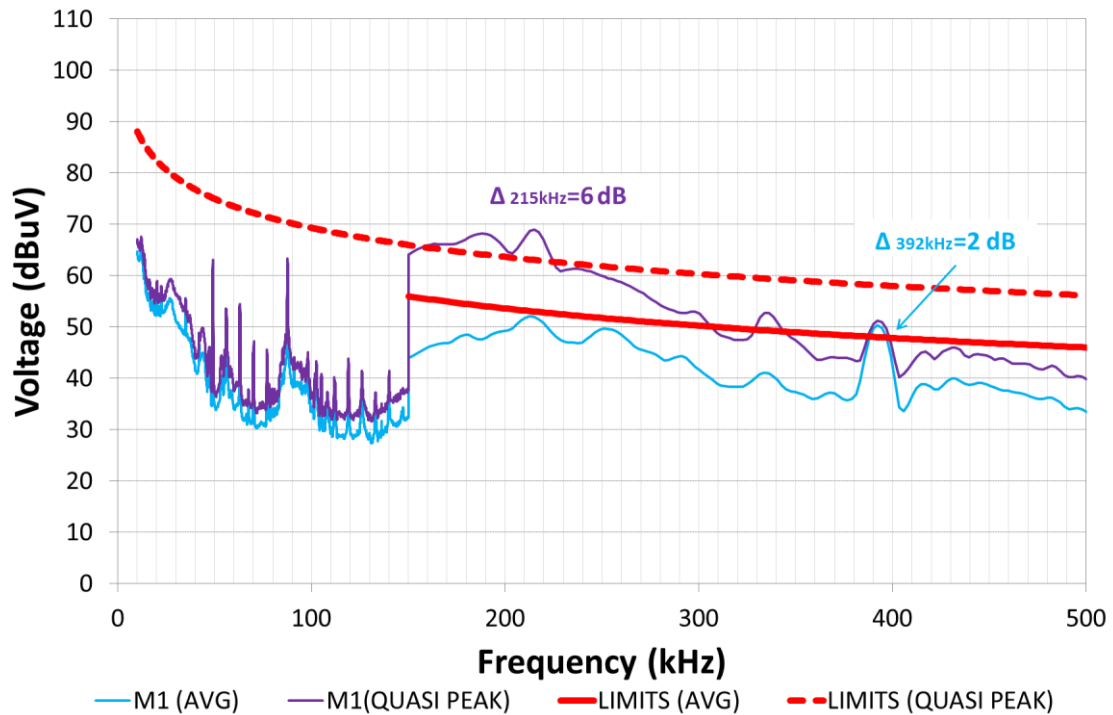


Figura 33: Emisiones medida CT fase R concentrador ON Sonda 50 Ω

Los resultados obtenidos en esta medida son los siguientes:

- Emisiones de hasta 63 dBuV a las frecuencias de 49 kHz, 56 kHz y a 63 kHz que pueden ser armónicos de una señal a 7 kHz la cual no está dentro del rango de medida de este trabajo.
- Emisiones de hasta 63 dBuV a las frecuencias de alrededor de 87.6 kHz.
- Estas emisiones no exceden los límites de EN 50065-1.
- A las frecuencias alrededor de 200 kHz se superan los límites de emisión del detector quasi-pico de EN 50065-1 en cerca de 6 dB.
- A las frecuencias cercanas a 392 kHz se producen emisiones con valores de hasta 51 dBuV superando en 8 dB el límite del detector average.

La impedancia medida se observa a continuación:

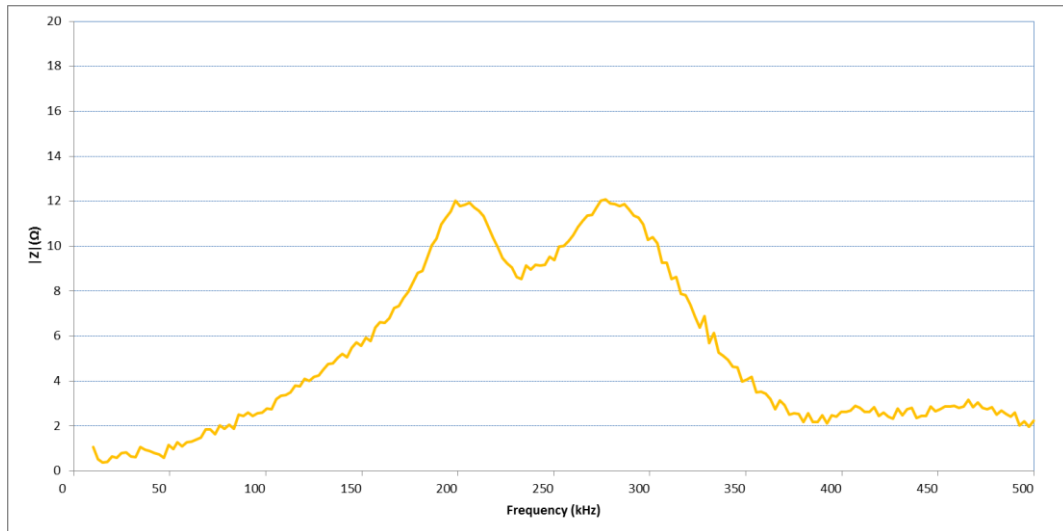


Figura 34: Comportamiento de la impedancia en la fase R con el concentrador ON

A frecuencias bajas, por debajo de 100 kHz y a frecuencias altas, por encima de 350 kHz la impedancia es baja, por debajo de 3 Ω , sin embargo, en el intervalo 100 kHz-350 kHz la impedancia va aumentando exponencialmente hasta llegar a 12 Ω tanto a 200 kHz como a 275 kHz teniendo a 250 kHz un mínimo de 9 Ω .

Medida 2

Esta medida está realizada en el mismo punto que en la medida 1, en este caso con el concentrador apagado de tal manera que no existen las ráfagas PRIME de la medida anterior. Los resultados obtenidos muestran algunos cambios en las potencias de la señal emitida a determinadas frecuencias.

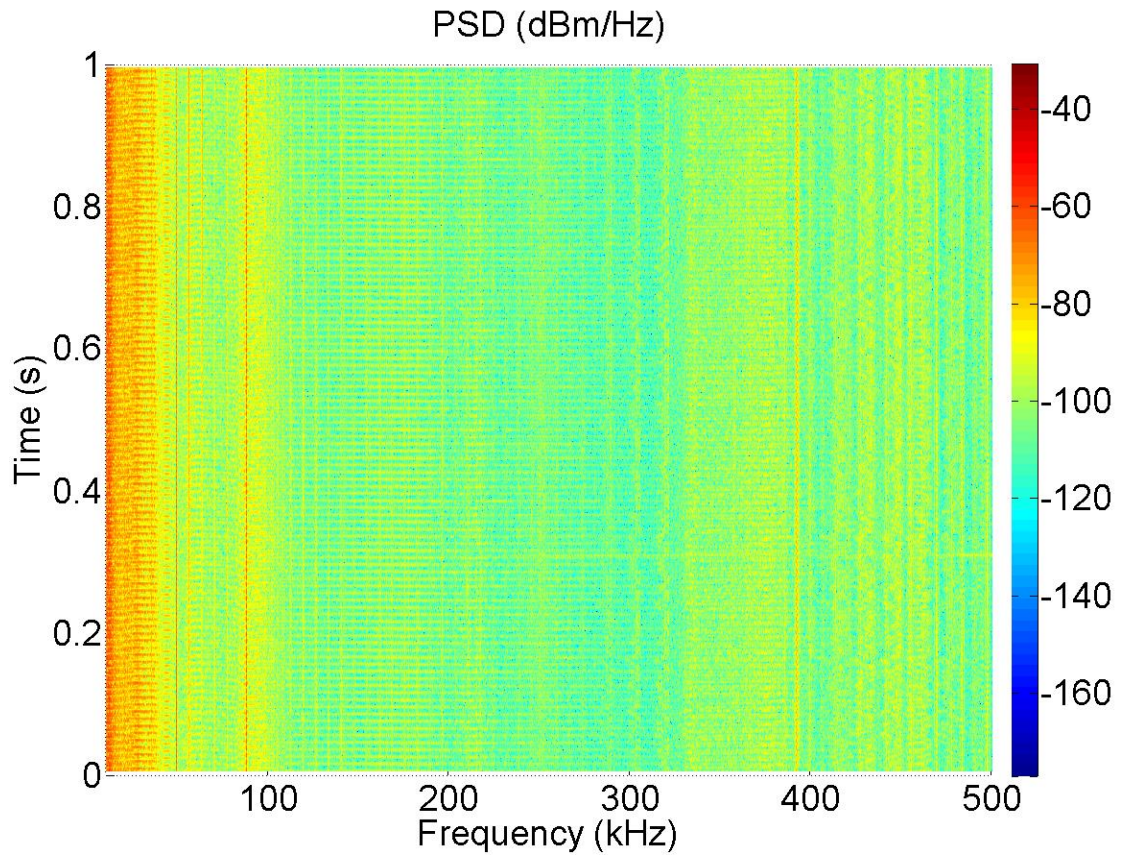


Figura 35: Espectrograma medida CT fase R concentrador OFF Sonda 50 Ω

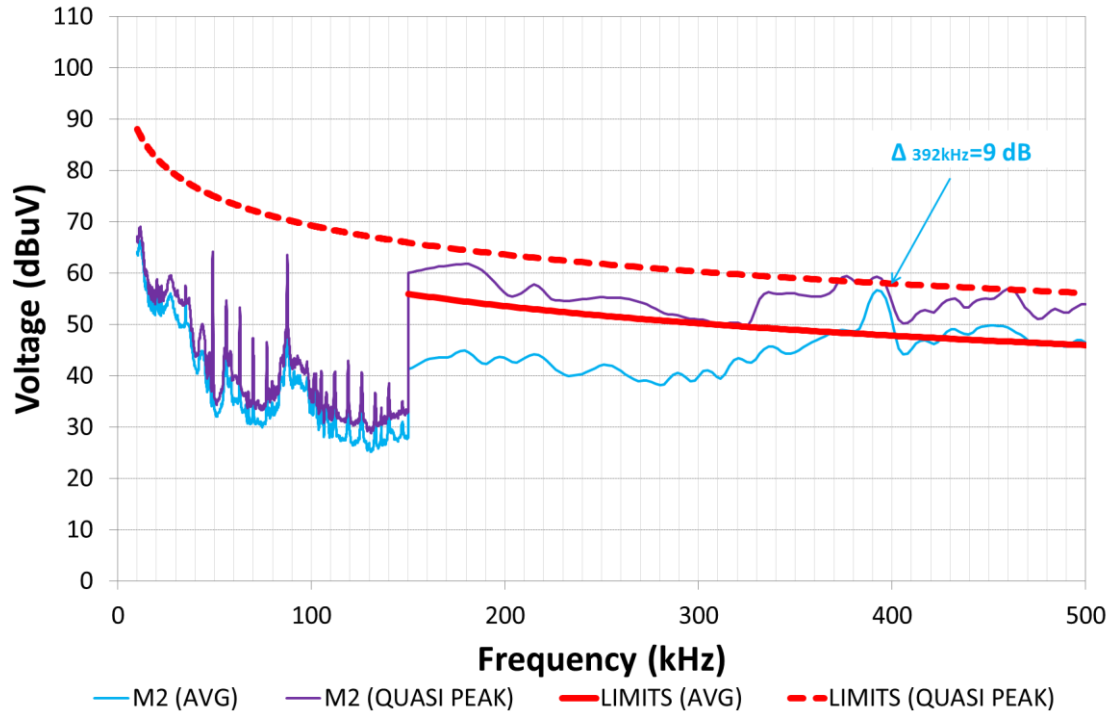


Figura 36: Emisiones medida CT fase R concentrador OFF Sonda 50 Ω

- Emisiones de hasta 63 dBuV en las frecuencias de 49 kHz y 87.6 kHz al igual que cuando el concentrador estaba encendido. Se observan picos con una

potencia inferior a 56 kHz, 63 kHz, 70 kHz, 77 kHz, 84 kHz, 91 kHz y en múltiplos de 7 kHz hasta 147 kHz que, como se ha comentado en la medida 1, se deben a armónicos de una señal en 7 kHz.

- A las frecuencias cercanas a 200 kHz no se superan los límites del detector quasi-pico como sucedía con el concentrador encendido llegando a unas emisiones de alrededor de 5 dB por debajo del límite.
- A las frecuencias de alrededor de 392 kHz se siguen produciendo emisiones. En esta medida con mayor nivel de señal superando levemente el límite del detector quasi-pico en 1 dB y el límite del detector average en 9 dB.

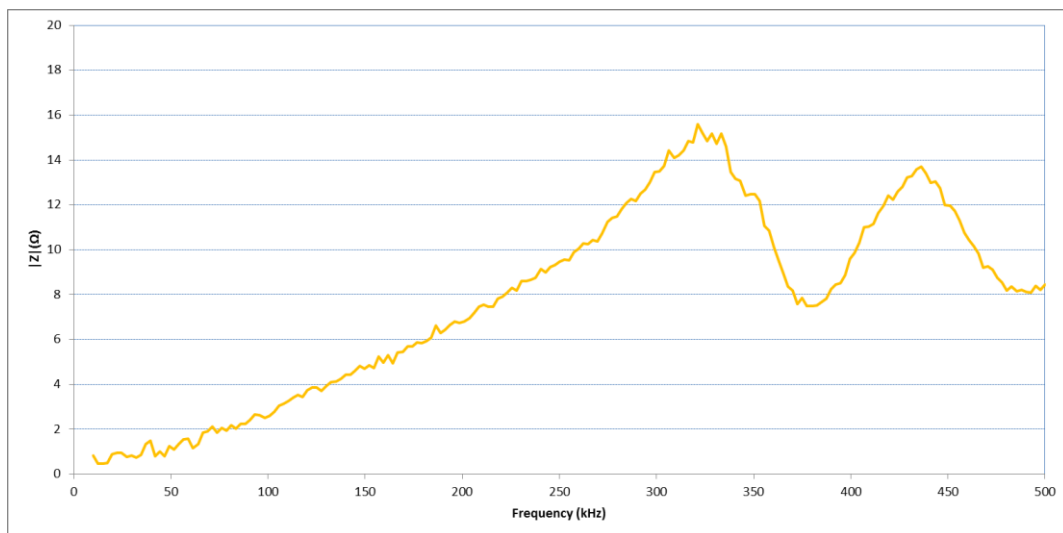


Figura 37: Comportamiento de la impedancia en la fase R con el concentrador OFF

La impedancia a frecuencias bajas es muy baja, esta crece exponencialmente a frecuencias más altas, teniendo su máxima impedancia a 320 kHz con 15.5 Ω. A 434 kHz hay de nuevo un pico en la impedancia de 13.5 Ω disminuyendo hasta los 500 kHz donde hay 8 Ω.

Medida 3

Esta medida se ha realizado en la fase 'S' de la red eléctrica del mismo centro de transformación. Se ha utilizado al igual que en los casos anteriores una de las sondas de 50 Ω.

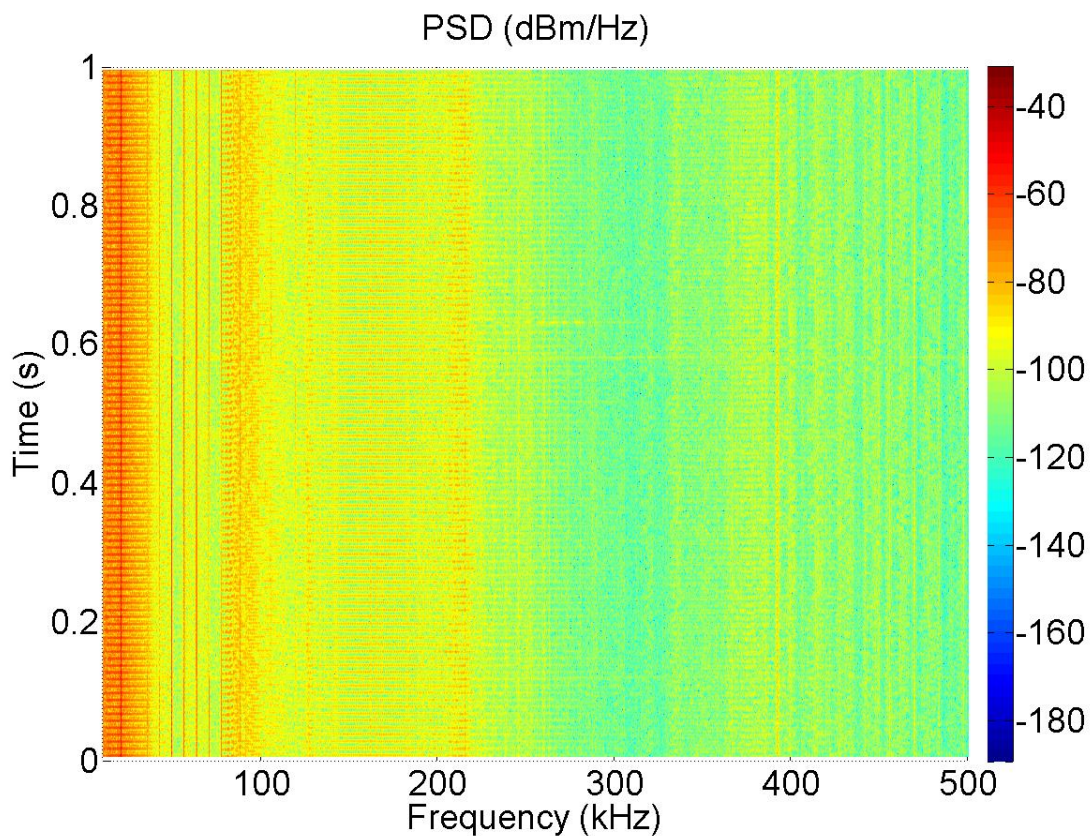


Figura 38: Espectrograma medida CT fase S Sonda 50 Ω

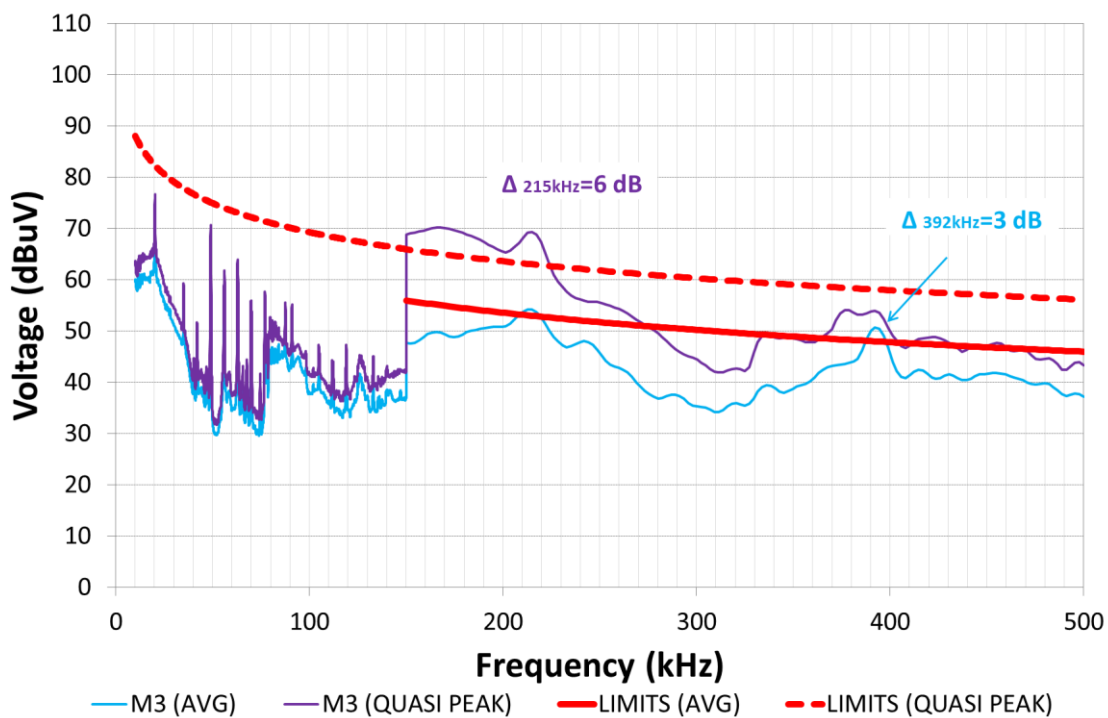


Figura 39: Emisiones medida CT fase S Sonda 50 Ω

En este caso aparecen nuevos picos a frecuencias que no aparecían en la fase 'R'.

- Emisiones de hasta 76 dBuV a 20 kHz y picos de emisiones cercanos al límite del

detector quasi-pico a frecuencias de 49 kHz (70dBuV), 56 kHz (60dBuV), 63 kHz (64dBuV), 70 kHz (55dBuV), 77 kHz (57dBuV) y otros con menos potencia hasta los 147 kHz, es decir, múltiplos de 7 kHz al igual que en la fase 'R'.

- Entre los 150 y 225 kHz se superan los límites del detector quasi-pico de EN 50065-1 y a 215 kHz el límite del detector average pudiendo producir estas emisiones interferencias con otras emisiones en ese rango de frecuencias.
- A 392 kHz se produce al igual que en la fase 'R' un pico de emisión de gran amplitud sobrepasando el límite del detector average en 3 dB.

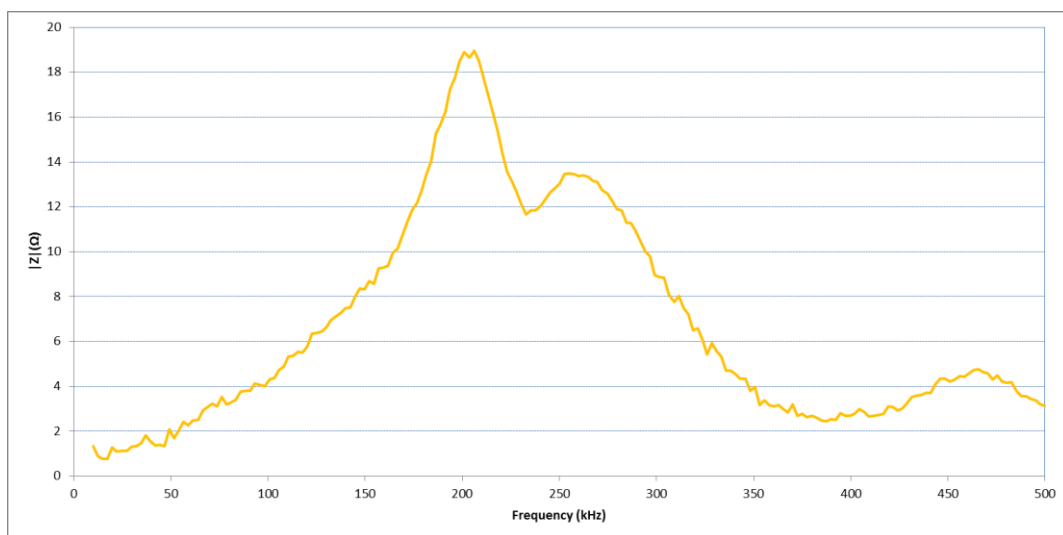


Figura 40: Comportamiento de la impedancia en la fase S

En esta fase la impedancia es mayor respecto a la fase R, a 200 kHz se observa una impedancia de 19 Ω , teniendo otro pico al igual que en la fase anterior a 250 kHz de 13 Ω . A partir de ahí, la impedancia disminuye para frecuencias más elevadas.

Medida 4

La siguiente medida está realizada en el mismo lugar pero en la fase 'T'. Al igual que en el caso anterior, con el concentrador encendido y utilizando la sonda de 50 Ω . A continuación se detallan los resultados obtenidos:

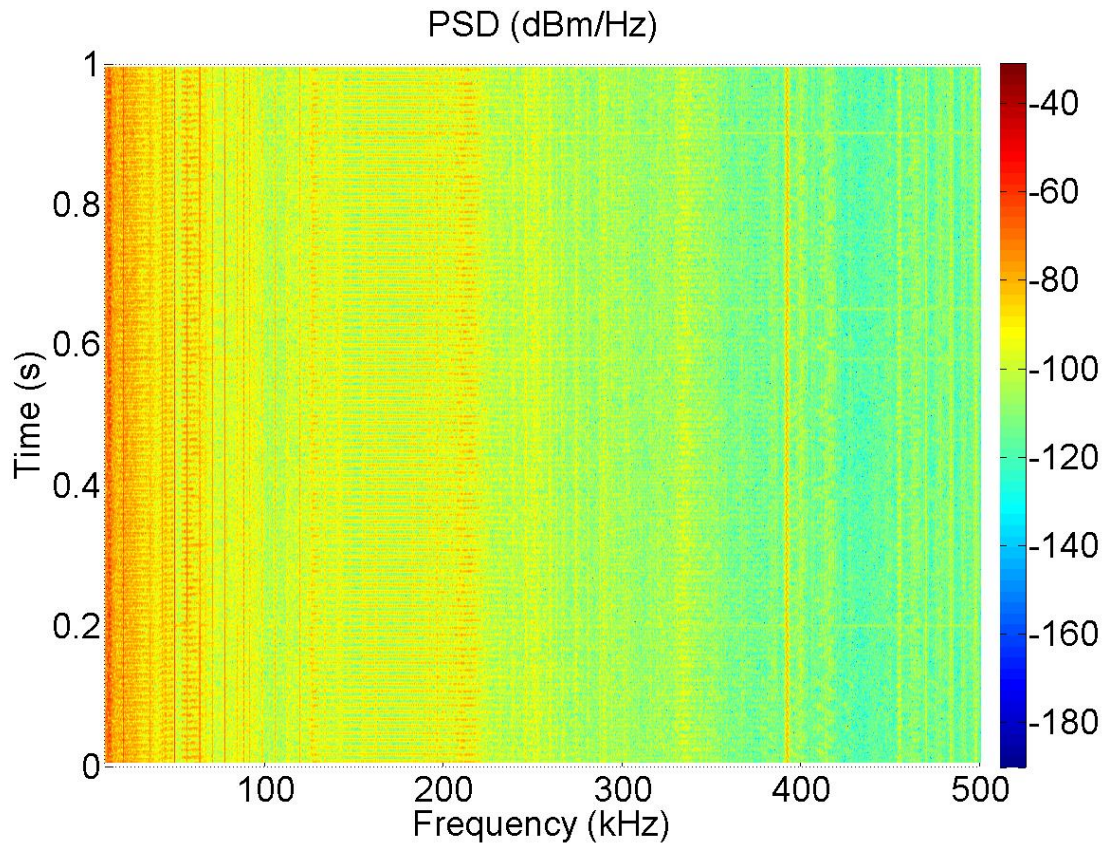


Figura 41: Espectrograma medida CT fase T Sonda 50 Ω

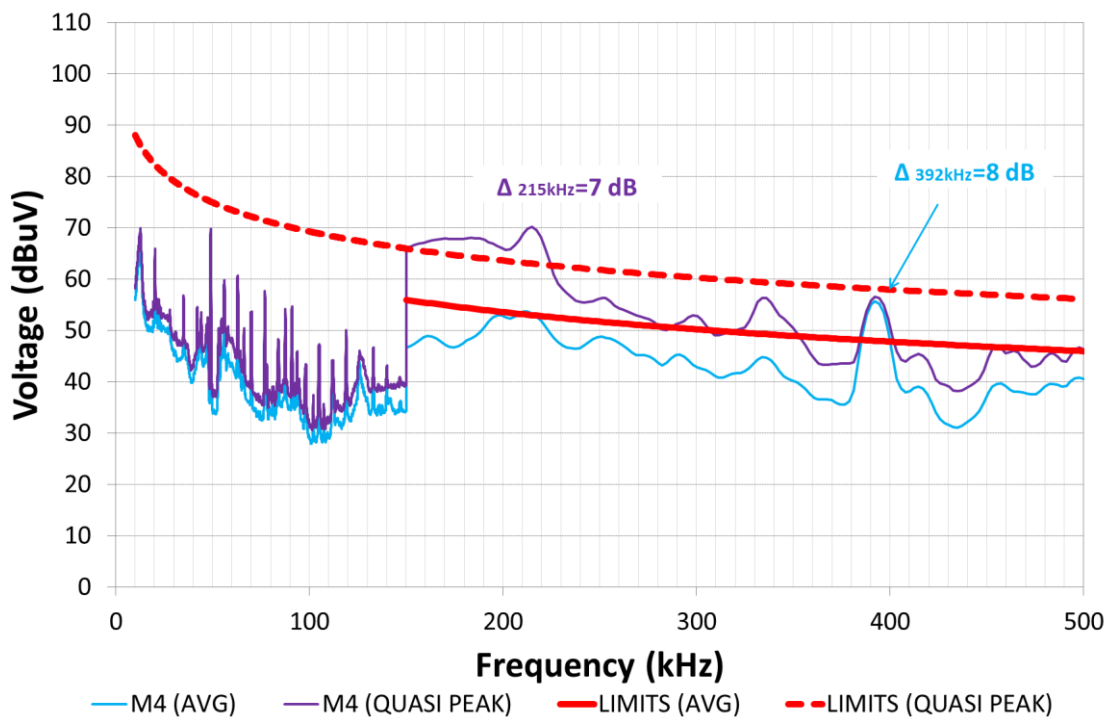


Figura 42: Emisiones medida CT fase T Sonda 50 Ω

En esta fase de nuevo aparecen nuevos picos e incluso alguno con un ancho de banda grande.

- Se producen emisiones entre 12 y 15 kHz de hasta 69 dBuV que no aparecían en las otras fases.
- Se produce al igual que en los anteriores casos, un pico de 65 dBuV a la frecuencia de 20 kHz y varios picos entre las frecuencias de 35 hasta 150 kHz, destacando un pico a las frecuencia de 49kHz de 71 dBuV y otros picos cada 7 kHz al igual que en las anteriores fases medidas.
- Entre las frecuencias de 150 y 220 kHz se superan como en las anteriores fases el límite del detector quasi-pico en un margen de hasta 7 dB a 215 kHz.
- A 392 kHz se produce un gran pico de emisión durante todo el tiempo de medida que supera el valor límite del detector average de EN 50065-1 en 7 dB.

Medida 5

Esta medida se ha realizado en el centro de transformación, concretamente en la fase 'R', con el concentrador encendido pero utilizando para el filtrado de la componente continua y los 50 Hz de la red eléctrica la sonda de 12.5 Ω . Analizando tanto el espectrograma como la gráfica de los límites de emisión junto con los obtenidos se sacan las siguientes conclusiones:

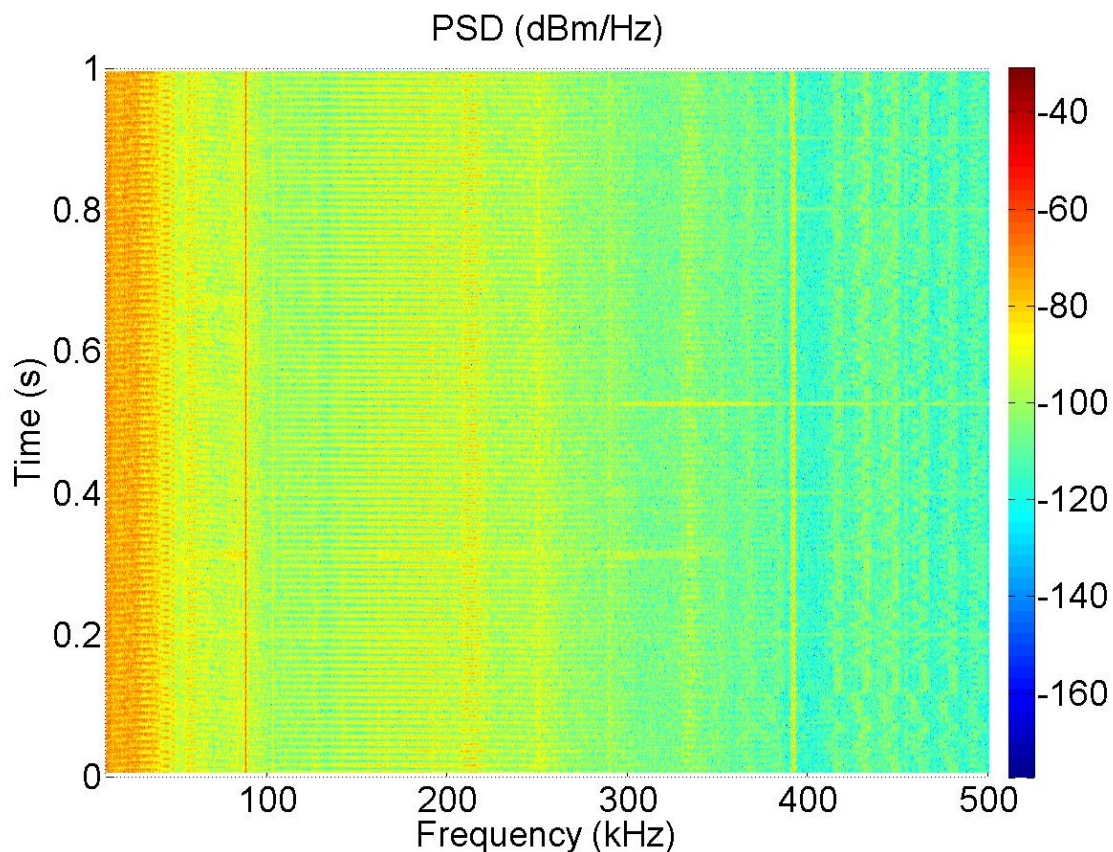


Figura 43: Espectrograma medida CT fase R Sonda 12.5 Ω

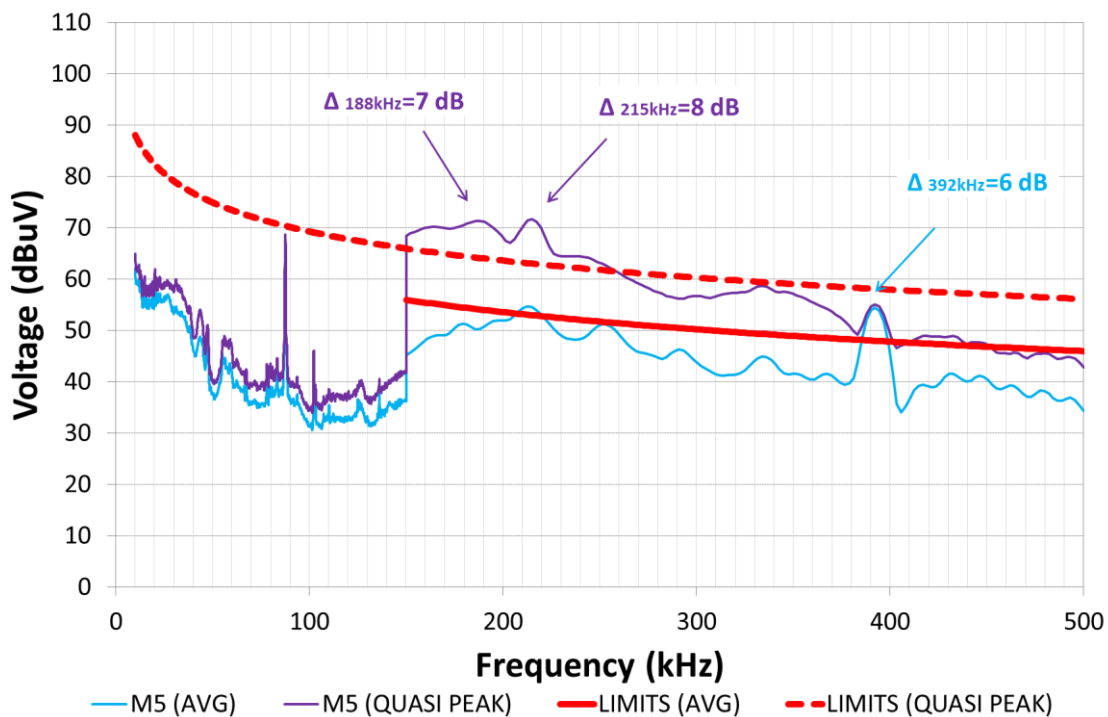


Figura 44: Emisiones medida CT fase R Sonda 12.5 Ω

Con la utilización de la sonda de 12.5 Ω, los resultados obtenidos varían en el rango de 10 a 150 kHz. Las emisiones hasta 50 kHz no tienen picos de gran amplitud como

ocurría utilizando la sonda de 50 Ω . A partir de 50 kHz la potencia medida va aumentando a medida que las frecuencias son mayores hasta llegar a la frecuencia de 87.6 kHz, donde se produce el pico máximo de 70 dBuV pero sin superar el límite del detector quasi-pico de EN 50065-1. A partir de esa frecuencia, hasta 150 kHz, las emisiones en ese intervalo decaen con una elevada pendiente negativa hasta que están muy por debajo del límite del detector quasi-pico y sin peligro de que interfieran con otras emisiones que se produzcan en ese intervalo del espectro radioeléctrico.

En el intervalo de 150 kHz a 220 kHz de nuevo se superan, como en la medida 1, los límites de emisión del detector quasi-pico que marca EN 50065-1 hasta en 9 dB a 215 kHz. A la frecuencia de 392 kHz aparece, como en todos los casos anteriores, el pico de emisión que supera el límite del detector average que se marca en 6 dB.

Medida 6

Esta medida está realizada en la fase 'S' de la red eléctrica del centro de transformación utilizando para el filtrado la sonda de 12.5 Ω .

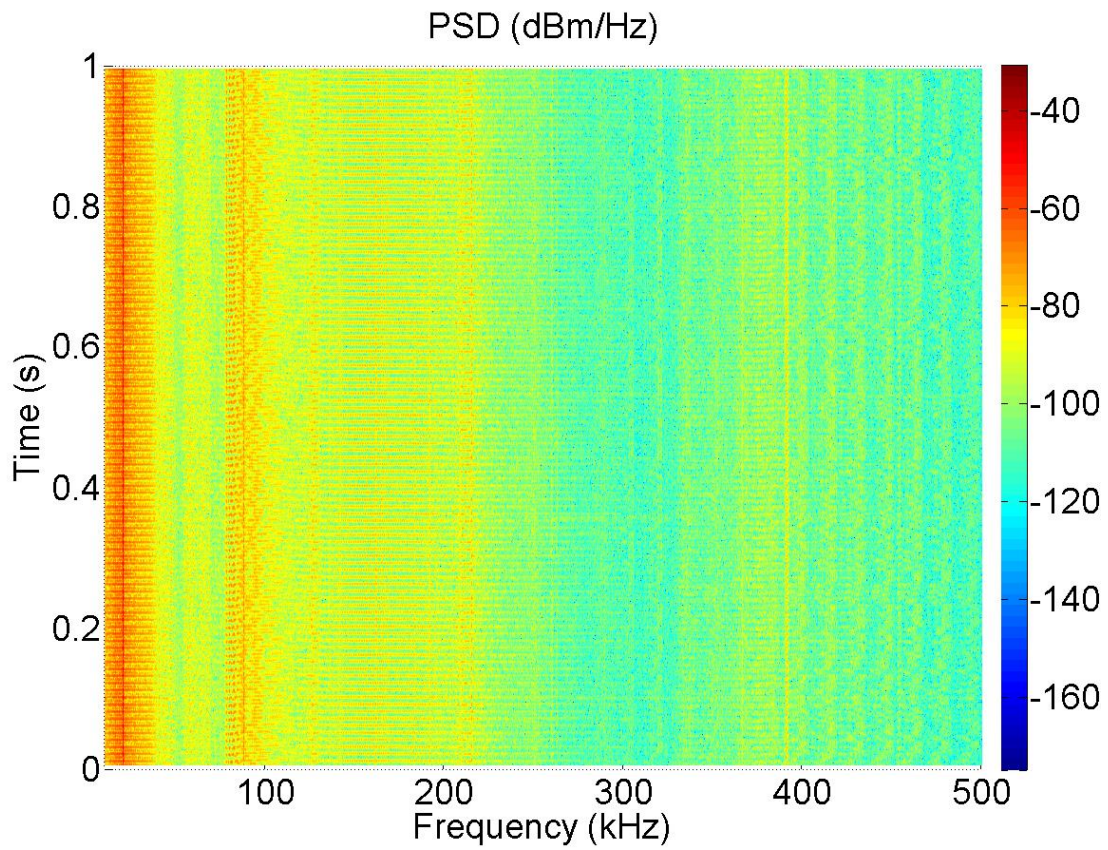


Figura 45: Espectrograma medida CT fase S Sonda 12.5 Ω

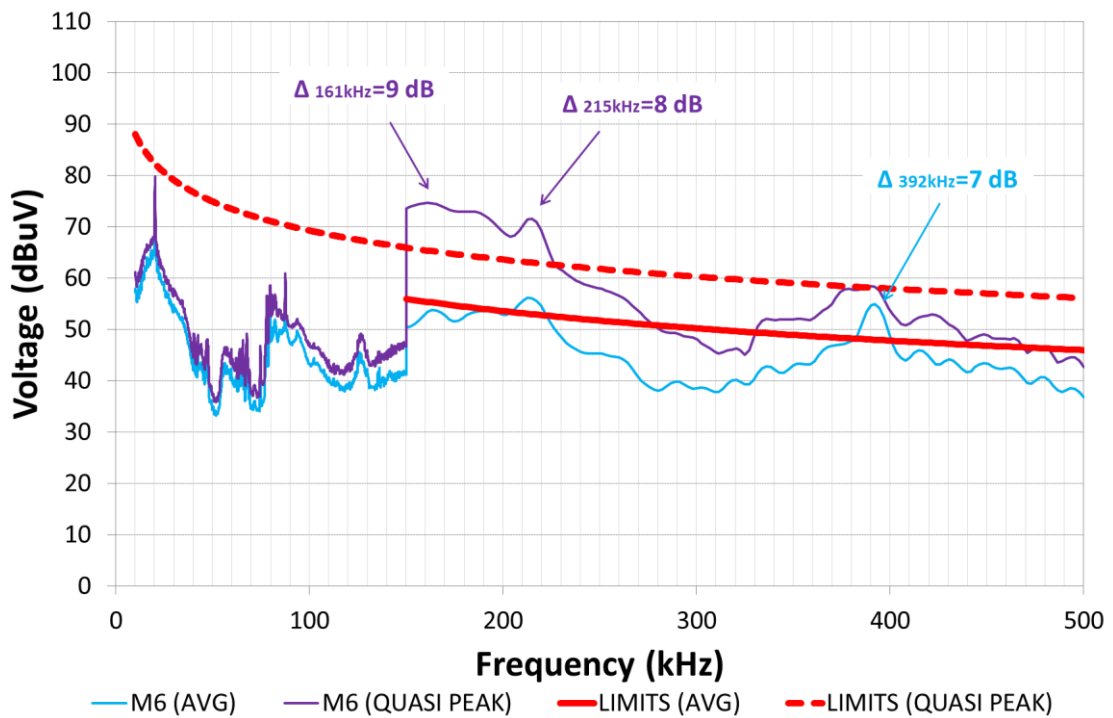


Figura 46: Emisiones medida CT fase S Sonda 12.5 Ω

En este caso, al igual que la medida con la sonda de 50 Ω , se observa un pico a 20.3 kHz muy cercano al límite de emisión, concretamente a 79 dBuV. En el intervalo entre 40

kHz y 100 kHz se producen emisiones con una tensión muy inferior al límite de emisión sin que se produzcan picos de emisiones destacables, como se han podido observar al utilizar la sonda de 50 Ω .

En este caso, a partir de 150 kHz y hasta 220 kHz se supera el límite de emisión hasta en 9 dB a 161 kHz, por lo tanto podría interferir en otras emisiones. A 392 kHz sigue produciéndose el pico de emisión que aparece durante todo el tiempo de medida como se observa en el espectrograma. Este supera el límite del detector average marcado por EN 50065-1 en 7 dB.

Medida 7

La última medida realizada en el centro de transformación se ha realizado en la fase 'T' utilizando la sonda de 12.5 Ω .

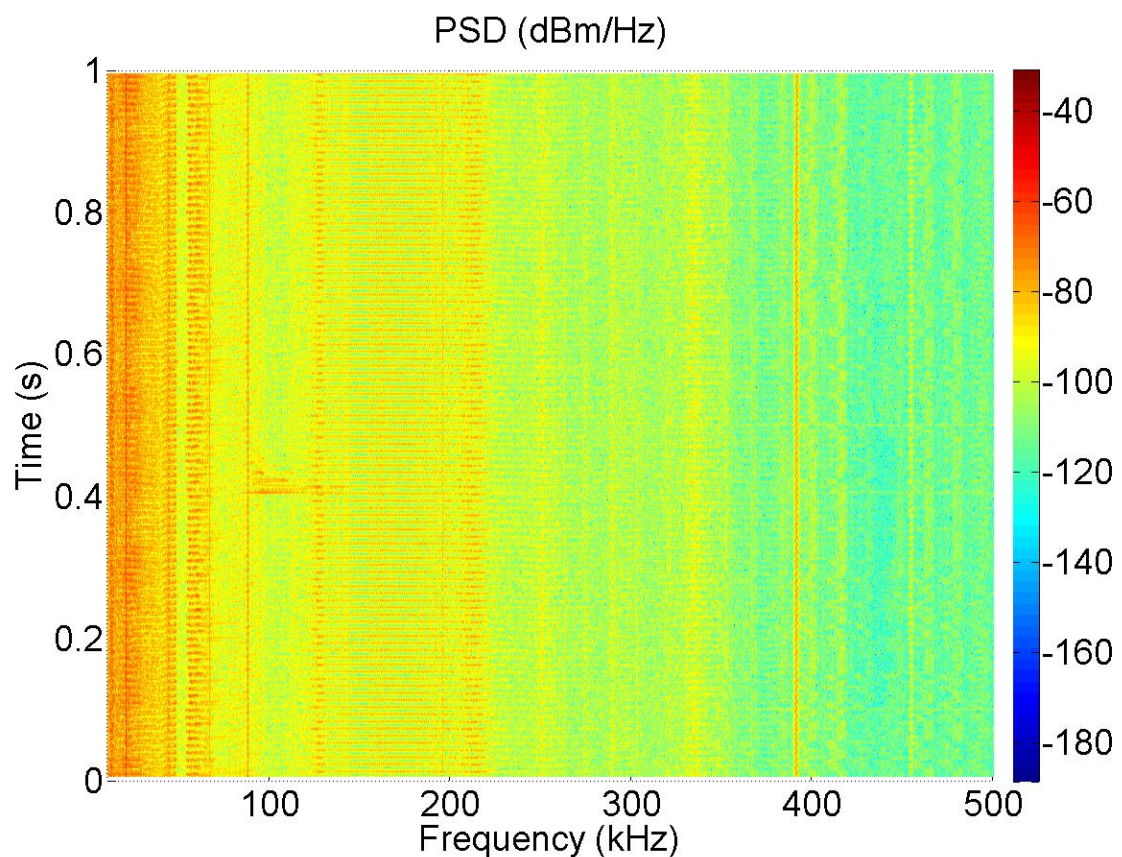


Figura 47: Espectrograma medida CT fase T Sonda 12.5 Ω

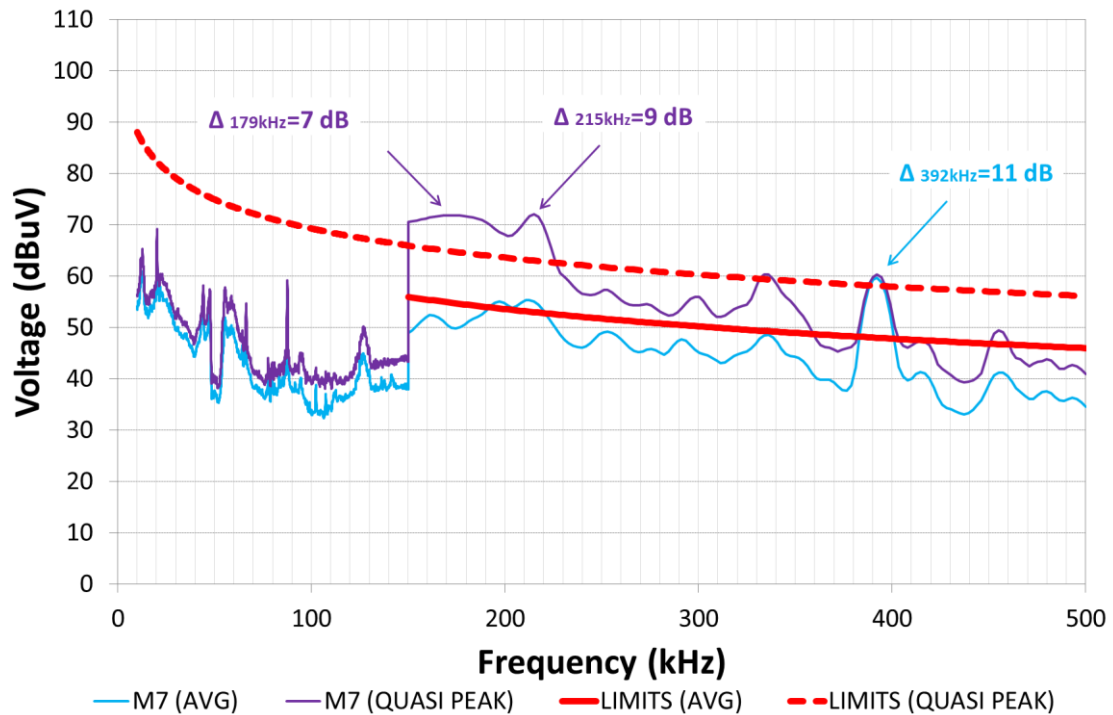


Figura 48: Emisiones medida CT fase T Sonda 12.5 Ω

Al igual que en las fases 'R' y 'S' hay un pico de emisión a 20 kHz de 70 dBuV y otro a 87.6 kHz de 57 dB. A su vez en el intervalo 30 kHz – 150 kHz hay varios picos de emisión (58 dBuV a 44.1 kHz, 57 dBuV a 47.6 kHz, 52 dBuV a 54.4 kHz, 54 dBuV a 66.4 kHz y 50 dBuV a 127 kHz), sin embargo, ninguno de ellos se acerca a los límites de emisión marcados en EN 50065-1.

En el intervalo de frecuencias 150 kHz-500 kHz si se superan los límites de emisión, concretamente entre 150 kHz y 220 kHz, hasta en 9 dB el límite del detector quasi-pico fijado. En la frecuencia de 392 kHz aparece, al igual que en los casos anteriores, un pico de emisión durante todo el tiempo que dura la medida que supera en 11 dB el límite fijado del detector average.

Medida 8

Esta medida está realizada en el cuarto de contadores del portal número 13. La medida se ha realizado utilizando la sonda de 50 Ω para el filtrado tanto de la componente continua como los 50 Hz de la red eléctrica. En este caso, como las fases no estaban marcadas por letras sino con cables de colores, se ha denominado a la fase medida en este caso fase "1". Al realizarse en el cuarto contadores el número de ráfagas PRIME ha

sido casi nulo y se ha podido coger un rango de tiempo mayor de medida que en el caso del centro de transformación.

A continuación se detallan los resultados obtenidos:

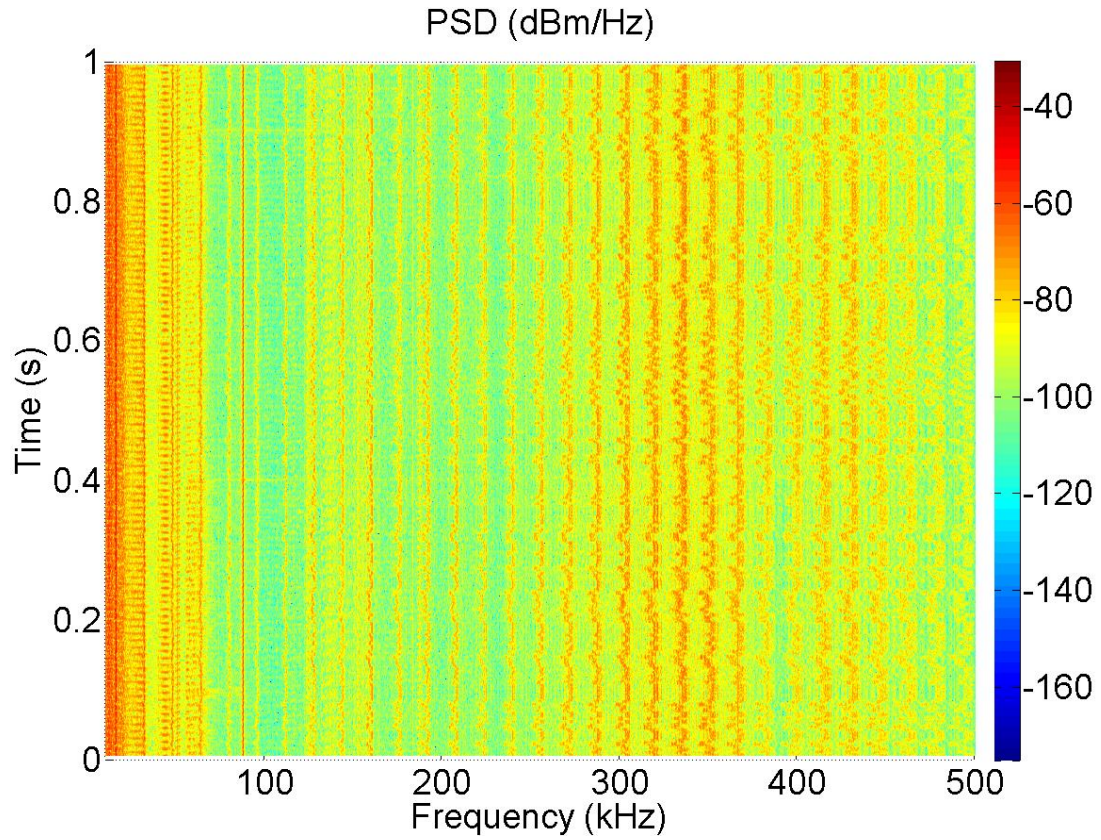


Figura 49: Espectrograma medida Cuadro Contadores fase 1 Sonda 50 Ω

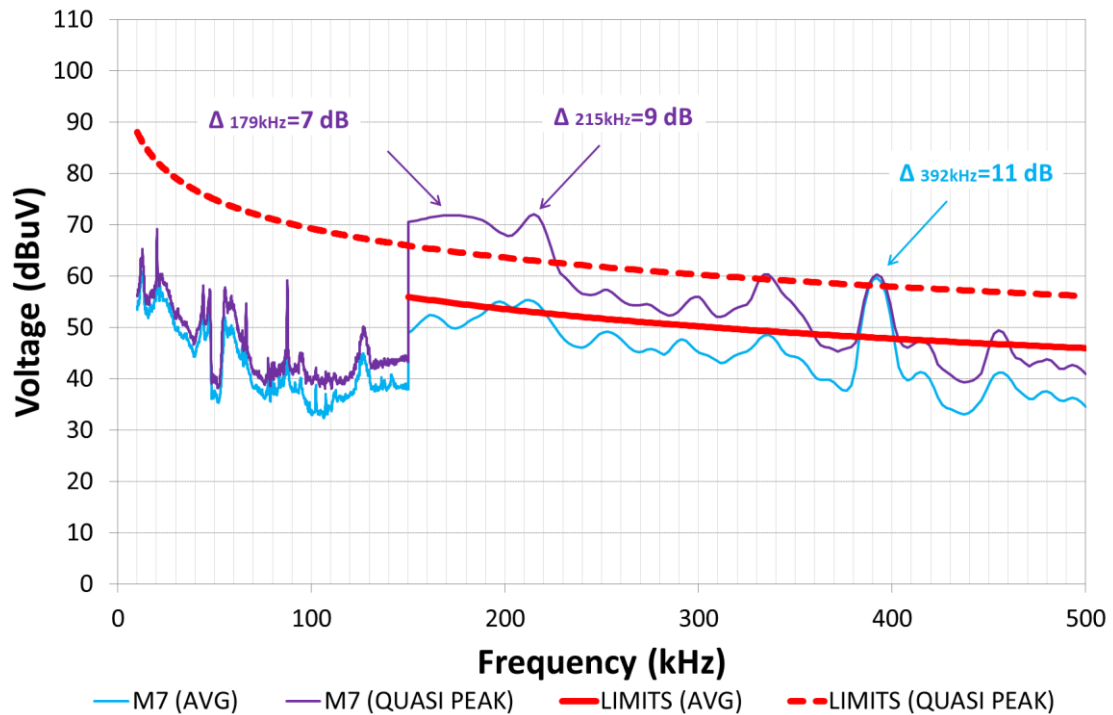


Figura 50: Emisiones medida Cuadro Contadores fase 1 Sonda 50 Ω

En el rango de 10 a 150 kHz se producen picos de emisiones a diferentes frecuencias pero sin superar los límites: 15 kHz (73 dBuV), 32 kHz (68 dBuV), 43 kHz (61 dBuV), 64 kHz (60 dBuV), 80 kHz (50 dBuV), 87.6 kHz (70dBuV), 96 kHz (47 dBuV), 112 kHz (51 dBuV), 127 kHz (57 dBuV) y 142.5 kHz (52 dBuV).

A partir de 150 kHz, las emisiones siguen una forma sinusoidal en todo el rango hasta los 500 kHz superando ampliamente los límites de los detectores average y quasi-pico de EN 50065-1, sobre todo a partir de 300 kHz. En algunos casos, como en 336 kHz hasta en 18 dB el límite del detector quasi-pico y en 22 dB el límite del detector average.

Medida 9

Esta medida está realizada en el mismo cuadro de contadores pero en la fase '2'. Al igual que en la anterior de ha utilizado la sonda de 50 Ω .

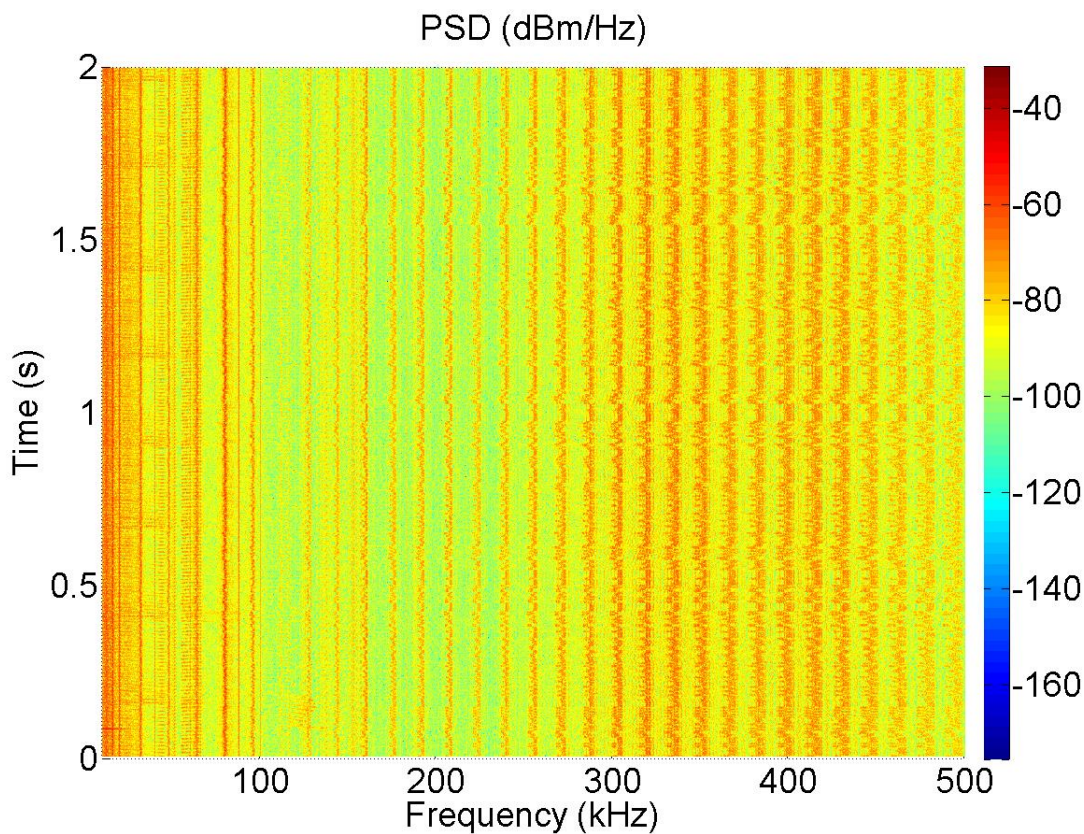


Figura 51: Espectrograma medida Cuadro Contadores fase 2 Sonda 50 Ω

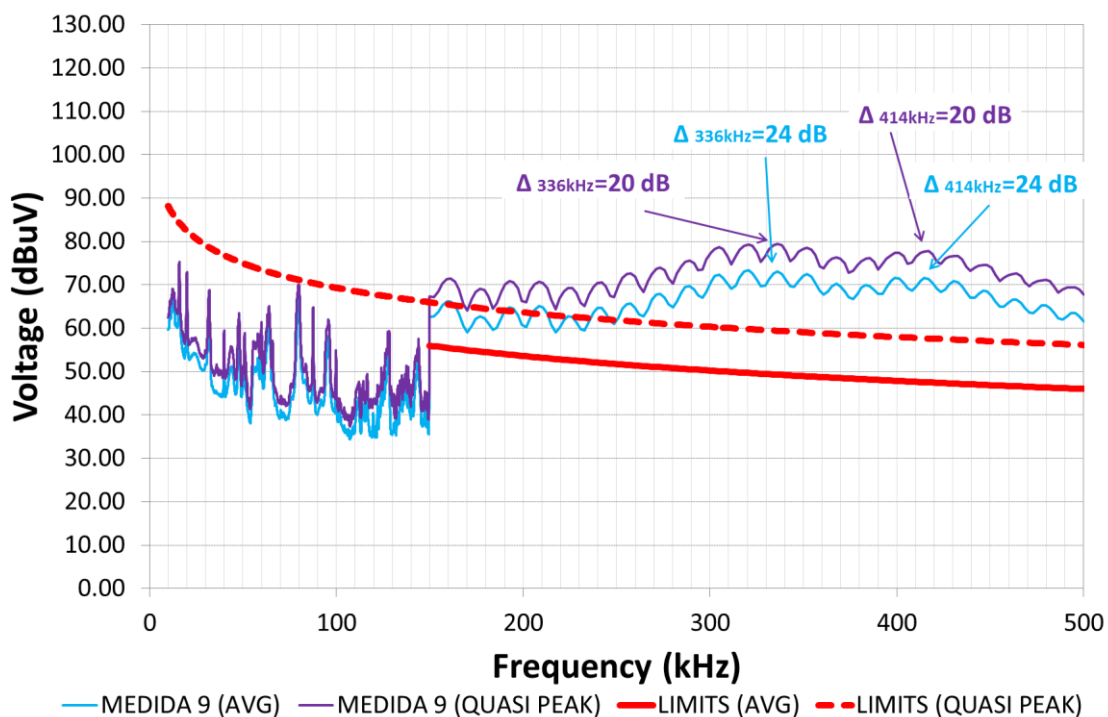


Figura 52: Emisiones medida Cuadro Contadores fase 2 Sonda 50 Ω

En esta fase se observan en el rango de 10 kHz-150 kHz diferentes picos de emisión pero al igual que en la anterior, sin superar los límites: 16 kHz (75 dBUV), 20 kHz (73

dBuV), 32 kHz (68 dBuV), 40 kHz (59 dBuV), 48 kHz (64 dBuV), 60 kHz (61 dBuV), 64 kHz (65 dBuV), 80 kHz (70 dBuV), 87.5 kHz (65 dBuV), 95.7 kHz (62 dBuV), 127.7 kHz (59 dBuV) y 144 kHz (57 dBuV). Como se observa, algunos picos de frecuencia están en múltiplos de otros por lo que pueden ser armónicos de una señal transmitida a 16 kHz y otra a 20 kHz.

En el rango de frecuencias desde 150 kHz hasta 500 kHz se superan al igual que en la fase 1 los límites con gran margen de hasta 20 dB del detector quasi-pico y 24 dB en el límite del detector average, tanto a 336 kHz como a 414 kHz.

Medida 10

Esta medida ha sido realizada en la fase restante de la red eléctrica, denominada fase '3' en el cuarto de contadores del mismo portal. Al igual que en los casos anteriores se ha utilizado la sonda de 50 Ω para el filtrado de la componente continua y la de 50 Hz.

A continuación se detallan los resultados obtenidos:

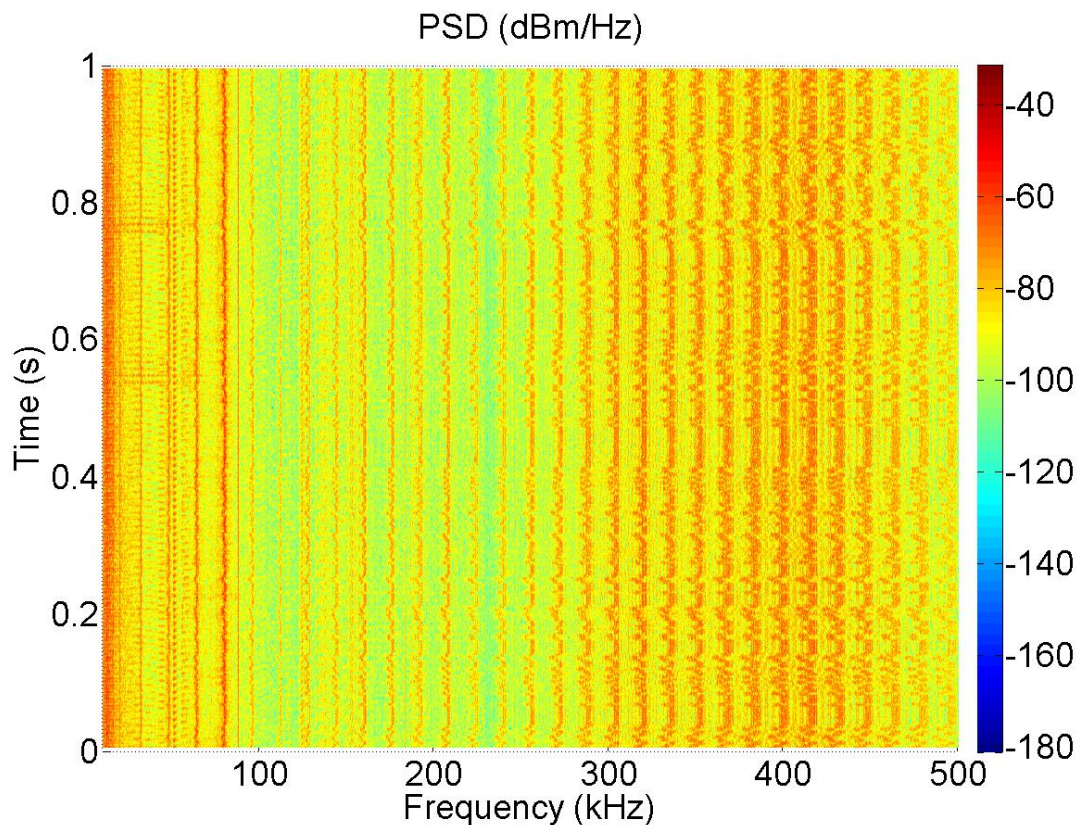


Figura 53: Espectrograma medida Cuadro Contadores fase 3 Sonda 50 Ω

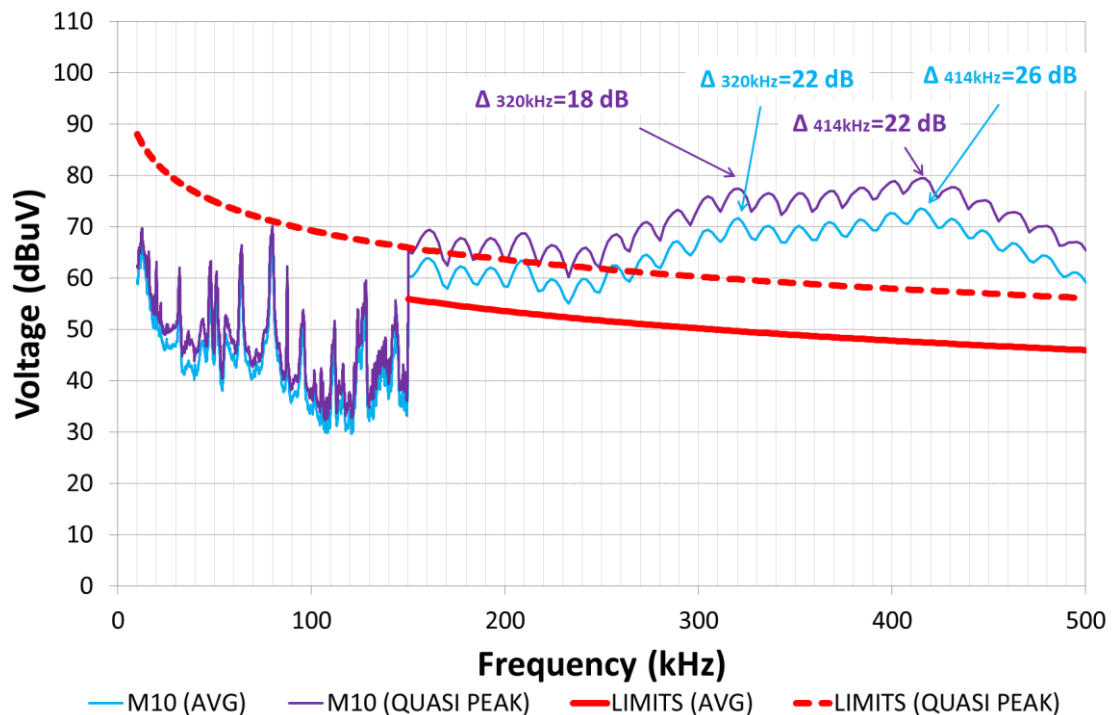


Figura 54: Emisiones medida Cuadro Contadores fase 3 Sonda 50 Ω

En el rango de 10 kHz a 150 kHz se producen diferentes picos pero ninguno sobrepasa los límites de emisión de EN 50065-1. Cabe destacar que en este caso en el rango de 40 kHz a 90 kHz los valores de quasi-pico son muy semejantes, sin embargo, los valores medios tienen picos en determinadas frecuencias donde se mantiene la tensión a esos valores durante todo el tiempo de medida: 48 kHz (61 dBuV), 51 kHz (59 dBuV), 64 kHz (63 dBuV), 80 kHz (67 dBuV), 87.6 kHz (60 dBuV), 95.5 kHz (50 dBuV), 112 kHz (48 dBuV), 127.6 kHz (56 dBuV) y 143.5 kHz (50 dBuV).

En el rango entre 150 kHz y 500 kHz se sobrepasan ampliamente los límites del detector average y del detector quasi-pico en todo el rango, al igual que en las dos fases anteriores, llegando a estar hasta 18 dB por encima del quasi-pico y 22 dB del average en 320 kHz.

Campaña de medidas 2

Medida 1

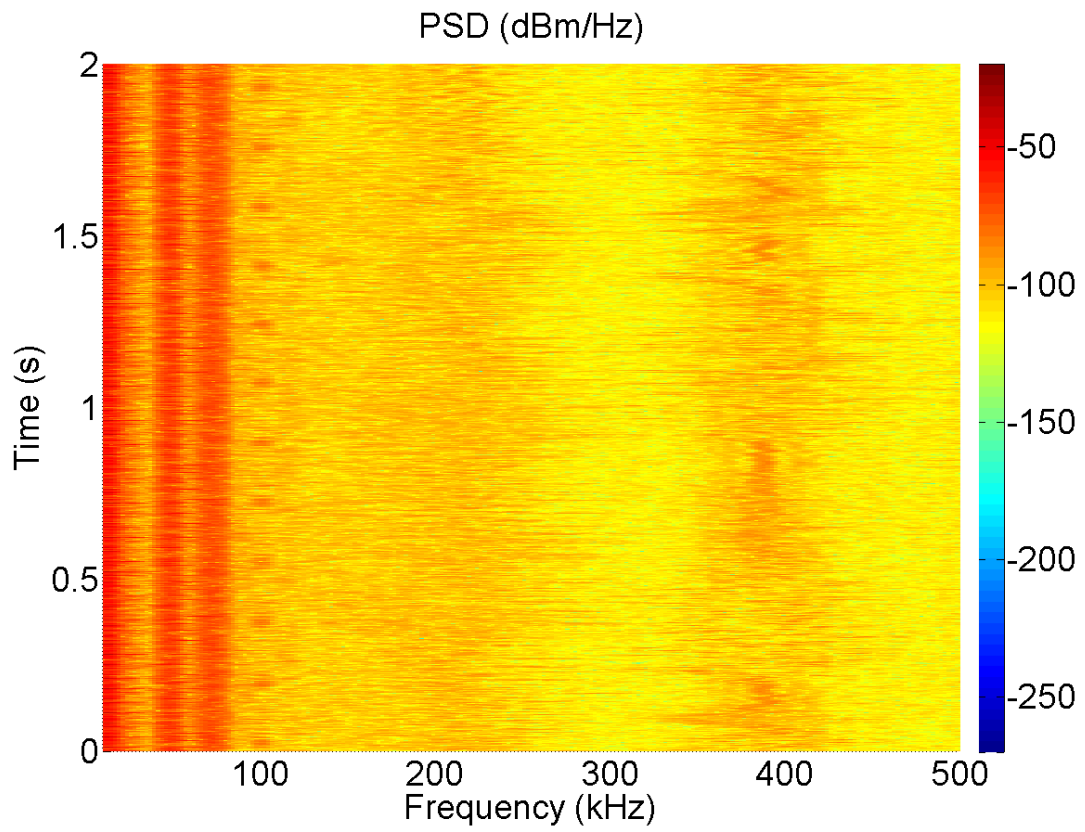


Figura 55: Espectrograma medida 1 en aula TSR

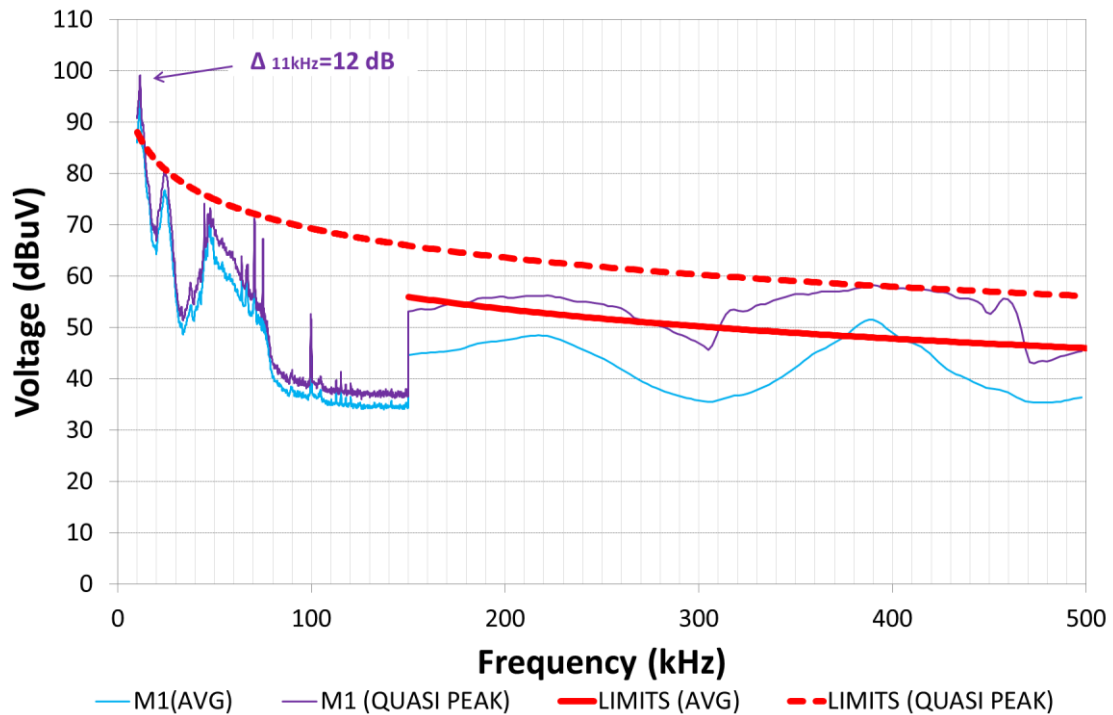


Figura 56: Emisiones medida 1 aula TSR

Los resultados obtenidos son los siguientes:

- Emisión de 99 dBuV a la frecuencia de 11 kHz que supera el límite del detector quasi-pico fijado por la EN 50065-1.
- Picos de emisiones de hasta 75 dBuV a diferentes frecuencias (24 kHz, 44 kHz, 70 kHz, 75 kHz y 100 kHz) que no superan los límites del detector quasi-pico.
- En el rango de frecuencias de 150 kHz a 500 kHz solo se supera el límite del detector average en las frecuencias cercanas a 380-390 kHz en un valor máximo de 3 dB. Los límites del detector quasi-pico no se superan en este rango frecuencial.

Medida 2

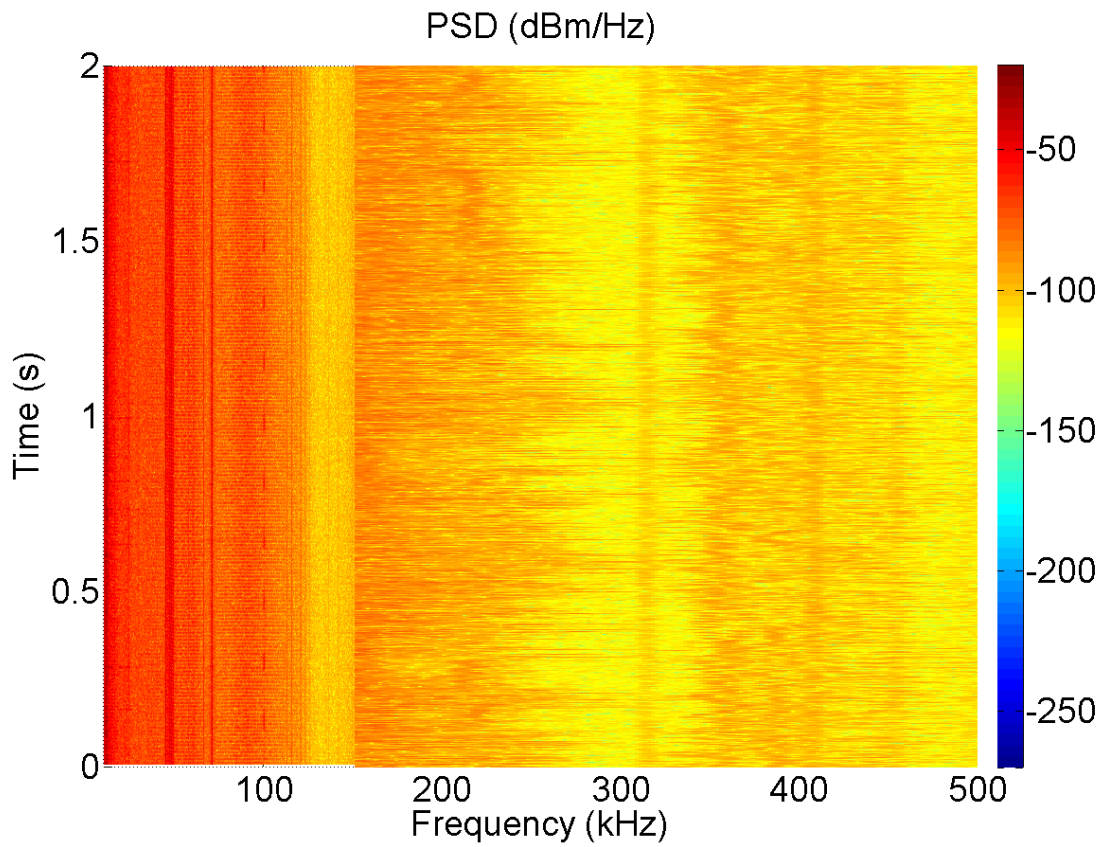


Figura 57: Espectrograma medida 2 aula TSR

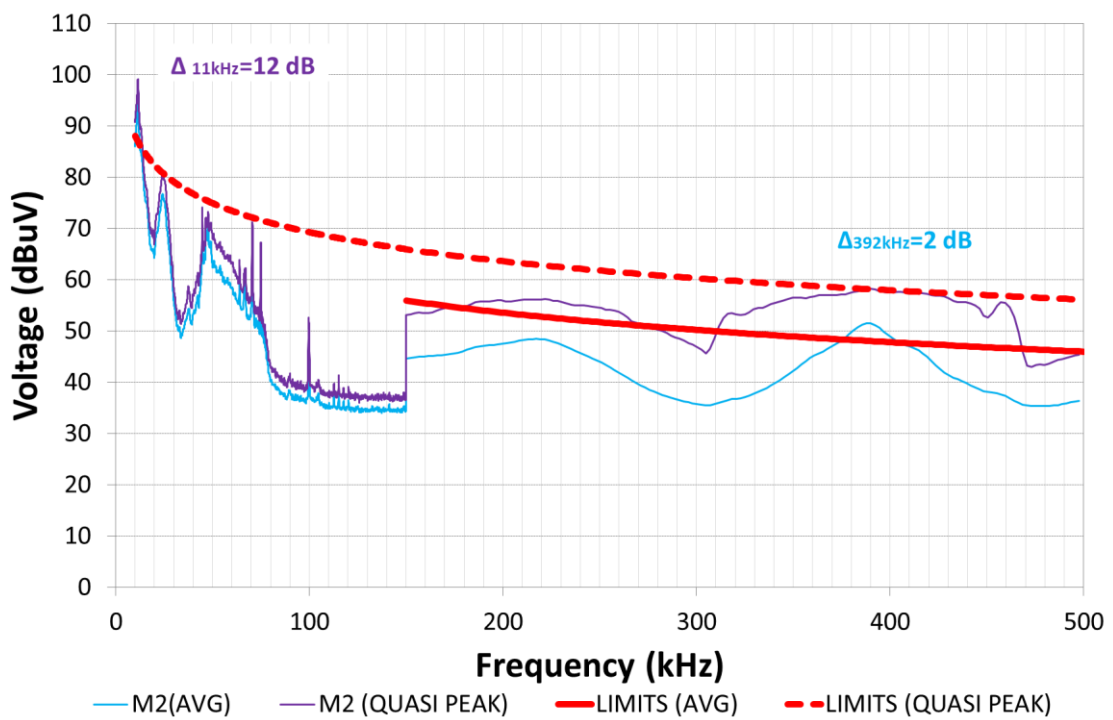


Figura 58: Emisiones medida 2 aula TSR

Los resultados de esta medida son los siguientes:

- Emisión de 95 dBuV a la frecuencia de 11 kHz.
- Diferentes picos de emisiones a las frecuencias 24 kHz, 45 kHz, 70 kHz, 75 kHz y 100 kHz que no superan los límites del detector quasi-pico en el rango 10-150 kHz.
- En el rango 150-500 kHz se supera en las frecuencias alrededor de 385 kHz el límite del detector average mínimamente en 2 dB.

Medida 3

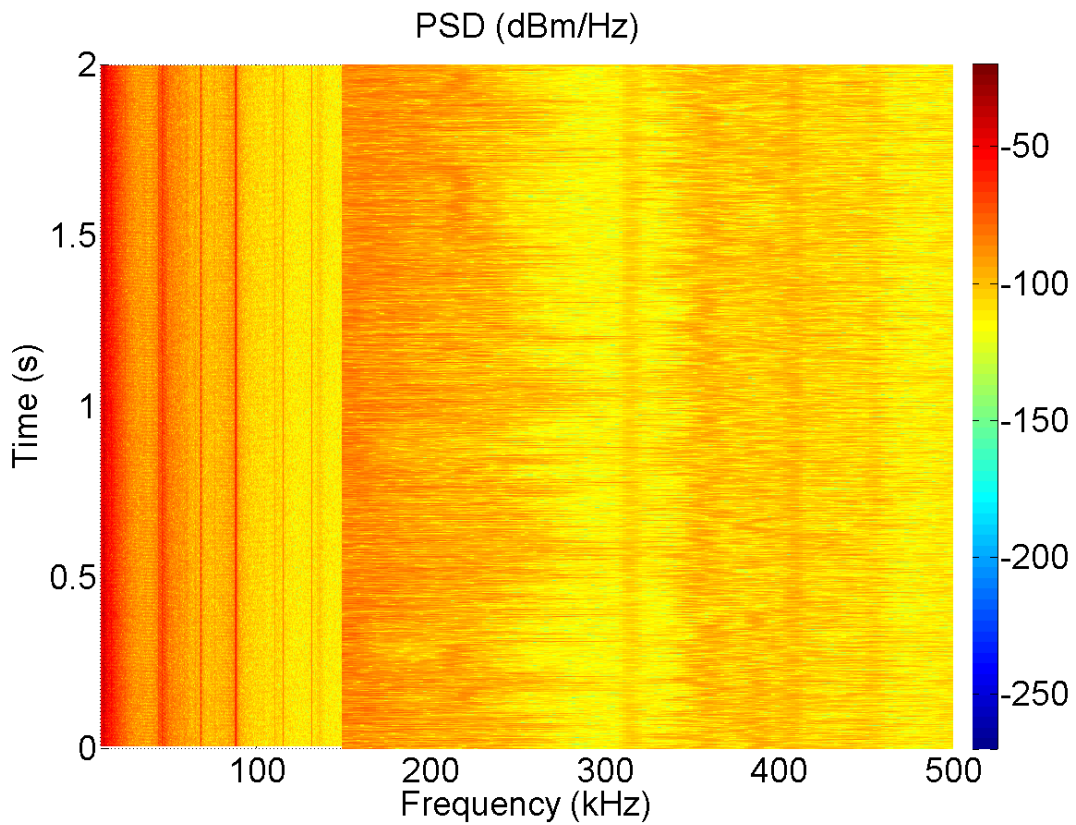


Figura 59: Espectrograma medida 3 aula TSR

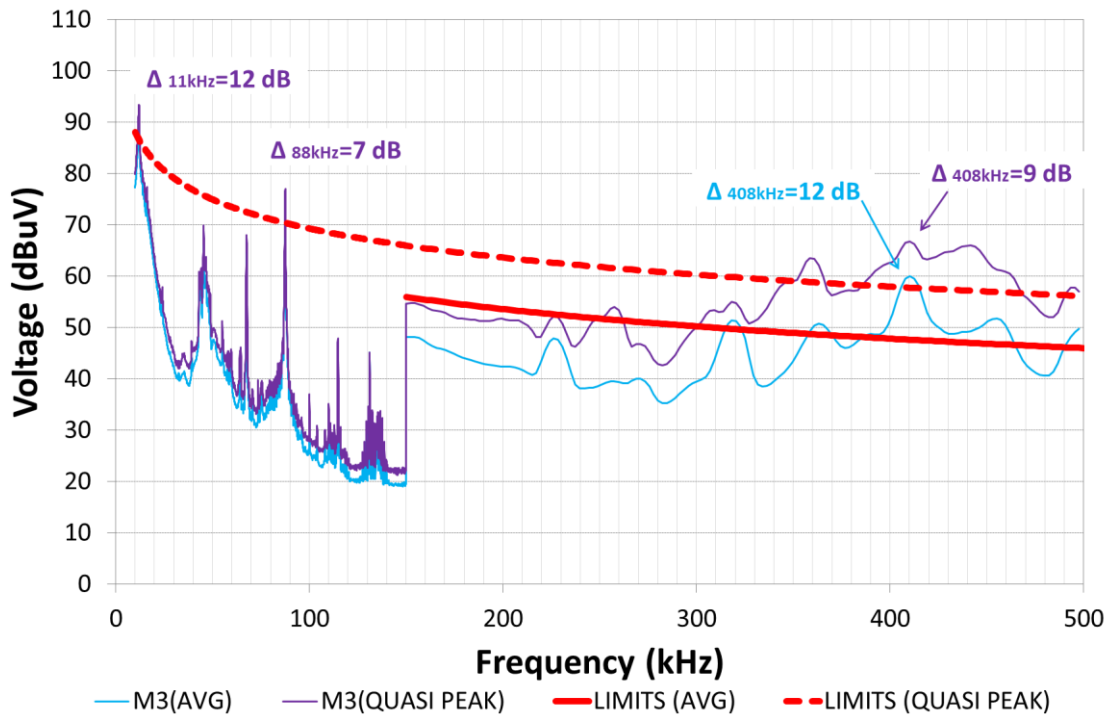


Figura 60: Emisiones medida 3 aula TSR

Los resultados obtenidos en la tercera medida son los siguientes:

- Dos picos de emisión que superan el límite del detector quasi-pico en 12 y 7 dB a las frecuencias de 11 kHz y 88 kHz respectivamente.
- Picos de emisiones que no superan los límites del detector quasi-pico a las frecuencias 45 kHz (70 dBuV), 67 kHz (68 dBuV), 114 kHz (47 dBuV) y 131 kHz (45 dBuV).
- A las frecuencias cercanas a 360 kHz se superan tanto los límites del detector average como el de quasi-pico hasta en 2 dB y 5 dB respectivamente.
- Entre los 390 y 460 kHz se superan los límites del detector average hasta en 12 dB y del detector quasi-pico en 9 dB, pudiendo producir estas emisiones interferencias con otras emisiones en ese rango de frecuencias.

Medida 4

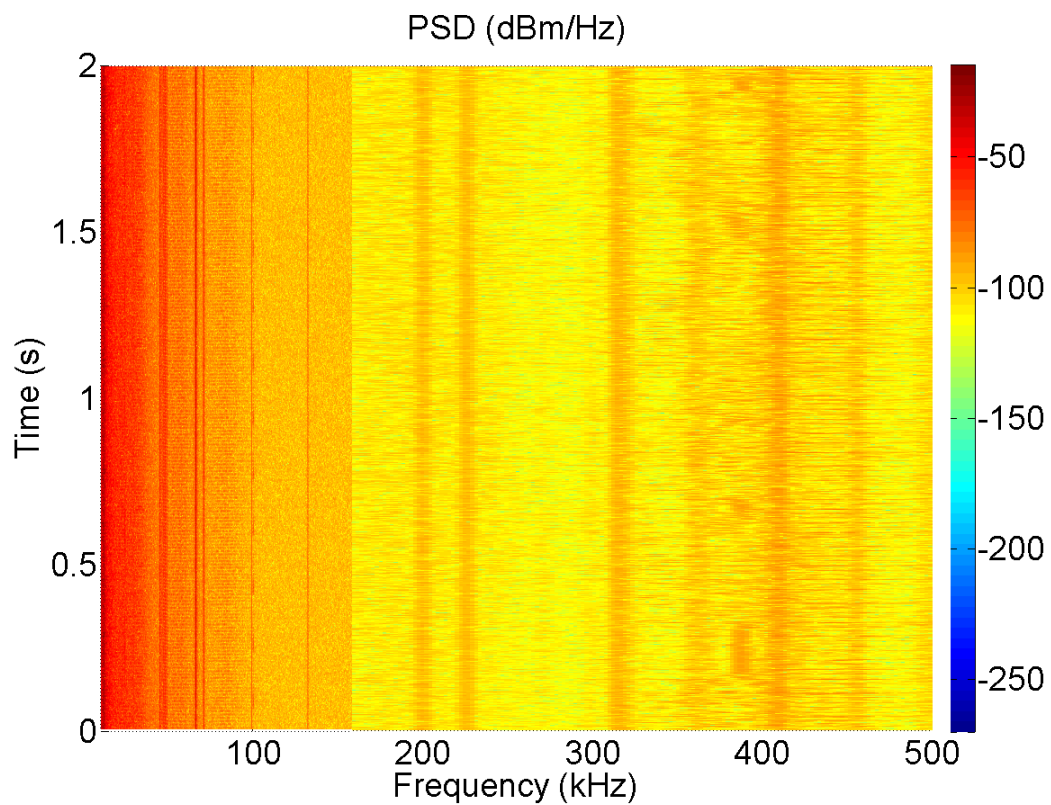


Figura 61: Espectrograma medida 4 aula TSR

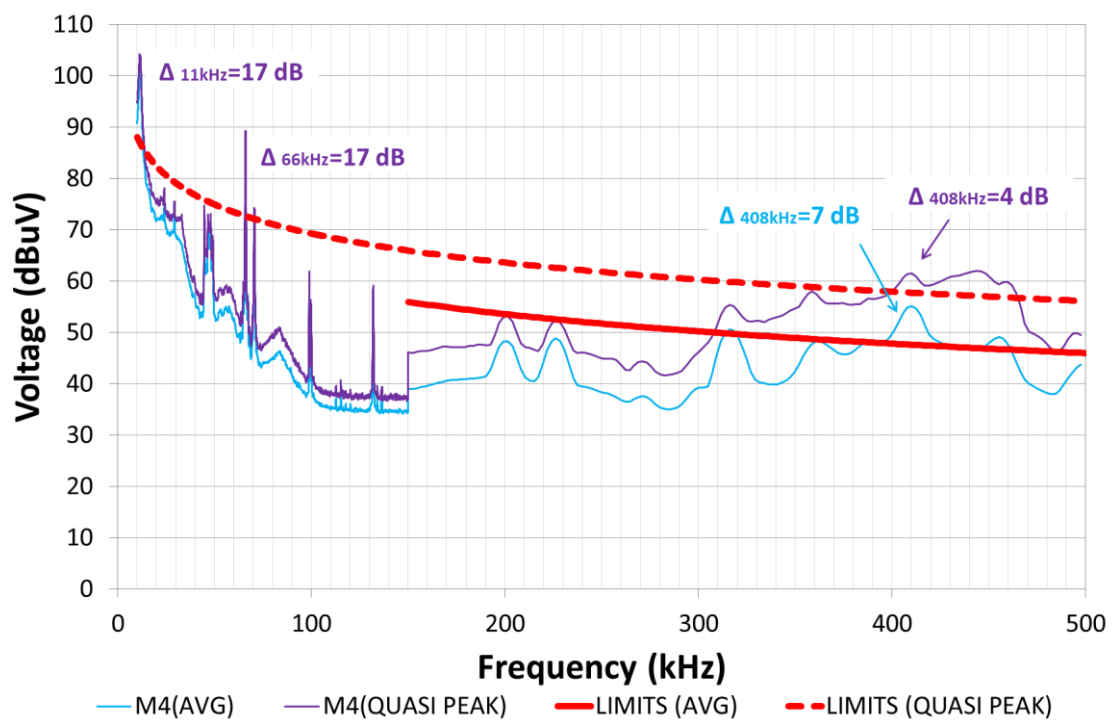


Figura 62: Emisiones medida 4 aula TSR

Los resultados obtenidos en la cuarta medida son los siguientes:

- Dos grandes picos a las frecuencias de 11 kHz y 66 kHz que superan los límites

del detector quasi-pico en 17 dB.

- Emisiones de hasta 74 dBuV a 44 kHz y 72 dBuV a 70 kHz que se quedan cerca de superar los límites del detector quasi-pico.
- Dos grandes picos de emisión a las frecuencias de 99 kHz (61 dBuV) y 132 kHz (58 dBuV).
- En el rango 150-500 kHz se superan los límites tanto del detector quasi-pico en 4 dB como del average en 7 dB en las frecuencias cercanas a 408 kHz.

Medida 5

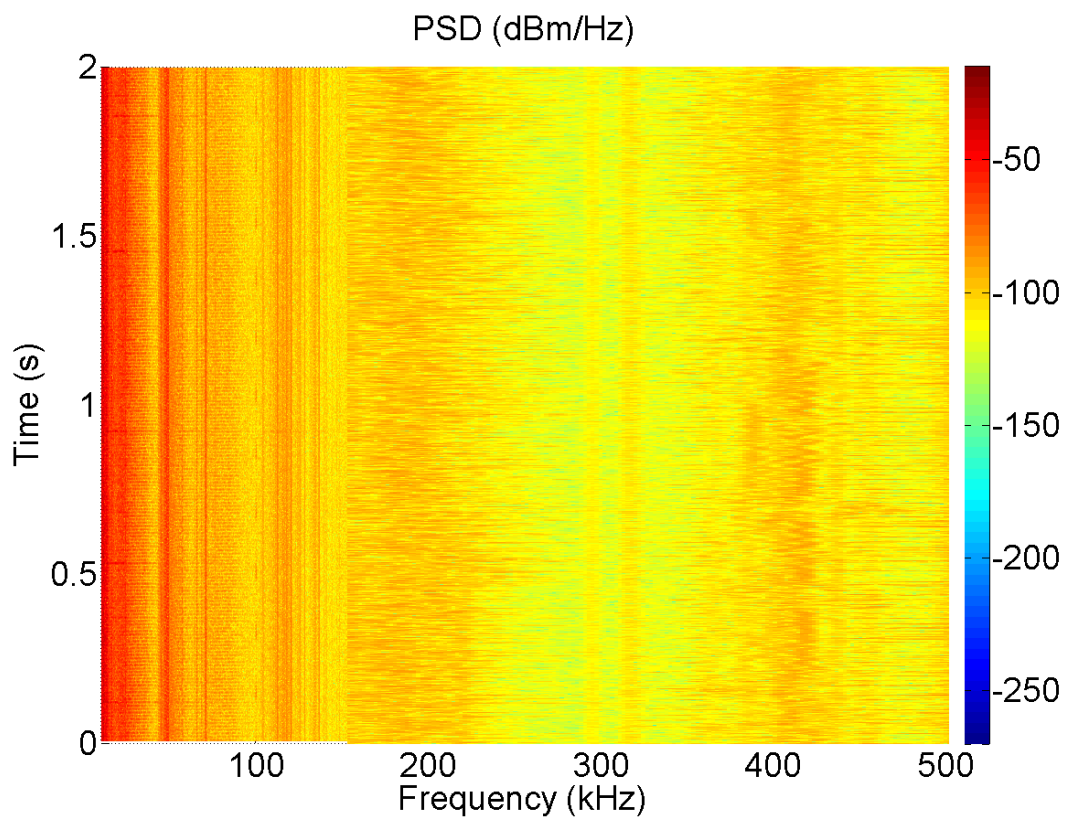


Figura 63: Espectrograma medida 5 aula TSR

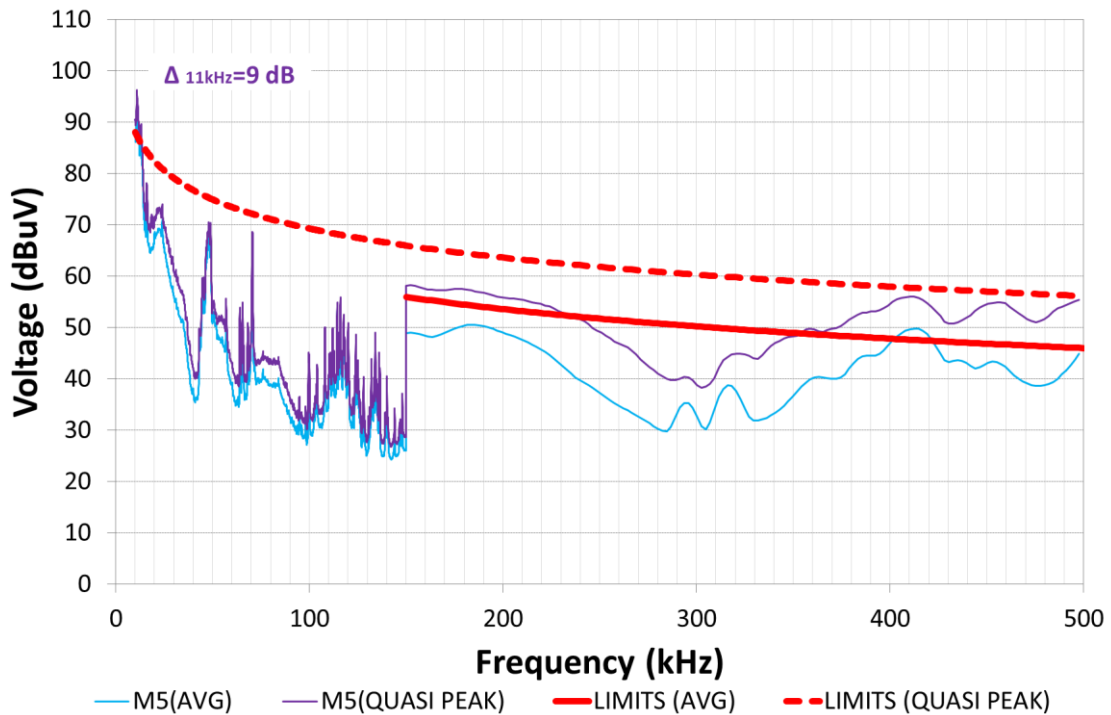


Figura 64: Emisiones medida 5 aula TSR

Los resultados obtenidos son los siguientes:

- Emisión de 96 dBuV a 11 kHz que supera en 9 dB el límite del detector quasi-pico.
- Dos grandes picos que no superan el límite a las frecuencias de 48 kHz (70 dBuV) y 70 kHz (68 dBuV).
- En el rango 100-150 kHz hay un gran número de picos, siendo el de mayor tensión a 116 kHz (55 dBuV).
- En el rango de 150 kHz a 500 kHz solo se supera mínimamente el límite del detector average en las frecuencias cercanas a 412 kHz.

Medida 6

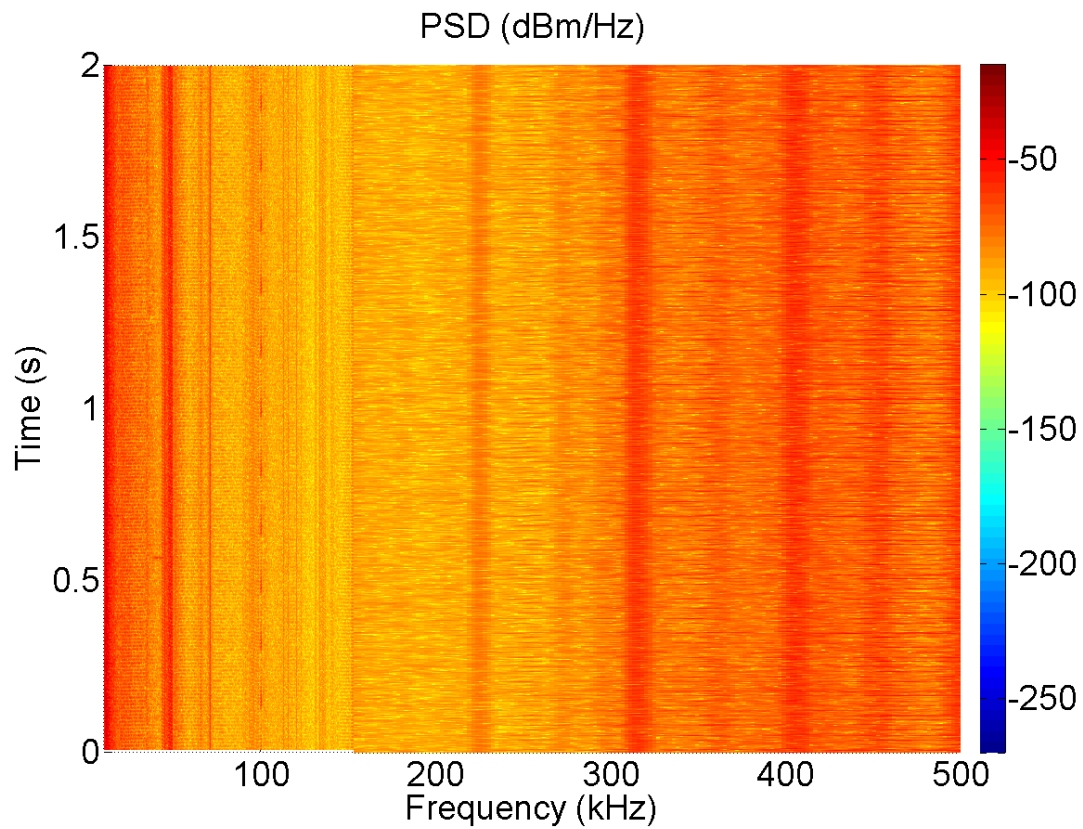


Figura 65: Espectrograma medida 6 aula TSR

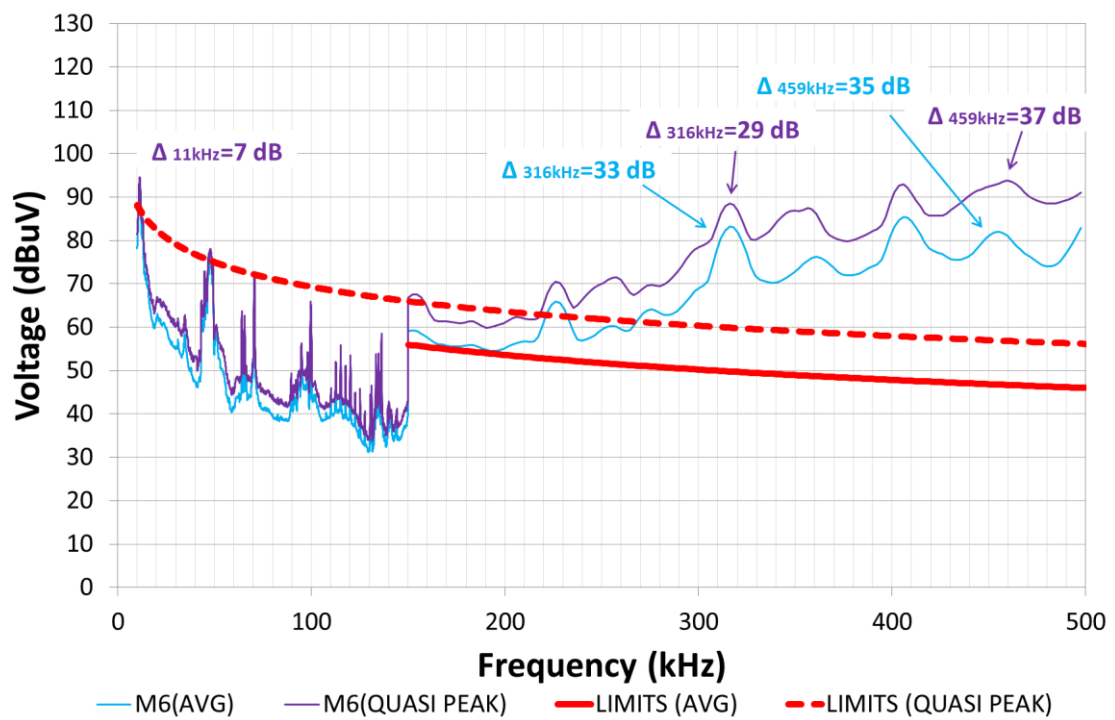


Figura 66: Emisiones medida 6 aula TSR

Los resultados obtenidos en el punto de medida 6 son los siguientes:

- Emisión a la frecuencia de 11 kHz que supera en 7 dB el límite del detector quasi-pico.
- Picos de emisiones que cercanos al límite del detector quasi-pico a las frecuencias 48 kHz (78 dBuV), 70 kHz (72 dBuV), 99 kHz (65 dBuV) y 134 kHz (54 dBuV). Dichas emisiones se observan en el espectrograma que son constantes en el tiempo.
- En el rango de 220 kHz a 500 kHz se superan con gran margen tanto el límite del detector average como el de quasi-pico, teniendo su máximo exponente a la frecuencia de 459 kHz donde se superan en 35 dB y 37 dB respectivamente. Esto puede hacer que se produzcan interferencias con otras emisiones en dicho rango de frecuencias.

Medida 7

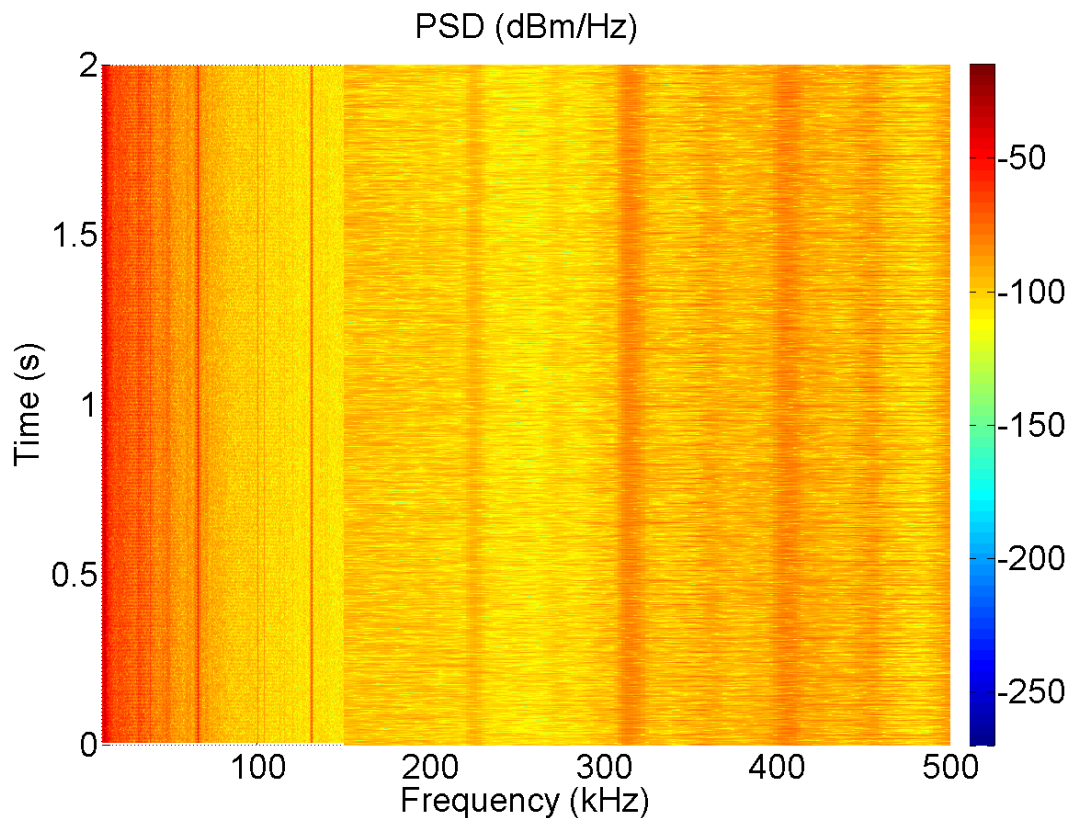


Figura 67: Espectrograma medida 7 aula TSR

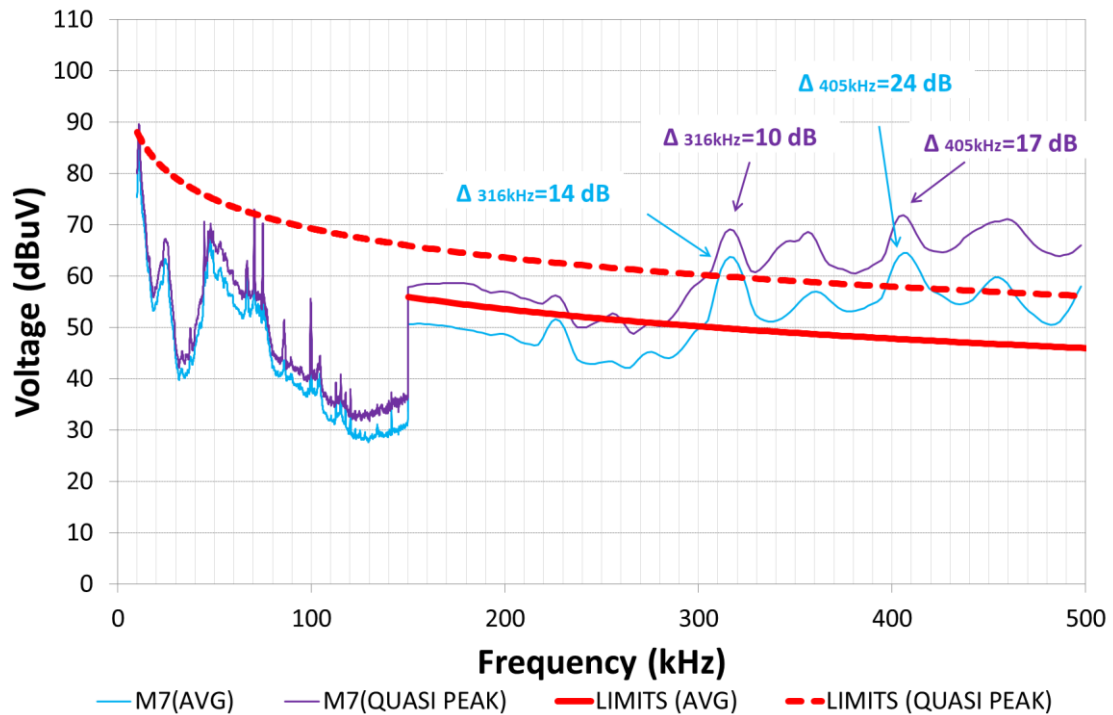


Figura 68: Emisiones medida 7 aula TSR

Los resultados de la séptima medida realizada son los siguientes:

- En el rango de 10 a 150 kHz se observan varias emisiones cercanas al límite del detector quasi-pico a las siguientes frecuencias: 11 kHz (89 dBuV), 24 kHz (67dBuV), 44 kHz (70 dBuV), 70 kHz (73 dBuV) y 99 kHz (55 dBuV).
- En el rango de 300 kHz a 500 kHz se superan los límites tanto del detector average como de quasi-pico. Destacan dos emisiones que son constantes en el tiempo, como se observa en el espectrograma, a las frecuencias de 316 kHz y 405 kHz.

Medida 8

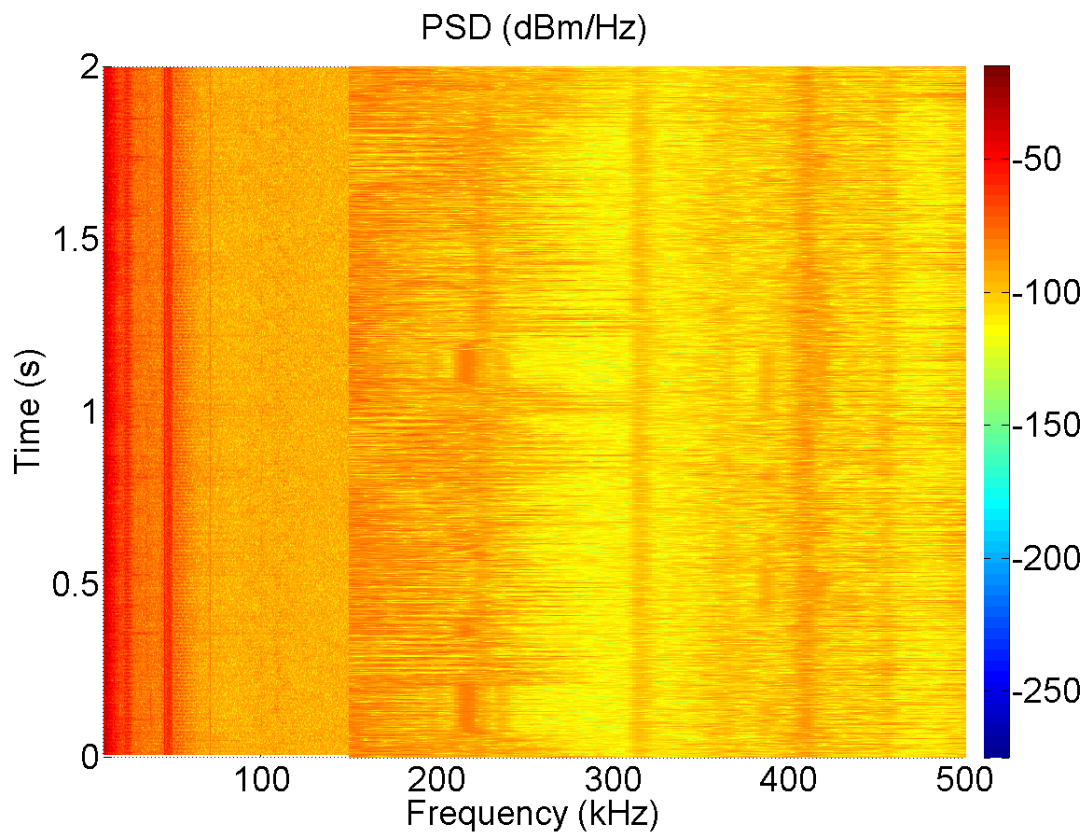


Figura 69: Espectrograma medida 8 laboratorio Atlantis

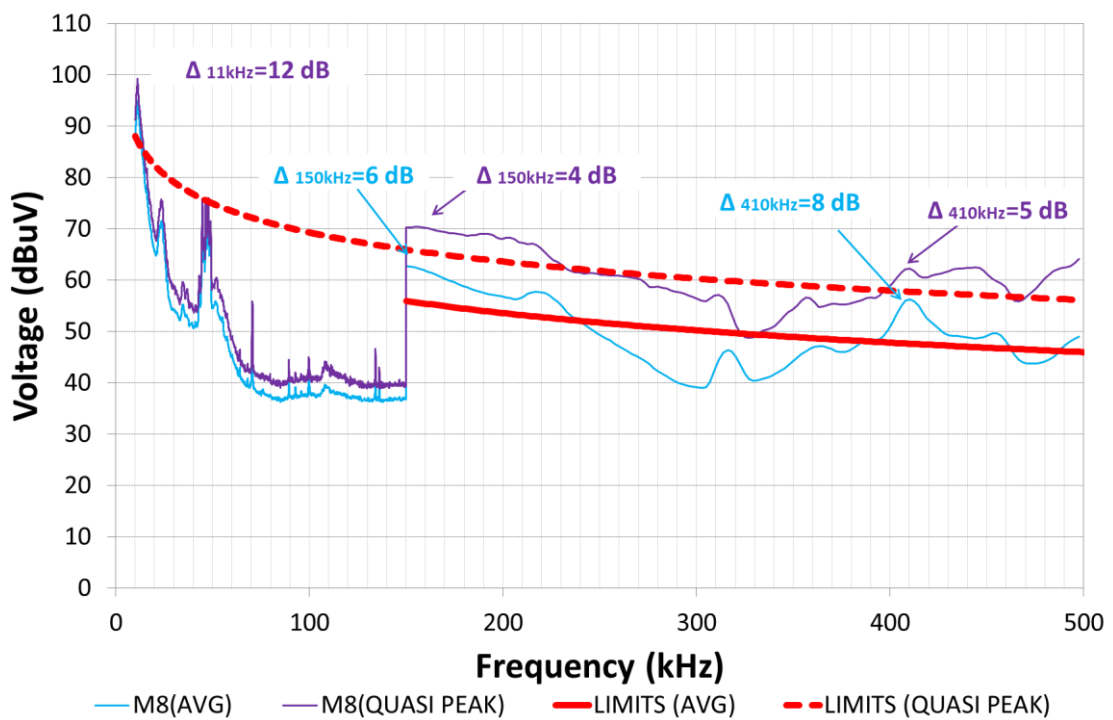


Figura 70: Emisiones medida 8 laboratorio Atlantis

Los resultados obtenidos en esta medida son los siguientes:

- Emisión a la frecuencia de 11 kHz que supera el límite fijado en 11 dB.
- Tres emisiones que no superan el límite del detector quasi-pico a las frecuencias 24 kHz (75 dBuV), 44 kHz (75 dBuV) y 70 kHz (55 dBuV).
- En el rango de 150 kHz a 220 kHz se supera constantemente tanto el límite del detector average como el límite de quasi-pico teniendo su máxima diferencia a 150 kHz, donde se supera en 6 y 4 dB respectivamente.
- En el rango 400-500 kHz se superan los límites constantemente destacando las emisiones cercanas a 410 kHz donde se supera el límite del detector average hasta en 8 dB.

Medida 9

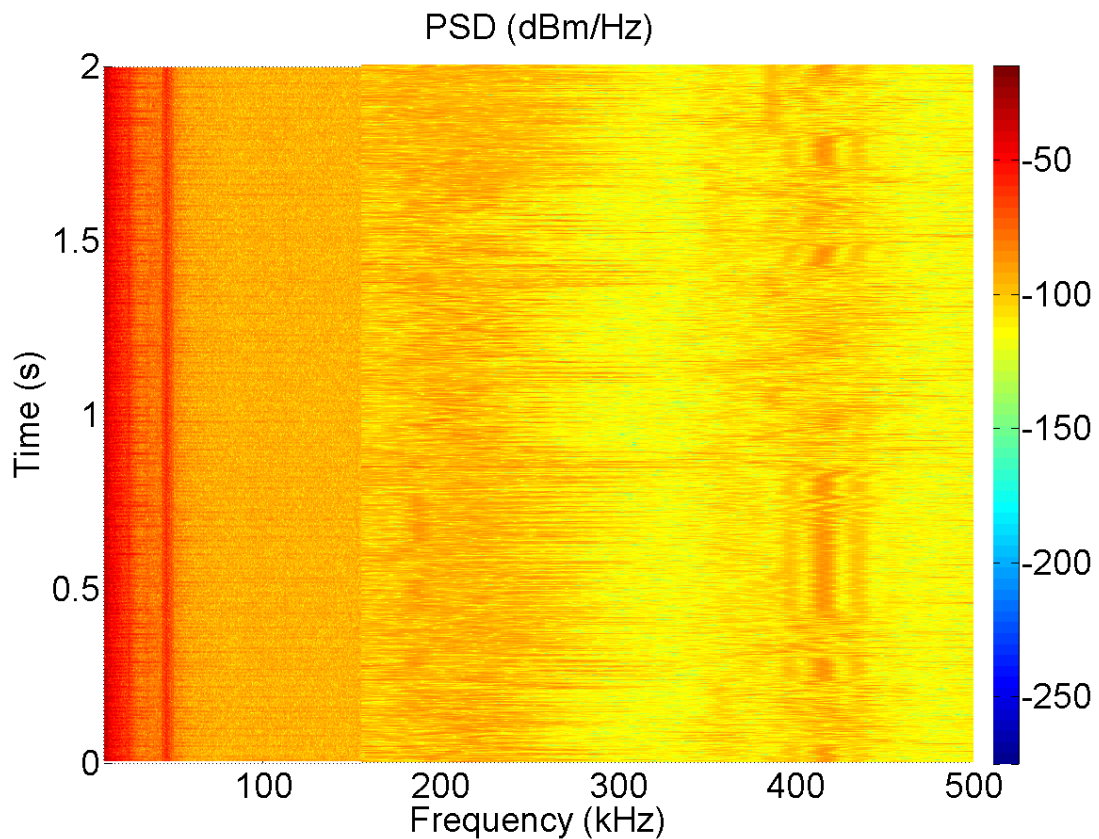


Figura 71: Espectrograma medida 10 laboratorio Atlantis

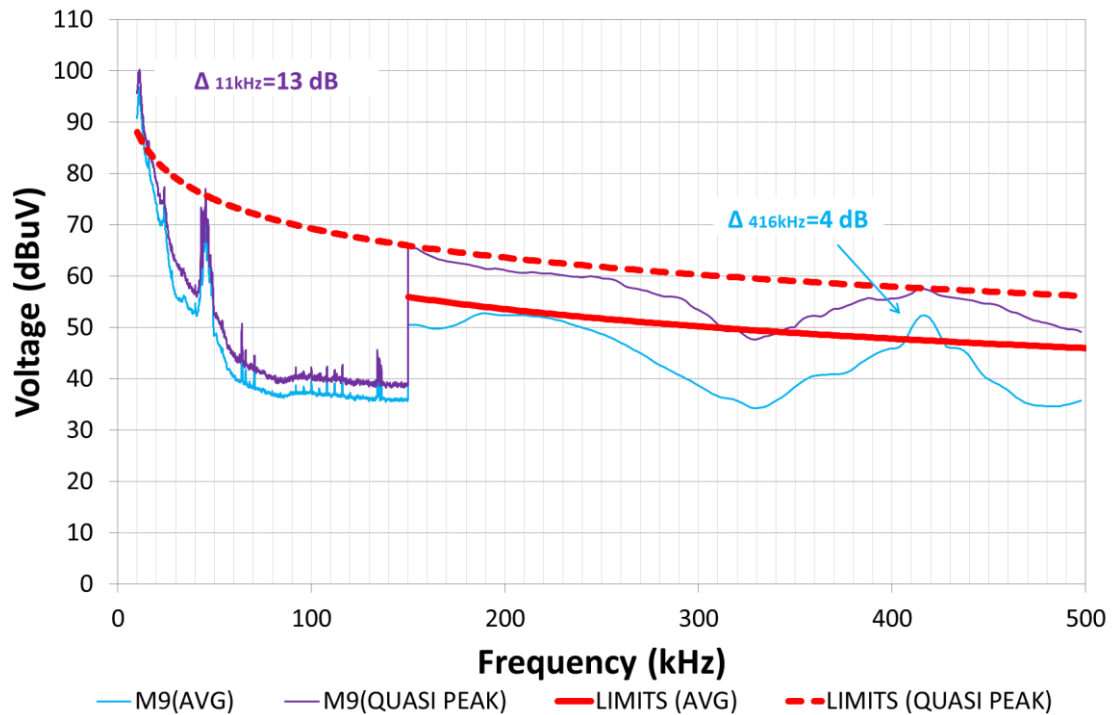


Figura 72: Emisiones medida 9 laboratorio Atlantis

Los resultados obtenidos en esta medida realizada son los siguientes:

- Como en el resto de las medidas realizadas destaca un pico a 11 kHz que supera el límite del detector quasi-pico en 13 dB.
- Emisión cercana al límite del detector quasi-pico a la frecuencia de 45 kHz (76 dBuV)
- En el rango de 150 a 500 kHz solo se supera mínimamente el límite del detector average en las frecuencias cercanas a 416 kHz (4 dB).

Medida 10

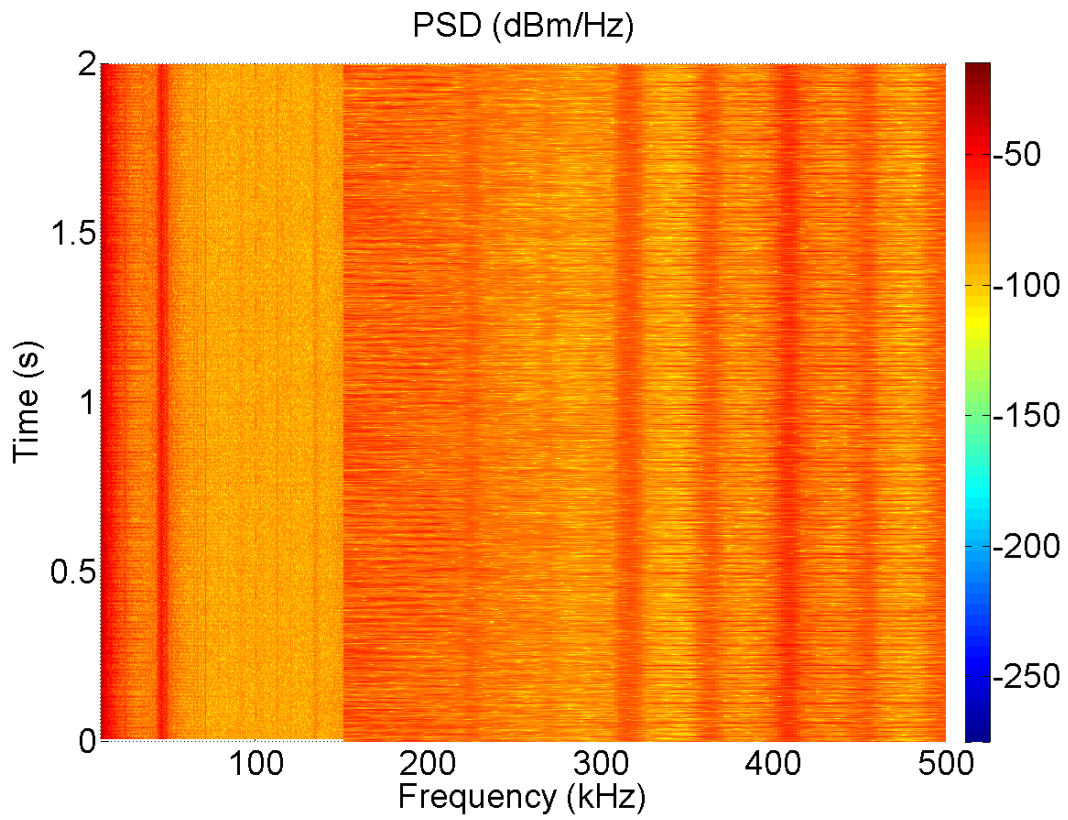


Figura 73: Espectrograma medida 10 laboratorio Atlantis

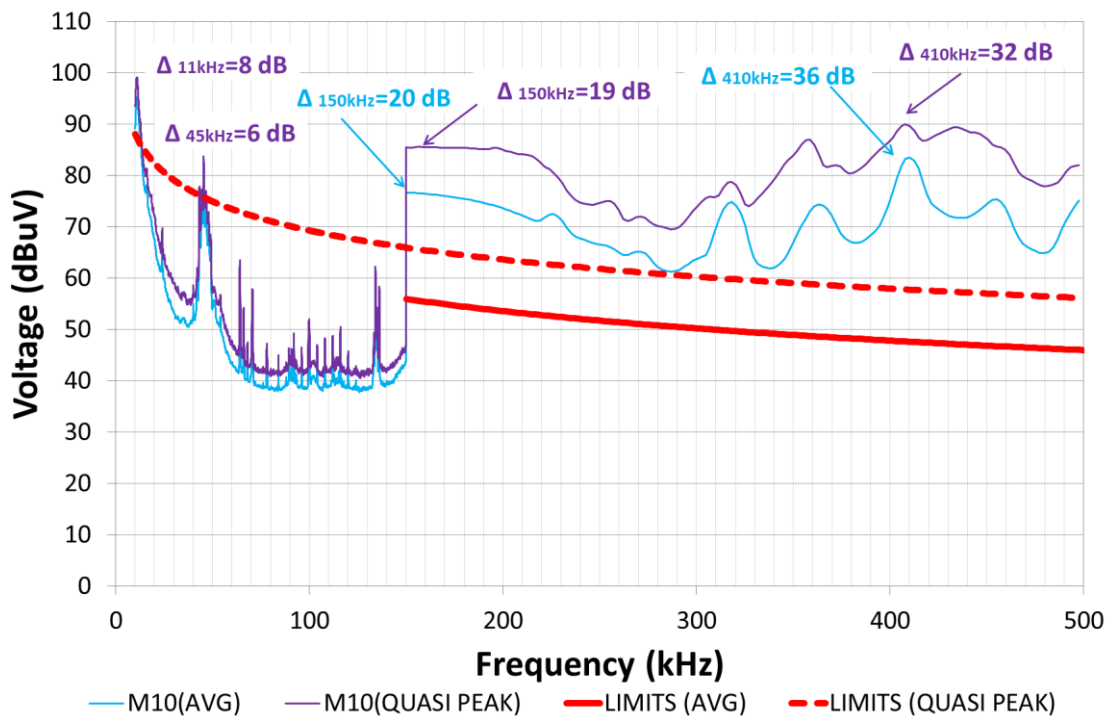


Figura 74: Emisiones medida 10 laboratorio Atlantis

Los resultados obtenidos en la décima medida son los siguientes:

- Dos picos de emisiones a 11 kHz y 45 kHz que superan los límites del detector quasi-pico en 8 y 6 dB respectivamente.
- En el rango de 70 a 150 kHz hay un gran número de emisiones, sin que ninguna de ellas, se aproxime a los límites fijados por EN 50065-1.
- De 150 a 500 kHz se supera en todo el rango de frecuencias los límites marcados tanto del detector average como se quasi-pico. Destacan emisiones a las frecuencias cercanas de 150 kHz, donde se supera el límite del detector average en 20 dB y el de quasi-pico en 19 dB y, emisiones a las frecuencias cercanas a 410 kHz, donde se supera el límite del detector average en 36 dB y el de quasi-pico en 32 dB.

Medida 11

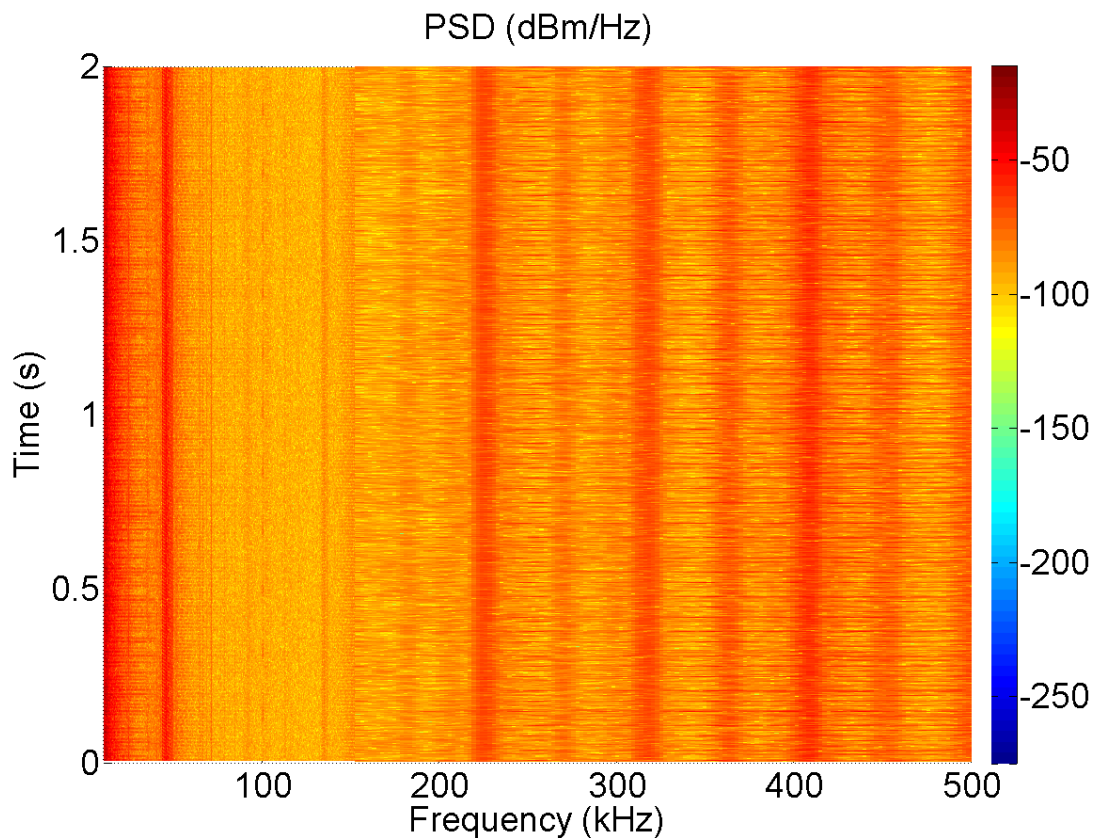


Figura 75: Espectrograma medida 11 laboratorio Atlantis

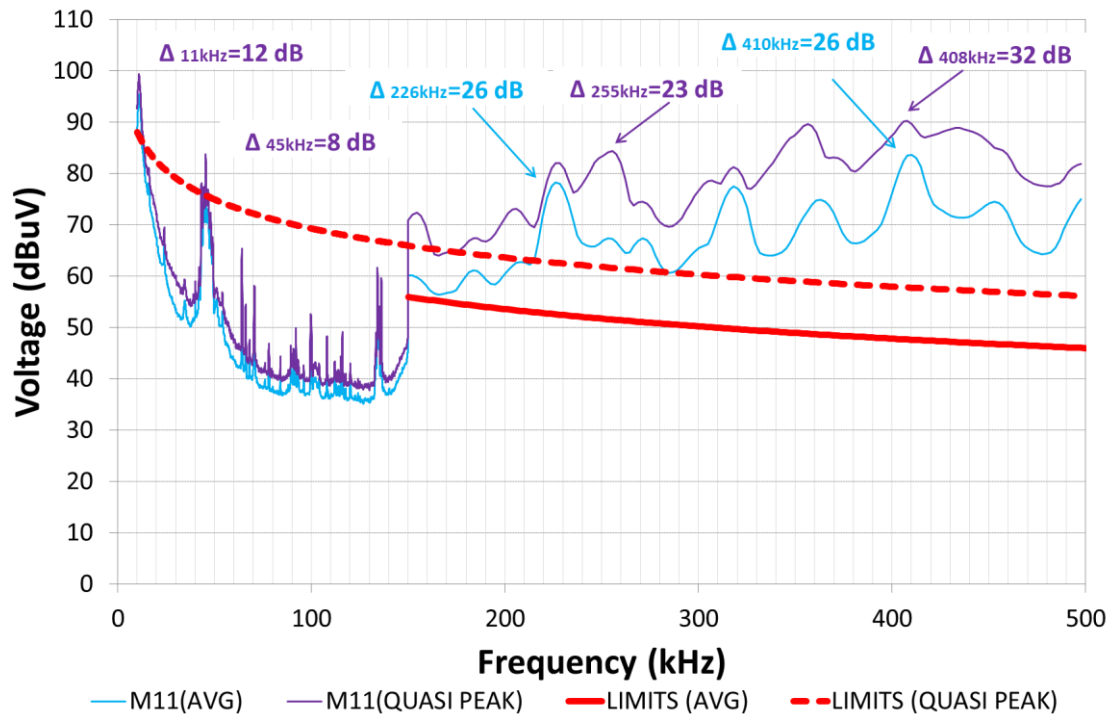


Figura 76: Emisiones medida 11 laboratorio Atlantis

Los resultados obtenidos en esta medida son los siguientes:

- Dos grandes picos a las frecuencias de 11 kHz y 45 kHz que superan el límite en 12 y 8 dB respectivamente.
- Varias emisiones que no superan los límites fijados en el rango de 60 a 150 kHz: 64 kHz (65 dBuV), 70 kHz (58 dBuV), 99 kHz (52 dBuV), 116 kHz (49 dBuV), 134 kHz (61 dBuV) y 136 kHz (59 dBuV).
- En el rango de 150 a 500 kHz se superan los límites del detector average y de quasi-pico. Destaca al superarse el límite del detector average hasta en 26 dB a las frecuencias de 226 kHz y 410 kHz.
- En 408 kHz destaca que se supere el límite del detector quasi-pico en 32 dB.