

TESIS DOCTORAL

Análisis de la capacidad de
PRIME para gestión de red en
entornos con generación
distribuida y sistemas de
almacenamiento

Autora: Noelia Uribe Pérez

Directores: Dr. David de la Vega y Dra. Itziar Angulo

Mayo 2017

Ciemat
Centro de Investigaciones
Energéticas, Medioambientales
y Tecnológicas



Esta Tesis se ha financiado con las ayudas para personal investigador en formación del Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT), Organismo Público de Investigación perteneciente al Ministerio de Economía, Industria y Competitividad, y se ha desarrollado en las instalaciones del Centro de Desarrollo de Energías Renovables (CEDER).

ABSTRACT

One of the most challenging issues facing power line communications or PLC is precisely the use of the electric cable as a transmission medium. Some devices connected to the mains, especially those that include transistor-based electronics, introduce a series of high frequency disturbances, normally in the range of 2-150 kHz, known as supraharmonics. From the point of view of communications, this is a major problem, since it is the operating band of many PLC technologies, so that such emissions can affect communications.

The problem of the classification and evaluation of the supraharmonics lies in the lack of detail in their performance and the extent of their influence on other neighboring devices. In addition, the particular characteristics of the electric cable as a channel of propagation, which make it a hostile medium for communications, make analysis difficult. In fact, it is a current topic in which entities such as CENELEC and CIGRÉ emphasize the need for measurement methodologies and more measures in real environments.

In this context, one of the lines of work of this Thesis aims at characterizing the supraharmonic emissions of the distributed resources of a real microrred in the range 2-150 kHz and at analyzing its influence over the communications. This study concludes that supraharmonic emissions can affect communications and that there are also different levels of affection, which have been demonstrated empirically.

In spite of the above, the rise of PLC systems in the low voltage section is a reality that is being mainly driven by the advanced metering systems. This situation means that, at present, the PLC technology deployed in the low voltage section is being used only for metering.

In this context, the second line of work is intended to demonstrate the feasibility of PLC-PRIME technology for applications beyond advanced metering. In particular, it is tested that PRIME-based advanced metering systems have additional capacity under different traffic scenarios and the feasibility of IP implementation over PRIME is demonstrated in a practical way.

The conclusions of this work provide useful results towards the evolution of the communications in the electrical networks, and therefore, for the future applications of the Smart Grids.

RESUMEN

Uno de los principales desafíos a los que se enfrentan las comunicaciones sobre cable eléctrico o PLC es precisamente el hecho de emplear el cable eléctrico como medio de transmisión. Algunos dispositivos conectados a la red eléctrica, especialmente los que incluyen electrónica basada en transistores, introducen una serie de perturbaciones a alta frecuencia, normalmente en el rango de 2-150 kHz, conocidas como supraarmónicos. Desde el punto de vista de las comunicaciones se trata de un problema importante, ya que es la banda de operación de muchas tecnologías PLC, por lo que dichas emisiones pueden afectar a las comunicaciones.

La dificultad de la clasificación y evaluación de los supraarmónicos radica en el desconocimiento en detalle de su comportamiento y del alcance de su influencia sobre otros dispositivos vecinos. Además, las particulares características del cable eléctrico, que lo convierten en un medio hostil para las comunicaciones, dificultan el análisis. De hecho, se trata de un tema actual en el que entes como CENELEC y CIGRÉ hacen hincapié en la necesidad de metodologías de medida y de más medidas en entornos reales.

En este contexto, una de las líneas de trabajo de esta Tesis busca caracterizar las emisiones supraarmónicas de los recursos distribuidos de una microrred real en el rango 2-150 kHz y analizar su influencia en las comunicaciones. De este estudio se concluye que las emisiones supraarmónicas pueden afectar a las comunicaciones y que además hay diferentes niveles de afectación, que han sido demostrados empíricamente.

Pese a lo anterior, el auge de los sistemas PLC en la sección de baja tensión es una realidad que está siendo principalmente impulsada por los despliegues de medida avanzada. Esta situación hace que, en la actualidad, la tecnología PLC desplegada en la sección de baja tensión se esté empleando únicamente para la medida.

En este contexto, la segunda línea de trabajo pretende demostrar la viabilidad de la tecnología PLC-PRIME para aplicaciones más allá de la medida. En concreto, se comprueba que los sistemas de medida avanzada basados en PRIME cuentan con capacidad adicional bajo diferentes escenarios de tráfico y se demuestra de forma práctica la viabilidad de la implementación de IP sobre PRIME.

Las conclusiones de este trabajo aportan resultados útiles para la evolución de las comunicaciones en las redes eléctricas, y por tanto, también de las futuras aplicaciones de las Smart Grids.

ÍNDICE

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS | 1 |
| 1.1. Presentación y relevancia..... | 3 |
| 1.1.1. Generación distribuida, redes inteligentes y microrredes | 4 |
| 1.1.2. Las comunicaciones en el contexto eléctrico..... | 6 |
| 1.2. Motivación..... | 7 |
| 1.2.1. El ruido en las comunicaciones PLC | 8 |
| 1.2.2. La gestión de las microrredes | 9 |
| 1.3. Objetivos | 10 |
| CAPÍTULO 2. LAS COMUNICACIONES PARA LA MEDIDA INTELIGENTE..... | 13 |
| 2.1. Introducción..... | 15 |
| 2.2. Las comunicaciones sobre cable eléctrico | 19 |
| 2.2.1. El canal PLC: características y modulaciones..... | 21 |
| 2.2.2. Clasificación de comunicaciones sobre cable eléctrico..... | 23 |
| 2.2.2.1. Clasificación según la señal eléctrica..... | 24 |
| 2.2.2.2. Clasificación según el ancho de banda empleado..... | 24 |
| 2.2.2.3. Clasificación según la tensión de la señal | 27 |
| 2.2.3. Estándares PLC | 30 |
| 2.2.4. Problemática de las comunicaciones PLC..... | 32 |
| 2.2.5. PowerLine Intelligent Metering Evolution, PRIME..... | 36 |
| 2.2.5.1. Capa física (PHY) | 36 |
| 2.2.5.2. Capa de acceso al medio (MAC)..... | 38 |
| 2.2.5.3. Capa de convergencia (CL) | 46 |
| 2.2.5.4. Capa de gestión | 47 |
| CAPÍTULO 3. LA MICRORRED DEL CEDER-CIEMAT..... | 49 |
| 3.1. Introducción..... | 51 |
| 3.2. Nivel eléctrico | 52 |
| 3.3. Nivel de comunicaciones | 61 |
| 3.3.1. Aspectos abordados con el sistema de comunicaciones..... | 69 |
| 3.4. Selección del escenario de pruebas | 72 |
| CAPÍTULO 4. EL RUIDO EN LAS COMUNICACIONES EN LA BANDA CENELEC-A | 79 |
| 4.1. Introducción..... | 81 |
| 4.2. Estado del arte..... | 82 |
| 4.2.1. Estudios previos | 82 |
| 4.2.2. Situación actual de la normativa de compatibilidad electromagnética en el rango de frecuencias 2-150 kHz..... | 83 |
| 4.3. Objetivos | 85 |
| 4.4. Metodología de medida | 86 |
| 4.4.1. Definición de las medidas..... | 86 |

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 4.4.2. Configuración de las medidas..... | 87 |
| 4.5. Caracterización del ruido y resultados obtenidos | 89 |
| 4.5.1. Emisiones por fase e influencia de la distancia..... | 89 |
| 4.5.2. Emisiones generadas por recursos distribuidos..... | 94 |
| 4.5.2.1. Turbina hidroeléctrica..... | 95 |
| 4.5.2.2. Bomba hidroeléctrica | 96 |
| 4.5.2.3. Inversor fotovoltaico FV4..... | 97 |
| 4.5.2.4. Cargador de baterías | 98 |
| 4.5.2.5. Inversor fotovoltaico FV1..... | 99 |
| 4.5.2.6. Inversor fotovoltaico FV2..... | 100 |
| 4.5.2.7. Inversor fotovoltaico FV3..... | 101 |
| 4.5.3. Influencia de las emisiones en las comunicaciones NB-PLC | 102 |
| 4.5.3.1. Turbina hidroeléctrica..... | 103 |
| 4.5.3.2. Bomba hidroeléctrica | 104 |
| 4.5.3.3. Inversor fotovoltaico FV4..... | 105 |
| 4.5.3.4. Cargador de baterías | 106 |
| 4.5.3.5. Inversor fotovoltaico FV1..... | 109 |
| 4.5.3.6. Inversor fotovoltaico FV2..... | 111 |
| 4.5.3.7. Inversor fotovoltaico FV3..... | 112 |
| 4.6. Comparativa con límites propuestos y medidas de mitigación | 114 |
| 4.6.1. Comparativa con límites propuestos y normativa de los equipos..... | 114 |
| 4.6.2. Posibles medidas de mitigación | 116 |
| 4.7. Conclusiones | 117 |
| 4.7.1. Características de las emisiones no deseadas en la banda CENELEC-A | 117 |
| 4.7.2. Influencia en las comunicaciones PRIME | 119 |
| <i>CAPÍTULO 5. GESTIÓN DISTRIBUIDA MEDIANTE PRIME</i> | 123 |
| 5.1. Introducción..... | 125 |
| 5.2. Estado del arte..... | 125 |
| 5.3. Objetivos | 127 |
| 5.4. Metodología de medida | 127 |
| 5.4.1. Definición de las medidas..... | 128 |
| 5.4.1.1. Parámetros a evaluar | 128 |
| 5.4.1.2. Variables de análisis | 128 |
| 5.4.2. Equipamiento para las medidas | 131 |
| 5.4.3. Resumen de las medidas a realizar | 135 |
| 5.5. Resultados obtenidos | 136 |
| 5.5.1. Ocupación de canal..... | 136 |
| 5.5.2. Latencia..... | 144 |
| 5.5.3. Tasa de bits..... | 146 |
| 5.5.3.1. Comparativa con medidas de laboratorio | 146 |
| 5.5.3.2. Evaluación de la influencia del tipo de comunicación en función de los niveles de repetición, número de nodos y tipo de tráfico..... | 146 |
| 5.5.3.3. Evaluación de los parámetros de configuración TCP | 150 |

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 5.5.3.4. Extensión del análisis a un mayor número de nodos..... | 155 |
| 5.5.3.5. Comparativa TCP frente a UDP | 157 |
| 5.5.3.6. Extensión del análisis a distintos niveles de repetición..... | 162 |
| 5.6. Análisis de la capacidad adicional en un canal que implementa NB-PLC para AMI | 172 |
| 5.6.1. Posibilidades del canal para la gestión de recursos distribuidos..... | 172 |
| 5.6.2. Capacidad de PRIME para incrementar el rendimiento en el canal | 177 |
| 5.7. Conclusiones | 179 |
| <i>CAPÍTULO 6. APORTACIONES DE LA TESIS Y LÍNEAS FUTURAS</i> | 185 |
| 6.1. Aportaciones..... | 187 |
| 6.2. Líneas futuras | 192 |
| 6.3. Difusión de resultados | 193 |
| 6.3.1. Publicaciones internacionales..... | 193 |
| 6.3.2. Congresos internacionales..... | 194 |
| 6.3.3. Congresos nacionales | 195 |
| 6.3.4. Contribuciones a comités internacionales..... | 196 |
| <i>REFERENCIAS Y GLOSARIO.....</i> | 197 |
| REFERENCIAS | 199 |
| GLOSARIO | 213 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1. Esquema del sistema eléctrico convencional [3]. | 3 |
| Figura 2. Esquema de una red eléctrica inteligente o <i>Smart Grid</i> . [10]. | 5 |
| Figura 3. Esquema de una microrred eléctrica [11]. | 6 |
| Figura 4. Funcionalidades del sistema de comunicaciones en una SG [16]. | 7 |
| Figura 5. Ejemplo de aplicación de un sistema PLC para medida avanzada en diferentes entornos [54]. | 19 |
| Figura 6. Generación de una señal PLC [58]. | 20 |
| Figura 7. Especificación de bandas CENELEC en Europa y comparativa con la regulación FCC en Estados Unidos [81]. | 26 |
| Figura 8. Esquema del sistema de suministro eléctrico en Europa [56]. | 28 |
| Figura 9. Esquema del sistema de suministro eléctrico típico en Asia y América [56]. | 28 |
| Figura 10. Gráfico de la variación de la atenuación en PLC con el tiempo y la frecuencia [56]. | 33 |
| Figura 11. Representación del canal PLC y de los diferentes tipos de ruidos existentes así como su distribución espectral de potencia con la frecuencia. Adaptado de [69]. | 35 |
| Figura 12. Ejemplo de una señal PLC con diferentes tipos de ruidos identificados [107]. | 35 |
| Figura 13. Modelo de capas empleado en la especificación PRIME [102]. | 36 |
| Figura 14. Diagrama de bloques del transmisor PHY en PRIME [102]. | 37 |
| Figura 15. Formato de trama en PRIME [102]. | 37 |
| Figura 16. Diferentes estados posibles de un nodo de servicio en una subred PRIME [102]. | 40 |
| Figura 17. Estructura del direccionamiento y tamaños en PRIME [102]. | 40 |
| Figura 18. Estructura de un <i>frame</i> en PRIME [102]. | 41 |
| Figura 19. Estructura de una PDU MAC genérica en PRIME. | 41 |
| Figura 20. Captura del programa ZPM para una de las subredes de la microrred del CEDER-CIEMAT. | 46 |
| Figura 21. Capa de convergencia y subcapas en PRIME. | 47 |
| Figura 22. Fotografías aéreas del CEDER-CIEMAT: vista general y localización de los diferentes Centros de Transformación. | 51 |
| Figura 23. Esquema unifilar del conexionado entre CTs en la microrred del CEDER-CIEMAT. | 53 |
| Figura 24. Localización de los diferentes recursos distribuidos (generación y almacenamiento) con que cuenta la microrred del CEDER-CIEMAT en la actualidad | 57 |
| Figura 25. Fotografías de los CTs PEPAl y PEPAlI, respectivamente, con los aerogeneradores. | 59 |
| Figura 26. Dispositivos de medida y almacenamiento de datos: a) SM monofásico [114]; b) SM trifásico [115] y c) DC [113]. | 62 |
| Figura 27. Despliegue de fibra óptica y cobre para conectar los <i>switches</i> de acceso en los diferentes puntos de la microrred del CEDER-CIEMAT. | 63 |
| Figura 28. Topología de red de comunicaciones en el CEDER-CIEMAT. | 64 |
| Figura 29. Fotografías con la instalación de SMs y concentradores de datos en la microrred del CEDER-CIEMAT. | 66 |

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 30. Diagrama de la conexión de dos DCs en configuración maestro-esclavo para CTs con doble transformador [113]. | 68 |
| Figura 31. Esquema general de acceso y funcionalidades de los DCs instalados en la microrred del CEDER-CIEMAT [113]. | 68 |
| Figura 32. Menú de consulta con la información disponible para un SM de la subred CT-PEPAIII. | 70 |
| Figura 33. Esquema de una tarea programada para petición de datos de medida a los SMs. | 71 |
| Figura 34. Visualización de consumos y generación en la microrred del CEDER-CIEMAT. | 71 |
| Figura 35. Programación del grupo bombeo turbinado de acuerdo a las características de la tarifa contratada en el CEDER-CIEMAT. | 72 |
| Figura 36. Técnicas de gestión de carga para optimización de recursos energéticos. | 73 |
| Figura 37. Esquema del CT-PEPAIII, parte de la microrred del CEDER-CIEMAT. | 73 |
| Figura 38. Imagen del ramal de la caseta en el CT-PEPAIII del CEDER-CIEMAT. | 74 |
| Figura 39. Imagen de las tres pérgolas fotovoltaicas, FV1, FV2 y FV3, del ramal de la caseta en el CT-PEPAIII del CEDER-CIEMAT. | 74 |
| Figura 40. Imágenes de los tres inversores fotovoltaicos de las pérgolas FV1, FV2 y FV3, respectivamente, del ramal de la caseta en el CT-PEPAIII del CEDER-CIEMAT [116]. | 75 |
| Figura 41. Imagen de la bancada de baterías de Plomo-Ácido y el inversor-cargador asociado del ramal de la caseta en el CT-PEPAIII del CEDER-CIEMAT [117]. | 75 |
| Figura 42. Imagen del ramal de la zona bombeo-turbinado en el CT-PEPAIII del CEDER-CIEMAT. | 75 |
| Figura 43. Imagen de la pérgola fotovoltaica FV4 y su inversor asociado de la zona bombeo-turbinado en el CT-PEPAIII del CEDER-CIEMAT [116]. | 76 |
| Figura 44. Imagen de la turbina hidráulica y su generador asociado de la zona bombeo-turbinado en el CT-PEPAIII del CEDER-CIEMAT [118], [119]. | 76 |
| Figura 45. Imágenes del armario de condensadores de la zona bombeo-turbinado en el CT-PEPAIII del CEDER-CIEMAT [120]. | 76 |
| Figura 46. Imágenes de la turbina hidráulica basada en el tornillo de Arquímedes de la zona bombeo-turbinado en el CT-PEPAIII del CEDER-CIEMAT. | 77 |
| Figura 47. Imagen de las bombas hidráulicas y su cuadro eléctrico de la zona bombeo-turbinado en el CT-PEPAIII del CEDER-CIEMAT [121]. | 78 |
| Figura 48. Topología de la subred de comunicaciones PRIME en el CT-PEPAIII del CEDER-CIEMAT. | 78 |
| Figura 49. Localización de las emisiones por parte de diferentes equipos en el rango 2 - 500 kHz [126]. | 82 |
| Figura 50. Valores límites de emisiones según EN 50065-1, CISPR15 y IEC TS 62578. Las bandas verticales rojas delimitan el rango 2-150 kHz [152]. | 85 |
| Figura 51. Pérdidas del acoplador capacitivo TABT-2: (a) inserción, inferiores a 1 dB y (b) de retorno, menor de - 12 dB a partir de 30 kHz y hasta frecuencias mayores de 600 kHz. | 87 |
| Figura 52. Configuración de las medidas realizadas en el CEDER-CIEMAT para la obtención de los espectros en la salida AC del DER bajo test. | 88 |

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 53. Configuración de las medidas realizadas en el CEDER-CIEMAT para la obtención de los espectros en la entrada del SM asociado al DER bajo test. | 88 |
| Figura 54. Equipos y configuración empleados en las medidas en el CEDER-CIEMAT para la obtención de espectros en el rango supraarmónico. | 88 |
| Figura 55. Espectro obtenido a la salida AC del inversor FV4 para los estados <i>paro</i> (“off”) y <i>arranque</i> (“start”). | 91 |
| Figura 56. Espectro obtenido a la salida AC del inversor FV4 para los estados <i>paro</i> (“off”) y <i>estable</i> (“steady”). | 91 |
| Figura 57. Espectro obtenido a la entrada del SM FV4 en su posición original para los estados <i>paro</i> (“off”) y <i>arranque</i> (“start”). | 92 |
| Figura 58. Espectro obtenido a la a la entrada del SM FV4 en su posición original para los estados <i>paro</i> (“off”) y <i>estable</i> (“steady”). | 92 |
| Figura 59. Espectro obtenido a la entrada del SM FV4 trasladado de sitio para los estados <i>paro</i> (“off”) y <i>arranque</i> (“start”). | 93 |
| Figura 60. Espectro obtenido a la a la entrada del SM FV4 trasladado de sitio para los estados <i>paro</i> (“off”) y <i>estable</i> (“steady”). | 93 |
| Figura 61. Espectro obtenido a la entrada del SM de la turbina para diferentes estados de operación: <i>apagado</i> (“off”), <i>arranque</i> (“start”) y <i>funcionamiento estable</i> (“steady”), con el resto de dispositivos desconectados. | 95 |
| Figura 62. Espectro obtenido a la entrada del SM de la turbina para diferentes potencias de operación con el resto de dispositivos desconectados. | 96 |
| Figura 63. Espectro obtenido a la entrada del SM de la bomba para diferentes estados de operación: <i>apagado</i> (“off”), <i>arranque</i> (“start”) y <i>funcionamiento estable</i> (“steady”) con el resto de dispositivos desconectados. | 97 |
| Figura 64. Espectro obtenido a la entrada del SM del inversor fotovoltaico FV4 para diferentes estados de operación: <i>encendido</i> (“on”), <i>arranque</i> (“start”) y <i>funcionamiento estable</i> (“steady”) con el resto de dispositivos desconectados. | 98 |
| Figura 65. Espectro obtenido a la entrada del SM del cargador de baterías para diferentes estados de operación: <i>apagado</i> (“off”), <i>stand-by</i> y <i>encendido</i> (“on”) con el resto de dispositivos desconectados. | 99 |
| Figura 66. Espectro obtenido a la entrada del SM del inversor fotovoltaico FV1 para diferentes estados de operación: <i>encendido</i> (“on”), <i>arranque</i> (“start”) y <i>funcionamiento estable</i> (“steady”) con el resto de dispositivos desconectados. | 100 |
| Figura 67. Espectro obtenido a la entrada del SM del inversor fotovoltaico FV2 para diferentes estados de operación: <i>encendido</i> (“on”), <i>arranque</i> (“start”) y <i>funcionamiento estable</i> (“steady”) con el resto de dispositivos desconectados. | 101 |
| Figura 68. Espectro obtenido a la entrada del SM del inversor fotovoltaico FV3 para diferentes estados de operación: <i>encendido</i> (“on”), <i>arranque</i> (“start”) y <i>funcionamiento estable</i> (“steady”) con el resto de dispositivos desconectados. | 102 |
| Figura 69. Ejemplo de topología de la subred PRIME para la microrred del CEDER-CIEMAT. | 103 |
| Figura 70. Espectro obtenido a la entrada del SM de la turbina para diferentes estados de operación: <i>apagado</i> (“off”), <i>encendido</i> (“on”), <i>arranque</i> (“start”) y | |

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <i>funcionamiento estable</i> (“steady”) con el resto de dispositivos encendidos. | 104 |
| Figura 71. Espectro obtenido a la entrada del SM de la bomba para diferentes estados de operación: <i>apagado</i> (“off”), <i>arranque</i> (“start”) y <i>funcionamiento estable</i> (“steady”) con el resto de dispositivos encendidos. | 105 |
| Figura 72. Cambio de <i>switch</i> del SN de la bomba cuando la bomba está operando y el resto de dispositivos encendidos. | 105 |
| Figura 73. Espectro obtenido a la entrada del SM del inversor FV4 para diferentes estados de operación: <i>encendido</i> (“on”), <i>arranque</i> (“start”) y <i>funcionamiento estable</i> (“steady”) con el resto de dispositivos encendidos. | 106 |
| Figura 74. Espectro obtenido a la entrada del SM del cargador de baterías para diferentes estados de operación: <i>apagado</i> (“off”), <i>stand-by</i> y <i>encendido</i> (“on”), con el resto de dispositivos encendidos. | 107 |
| Figura 75. Evolución de la subred PRIME durante (a) fase <i>stand-by</i> y (b) fase <i>encendido</i> del cargador de baterías. Los estados del SN de FV3 y del SN del cargador cambian a <i>desconectado</i> cuando el cargador se enciende. | 107 |
| Figura 76. Tráfico MAC que muestra los últimos mensajes <i>Keep Alive</i> registrados y los procesos de baja iniciados por el BN para el SN del inversor FV3 y el SN del cargador tras el encendido del cargador. | 109 |
| Figura 77. Secuencia de tramas MAC entre el BN y el SN del inversor FV3 y entre el BN y el SN del cargador, respectivamente. | 109 |
| Figura 78. Espectro obtenido a la entrada del SM del inversor FV1 para diferentes estados de operación: <i>encendido</i> (“on”), <i>arranque</i> (“start”) y <i>estable</i> (“steady”) con el resto de inversores encendidos y el cargador apagado. . | 110 |
| Figura 79. Espectro obtenido a la entrada del SM del inversor FV1 para diferentes estados de operación del cargador: <i>apagado</i> (“off”), <i>stand-by</i> y <i>encendido</i> (“on”), con el resto de inversores encendidos. | 110 |
| Figura 80. Espectro obtenido a la entrada del SM del inversor FV2 para diferentes estados de operación: <i>encendido</i> (“on”), <i>arranque</i> (“start”) y <i>funcionamiento estable</i> (“steady”) con el resto de inversores encendidos y el cargador apagado. | 111 |
| Figura 81. Espectro obtenido a la entrada del SM del inversor FV2 para diferentes estados de operación del cargador: <i>apagado</i> (“off”), <i>stand-by</i> y <i>encendido</i> (“on”), con el resto de inversores encendidos. | 112 |
| Figura 82. Espectro obtenido a la entrada del SM del inversor FV3 para diferentes estados de operación: <i>encendido</i> (“on”), <i>arranque</i> (“start”) y <i>estable</i> (“steady”) con el resto de inversores encendidos y el cargador apagado. . | 113 |
| Figura 83. Espectro obtenido a la entrada del SM del inversor FV3 para diferentes estados de operación del cargador: <i>apagado</i> (“off”), <i>stand-by</i> y <i>encendido</i> (“on”), con el resto de inversores encendidos. | 113 |
| Figura 84. Localización aproximada de las emisiones supraarmónicas de los DER analizados de acuerdo a los límites de emisión fijados por EN 50065-1. Las líneas rojas delimitan el rango 2- 150 kHz. | 114 |
| Figura 85. Petición de perfil temporal al SM con número de serie ZIV0038301037 vía servicio web, especificando fecha inicio, fecha fin y fuente (SM). | 130 |
| Figura 86. Esquema del despliegue de equipos para la medida de la capacidad del canal para la comunicación entre PBN-BN y PBN-SNB (áreas punteadas) en el CT-PEPAIII del CEDER-CIEMAT. | 132 |

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 87. Esquema del despliegue de equipos para la medida de la capacidad del canal para la comunicación entre PBN-SNA y PBN-SNB (áreas punteadas) en el CT-PEPAIII del CEDER-CIEMAT..... | 132 |
| Figura 88. Ejemplo de topología a nivel de comunicaciones para los esquemas de la Figura 86 y Figura 87..... | 133 |
| Figura 89. Esquema sintético del conexionado y comunicaciones existentes en las pruebas realizadas con iperf en el CT-PEPAIII del CEDER-CIEMAT..... | 134 |
| Figura 90. Captura del programa iperf en el lado del cliente..... | 134 |
| Figura 91. Captura del programa iperf en el lado del servidor..... | 135 |
| Figura 92. Flujo de tramas MAC generado por el tráfico de control existente en la subred..... | 138 |
| Figura 93. Representación temporal de tramas PRIME en el canal con sólo tráfico de control..... | 139 |
| Figura 94. Representación temporal de tramas PRIME en el canal con sólo tráfico de control: vista ampliada de la sección punteada en la Figura 93..... | 139 |
| Figura 95. Representación temporal de tramas PRIME en el canal con sólo tráfico de control: vista ampliada de la sección punteada en la Figura 94..... | 139 |
| Figura 96. Representación temporal de tramas PRIME en el canal con sólo tráfico de control: vista ampliada de la sección punteada en la Figura 95..... | 139 |
| Figura 97. Flujo de tramas MAC generado por peticiones instantáneas a todos los SMs de la subred..... | 140 |
| Figura 98. Representación temporal de tramas PRIME en el canal con tráfico de control (en azul) y peticiones instantáneas a todos los SMs de la subred (en rojo)..... | 140 |
| Figura 99. Representación temporal de tramas PRIME en el canal con tráfico de control (en azul) y peticiones instantáneas a todos los SMs de la subred (en rojo): vista ampliada de la sección punteada en la Figura 98..... | 141 |
| Figura 100. Representación temporal de tramas PRIME en el canal con tráfico de control (en azul) y peticiones instantáneas a todos los SMs de la subred (en rojo): vista ampliada de la sección punteada en la Figura 99..... | 141 |
| Figura 101. Representación temporal de tramas PRIME en el canal con tráfico de control (en azul) y peticiones instantáneas a todos los SMs de la subred (en rojo): vista ampliada de la sección punteada en la Figura 100..... | 141 |
| Figura 102. Flujo de tramas MAC generado por petición de perfil temporal al SM con número de serie ZIV0038301037..... | 142 |
| Figura 103. Representación temporal de tramas PRIME en el canal con tráfico de control (en azul) y peticiones de perfil temporal a un SMs (en rojo)..... | 142 |
| Figura 104. Representación temporal de tramas PRIME en el canal con tráfico de control (en azul) y peticiones de perfil temporal a un SMs (en rojo): vista ampliada de la sección punteada en la Figura 103..... | 143 |
| Figura 105. Representación temporal de tramas PRIME en el canal con tráfico de control (en azul) y peticiones de perfil temporal a un SMs (en rojo): vista ampliada de la sección punteada en la Figura 104..... | 143 |
| Figura 106. Representación temporal de tramas PRIME en el canal con tráfico de control (en azul) y peticiones de perfil temporal a un SMs (en rojo): vista ampliada de la sección punteada en la Figura 105..... | 143 |

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 107. Superposición de tramas de medida sin tráfico de control: peticiones instantáneas a todos los SMs de la subred (en rojo) y peticiones de perfil temporal un SMs (en verde)..... | 143 |
| Figura 108. Superposición de tramas de medida sin tráfico de control: peticiones instantáneas a todos los SMs de la subred (en rojo) y peticiones de perfil temporal un SMs (en verde): vista ampliada de la sección punteada en la Figura 107 | 143 |
| Figura 109. Valores medios de latencia para diferentes tipos de tráfico. Se incluyen dos tipos de comunicación: BN-SNB(i) (líneas sólidas) y SNA(0)-SNB(i) (líneas punteadas). Los niveles de repetición de SNB están indicados en el eje de abscisas. | 144 |
| Figura 110. Topologías de la subred con 9 nodos conectados y tipos de comunicación medidos en cada caso. | 147 |
| Figura 111. Topologías de la subred con 13 nodos conectados y tipos de comunicación medidos en cada caso..... | 147 |
| Figura 112. Representación de la tasa de bits obtenida para diferentes tipos de comunicación según tipo de tráfico y números de nodos. | 148 |
| Figura 113. Representación de la tasa de bits obtenida según configuraciones TCP para comunicación entre BN y SN sin repetición. Se incluyen medidas para varios números de nodos y diferentes tipos de tráfico..... | 151 |
| Figura 114. Representación de la tasa de bits obtenida según configuraciones TCP para comunicación entre dos nodos. Se incluyen medidas para varios números de nodos y diferentes tipos de tráfico. | 151 |
| Figura 115. Representación de la tasa de bits obtenida según configuraciones TCP para comunicación entre BN y SN con un nivel de repetición. Se incluyen medidas para varios números de nodos y diferentes tipos de tráfico. | 152 |
| Figura 116. Topología de la subred con 17 nodos conectados y tipo de comunicación medido..... | 156 |
| Figura 117. Topologías de la subred con 21 nodos conectados y tipos de comunicación medidos en cada caso..... | 156 |
| Figura 118. Resultados obtenidos de tasa de bits en un escenario simulado para comunicación BN-SN(0) según el número de nodos y para distintos tipos de tráfico [180]. | 157 |
| Figura 119. Representación de la tasa de bits obtenida para TCP y UDP en el caso de comunicación entre BN y SN sin repetición con diferente número de nodos y varios tipos de tráfico. | 158 |
| Figura 120. Representación de la tasa de bits obtenida para comunicación SNA(0)-SNB(0) con diferente número de nodos. Se incluyen medidas para TCP y UDP y varios tipos de tráfico. | 160 |
| Figura 121. Representación de la tasa de bits obtenida en las medidas del CEDER-CIEMAT para comunicación BN-SN(1) y con diferente número de nodos. Se incluyen medidas para TCP y UDP y varios tipos de tráfico..... | 160 |
| Figura 122. Topologías de la subred con 21 nodos conectados y tipos de comunicación medidas (II). | 163 |
| Figura 123. Representación de la tasa de bits obtenida para comunicación entre BN y SN con distintos niveles de repetición en el escenario de 21 nodos. Se incluyen medidas para TCP, UDP, varios tipos de tráfico y los valores medios de latencia. | 163 |

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 124. Representación de la tasa de bits obtenida para comunicación entre SNs: cliente a nivel 0 y servidor a distintos niveles de repetición en el escenario de 21 nodos. Se incluyen medidas para TCP, UDP, varios tipos de tráfico y los valores medios de latencia..... | 164 |
| Figura 125. Representación temporal de tramas PRIME en el canal con tráfico de control (en azul), tramas IP (en verde) y sin tráfico de medida..... | 170 |
| Figura 126. Representación temporal de tramas PRIME en el canal con tráfico de control (en azul), tramas IP (en verde) y sin tráfico de medida: vista ampliada de la sección punteada en la Figura 125..... | 170 |
| Figura 127. Representación temporal de tramas PRIME en el canal con tráfico de control (en azul), tramas IP (en verde) y sin tráfico de medida: vista ampliada de la sección punteada en la Figura 126..... | 171 |
| Figura 128. Representación temporal de tramas PRIME en el canal con tráfico de control (en azul), peticiones instantáneas a todos los SMs de la subred (en rojo) y tramas IP (en verde). | 171 |
| Figura 129. Representación temporal de tramas PRIME en el canal con tráfico de control (en azul), peticiones instantáneas a todos los SMs de la subred (en rojo) y tramas IP (en verde): vista ampliada de la sección punteada en la Figura 128. | 171 |
| Figura 130. Representación temporal de tramas PRIME en el canal con tráfico de control (en azul), peticiones instantáneas a todos los SMs de la subred (en rojo) y tramas IP (en verde): vista ampliada de la sección punteada en la Figura 129. | 171 |
| Figura 131. Representación temporal de tramas PRIME en el canal con tráfico de control (en azul), peticiones de perfil temporal un SMs (en rojo) y tramas IP (en verde). | 171 |
| Figura 132. Representación temporal de tramas PRIME en el canal con tráfico de control (en azul), peticiones de perfil temporal un SMs (en rojo) y tramas IP (en verde): vista ampliada de la sección punteada en la Figura 131. | 172 |
| Figura 133. Representación temporal de tramas PRIME en el canal con tráfico de control (en azul), peticiones de perfil temporal un SMs (en rojo) y tramas IP (en verde): vista ampliada de la sección punteada en la Figura 132. | 172 |
| Figura 134. Esquema de la propuesta de gestión de recursos distribuidos en la microrred del CEDER-CIEMAT. | 175 |
| Figura 135. Asociaciones básicas de seguridad para aplicaciones IP sobre PLC [192]. | 176 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabla 1. Comparativa entre la red eléctrica actual y la que se espera en un futuro [4]. | 4 |
| Tabla 2. Principales tecnologías y características para sistemas AMI..... | 16 |
| Tabla 3. Resumen de las principales aplicaciones de PLC para las SGs y microrredes [55]. | 19 |
| Tabla 4. Características de diferentes tecnologías PLC según la banda de frecuencia. | 23 |
| Tabla 5. Características de las secciones del sistema eléctrico relativas al uso de PLC. | 29 |
| Tabla 6. Principales estándares y especificaciones PLC. | 31 |
| Tabla 7. Rendimientos obtenidos según modulación escogida en PRIME [102]. | 37 |
| Tabla 8. Tipos de paquetes de control MAC en PRIME [PRIME]. | 42 |
| Tabla 9. Correspondencia entre el nivel de cobertura de un SN y la probabilidad P de que exista una comunicación satisfactoria entre el BN y un SN de la misma subred..... | 43 |
| Tabla 10. Listado de los diferentes recursos distribuidos (generación y almacenamiento) con que cuenta la microrred del CEDER-CIEMAT en la actualidad. | 54 |
| Tabla 11. Listado de los SMS instalados en la microrred del CEDER-CIEMAT en la actualidad. | 65 |
| Tabla 12. Subredes PRIME existentes en la microrred del CEDER-CIEMAT y CTs correspondientes. | 66 |
| Tabla 12. Subredes PRIME existentes en la microrred del CEDER-CIEMAT y CTs correspondientes (cont.). | 67 |
| Tabla 12. Subredes PRIME existentes en la microrred del CEDER-CIEMAT y CTs correspondientes (cont.). | 68 |
| Tabla 13. Resumen de la comparativa según distancias y características principales. | 89 |
| Tabla 14. Listado de recursos considerados, características y configuraciones de medida..... | 94 |
| Tabla 15. Resumen de los espectros generados por cada DER, amplitudes e influencia sobre PRIME en las medidas realizadas en el CEDER-CIEMAT. | 115 |
| Tabla 16. Resumen de las diferentes configuraciones empleadas en las medidas para evaluar la capacidad de IP sobre PRIME en la microrred del CEDER-CIEMAT. | 135 |
| Tabla 17. Resumen de la ocupación del canal según el tipo de tráfico, especificando las tramas enviadas (Tx) y recibidas (Rx) de cada tipo, así como el porcentaje de canal libre en cada caso. | 139 |
| Tabla 18. Valores medios de latencia obtenidos en las medidas del CEDER-CIEMAT para diferentes tipos de tráfico y comunicación..... | 145 |
| Tabla 19. Comparativa de resultados obtenidos en laboratorio [180] y en las pruebas en campo en el CEDER-CIEMAT para configuraciones por defecto de TCP (ventana de 8 kB y tamaño de segmento de 1220 B)..... | 146 |
| Tabla 20. Resultados de la tasa de bits obtenido en las medidas del CEDER-CIEMAT según el tipo de comunicación para diferentes tipos de tráfico y número de nodos..... | 149 |

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabla 21. Variación de la tasa de bits obtenida según el tipo de comunicación para diferentes tipos de tráfico y número de nodos..... | 150 |
| Tabla 22. Resultado de la tasa de bits según diferentes configuraciones TCP para comunicación sin repetición entre BN y SN, entre SNs sin repetición y entre BN y SN con un nivel de repetición. Se incluyen medidas para varios números de nodos y diferentes tipos de tráfico. Se han identificado en verde y rojo el mayor y menor valor, respectivamente, en cada tipo de tráfico. ... | 154 |
| Tabla 23. Variación de la tasa de bits según la configuración TCP. El cálculo se hace respecto al mayor valor para cada tipo de tráfico y se muestran los valores más desfavorables..... | 155 |
| Tabla 24. Resultados de la tasa de bits obtenida para comunicación entre BN y SN sin repetición con diferente número de nodos y varios tipos de tráfico | 157 |
| Tabla 25. Resultados de la tasa de bits obtenida para TCP y UDP, jitter y porcentaje de datagramas perdidos para comunicación BN-SN(0) con diferente número de nodos en la subred. | 159 |
| Tabla 26. Variación de la tasa de bits obtenida para TCP y UDP según el número de nodos de la subred, para el tipo de comunicación BN-SNB(0) y para cada tipo de tráfico. La comparación se hace respecto a los resultados obtenidos con el menor número de nodos (9 SNs)..... | 159 |
| Tabla 27. Resultados de la tasa de bits, jitter y porcentaje de datagramas perdidos para comunicación BN-SNB(1) y SNA(0)-SNB(0) para diferente número de nodos en la subred. | 162 |
| Tabla 28. Diferencias de la tasa de bits obtenida para TCP y UDP según el número de nodos de la subred, para el tipo de comunicación SNA(0)-SNB(0) y BN-SNB(1) y para cada tipo de tráfico. La comparación se hace respecto a los resultados obtenidos con el menor número de nodos (9 SNs). | 162 |
| Tabla 29. Resultados de la tasa de bits, jitter y porcentaje de datagramas perdidos para comunicación entre BN y SN y entre SNs con distintos niveles de repetición para una subred de 21 nodos. | 166 |
| Tabla 30. Variación de la tasa de bits para TCP y UDP según el nivel de repetición, para el tipo de comunicación BN-SNB y SNA-SNB y para cada tipo de tráfico. Se incluyen las diferencias respecto a distintos niveles de repetición. | 167 |
| Tabla 31. Resumen de la ocupación del canal según el tipo de tráfico, incluyendo IP, especificando las tramas enviadas (Tx) y recibidas (Rx) de cada tipo, así como la duración total de la sesión en cada caso. La configuración TCP es la configuración por defecto (tamaño de segmento de 1220 B ventana de 8 KB) y en todos los casos hay 21 SNs. | 169 |
| Tabla 32. Principales tipos de tráfico SGs incluyendo la regularidad de medida, el tamaño de los datos implicados y los requisitos de ancho de banda y latencia aproximados. | 174 |

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1. Presentación y relevancia

El modelo eléctrico actual se caracteriza por ser un sistema fuertemente centralizado, tanto en generación como en gestión, conectado a una amplia red de transmisión y distribución, de carácter radial. Se trata de un modelo que ha permanecido prácticamente inmóvil durante las últimas décadas, con un nivel de modernización relativamente bajo, especialmente en comparación con otros sectores, y que está ampliamente extendido en el mundo. La Figura 1 muestra el esquema de un sistema eléctrico convencional: en él se puede identificar la central generadora, de donde parte la electricidad que, tras pasar por los sistemas de transporte y distribución, llega a los puntos finales de consumo.

Este modelo contrasta con los nuevos requisitos y necesidades que se esperan del sistema eléctrico del futuro y tales desafíos ponen en evidencia su obsolescencia. La introducción progresiva de fuentes energéticas distribuidas o DG (*Distributed Generation*), la liberalización de los mercados energéticos, el cambio climático, la concienciación social sobre el consumo y su repercusión en el medio ambiente, la eficiencia energética, la seguridad de abastecimiento, la respuesta a la demanda, los sistemas de almacenamiento descentralizados y la progresiva introducción del vehículo eléctrico son factores clave en el cambio del modelo energético [1]. El nuevo sistema ha de caracterizarse por ser flexible, accesible, fiable, sostenible y económicamente viable [2], lo que supone una serie de cambios respecto a la red eléctrica actual, recogidos de forma sintética en la Tabla 1.

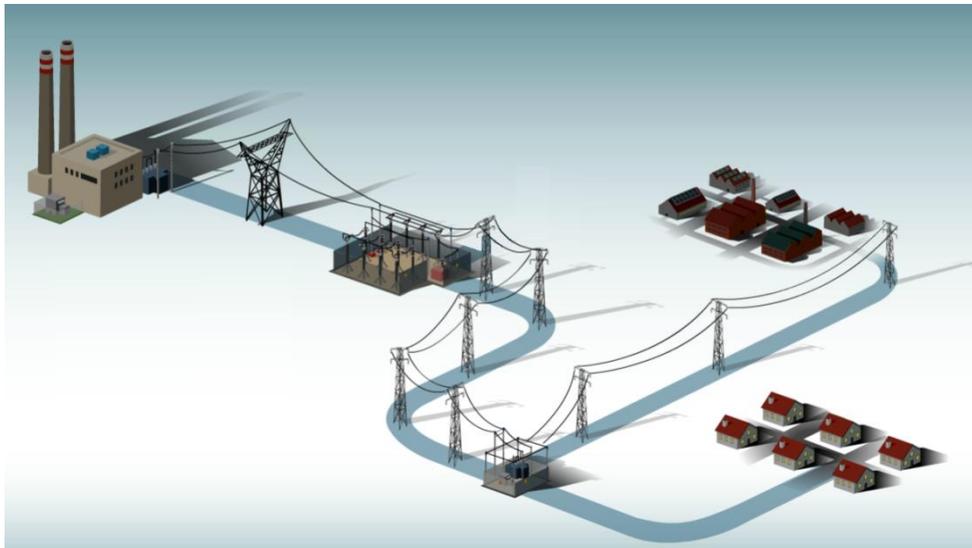


Figura 1. Esquema del sistema eléctrico convencional [3].

| | Red Eléctrica Actual | Red Eléctrica Futura |
|----------------------------------|-------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| Naturaleza | Electromecánica | Digital |
| Comunicación | Si existe, normalmente en un sentido | Bidireccional |
| Generación | Centralizada | Distribuida |
| Sensorización | Si existe, con pocos sensores y en sitios localizados | Sensorizada en su totalidad |
| Monitorización | Manual y en puntos localizados | Automática y a nivel global |
| Escenario ante errores | Con fallos y cortes | Adaptativa y aislable |
| Actuación frente a fallos | Reparación manual | Reparación automática (<i>self-healing</i>) |
| Control | Limitado a puntos y acciones concretas | Ubicuo |
| Rol del usuario | Mero consumidor | <i>Prosumers</i> |

Tabla 1. Comparativa entre la red eléctrica actual y la que se espera en un futuro [4].

1.1.1. Generación distribuida, redes inteligentes y microrredes

Uno de los principales agentes de cambio es la DG, principalmente constituida por energías renovables aunque no sólo por éstas, así como los recursos energéticos distribuidos en general o DER (*Distributed Energy Resources*), que suponen un profundo cambio en el modelo energético actual. Pese a que no existe una única definición, en general por DG se entiende la generación de energía eléctrica en la red de distribución o bien en la sección de los consumidores, cerca de los puntos finales de consumo [5]. La progresiva introducción de la DG es un hecho constatable: en 2014 se registraron más de 87 GW de potencia instalada a nivel mundial y en los próximos 6 años se espera un crecimiento de más del doble de la registrada en 2014, superando los 165 GW para el 2023 [6].

En general la DG reduce las pérdidas por transporte y ayuda a descongestionar la red. Además, aporta independencia energética y desde el punto de vista de inversión es más fácil localizar posibles emplazamientos de DG que grandes centrales generadoras. Por lo tanto, beneficia al consumidor, al medio ambiente, al sistema de distribución, contribuye a la eficiencia global del sistema y genera nuevas oportunidades de negocio [7].

El consecuente desafío al desarrollo de la DG es cómo integrar esa gran cantidad de puntos de producción distribuidos en la red eléctrica de manera efectiva. Además, en el caso de las energías renovables se trata a priori de sistemas no gestionables. La DG implica una serie de operaciones de gestión que ya no pueden ser consideradas como un elemento pasivo de un sistema radial sino que supone un rediseño del sistema. Es así como surge el concepto de red eléctrica inteligente o SG (*Smart Grid*) que, de acuerdo a la Plataforma Europea de Tecnología e Innovación para la Transición Energética (ETIP-SNET), se puede definir como un conjunto de interconexiones de electricidad, a nivel de red de transporte y de distribución, que pueden integrar de forma inteligente el comportamiento y las acciones de sus usuarios, tanto generadores como consumidores, para así distribuir la electricidad de manera eficiente, sostenible, económica y segura. Para tal fin, las SGs se sirven de sistemas de monitorización, control y comunicación, por lo que la integración de las Tecnologías de la Información y la Comunicación, TICs, resulta fundamental. La Figura 2 muestra el esquema de una SG. En comparación con el sistema convencional de la

Figura 1, se aprecia una notable evolución hacia un sistema menos jerarquizado, más dinámico y totalmente conectado.

El concepto de la SG está íntimamente ligado a las microrredes eléctricas. En esencia, una microrred eléctrica es un sistema energético integrado formado por recursos energéticos distribuidos, entre ellos la DG, así como múltiples cargas operando como una única red, autónoma y capaz de operar de forma aislada o conectada a la red principal [8]. Si bien las SGs son en realidad un paradigma a día de hoy, con más pilotos que proyectos que sean estrictamente una SG, las microrredes eléctricas cuentan con una larga trayectoria. De hecho, las primeras plantas eléctricas construidas a finales del siglo XIX podrían considerarse microrredes, ya que el sistema centralizado de la red eléctrica aún no estaba implantado [9]. Precisamente fue este modelo eléctrico centralizado el que relegó la figura de las microrredes a un segundo plano. Sin embargo, el actual auge de la DG y las SGs ha propiciado el resurgimiento de las microrredes eléctricas, ya que éstas pueden considerarse como los pilares fundamentales de la SG. Mientras que las primeras microrredes eran sistemas manuales y típicamente basados en combustibles fósiles, en la actualidad son sistemas con una progresiva introducción de algún tipo de sistema de comunicaciones y de energías renovables. La Figura 3 muestra el esquema de una microrred con los diferentes elementos de generación (fotovoltaica FV, aerogeneradores, *prosumers*, cogeneración), almacenamiento y cargas, así como el gestor energético central de la microrred, MEMS (*Microgrid Energy Management System*), encargado de gobernar los diferentes elementos y la operación del sistema a nivel global. La microrred se integra en una red externa, idealmente una SG como la de la Figura 2, a través de los puntos de acople.

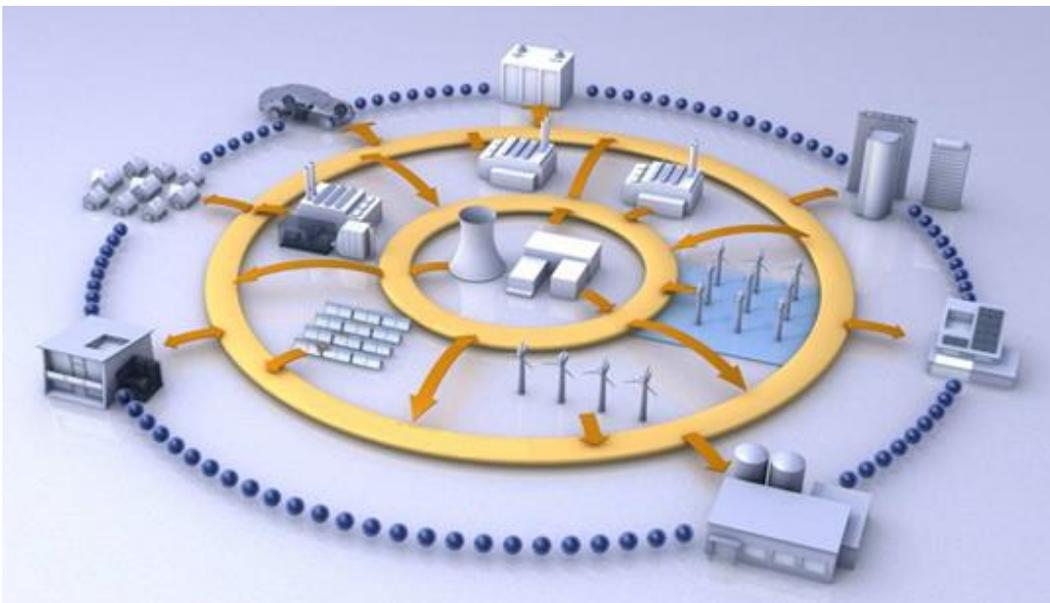


Figura 2. Esquema de una red eléctrica inteligente o *Smart Grid*. [10]

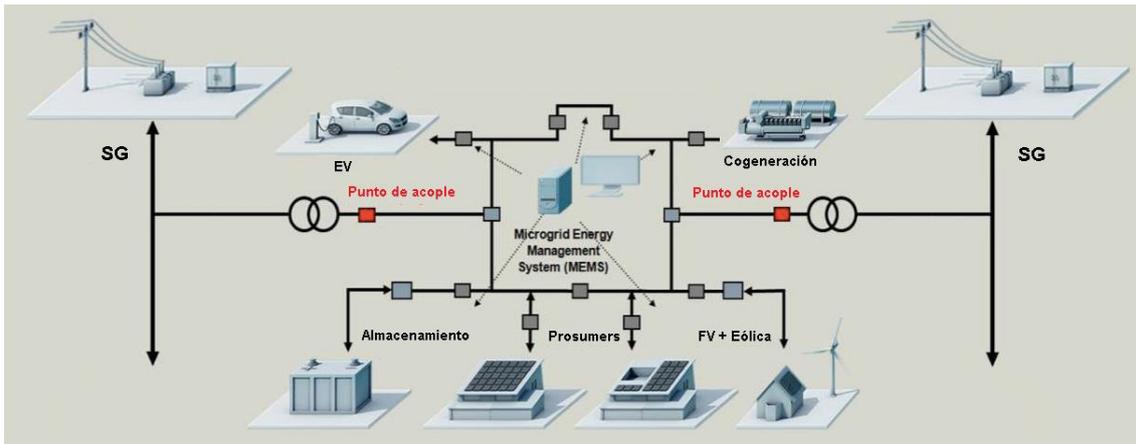


Figura 3. Esquema de una microrred eléctrica [11].

A fecha de Noviembre de 2016 se identificaron un total de 1681 proyectos de microrredes en todo el mundo, con una potencia instalada total que supera los 16.5 GW. Norteamérica y Asia-Pacífico son las regiones con mayor potencia instalada, 43 % y 39 % del total, respectivamente, mientras que Europa se encuentra en tercer lugar, con un 11 % del total. El restante se reparte entre Sudamérica (4 %) y Oriente Medio y África (3 %) [12]. Mientras que en Norteamérica el mercado de las microrredes está siendo impulsado por los usuarios, en Europa lo hacen las compañías eléctricas.

1.1.2. Las comunicaciones en el contexto eléctrico

El motivo fundamental de la introducción de las TICs en el contexto eléctrico es que van a ser las habilitadoras de las funciones de control, gestión y monitorización, así como de aplicaciones derivadas, aspectos clave para el éxito de las microrredes y, por extensión, de las SGs. Por lo tanto, la red de comunicaciones de un sistema eléctrico completamente optimizado estará asociada a la gestión los recursos energéticos (DG, almacenamiento y cargas), a los dispositivos de medida y a otras funcionalidades añadidas, tal y como recoge la Figura 4.

La implantación de herramientas que permitan conocer los consumos resulta especialmente importante para la gestión de la DG y de las microrredes. Precisamente, gran parte de las recientes inversiones en el sistema eléctrico se han centrado en el campo de la medida. Los comienzos de la automatización de la medida, telemetría o AMR (*Automated Meter Reading*) permitieron a las compañías eléctricas acceder de forma remota a los registros de los contadores eléctricos y, en algunos casos, a información muy básica sobre el estado de los contadores [13], pero el sistema AMR, caracterizado por su unidireccionalidad, no permite aplicaciones adicionales. Es por ello que surgió la medida inteligente o *Smart Metering*, que es la contextualización en el, actualmente en auge, "mundo *smart*" de las infraestructuras avanzadas de medida o AMI (*Advanced Metering Infrastructure*). La directiva europea 2012/27/EC define el AMI como "un sistema electrónico capaz de medir el consumo de energía, que proporciona más información que un contador convencional, y de transmitir y recibir datos utilizando una forma de comunicación electrónica". Los sistemas AMI se caracterizan, por lo tanto, por su comunicación bidireccional, permitiendo, además, aplicaciones añadidas cuando trabajan junto con sensores y

tecnología de control distribuida [14]. Los sistemas AMI cuentan con numerosos despliegues a nivel mundial. En concreto en Europa, cuya legislación obliga a los países miembros al cambio progresivo de contadores convencionales por sistemas AMI, una de las tecnologías más empleada son las comunicaciones sobre cable eléctrico o PLC (*Power Line Communications*) [15].

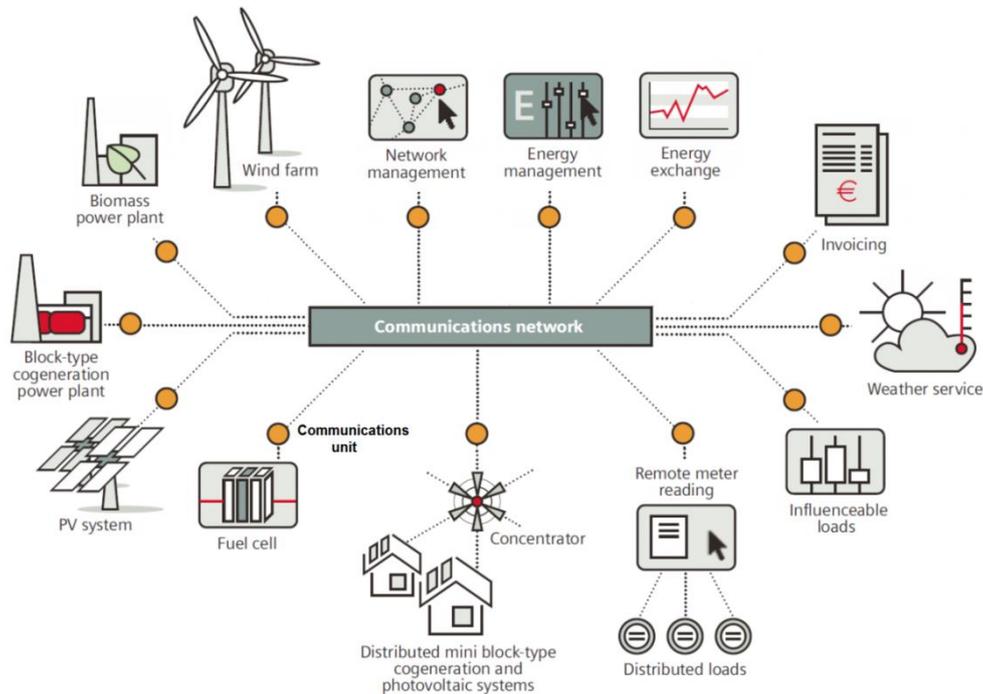


Figura 4. Funcionalidades del sistema de comunicaciones en una SG [16].

1.2. Motivación

El despliegue de sistemas AMI implica dos consecuencias directas:

- Por un lado, supone un escenario en el que dos entes tradicionalmente independientes con sus características y normativas específicas, comunicaciones y electricidad, convergen. De esa convergencia pueden surgir problemas que lleguen afectar al funcionamiento del sistema. En el caso concreto de PLC, este aspecto cobra más relevancia aún, ya que comparten el mismo medio de transmisión.
- Por otro lado, los sistemas AMI suponen el primer paso firme de la introducción de las TICs en el contexto eléctrico y, específicamente, en la sección de baja tensión. Por lo tanto, su infraestructura puede ser aprovechada para aplicaciones más allá de la medida, como la gestión de la DG y de las microrredes.

Estos aspectos derivan a su vez en dos líneas de trabajo:

1.2.1. El ruido en las comunicaciones PLC

Algunos dispositivos conectados a la red eléctrica, especialmente los que incluyen electrónica basada en transistores, introducen una serie de perturbaciones a alta frecuencia, normalmente en el rango de 2-150 kHz, conocidas como *supraarmónicos* [17]. Desde el punto de vista de las comunicaciones se trata de un problema importante, ya que es la banda de operación de muchas tecnologías PLC, por lo que dichas emisiones pueden afectar a las comunicaciones.

De hecho, la literatura recoge estudios de diferentes dispositivos en los que se demuestran estas emisiones supraarmónicas. Los dispositivos más abordados son equipos domésticos e inversores FV. Sin embargo, la mayoría de estas medidas se han llevado a cabo en laboratorio o en entornos aislados, y en ningún caso profundizando en su influencia sobre PLC en un entorno real.

En el contexto actual, la relevancia de los supraarmónicos se fundamenta en dos pilares principalmente:

- Los inversores FV son uno de los dispositivos ampliamente identificados como generador de supraarmónicos. Por ello, con el actual auge de las microrredes y de la DG es previsible que cada vez existan más fuentes de supraarmónicos;
- El auge de la DG coincide con el incremento de los despliegues AMI, muchos de ellos basados en PLC. Concretamente en Europa, CENELEC-A fija un rango de operación para estos equipos de 3 -148.5 kHz, que coincide con el abanico de frecuencias en el que se presentan los supraarmónicos.

Precisamente, el auge de las microrredes pone de manifiesto la existencia de otros recursos distribuidos generadores de supraarmónicos que aún no han sido caracterizados. Además, el hecho de que estos equipos puedan formar parte de un despliegue AMI implica que puedan influir en su correcto funcionamiento.

Esta situación se agrava por la ausencia de una estandarización específica en el rango de frecuencias 2-150 kHz que aborde la problemática de los supraarmónicos. En este sentido, numerosas asociaciones internacionales y comités estandarizadores han creado grupos de trabajo dedicados a ello, tales como el grupo conjunto C4.24 de CIGRE/CIREN, el SC205 de CENELEC y el IEEE EMC Society TC 7. De hecho, en los informes de estos grupos se hace hincapié en la necesidad de más medidas en entornos reales [18].

Por ello, resulta fundamental identificar las fuentes de supraarmónicos, caracterizarlas y analizar su influencia en PLC. En este contexto, esta línea de trabajo busca caracterizar los supraarmónicos generados por diversos recursos distribuidos en la microrred real del CEDER-CIEMAT. Además, se pretende analizar de forma empírica la influencia en el sistema AMI basado en PLC que incluye la microrred. Este sistema de medida emplea la tecnología PRIME, definida en el Capítulo 2.

1.2.2. La gestión de las microrredes

La gestión en el sistema eléctrico es un aspecto ampliamente abordado en la literatura, tanto de forma teórica como práctica. Históricamente, las aplicaciones de telegestión se han centrado en las secciones de alta y media tensión del sistema eléctrico, HV y MV, al ser las zonas más críticas de la red. En concreto, PLC se ha venido utilizando en algunas aplicaciones básicas de teled medida en HV y MV.

El auge de las microrredes y de la DG ha puesto de manifiesto la necesidad de gestionar también la sección de baja tensión, LV, y son numerosos los proyectos que han incluido esta sección dentro de su gestión global de la red. Sin embargo, simplemente utilizan algún tipo de despliegue AMI para acceder a los consumos y generación de los puntos finales sin profundizar en más aplicaciones [19].

En realidad, un sistema AMI no tiene por qué estar limitado únicamente a la medida. Un despliegue AMI supone implementar un sistema de comunicaciones en el que cada recurso distribuido con un contador asociado puede considerarse automáticamente como un recurso “conectado”, al que se le pueden enviar consignas de actuación y del que se puede extraer información (además de los datos de medida). Por lo tanto, la medida puede verse complementada con otras funcionalidades, como las que muestra la Figura 4.

En este contexto, la implementación de comunicaciones basadas en IP emerge con fuerza, ya que se trata de un protocolo ampliamente difundido, robusto y seguro. Además, IP puede ser el agente clave que garantice la interoperabilidad entre diferentes tecnologías.

Siguiendo este enfoque, la segunda línea de trabajo busca analizar la capacidad de la red LV para la transmisión de datos adicionales a los de telelectura, mediante una campaña de medidas de campo en la microrred del CEDER-CIEMAT, en la que se mide la capacidad de IP sobre la tecnología PLC-PRIME. Además, pretende evaluar parámetros y variables relacionados con los diferentes tipos de tráfico presentes en el medio, las posibles configuraciones IP, la topología de la red y el tamaño de la misma, con el fin de conocer las condiciones que permiten maximizar el rendimiento del canal. Finalmente, se persigue evaluar la idoneidad de las capacidades del canal obtenidas para la gestión de una microrred.

1.3. Objetivos

El objetivo global de la tesis es:

- **Evaluación de la capacidad de un sistema AMI basado en PLC para la gestión de recursos eléctricos distribuidos.**

A continuación se definen los objetivos parciales para la consecución del objetivo principal:

- **Caracterización de las emisiones supraarmónicas de los recursos distribuidos en el rango 2-150 kHz en una microrred real.**

Es necesario caracterizar de forma empírica los supraarmónicos para profundizar en su comportamiento. Además, la caracterización de dispositivos que aún no han sido abordados en la literatura permite identificar nuevos equipos generadores de supraarmónicos y por extensión, potenciales víctimas.

Una caracterización completa de los supraarmónicos requiere llevarla a cabo en dos fases: por un lado, con el recurso bajo medida aislado y, por otro lado, con el recurso funcionando en entorno habitual, con el resto de dispositivos vecinos funcionando. Esta doble caracterización permite medir no sólo a los equipos en un entorno real sino también medir la influencia de los supraarmónicos en los equipos vecinos y viceversa.

Para ello se hará una doble campaña de medidas en la microrred real del CEDER-CIEMAT.

- **Análisis de la influencia de las emisiones supraarmónicas en el rango 2-150 kHz en PLC-PRIME.**

A falta de una regulación específica con la que comparar los niveles de amplitud de los supraarmónicos, el estudio de su influencia en las señales PRIME de forma empírica resulta vital para identificar el alcance de las posibles afecciones.

Para ello se realizará una campaña paralela a la anterior que analice la evolución de las comunicaciones PLC-PRIME con el objetivo de identificar anomalías por la presencia de supraarmónicos.

La campaña consistirá en la monitorización de la topología de la subred de comunicaciones así como en el análisis de otros parámetros de comunicaciones disponibles. Con los resultados obtenidos se podrán identificar anomalías en el sistema de comunicaciones así como evaluar la reacción de la subred de comunicaciones a dichas emisiones.

- **Validación de los resultados obtenidos en laboratorio del rendimiento de IP sobre PLC-PRIME en un entorno real.**

La validación en un entorno real de los resultados recogidos en otro proyecto relacionado, que han sido obtenidos en laboratorio, supondrá la confirmación de la viabilidad de los sistemas PLC-PRIME para aplicaciones más allá de la medida.

Para ello se diseñará una metodología de medida que permita reproducir el escenario de las pruebas de laboratorio en el entorno real de la microrred del CEDER-CIEMAT.

- **Maximización del rendimiento de IP sobre PLC-PRIME.**

Una vez validadas las pruebas en laboratorio, es importante abordar las posibilidades disponibles que permitan maximizar la tasa de bit.

Para ello se diseñará una campaña de medidas bajo diferentes variables (número de nodos en la subred, protocolo de transporte IP a emplear, tipo de tráfico en la red, tipo de comunicación) que permita obtener resultados en base a diferentes parámetros. Los resultados servirán para caracterizar el rendimiento del sistema de comunicaciones en detalle e identificar las configuraciones más eficientes y los factores más limitantes.

- **Estudio de la viabilidad de IP sobre PLC-PRIME para la gestión de recursos energéticos distribuidos.**

Finalmente, se busca estudiar de forma teórica la viabilidad de IP sobre PLC-PRIME para gestionar una microrred con recursos distribuidos, a partir de los resultados obtenidos en el anterior objetivo parcial.

Para ello se identificarán los requisitos en cuanto a las comunicaciones de las principales funcionalidades relacionadas con la gestión en el contexto eléctrico. Finalmente, se expondrán aquellas aplicaciones susceptibles de implementarse con el sistema presentado.

2. LAS COMUNICACIONES PARA LA MEDIDA INTELIGENTE

2.1. Introducción

Un sistema de medida avanzada, AMI, se compone de cuatro elementos fundamentales:

- El contador digital o SM (*Smart Meter*): se caracteriza por su doble rol bidireccional, medida y comunicaciones. Es el dispositivo encargado de registrar las medidas, tanto de consumo como de generación. Su nodo de comunicaciones embebido le permite enviar los datos de medida y comunicarse con otros nodos de la subred;
- El concentrador de datos o DC (*Data Concentrator*): es el equipo encargado de recopilar información de medida. En muchos casos está al cargo del mantenimiento de la red de comunicaciones y, como ocurre con los SMs, también incorpora un nodo de comunicaciones embebido. Normalmente se instala en los centros de transformación y puede tener funciones adicionales, como la de supervisar la media tensión;
- El sistema de comunicaciones: es la tecnología por la que fluye el tráfico que se intercambian los nodos. Por lo tanto es la columna vertebral del sistema AMI;
- El controlador central o CC (*Control Center*): es el que gestiona y controla todo el sistema. Normalmente forma parte de un sistema modular en el que cada división tiene sus funciones específicas.

Las tecnologías existentes para la medida avanzada se pueden clasificar en dos grandes grupos: tecnologías cableadas y tecnologías inalámbricas. A grandes rasgos, las tecnologías cableadas son más robustas que su alternativa inalámbrica, pero éstas normalmente conllevan una instalación con un coste menor y más rápido, y suelen ser más apropiadas para ubicaciones remotas o de difícil acceso [20]. Entre las tecnologías cableadas destacan: las comunicaciones sobre cable eléctrico o PLC (*Power Line Communications*), el DSL (*Digital Subscriber Line*), Euridis y la fibra óptica pasiva o PON (*Passive Optical Network*), mientras que entre las principales opciones inalámbricas cabe destacar: las redes de RF malladas, las redes celulares, las redes de área personal o PAN (tecnologías del grupo IEEE 802.15 tales como ZigBee, 6LoWPAN y Bluetooth), redes de área local o LAN (grupo IEEE 802.11 como por ejemplo Wi-Fi e IEEE 802.11n) y redes de área metropolitana o MAN (grupo IEEE 802.16, en el que destaca WiMAX) [21]. La Tabla 2 recoge las principales características de estas tecnologías y algunos de los proyectos asociados que las emplean.

| Tecnología inalámbrica | Tasa de bit | Bandas de frecuencia | Distancia | Ventajas | Desventajas | Despliegues y proyectos | |
|------------------------------|----------------|----------------------|-------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| RF mallada | - | 902-928MHz | Depende de los saltos | <ul style="list-style-type: none"> · La red puede ser ampliada mediante múltiples saltos · Se forman enlaces ad-hoc de forma dinámica | <ul style="list-style-type: none"> · Suelen ser sistemas propietarios · El rendimiento decrece notablemente con la distancia | Mayoría de despliegues en EEUU | |
| Celular | 3G - 4G | 60 – 240 kbps | 824-894 MHz 1900 MHz | Hasta 50 km | <ul style="list-style-type: none"> · Amplia cobertura · Bajo mantenimiento | <ul style="list-style-type: none"> · Las conexiones individuales son caras | China Southern Power Grid (CHN) [21] Smart Grid Smart City (AUS) [22] Essential Energy (AUS) [23] |
| | GSM | 14.4 kbps max. | 900 – 1800 MHz | 1-10 km | <ul style="list-style-type: none"> · Bajo consumo | <ul style="list-style-type: none"> · Tasas de bits moderadas | Telegestore (IT) [24], [25] |
| | GPRS | 170 kbps max. | 900 – 1800 MHz | 1-10 km | <ul style="list-style-type: none"> · Flexibilidad de configuración | | PRICE-GEN (ES) [26], [27] Eandis and Infrac (BE) [28],[29], [30] Linky (FR) [31], [32] |
| Redes PAN IEEE 802.15 | ZigBee | 20 – 250 Kbps | 868MHz/ 915MHz / 2.4GHz | 10-1000 m | <ul style="list-style-type: none"> · Bajo coste · Bajo consumo | <ul style="list-style-type: none"> · Bajas tasas de bits · Problemas de seguridad (especialmente Bluetooth) | Energy Demand Research Project, EDRP (UK) [33], [34] National Smart Metering Programme, NSMP (IRL) [35], [36] |
| | 6LoWPAN | | | | | | |
| | Bluetooth | 721 Kbps | 2.4 – 2.4835 GHz | 1-100 m | | | |
| Redes LAN IEEE 802.11 | Wi-Fi | 54 Mbps max. | 2.4 GHz / 5.8 GHz | | | | |
| | Enhanced Wi-Fi | 54 Mbps max. | 2.4 GHz | 100 m | <ul style="list-style-type: none"> · Alto nivel de fiabilidad y disponibilidad | <ul style="list-style-type: none"> · Se ve afectado por las emisiones de equipos cercanos | CMP AMI (US) [37] National Smart Metering Programme, NSMP (IRL) [35], [36] |
| | IEEE 802.11n | 600 Mbps max. | 2.4 GHz | | | | |
| Redes MAN IEEE 802.16 | WiMAX | 70 Mbps | 1.8 GHz – 3.65 GHz | 50 km | <ul style="list-style-type: none"> · Buen rendimiento a largas distancias · Capacidad de servicio a miles de usuarios finales | <ul style="list-style-type: none"> · Costes más elevados en comparación con tecnologías similares | Victorian Smart Meter Rollout (AUS) [38] |

Tabla 2. Principales tecnologías y características para sistemas AMI.

| Tecnología cableada | Tasa de bit | Bandas de frecuencia | Distancia | Ventajas | Desventajas | Despliegues y proyectos |
|---------------------|-----------------------|----------------------------------------|----------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| NB-PLC | Hasta 500 kbps | 3 – 500 kHz | Varios km | <ul style="list-style-type: none"> · El medio ya está desplegado · Los equipos no dependen de baterías | <ul style="list-style-type: none"> · El cable de electricidad es un medio hostil para las comunicaciones | <p>La mayoría de despliegues en Europa y China</p> <p>Telegestore (IT) [24], [25]</p> <p>Woodruff Electric Cooperative (USA) [39]</p> <p>Boulder SmartCityGrid (US) [40], [41]</p> <p>PRICE-GEN (ES) [26], [27]</p> <p>Eandis and Infrac (BE) [28], [29], [30]</p> <p>Linky (FR) [31], [32]</p> <p>Energy Demand Research Project, EDRP (UK) [33], [34]</p> |
| BB-PLC | Hasta cientos de Mbps | 1.8 – 250 MHz | Varios km | | | |
| xDSL | ADSL | 800 kbps de subida 8 Mbps de bajada | 5 km | <ul style="list-style-type: none"> · El medio ya está desplegado | <ul style="list-style-type: none"> · Costes de mantenimiento elevado | <p>PRICE-GEN (ES) [26], [27]</p> <p>Eandis and Infrac (BE) [28], [29], [30]</p> |
| | HDSL | 2 Mbps | 3.6 km | <ul style="list-style-type: none"> · Tasas de bits moderadas | <ul style="list-style-type: none"> · La eficiencia disminuye con la distancia | |
| | VHDSL | 15 – 100 Mbps | 1.5 km | | | |
| Euridis | IEC 62056-31 | 9.6 kbps | 80 MHz – 1 GHz | Cientos m | <ul style="list-style-type: none"> · Bajo coste · Tecnología conocida | <ul style="list-style-type: none"> · Bajas tasas de bits <p>Amplio despliegue de SMs en Francia [42] [43]</p> |
| PON | 155 – 2.5 Gbps | | | 60 km | <ul style="list-style-type: none"> · Elevadas tasas de bits · Inmunidad frente al ruido · Buen rendimiento durante kms | <ul style="list-style-type: none"> · Coste elevado <p>Boulder SmartCityGrid (US) [40] [41]</p> <p>PRICE-GEN (ES) [26], [27]</p> <p>Austin (US) [44]</p> |

Tabla 2. Principales tecnologías y características para sistemas AMI (cont.).

La presencia de los sistemas AMI está desigualmente repartida a nivel mundial. En concreto, Europa está viviendo en la actualidad un auge en instalaciones de este tipo, pese a unos comienzos relativamente tardíos. Esto se debe en gran parte a diferentes legislaciones nacionales impulsadas por la Directiva Eléctrica Europea 2009/72/EC, por la cual los estados miembros se han comprometido a instalar 200 millones de contadores digitales para 2020 [45]. Países como Italia y Suecia ya han finalizado sus despliegues de SMS, mientras que en la mayor parte de países restantes están en proceso de despliegue, y otros como Austria, Polonia, Rumanía o Dinamarca aún han de legislar al respecto. Las tecnologías empleadas en estos despliegues son también dispares, pero destacan especialmente PLC y GSM.

Por otro lado, Estados Unidos vivió un importante auge de instalaciones de SMS durante el programa de inversiones ARRA, el cual se ha visto desacelerado con el fin de éste en 2011 [46]. Aun así, en 2015 se contabilizaron un total de 65 millones de SMS instalados y se estima que esta cifra alcance los 90 millones para 2020 [47]. Entre las tecnologías empleadas, destaca la RF mallada aunque también hay una participación importante de 3G y PLC en su versión de banda ancha. Canadá también cuenta con un importante despliegue de SMS [48], empleando principalmente alternativas inalámbricas (RF mallada en general pero también GSM y ZigBee). Latinoamérica, por su parte, destaca por su bajo número de despliegues de SMS. Brasil y México son los primeros mercados potenciales y Argentina y Chile se postulan también como países instaladores de SMS para los próximos años [49].

Finalmente, en la zona Asia-Pacífico destaca especialmente China, donde se están realizando amplios despliegues de SMS bajo un Plan Nacional que busca la mejora del sistema eléctrico nacional y el cambio hacia un suministro más sostenible. A finales de 2016, China contaba con más de 348 millones de SMS instalados, lo que supone el 67 % de las instalaciones registradas a nivel mundial [50]. La mayor parte de los dispositivos instalados emplean PLC, pero también se puede encontrar una presencia relevante de PON [51]. Por su parte, Japón también está apostando fuerte por los despliegues de SMS y estiman instalar un total de 80 millones de dispositivos para 2024 [46]. Australia es otro de los países cuyos despliegues de SMS se están viendo impulsados por programas gubernamentales, además de por diversos problemas en el suministro eléctrico que padecieron en 2006 y 2007 [52]. Los mayores despliegues con los que cuenta el país emplean RF mallada, ZigBee y WiMAX. Por último, los despliegues de SMS en India se están dando a la par que numerosos proyectos de SGs y algunos informes apuntan a que el país contará con 130 millones de dispositivos equipados con tecnología PLC e inalámbrica para 2021 [53].

En el contexto de los sistemas AMI, el rol de PLC destaca notablemente, principalmente impulsado por las compañías eléctricas, cuyo interés reside en que PLC implica menos infraestructura que otras alternativas, al estar el medio de transmisión de las comunicaciones ya desplegado (el cable eléctrico). Esta característica conlleva automáticamente un coste inferior. Además, el uso de PLC les permite a las compañías tener una red de comunicaciones propia, sin depender de terceros.

La Figura 5 muestra un ejemplo de un sistema AMI basado en PLC. El consumo de los usuarios finales puede consultarse de forma remota a través de sus SMS asociados. El acceso a los SMS se hace vía PLC a través de los DCs. A su vez, a los DCs se accede

vía cable (por ejemplo, Ethernet) o con alguna alternativa inalámbrica. Además de los sistemas AMI, PLC se puede emplear en otras aplicaciones orientadas a las SGs y microrredes, tal y como recoge la Tabla 3 de forma resumida.

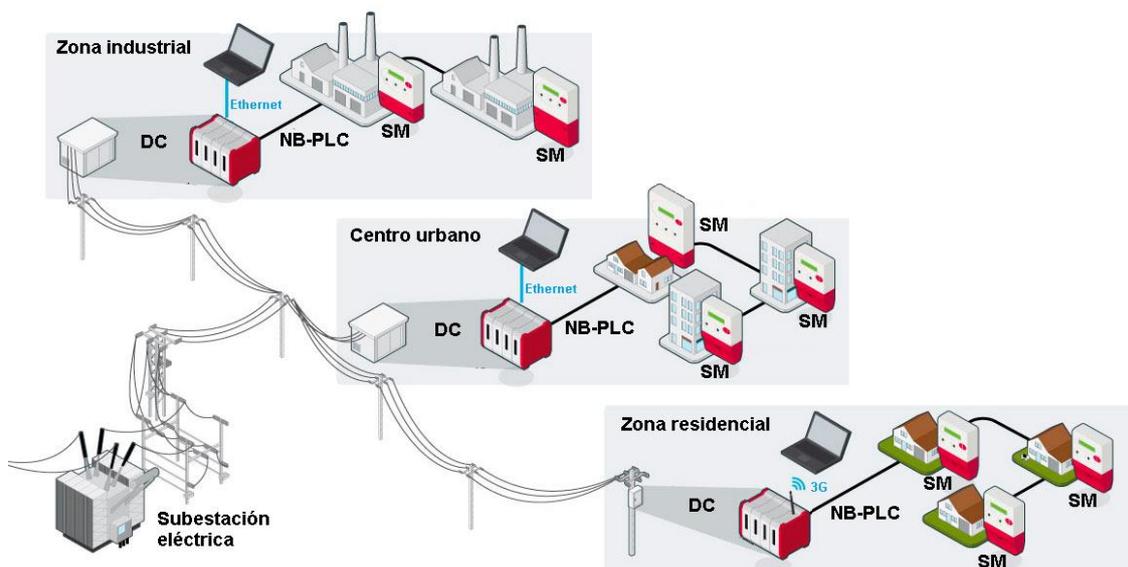


Figura 5. Ejemplo de aplicación de un sistema PLC para medida avanzada en diferentes entornos [54].

| Funcionalidades de PLC en Smart Grids y microrredes | |
|-----------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| Aplicación | Objetivos |
| AMR y AMI | Medir en tiempo real y tarificación. |
| Monitorización | Control y gestión remota del máximo número de puntos y dispositivos de la red. |
| Vehículos eléctricos | Establecer comunicación entre el vehículo y el gestor. |
| Gestión de la demanda | Satisfacer cargas con altos niveles de eficiencia energética. |
| Detección de fallos | Identificar fallos en remoto de forma instantánea. |
| Transmisión de voz y datos | Proveer más ancho banda para servicios de voz y datos. |

Tabla 3. Resumen de las principales aplicaciones de PLC para las SGs y microrredes [55].

2.2. Las comunicaciones sobre cable eléctrico

A lo largo del tiempo se han venido utilizando diferentes acrónimos para las comunicaciones sobre el cable eléctrico, como PLT (*Power Line Telecommunications* o *Power Line Transmission*), DLC (*Distribution Line Carrier*) para referirse a las comunicaciones en baja tensión y PLC como *Power Line Carrier* para las de alta tensión [56]. En esta tesis, y siguiendo la línea de la mayoría de la literatura al respecto, se utiliza PLC como *Power Line Communications* entendiendo su visión más genérica, es decir, comprendiendo baja, media y alta tensión, así como todo el espectro de frecuencias posible.

La tecnología PLC se sirve del cableado eléctrico para la transmisión de información, para lo que sobrepone una señal de comunicaciones modulada sobre la señal eléctrica. En el caso de la señal eléctrica en corriente alterna o AC, como suele ser

más ruidosa en los picos, en un principio se insertaba la señal de comunicaciones en el rango cercano al cero. Sin embargo, con la evolución de la tecnología, se pasó a añadir señales constantes en todo el rango de amplitud de la señal eléctrica, tal y como puede apreciarse en la Figura 6. Como la señal eléctrica tiene una frecuencia de 50 o 60 Hz (dependiendo del país), basta con inyectar la señal añadida a frecuencias mucho más altas para que la interferencia con la señal eléctrica sea lo menor posible [57]. Por lo tanto, el sistema PLC más sencillo constaría de un transmisor capaz de inyectar la señal de comunicaciones sobre la señal eléctrica, un cable eléctrico como medio de transmisión y un receptor capaz de extraer la señal de comunicaciones de la señal eléctrica.

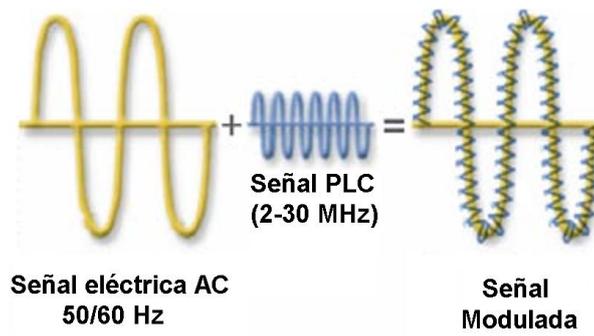


Figura 6. Generación de una señal PLC [58].

Pese al reciente auge de PLC, principalmente impulsado por los sistemas AMI, esta tecnología no es nueva. Sus primeras aplicaciones tratan de mediados de 1800, siendo prácticamente tan antigua como la propia red eléctrica en sí. Casualmente, los comienzos del uso de las comunicaciones a través del cable eléctrico fueron para aplicaciones relacionadas con la lectura de contadores ubicados en puntos lejanos a través de líneas de alta tensión fácilmente por encima de los 100 kV. La primera aplicación de teledividida data de 1838 y la primera patente sobre señalización en el cableado eléctrico fue en 1897, ambas en el Reino Unido. A partir de 1900 se empezaron a patentar aplicaciones en Estados Unidos [59]. El comienzo de la aplicación de esta tecnología para comunicación por voz data de 1918 y evoluciona hasta 1930, punto donde ya se considera una aplicación madura y aplicable en todo el mundo [60]. En las décadas posteriores la tecnología siguió evolucionando, y a finales de los años 80 ya se conseguía transmitir información en ambas direcciones y con técnicas de control de errores relativamente sofisticadas. Por último, a finales de los 90 las velocidades eran lo suficientemente elevadas como para empezar a considerar el acceso a internet a través de PLC [61].

La gran ventaja de PLC es que no hay ninguna alternativa, ya sea cableada o inalámbrica, con una infraestructura tan extensa. Como el medio ya está desplegado, en teoría, cualquier punto conectado a la red es susceptible de beneficiarse de los servicios que se sirvan con esta tecnología. Esto supone un ahorro importante, ya que los costes de realización, instalación y mantenimiento de redes de acceso de los sistemas de comunicaciones son muy altos, pudiendo alcanzar el 50% de la inversión total del sistema implementado. La idea principal del PLC es, por tanto, la reducción de gastos operacionales y de despliegue de nuevas redes, garantizando velocidades aceptables [62].

2.2.1. El canal PLC: características y modulaciones

Dado que el sistema eléctrico se ideó para la transmisión de corriente alterna a frecuencias de 50-60 Hz, el canal tiene una capacidad limitada para transmitir frecuencias mayores, y además presenta diferentes tipos de interferencias, tal y como se aborda en detalle en el apartado 2.2.4.

Estas características dificultan el análisis teórico y el modelado del canal PLC. Por ejemplo, en este contexto no es aplicable el principio de superposición, útil en la caracterización de canales de transmisión, en el que se asume linealidad e invariancia con el tiempo de las fuentes de ruido [63]. En concreto, las cuatro particularidades del canal que más dificultan su modelado son [64]:

- El comportamiento selectivo en frecuencia, debido a las reflexiones causadas por la desadaptación de impedancias en las discontinuidades;
- El comportamiento selectivo según el tiempo debido a los cambios de topología de la red, cargas y características del cable;
- La limitación, no sólo de la cobertura de la red, sino también del ancho de banda disponible debido a la importante atenuación y el fuerte comportamiento paso bajo del canal;
- La presencia de ruido coloreado, más difícil de modelar que el habitual ruido blanco Gaussiano.

Además, la diversidad de redes eléctricas existentes también dificulta su modelado. Por ejemplo, las características del canal no serán las mismas en una aplicación de área doméstica, en una red muy mallada o en una microrred con amplio despliegue de generación distribuida. De forma sintética, pueden agruparse los enfoques para la caracterización del canal en dos: de arriba a abajo (*top-down*), que trata de ajustar el modelado del canal a partir del modelado de datos obtenido mediante medidas [65] [66]; y el enfoque de abajo a arriba, (*bottom-up*), que se basa en los fundamentos de las líneas de transmisión, sin tener en cuenta medidas de campo [67], [68].

Debido al entorno hostil que el cable eléctrico supone para las comunicaciones, los sistemas PLC hacen uso de diferentes esquemas de modulación que tratan de incrementar la eficiencia espectral y combatir el ruido de la forma más eficiente posible. Para ello, modifican los parámetros de la señal a enviar de acuerdo a una señal moduladora siguiendo tres técnicas principalmente [62], [69]:

- Modulación con una única portadora: se caracteriza por tener una tasa de transmisión menor, en torno a 10 kbps, aunque suficiente para aplicaciones como monitorización y telemedida. Esta técnica es muy sensible al ruido en banda estrecha y a la distorsión [70]. Entre sus variantes destacan:
 - Modulación en frecuencia: su forma más simple es BFSK, que usa un par de frecuencias discretas. A pesar de que es una de las modulaciones más utilizadas debido a su relativa robustez, el desvanecimiento de la señal en PLC limita su uso, por lo que se ideó una alternativa llamada SFSK que utiliza dos bandas estrechas

separadas entre ellas en torno a los 10 kHz. Este sistema más robusto, ideado por la compañía francesa EDF, se estandarizó bajo el nombre IEC 61334 [71] (anteriormente IEC 1334). Se caracteriza por un ratio de transmisión de entre 200 y 800 bps.

- Modulación en amplitud o ASK: con una tasa de bit muy baja (< 120 bps) y portadoras por debajo de los 3 kHz. Es una modulación poco robusta frente al ruido y tradicionalmente se empleó para telemedida pero actualmente está obsoleta.
- Modulación mediante Espectro Ensanchado o SS (*Spread Spectrum*): en este caso la señal transmitida ocupa un ancho de banda considerablemente mayor al necesario para el envío de la información con una modulación habitual. Su principal ventaja es que es relativamente robusta, por lo que permite comunicaciones fiables en entornos ruidosos [69]. Sin embargo, las técnicas SS no ofrecen una tasa de bit demasiado alta y no pueden hacer frente de manera efectiva al ruido procedente de fuentes de alimentación conmutadas y otros dispositivos electrónicos. Entre sus variantes, la más atractiva para PLC es el espectro ensanchado por salto en frecuencia o FHSS, precisamente porque, tal y como ocurre con OFDM, permite que ciertas partes del espectro puedan no ser usadas, por ejemplo, si hay presencia de ruido [69].
- Modulación con Múltiples Portadoras: entre ellas destaca especialmente:
 - Multiplexación por División en Frecuencia Ortogonal u OFDM: en este sistema se modula un conjunto de portadoras individualmente con un esquema de modulación con múltiples bits, lo que le confiere una gran adaptabilidad. Al contrario que en las técnicas de espectro ensanchado, OFDM divide el espectro empleado en múltiples subcanales estrechos. Esto además permite excluir fácilmente determinados rangos de frecuencias, ya sea por imposición regulatoria o por mal funcionamiento, simplemente anulando la portadora correspondiente. Por lo tanto, OFDM es un sistema robusto frente al ruido coloreado y con una eficiencia espectral muy elevada [69]. Sin embargo, los sistemas que emplean OFDM son más complicados y, por extensión, más caros. Además, dado que en OFDM se ha de garantizar una comunicación satisfactoria en un mínimo suficiente de portadoras, y en particular, la transmisión exitosa de la cabecera y el preámbulo, las características particulares del ruido en PLC suponen un desafío también para esta modulación. De hecho, el estándar 1901.2 incluye un mecanismo adicional, denominado *sub-banding*, que filtra las porciones ruidosas del espectro disponible [72]. Algunos fabricantes han optado por una versión mejorada de OFDM que separa los canales de comunicación entre sí de forma que es posible seleccionarlos dinámicamente para adaptarlos a las características del canal de forma continuada [73].

2.2.2. Clasificación de comunicaciones sobre cable eléctrico

La tecnología PLC se puede clasificar atendiendo a tres criterios distintos:

- Según el tipo de señal eléctrica en la que viaja:
 - Corriente continua o DC (*Direct Current*)
 - Corriente alterna o AC (*Alternate Current*)
- Según la tensión de la señal en la que viaja:
 - Alta tensión o HV (*High Voltage*)
 - Media tensión o MV (*Medium Voltage*)
 - Baja tensión o LV (*Low Voltage*)
- Según la el ancho de banda empleado:
 - Banda ultra-estrecha o UNB-PLC (*UltraNarrowband PLC*)
 - Banda estrecha o NB-PLC (*Narrowband PLC*), y dentro de ésta:
 - Baja tasa de bit o LDR (*Low Data Rate*)
 - Alta tasa de bit o HDR (*High Data Rate*)
 - Banda ancha o BB-PLC (*Broadband PLC*)

La Tabla 4 recoge una comparativa de las principales características de las tecnologías PLC según la banda de frecuencia que emplean, y que se comentan en los siguientes subapartados.

| Tecnologías PLC según banda de frecuencias | | | | |
|--------------------------------------------|-----------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|------------------------------------------------------------|
| Tipos y características | UNB-PLC | NB-PLC | | BB-PLC |
| | | LDR | HDR | |
| Rango Frecuencias | 30 Hz – 3 kHz | 3 – 500 kHz | | 1.8 – 250 MHz |
| Bandas de frecuencia | SLF/ULF | VLF/LF/MF CENELEC, FCC, ARIB | | HF/VHF |
| Tasa de bit* | ~ bps | ~ kbps | hasta 500 kbps | Hasta cientos Mbps |
| Alcance | Cientos de km | Hasta varios km, ampliable con repetidores | | Hasta varios km, ampliable con repetidores |
| Aplicaciones | Telemedida, teleprotección. | Telemedida, servicios en redes domésticas, servicios <i>Smart Grids</i> (control, gestión, vehículo eléctrico, generación distribuida, etc.) | | Servicios en redes domésticas, servicios para la compañía. |

Tabla 4. Características de diferentes tecnologías PLC según la banda de frecuencia.

2.2.2.1. Clasificación según la señal eléctrica

a) PLC en corriente continua

En este caso, la señal PLC viaja sobre la señal eléctrica continua. Aunque la mayoría de las aplicaciones PLC van enfocadas al ámbito AC (en parte porque los cables de distribución fueron pensados para señales en alterna), también existen aplicaciones en DC, especialmente en banda estrecha, como su uso en los buses de generación distribuida y en transporte (control electrónico en aviones, coches y trenes), de forma que se reduce la complejidad y el coste de las comunicaciones [74]. En el campo del PLC sobre DC en banda estrecha existe poco trabajo realizado respecto a estándares, por lo que algunas empresas han optado por definiciones propietarias más flexibles.

b) PLC en corriente alterna

El uso de PLC en AC está más extendido en la literatura que la versión en continua y gran parte de este creciente foco se debe al auge de los sistemas AMI. Cualquier aplicación que se lleve a cabo en el despliegue eléctrico en la sección AC entrará dentro de este grupo, donde también se sitúa el trabajo desarrollado en esta tesis.

2.2.2.2. Clasificación según el ancho de banda empleado

a) PLC en banda ultra-estrecha (UNB-PLC)

La tecnología que opera en este rango se caracteriza por hacerlo en un rango de frecuencias que van desde los 30 Hz hasta los 3 kHz, abarcando así la parte superior de la banda de muy baja frecuencia (*Super Low Frequency Band*, 30 – 300 Hz) y la ultra baja frecuencia (*Ultra Low Frequency*, 0.3 – 3 kHz). Su tasa de bit es muy baja, en torno a los pocos bps (100 bps a lo sumo). Por el contrario, su rango de operación es muy alto, de más de 150 km.

Estos sistemas se caracterizan por ser propietarios; no obstante, la tecnología UNB-PLC está muy madura y se lleva utilizando desde hace al menos dos décadas, especialmente por parte de numerosas compañías eléctricas para teleprotección en alta tensión [75]. Los sistemas *Ripple Control* podrían considerarse como un ejemplo histórico de este tipo de PLC, especialmente si se tratan de comunicaciones en un solo sentido [76]. Dentro de las comunicaciones bidireccionales destaca TWACS, que normalmente utiliza la frecuencia de la línea (50 o 60 Hz) como portadora. Por lo tanto, no precisa de derivación (*bypass*) en los transformadores ya que la frecuencia portadora de la señal de comunicaciones es la misma que la de la señal eléctrica. Esta situación hace que sea utilizado por las compañías eléctricas como solución de bajo coste para aplicaciones de telemedida u otras en las que no se precisen altas tasas de bits [75].

b) PLC en banda estrecha (NB-PLC)

Corresponde a frecuencias de entre 3 y 500 kHz (bandas VLF/LF/MF), aunque varía según países, y potencias de transmisión de hasta cientos de vatios. Su alcance va desde los cientos de metros hasta los cientos de kms, ampliables si se instalan repetidores. Dentro de las tecnologías NB-PLC se pueden diferenciar dos grandes grupos según la tasa de bit que ofrecen:

- Baja tasa de bit o LDR (*Low Data Rate*): se trata de tecnologías con una sola portadora que alcanzan unos pocos kbps. Algunas tecnologías típicas NB-LDR son las que incluyen las recomendaciones ISO/IEC 14908-3 (LonWorks), ISO/IEC 14543-3-5 (KNX); CEA-600.31 (CEBus); IEC 61334-3-1, IEC 61334-5 (FSK and spread-FSK), etc. Otras tecnologías propietarias son Insteon; X10; HomePlug C&C; SITRED; Ariane Controls; BacNet, etc. Estas tecnologías se han venido utilizando típicamente en la automatización de los hogares o domótica.
- Alta tasa de bit o HDR (*High Data Rate*): este grupo está formado por tecnologías que utilizan técnicas de transmisión más eficientes, tales como OFDM, capaces de alcanzar tasas de bit de entre las decenas de kbps hasta los 500 kbps. Este es el grupo que más estándares en desarrollo está recabando actualmente, tales como G.hnem (ITU-T G.9905), IEEE 1901.2., ITU-T G.9904 (PRIME) e ITU-T G.9903 (G3-PLC).

La tecnología NB-PLC, especialmente en su versión HDR goza de un gran auge en la actualidad. Esto se debe a la implementación de modulaciones robustas como OFDM que, combinadas con técnicas de detección de errores y sistemas de entrelazado, presentan un buen rendimiento en entornos hostiles ofreciendo tasas de bits considerables [77] y [78]. Otro motivo del éxito actual de las tecnologías NB-PLC es que los requisitos computacionales y de memoria son directamente proporcionales al ancho de banda de señal procesado por el módem, lo que supone una ventaja frente a los sistemas BB-PLC [79]. Finalmente, la modernización de las redes eléctricas también está favoreciendo esta tecnología. NB-PLC es la alternativa que mejor se adapta a aplicaciones AMI, dado que los despliegues de medidores se ubican fundamentalmente en la sección LV de la red eléctrica.

Los rangos de frecuencia asignados a las aplicaciones de NB-PLC varían según el área geográfica. Mientras que en Europa CENELEC define un rango de 3 a 148.5 kHz, en EEUU y Canadá FCC e ICES, respectivamente, lo hacen de 0 a 535 kHz, en Japón ARIB define el rango 10 – 450 kHz y en China va desde los 3 a los 500 kHz [80].

El principal aspecto a tener en cuenta a la hora de delimitar frecuencias son las posibles interferencias con los servicios por radio. En EEUU, por ejemplo, se permite inyectar señales limitadas en banda ancha en cableado no aislado siempre que no esté diseñado para propagar ondas de radio en el espacio abierto. Además de contemplar un mayor rango de frecuencias para el uso de NB-PLC, EEUU, Canadá, Japón y China permiten el uso del rango de frecuencias sin asignación específica de bandas para uso exclusivo y sin protocolo concreto, lo que hace que el abanico de posibles aplicaciones sea mayor. Por el contrario, CENELEC especifica para Europa cuatro bandas de frecuencias distintas según el uso de las mismas, tal y como se puede ver en la Figura 7.

- Banda A: rango 3 – 95 kHz, reservada exclusivamente a compañías eléctricas. Sin embargo, debido a que en el rango inferior de frecuencias se concentran más interferencias, la mayoría de equipos PLC en esta banda operan en el rango superior (a partir de los 30 kHz – 40 kHz);

- Banda B: rango 95 – 125 kHz, accesible para cualquier aplicación;
- Banda C: rango 125 – 140 kHz, destinada a aplicaciones en redes domésticas con protocolo de acceso múltiple por detección de portadora y prevención de colisiones o CSMA/CA (*Carrier sense multiple access with collision avoidance*) obligatorio. Las estaciones que quieran transmitir deberán usar la frecuencia 132.5 kHz para informar de que el canal está en uso;
- Banda D: rango 140 – 148.5 kHz, usada para sistemas de alarma y seguridad.

CENELEC está enfocada a aplicaciones clásicas en banda estrecha, con una potencia de señal máxima de 5 mW y tasas de hasta 144 kbps en distancias en torno a los 500 m. En términos genéricos, se trata de un ancho de banda de 86 kHz y una potencia máxima del modulador de 5 V. Estas cifras son consideradas por algunos sectores como un tanto conservadoras en el contexto actual y más cuando se comparan con la regulación FCC [77].

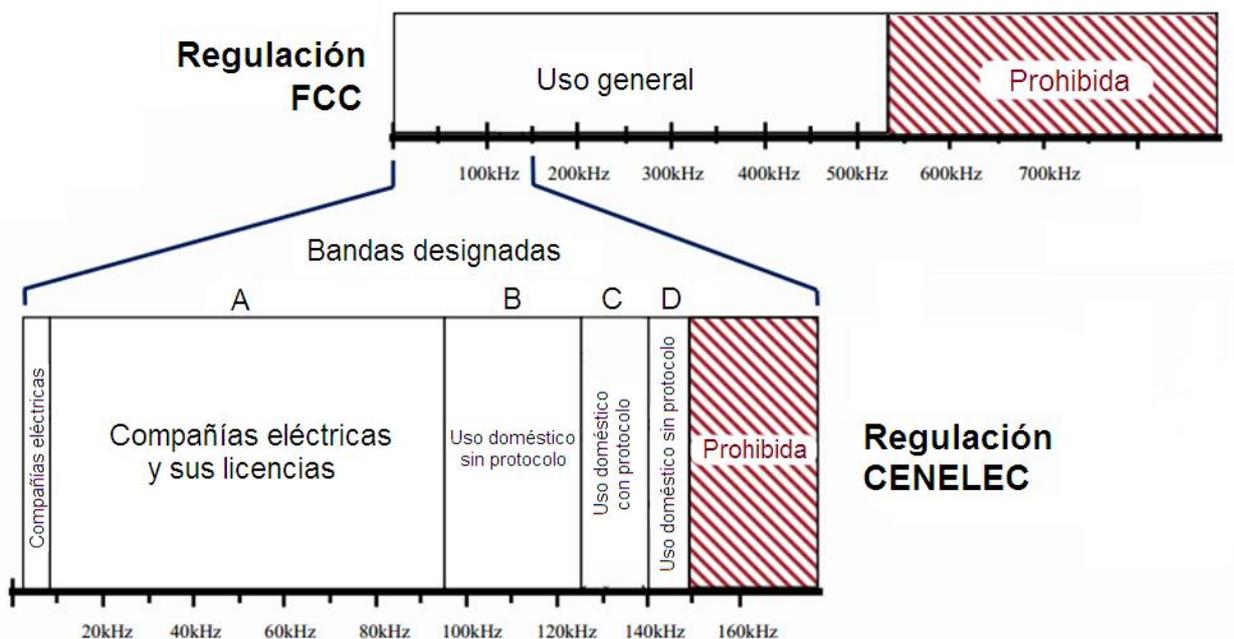


Figura 7. Especificación de bandas CENELEC en Europa y comparativa con la regulación FCC en Estados Unidos [81].

c) PLC en banda ancha (BB-PLC o BPL)

Esta tecnología se caracteriza por trabajar en una banda de frecuencias que van de los 1.8 a los 250 MHz (bandas HF/VHF) con una tasa de bit desde unos pocos Mbps hasta cientos de Mbps. Hasta los 100 MHz se denominan comunicaciones a alta frecuencia y por encima de ese valor ya se consideran muy alta frecuencia.

Tradicionalmente, han venido usando modulaciones SS y también OFDM, ya que mitiga las interferencias que la señal PLC a alta frecuencia pueda originar en los sistemas radio mediante la eliminación de frecuencias específicas. BB-PLC se utiliza

en aplicaciones de corto alcance, desde cientos de metros hasta pocos kilómetros. Sus primeros usos fueron para el acceso a Internet, de ahí que a esta tecnología también se la conozca como *Power Line Internet* [82]. De hecho, la mayoría de aplicaciones BB-PLC en baja tensión han sido para el acceso a internet [75]. Esta tecnología se posiciona como alternativa más económica a otros servicios más conocidos de banda ancha como son xDSL [57], [83].

La tecnología BB-PLC se desarrolló con mayor rapidez en Europa que en Estados Unidos, debido a una diferencia histórica en la forma de diseñar el sistema eléctrico. La señal BB-PLC no puede superar los transformadores que reducen los niveles de tensión en el sistema eléctrico, ya que su alta inductancia equivale a un filtro paso-bajo, bloqueando de esta forma el paso de señales a alta frecuencia, por lo que en este caso sería necesario usar repetidores. En EEUU, donde un transformador sirve a unos pocos hogares, a diferencia de los cientos de hogares en el sistema europeo, el uso de BB-PLC implicaría la instalación de muchos más repetidores que en una ciudad europea. Por el contrario, como el ancho de banda se comparte entre menos hogares, la velocidad de conexión sería mayor.

Pese a todo, Estados Unidos es el país con mayor despliegue BB-PLC, especialmente para el acceso a internet de banda ancha, de ahí que habitualmente se denomine *Broadband over Power Lines*. En Europa, BB-PLC se ha ido extendiendo progresivamente en aplicaciones domésticas y desde comienzos del año 2000 se está posicionando con fuerza mediante varias alianzas: HomePlug, UPA, HD-PLC y HomeGrid Forum. Los productos desarrollados por estos grupos se caracterizan por no ser interoperables entre sí.

2.2.2.3. Clasificación según la tensión de la señal

Esta clasificación se puede considerar dentro de PLC en AC, ya que, en general, la distribución de la electricidad hasta los puntos de consumo se hace en AC.

En Europa y Estados Unidos la red de transporte y distribución del sistema eléctrico está organizado en subredes de alta, media y baja tensión; HV, MV y LV, respectivamente, de acuerdo a los esquemas de la Figura 8 y la Figura 9.

Las líneas de alta tensión, que conectan los puntos de generación con las estaciones de distribución, transportan del orden de cientos de kV sobre distancias de decenas de km. Las líneas de media tensión, encargadas del transporte desde las estaciones de distribución hasta los transformadores, lo hacen en órdenes de magnitud de hasta la centena de kV sobre pocos km. Finalmente las de baja tensión, que conectan transformadores con puntos individuales de consumo, llevan unos pocos cientos de voltios sobre distancias de pocos cientos de metros hasta algunos km.

En EEUU cada transformador alimenta sólo a unos pocos de puntos de consumo, entre 1 y 8, lo que les permite usar transformadores relativamente pequeños. En cambio, en Europa cada transformador puede servir hasta 200 puntos de consumo. Normalmente la configuración en tres fases (3 fases activas más el neutro) es la predominante en Europa; por el contrario, en EEUU la más común es la configuración en dos fases. Con respecto a la tensión nominal, en EEUU es de 120 V a 60 Hz mientras que en Europa es de 230 V a 50 Hz entre una fase y el neutro, y de 400 V

entre dos fases activas. Según las localizaciones existen además diferentes configuraciones (estrella, anillo, etc).

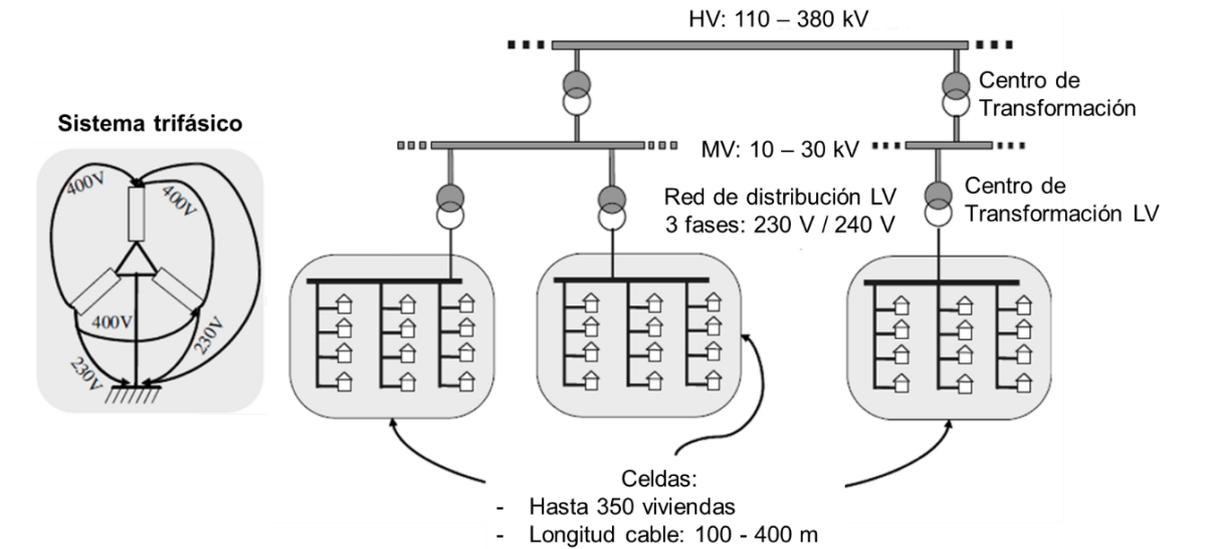


Figura 8. Esquema del sistema de suministro eléctrico en Europa [56].

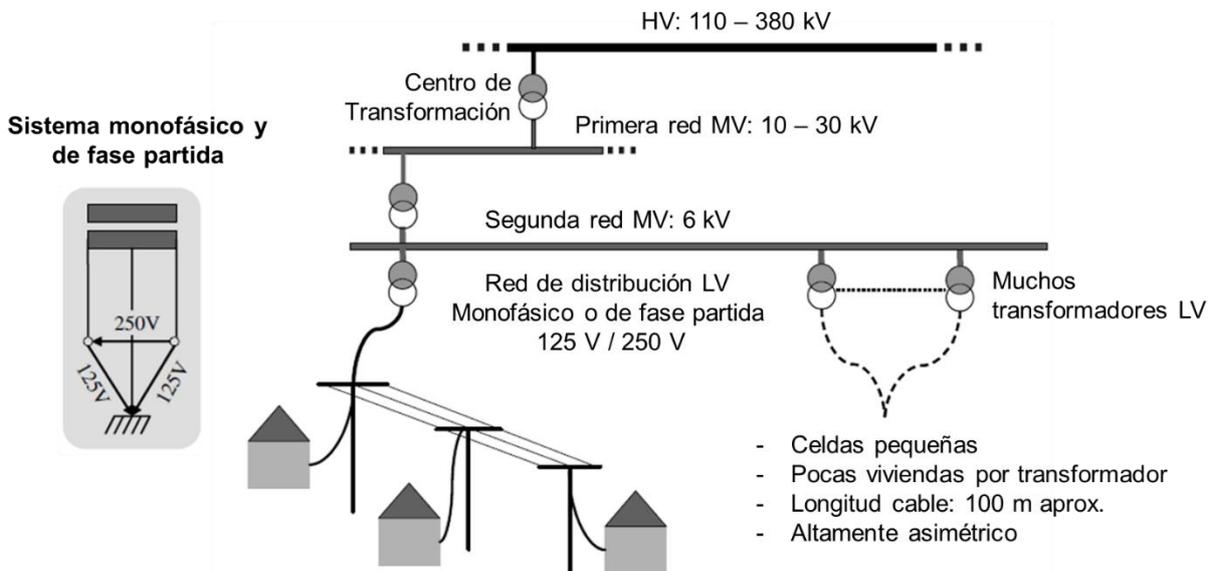


Figura 9. Esquema del sistema de suministro eléctrico típico en Asia y América [56].

En la Tabla 5 se recoge un resumen de sus principales características de las secciones del sistema eléctrico relativas al uso de PLC, y que se comentan en los siguientes subapartados.

| Secciones del sistema eléctrico y características | | | | | |
|---------------------------------------------------|------------------|----------------------------|---------------------------------------|-----------|---------------------------------------|
| | | Alta tensión, HV | Media tensión, MV | | Baja tensión, LV |
| Cable | | Aire libre | Aire libre | Enterrado | Enterrado |
| Banda PLC | | UNB, BB | UNB,NB, BB | | UNB, NB, BB |
| Rendimiento por Banda | | Bajo, medio | Bajo, bajo, alto | | Bajo, bajo, alto |
| Pérdidas (dB/km) | f=100 kHz | 0.01 – 0.09 | 0.5 - 1 | 1 - 2 | 1.5 - 3 |
| | f=10 MHz | 2 - 4 | 30 - 50 | 50 - 80 | 160 - 200 |
| Nivel Aplicaciones | | Servicios para la compañía | Servicios para la compañía y usuarios | | Servicios para la compañía y usuarios |

Tabla 5. Características de las secciones del sistema eléctrico relativas al uso de PLC.

a) PLC en alta tensión

Debido a sus características, el cableado en alta tensión es un buen conductor y se comporta como un filtro paso banda invariante con el tiempo [1]. Además, el número de cruces de línea es mucho menor que en baja tensión, por lo que una potencia de transmisión de tan sólo 10 W puede alcanzar distancias de 500 km o más [84]. Por lo tanto, esta sección del sistema eléctrico es la más favorable de todas para las comunicaciones. En sus orígenes esta tecnología se destinó a servicios de voz y teleprotección [85] y en la actualidad se utiliza tanto para sistemas analógicos como digitales.

Tradicionalmente se han venido usando UNB-PLC y BB-PLC en esta sección, pero, dadas las bajas pérdidas que presenta la alta tensión, hay un creciente interés por utilizar NB-PLC (especialmente el rango superior, hasta los 500 kHz), como lo muestra la reciente aparición de estándares al respecto, como el IEC 62488 [86].

b) PLC en media tensión

Este segmento del sistema eléctrico interconecta subestaciones secundarias entre sí y con las subestaciones primarias, lo que implica un elevado número de interconexiones y de transformadores asociados, así como de diferentes tipos de conductores, lo cual dificulta las comunicaciones PLC.

Los enlaces en media tensión más largos deben usar frecuencias en bandas bajas para garantizar un mínimo de eficacia, pero en general se puede usar tanto BB-PLC como NB-PLC, aunque teniendo en cuenta la evolución y futuras necesidades de las SGs, parece más conveniente usar BB-PLC en esta sección y emplear NB-PLC para la baja tensión, donde su uso está ampliamente extendido [78].

Sin embargo, en comparación con las aplicaciones en baja tensión, el uso de BB-PLC en media tensión ha recabado significativamente menor atención [87]. Por otro lado, algunas tecnologías en banda estrecha inicialmente concebidas para la baja tensión (tales como IEC 61334, PRIME, G3, IEEE 1901.2 e ITU G.9955/56) se están empezando a utilizar en media tensión, bien sea porque son capaces de atravesar los transformadores de distribución o porque se realiza a través de acopladores [75].

c) PLC en baja tensión

Se trata de la sección de la red de distribución que parte del secundario del transformador de media a baja tensión hasta los puntos finales de consumo. También se le puede encontrar bajo las siglas de RPC (*Residential Power Circuit*) y DLC (*Distribution Line Communication*). Esta sección de la red se caracteriza por tener cientos de usuarios conectados a ella (y sus correspondientes medidores). La carga en esta parte de la red es impredecible y de naturaleza heterogénea, ya que los patrones de consumo varían en función de muchos factores y porque el conjunto de dispositivos eléctricos de los usuarios tiene diferentes características eléctricas. Por lo tanto, en principio se trata de un medio hostil para las comunicaciones.

El PLC en baja tensión es probablemente el que más tarde se ha abordado (de forma seria, desde hace una década o dos [84]), pero actualmente es el que mayor interés suscita. En Europa, concretamente, empezó a recabar un interés especial a comienzos de 1998, con el fin de los últimos monopolios de las telecomunicaciones [69]. Históricamente, las dos motivaciones más importantes para el desarrollo de PLC en baja tensión por parte de las compañías eléctricas han sido la gestión de la carga y la telemedida en general, no sólo como contadores eléctricos, sino incluyendo también las lecturas de consumo de gas y agua. Curiosamente, en Estados Unidos el desarrollo en esta última línea vino a raíz de los relativamente altos salarios del personal encargado de tomar las medidas de los contadores y que las compañías eléctricas no podían revertir al consumidor, algo que sí ocurría en Europa en algunos casos [88]. Tradicionalmente, esta sección de la red se ha venido gestionando con NB-PLC, porque las compañías eléctricas se han centrado en satisfacer las necesidades operacionales, sin concebir servicios adicionales a los clientes, además del ahorro económico que supone frente al despliegue BB-PLC [78].

En general, en el lado de la transmisión (HV) la atenuación y la dispersión son bajas, y éstas aumentan progresivamente a medida que nos acercamos a los tramos de distribución (MV) y consumo (LV).

2.2.3. Estándares PLC

A lo largo de su evolución, los sistemas PLC han priorizado el buen funcionamiento en condiciones reales a la estandarización en sí, especialmente en sus orígenes. Además, las diferentes configuraciones del sistema eléctrico según su localización dificultan los procesos de estandarización. No obstante, los esfuerzos por estandarizar los sistemas se han ido sucediendo a lo largo de las últimas décadas, especialmente las dos últimas [76].

Algunos de los parámetros más importantes que recogen los estándares y recomendaciones son la distribución del espectro de frecuencias (aspecto abordado en el apartado 2.2.2.2) y la potencia máxima de transmisión, todo ello con el objetivo de evitar las interferencias con otros sistemas de telecomunicaciones y de maximizar la eficiencia del sistema [56]. La Tabla 6 recoge los principales estándares PLC así como sus características más relevantes.

| Principales estándares PLC y características | | | | | |
|------------------------------------------------------|------------|----------------|----------------------|-------------|----------------------------------------------------------------------------|
| Nombre | Ratio | Ancho de banda | Rango de frecuencias | Sección red | Aplicaciones |
| IEC 60495 [89] | ≤120 bps | UNB | 30 Hz-3 kHz | HV | Teleprotección |
| IEC 62488 [90] | ≤ 500 Kbps | NB | 3 – 500 kHz | HV | Aplicaciones de red |
| IEC 61334 [91] | ~ kbps | NB-LDR | 20-100 kHz | LV/MV | Telemida y SCADA |
| IEEE 1901[79] | ≤ 200 Mbps | BB | 1.8–250 MHz | LV | Acceso a internet, aplicaciones para SGs |
| IEEE 1901.2 [72] | ≤ 500 Kbps | NB-HDR | 10 – 490 kHz | LV/MV y DC | AMI, DA, EVs NAN, HAN |
| TWACS [92] | ≤120 bps | UNB | 30 Hz-3 kHz | HV | Telemida clásica (AMR) y AMI, control de carga |
| LonWorks/ LonTalk [93] | 3 – 6 kbps | NB-LDR | 115 – 132 kHz | LV | Automatización en redes domésticas, telemida |
| Digital Home Standard DHS [94] | ≤160 Mbps | BB | 3 – 33 MHz | LV | Acceso a internet, aplicaciones domésticas |
| Universal Power Line Bus (UPB) [95] (mejora del X10) | 240 bps | NB | 4 – 40 kHz | LV/MV | Comunicaciones para control y comandos |
| HomePlug AV (HPAV) [96] | >100 Mbps | BB | 86 MHz max. | LV/MV | Diferentes versiones para diferentes usos: telemida, seguridad, multimedia |
| HomePlug Green PHY (HPGP) [97] | ≤ 10 Mbps | BB | 2 – 30 MHz | LV/MV | Aplicaciones en redes domésticas y EVs |
| HomePlug Command&Control [98] | ≤500 kbps | NB-HDR | 100 – 400 kHz | LV | Aplicaciones de bajo coste |
| ITU-T G.hn [99] | ≤ 1 Gbps | BB | 1.8 – 250 MHz | LV/MV | Acceso a internet, redes domésticas |
| ITU-T G.hnem [100] | ≤ 1 Mbps | NB-HDR | < 500 kHz | LV/MV | Telemida, redes domésticas y EVs. |
| G3 [101] | ≤35 kbps | NB-HDR | 3 – 500 kHz | LV/MV | Telemida, aplicaciones de control, redes domésticas |
| PRIME [102] | ≤130 kbps | NB-HDR | 3 – 500 kHz | LV | Telemida y aplicaciones de control |

Tabla 6. Principales estándares y especificaciones PLC.

2.2.4. Problemática de las comunicaciones PLC

Además de las ventajas de la tecnología PLC, descritas en el apartado 2.2, también presenta inconvenientes, derivados del uso de la red eléctrica como medio de transmisión de señales de comunicaciones. El principal problema es que el cable eléctrico no se concibió para la transmisión de datos, ni los equipos conectados a la red fueron diseñados para respetar la calidad de las comunicaciones. Esto hace que el problema de la propagación y de las posibles interferencias en las comunicaciones sea inherente a la tecnología PLC.

Respecto al cable eléctrico como medio de propagación, la reactancia inductiva de la red es la que domina los efectos de la propagación [63]. Además, el cable está compuesto por diversos materiales y secciones que generan un amplio rango de impedancias en distintos puntos de la red. El comportamiento del cable también cambia según el momento del día (de acuerdo a los dispositivos que estén conectados a él) y las condiciones atmosféricas (temperatura, humedad, presión, etc.) [103]

Además, la respuesta del canal es diferente según la sección eléctrica [104]; mientras que en la red de transmisión la atenuación y la dispersión son pequeñas, a medida que se avanza en la red de distribución hacia los puntos finales de consumo, éstas aumentan considerablemente, especialmente a altas frecuencias [1] [105].

Por lo tanto, la atenuación en PLC se caracteriza por depender de la topología de la red, de la localización de los dispositivos de comunicación y de las cargas y también es dependiente del tiempo y de la frecuencia.

De forma sintética, pueden enumerarse las principales fuentes de atenuación y distorsión en PLC como sigue [70]:

- Impedancia de las cargas conectadas a la red de baja tensión;
- Existencia de múltiples fases eléctricas: si las señales PLC se inyectan en una fase, éstas tienen que viajar al resto a través del transformador o alguna carga que vaya conectada entre fases, lo que atenúa notablemente las señales;
- Transformadores eléctricos: los transformadores provocan una gran atenuación en los equipos PLC instalados en el lado del primario y secundario, por ejemplo, en la comunicación entre contadores instalados en la red de baja tensión y el concentrador localizado en la media tensión;
- Pérdidas en la línea eléctrica: la impedancia característica del cableado puede aumentar la atenuación de la señal;
- Propagación multicamino: la propagación por múltiples vías y las reflexiones producidas por la diferencia de impedancias pueden atenuar la señal PLC;

La Figura 10 muestra de forma gráfica un ejemplo de la evolución de la atenuación con la frecuencia y el tiempo. El hecho de que la atenuación tienda a decrecer a frecuencias mayores tiene que ver con la impedancia de acceso. Mientras que en el rango de los MHz la impedancia de acceso está relacionada con las impedancias de la

propia línea, en el rango de los kHz son las impedancias de las cargas conectadas las que influyen de manera decisiva en la impedancia de acceso [56].

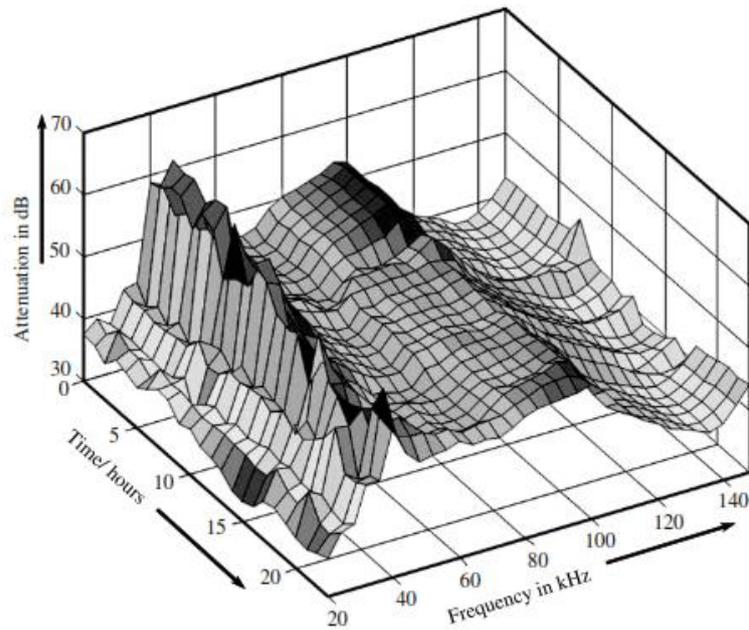


Figura 10. Gráfico de la variación de la atenuación en PLC con el tiempo y la frecuencia [56].

Además de los problemas de propagación en el cable eléctrico, la presencia de interferencias dificulta la calidad de las comunicaciones. A diferencia de otros canales de comunicación, las emisiones interferentes no pueden ser caracterizadas por un ruido aditivo blanco Gaussiano (AWGN) estacionario, por lo que su modelado es más complicado. Además, al contrario que ocurre con la dispersión y la atenuación, cuya influencia se acentúa a medida que nos aproximamos a los puntos de distribución y consumo, el ruido en PLC está presente en todas las secciones del sistema eléctrico [1]. Estas emisiones interferentes están originadas por las cargas y dispositivos eléctricos conectados a la red, y por lo tanto, varían según el momento del día, la localización y la frecuencia, precisamente por la naturaleza heterogénea de las cargas y dispositivos. Por lo tanto, el nivel de emisiones en un punto determinado vendrá dado por la combinación de todas las ondas de ruido procedentes de diferentes fuentes [56].

La heterogeneidad del ruido o emisiones interferentes en PLC permite clasificarlos en diversos tipos [56] [70]:

- Ruido continuo o “de fondo” (*background*), consistente a en la superposición de varias fuentes de ruido de baja intensidad y cuya densidad espectral de potencia (PSD) decrece con la frecuencia. A su vez puede clasificarse en:
 - Invariante con el tiempo: está caracterizado por tener una envolvente de onda constante durante un largo periodo. Un ejemplo de este tipo es el ruido térmico generado por la circuitería interna de un dispositivo.
 - Variante con el tiempo: en este caso, la envolvente cambia sincronamente con el voltaje de la línea. Por lo tanto, el período del

ruido es la mitad de la duración del ciclo de la red. Este ruido suele ser frecuente en sistemas NB-PLC. Por ejemplo, el ruido de las lámparas fluorescentes accionadas por inversores.

- Ruido impulsivo: consistente en impulsos de corta duración y elevada amplitud. Se pueden clasificar a su vez en tres tipos:
 - Síncrono con el voltaje de la línea en AC: la forma de onda del ruido es un tren de impulsos de frecuencia igual o el doble que la de la red. Un ejemplo de esto es el ruido generado por los reguladores de luz o los motores de cepillo. Es más habitual en el rango de 50 a 100 Hz y su DSP disminuye con la frecuencia.
 - Asíncrono con el voltaje de la línea en AC: en este caso, el tren de impulsos se propaga con una frecuencia mucho mayor que la de la red. Por ejemplo, el ruido originado por los reguladores conmutados. Suele estar presente en el rango de 50 a 200 kHz.
 - Impulsos aislados: ocurren de forma aleatoria y sin frecuencia fija, de muy corta duración y a menudo con largos intervalos entre ellos (de más de varios segundos). Son típicamente causados por conmutaciones, como por ejemplo los interruptores de pared o los bancos de condensadores empleados para la corrección del factor de potencia. Debido a la dificultad de su modelado, este tipo de ruido fue ignorado durante mucho tiempo. Sin embargo, en la práctica ha resultado ser una importante señal interferente, debido a que su considerable nivel de potencia afecta seriamente a las comunicaciones, y a que la duración del impulso suele ser mayor que la longitud del símbolo [69]. Este tipo de ruido está caracterizado por tres variables aleatorias: amplitud, anchura del impulso y tiempo entre impulsos, por lo que han de emplearse métodos estadísticos para su caracterización [106].
- Ruido de banda estrecha: se caracteriza por ser sinusoidal con amplitudes moduladas. Este tipo de ruido está causado por equipos de difusión de onda corta y puede afectar a diferentes sub-bandas NB-PLC.

La Figura 11 representa el escenario de ruido en PLC de forma sintética: el dispositivo emisor emite una señal PLC, $s(t)$, que, tras pasar el canal con una respuesta al impulso $h(t)$, llega a un nodo donde se le añaden una serie de ondas interferentes $n(t)$. Finalmente, la señal resultante $r(t)$ llega al receptor.

Finalmente, la Figura 12 muestra un ejemplo de diferentes tipos de ruido identificados en el canal PLC, donde se puede apreciar el ruido de fondo, más visible a frecuencias bajas; el ruido de banda estrecha, con unos picos de potencia similares al máximo del ruido de fondo, y ruido periódico a partir de 55 kHz [107].

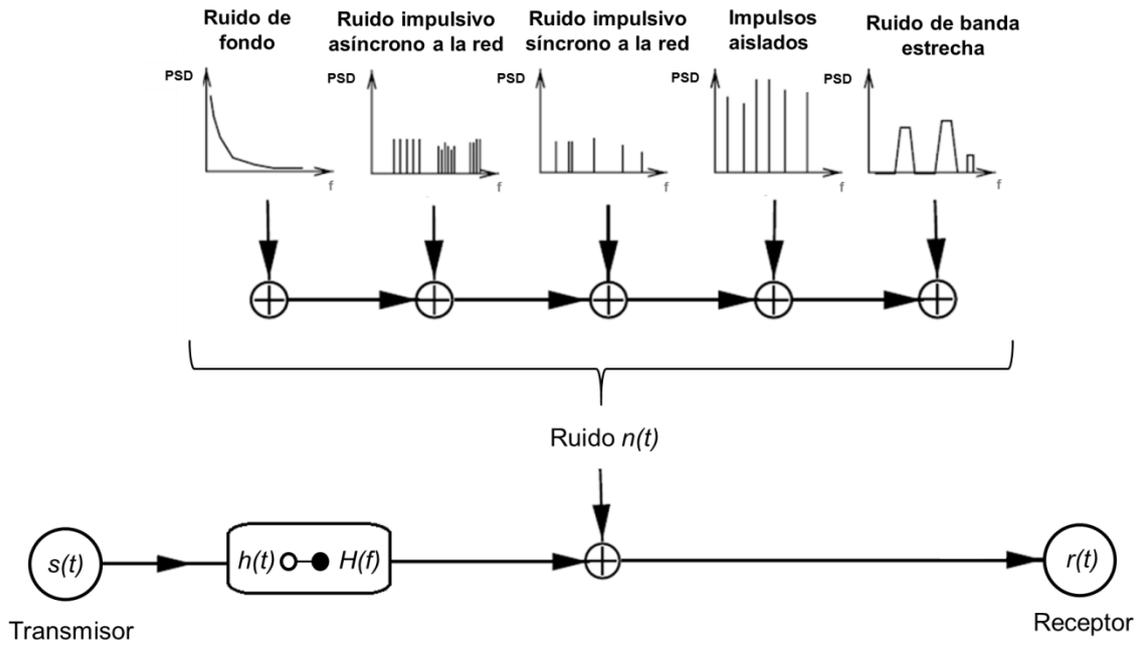


Figura 11. Representación del canal PLC y de los diferentes tipos de ruidos existentes así como su distribución espectral de potencia con la frecuencia. Adaptado de [69].

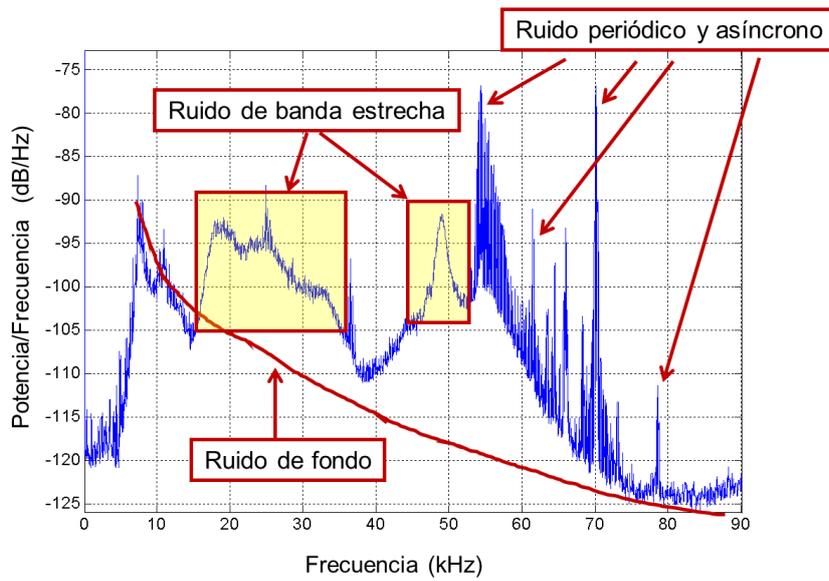


Figura 12. Ejemplo de una señal PLC con diferentes tipos de ruidos identificados [107].

2.2.5. PowerLine Intelligent Metering Evolution, PRIME

La tecnología implementada en el sistema de medida de la microrred del CEDER-CIEMAT es PRIME v1.3.6, un sistema NB-PLC que emplea modulación multiportadora OFDM, permite escoger entre tres modulaciones digitales distintas para las portadoras y trabaja en el rango de frecuencias de 41.992 a 88.867 kHz en baja tensión. De esta forma, evita la parte inferior de la banda CENELEC-A (3-95 kHz), descrita tradicionalmente como “más ruidosa” [102].

El estándar define la capa física o PHY (*Physical*), encargada de transmitir y recibir tramas entre nodos; la capa de acceso al medio o MAC (*Medium Access Control*), que se ocupa de todas las funcionalidades referentes al acceso al sistema, uso del ancho de banda y gestión de la conexiones; y la capa de convergencia o CL (*Convergence Layer*). Además, también describe el plano de gestión, como se puede ver en la Figura 13. Este modelo de capas se mantiene para la especificación posterior del estándar, v.1.4.

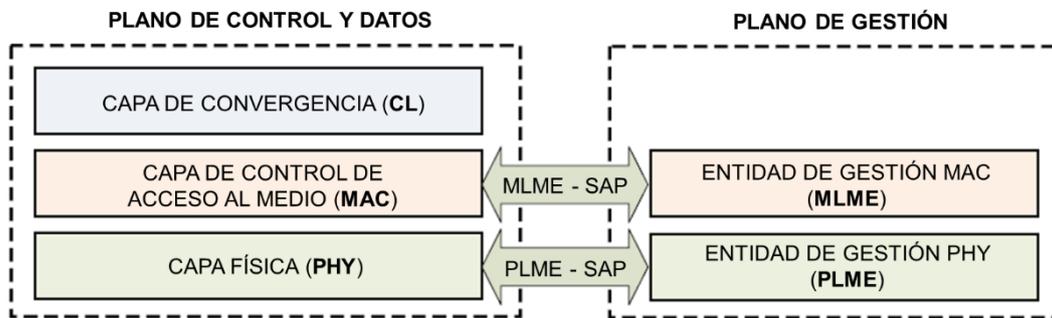


Figura 13. Modelo de capas empleado en la especificación PRIME [102].

2.2.5.1. Capa física (PHY)

La capa física PRIME emplea una modulación OFDM adaptativa que emplea 97 subportadoras equiespaciadas y transmitidas en símbolos de 2240 microsegundos de duración con un ancho de banda disponible que supera los 47 kHz. OFDM dota a PRIME de robustez frente al ruido de banda estrecha y de un máximo aprovechamiento del espectro disponible. El estándar admite tres modulaciones diferenciales posibles: DBPSK, DQPSK y D8PSK, que pueden ser usadas con un código convolucional. La especificación v1.4 incluye también dos modos adicionales denominados DBPSK robusto y DQPSK robusto. PRIME v1.3.6 incluye junto con OFDM un sistema de corrección de errores y entrelazado de datos.

El diagrama del transmisor en la capa PHY, representado en la Figura 14, recibe las tramas de la capa MAC que, tras pasar por el verificador de redundancia cíclica o CRC (*Cyclic Redundancy Check*), donde se detectan posibles cambios en los datos, se codifican con un codificador binario convolucional y sus datos se entremezclan, en un proceso conocido como *interleaving*. Las interferencias de banda estrecha típicas en PLC hacen que las subportadoras muestren amplitudes distintas en el receptor, lo que puede provocar que unos grupos de subportadoras sean menos fiables que otros. Por ello, el entrelazador hace que la presencia de bits erróneos se distribuya de forma aleatoria antes del decodificado. En el transmisor, los bits codificados se permutan después del entrelazado para garantizar que los bits adyacentes estén separados por

otros bits. Dependiendo de la constelación empleada, PRIME usa hasta tres esquemas distintos de entrelazado. Además, se emplea un barajador o *scrambler* antes del entrelazado para evitar que aparezcan secuencias largas de bits idénticos. Tras el entrelazado, los datos se modulan usando un esquema DBPSK, DQPSK o bien D8PSK. El estándar detalla las velocidades obtenidas para cada modulación escogida, que están recogidas en la Tabla 7. El siguiente paso es la modulación OFDM, que se realiza mediante una transformada inversa rápida de Fourier o IFFT, y el generador del prefijo cíclico [102].

Una trama PRIME tiene tres partes principales (ver Figura 15):

- **Preámbulo:** cada transmisión comienza con un preámbulo prefijado, que cumple con el papel de sincronización.
- **Cabecera:** contiene información referente al esquema de modulación empleado para los datos y su longitud, así como información referente al control y detección de errores. La cabecera se modula con DBPSK y siempre usa detección de errores.
- **Datos (*payload*):** los datos pueden emplear DBPSK, DQPSK o bien D8PSK, dependiendo del nivel señal a ruido existente. La capa MAC es la encargada de seleccionar la modulación óptima de acuerdo a la información recopilada sobre errores en las tramas previas.

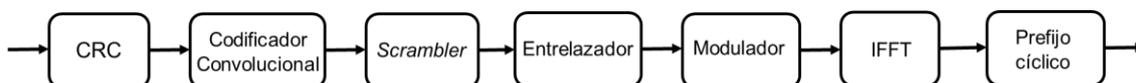


Figura 14. Diagrama de bloques del transmisor PHY en PRIME [102].

| Resultados según modulación | DBPSK | | DQPSK | | D8PSK | |
|------------------------------------------|-------|------|-------|------|-------|-------|
| Codificador convolutivo | Sí | No | Sí | No | Sí | No |
| Bits de información por subportadora | 0.5 | 1 | 1 | 2 | 1.5 | 3 |
| Bits de información por símbolo OFDM | 48 | 96 | 96 | 192 | 144 | 288 |
| Velocidad de transmisión (aprox.) [kbps] | 21.4 | 42.9 | 42.9 | 85.7 | 64.3 | 128.6 |

Tabla 7. Rendimientos obtenidos según modulación escogida en PRIME [102].

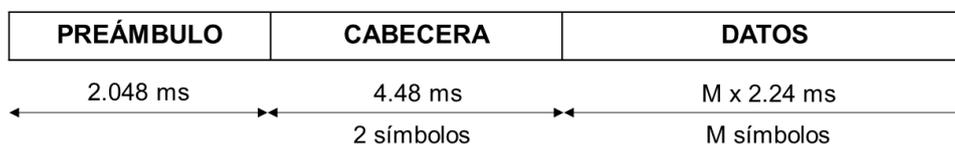


Figura 15. Formato de trama en PRIME [102].

2.2.5.2. Capa de acceso al medio (MAC)

La capa MAC es la encargada de funciones clave como la gestión de las conexiones y la formación de la topología de la red. Además, está orientada a la conexión, lo que implica que cualquier intercambio de información requiere necesariamente el establecimiento de una conexión previa. A cada nodo se le asigna una dirección MAC universal (EUI-48) por parte del fabricante, que se utiliza durante el proceso de registro en la subred [102]. En PRIME los dispositivos se configuran de forma automática en forma de árbol en donde se puede diferenciar dos tipos de nodos:

- Nodo base o BN (*Base Node*): hace las veces de “raíz” del árbol formado por los dispositivos. Un BN por sí mismo forma una subred y sólo puede haber un BN por subred, por lo tanto, la dirección MAC de éste hace las veces de identificador de dicha subred o SNA (*SubNetwork Address*). De esta forma, una red PRIME puede estar formada por múltiples subredes con un BN cada una. El BN es el encargado de gestionar la subred y por lo tanto, está al cargo de la gestión de todos los recursos y conexiones que ocurren en ella. Los BN están típicamente embebidos en los concentradores de datos, como se detalla en el Capítulo 3. Las principales funciones del BN pueden enumerarse como sigue:
 - Transmisión de *beacons*: estas tramas sirven para garantizar el mantenimiento de la conectividad en la subred y son enviadas por el BN cada cierto tiempo;
 - Gestión de registros: una vez más, es el BN quien se encarga de recibir las peticiones de registro de los nodos y aceptarlas o no;
 - Establecimiento y mantenimiento de las conexiones: la capa MAC en PRIME está orientada a la conexión, por lo que todas las conexiones previas al intercambio de datos son llevadas a cabo por el BN;
 - Promociones y bajas de nodos en la subred: el BN es el encargado de asignar los roles de los nodos, para lo que mantiene una tabla actualizada con los mismos;
 - Mediación en el acceso al canal: el BN decide sobre el uso del canal y la forma de acceder a él, ya sea de manera controlada o libre. En caso de ser de forma controlada, también se encarga de asignar el canal a los dispositivos correspondientes.
 - Distribución de secuencias aleatorias para encriptación: la encriptación que llevan todos los mensajes de control de la capa MAC se basa en un código aleatorio generado por el BN de forma periódica.
 - Gestión de grupos de multidifusión;
 - Gestión de las comunicaciones entre nodos: el tráfico que se intercambien dos nodos de la subred ha de pasar necesariamente por el BN.

- Nodo de servicio o SN (*Service Node*): forman las ramas y hojas del árbol. Los SNs se encargan de mantener la conectividad en la subred así como de propagar los datos de otros dispositivos vecinos, además de los suyos propios, si fuera necesario. De esta forma los SNs, típicamente embebidos en los medidores, pueden tener tres estados diferentes, tal y como se refleja en la Figura 16:
 - Desconectado (*Disconnected*): es el estado inicial de un SN cuando se alimenta eléctricamente. En esta fase no pueden comunicarse ni hacer de repetidores de sus nodos vecinos. Su función será por lo tanto la de buscar una subred de la que formar parte y registrarse en ella.
 - Terminal (*Terminal*): en este estado el SN es capaz de establecer conexiones y transmitir datos, pero no puede hacer de repetidor.
 - Repetidor (*Switch*): el SN sí es capaz de repetir datos de sus nodos vecinos dentro de la subred y además mantiene todas las funcionalidades del estado terminal. Los repetidores también envían tramas *beacon*. La función de los repetidores es muy importante, ya que propagarán las tramas a nodos y en general a secciones de la subred que no tengan conexión directa con el BN. Los *switches* reenvían la información de forma selectiva, es decir, sólo propagan aquellas tramas que tiene por origen o destino un SN conectado a él. Para ello comprueban en su tabla interna si el nodo en cuestión está conectado a él.

Los anteriores estados se alcanzan a través de los siguientes eventos, también reflejados en la Figura 16:

- Registro (*Register*): es el proceso por el cual un SN pasa a formar parte de la lista de nodos registrados en el BN y si culmina con éxito implica que el SN es parte de la subred. Representa el paso de desconectado a terminal.
- Baja (*Unregister*): en este proceso el SN es eliminado de la tabla de nodos registrados en el BN y puede ser iniciado por el SN o bien por el BN. Si se completa el proceso de baja implica que el SN ya no forma parte de la subred. Representa el paso de terminal o repetidor a desconectado.
- Promoción (*Promote*): en esta fase el SN promociona a repetidor, siendo capaz de reenviar la información de nodos vecinos. Representa la transición de terminal a repetidor.
- Descenso (*Demote*): esta transición implica que el SN en cuestión deja de tener capacidad de repetidor. Representa el paso de repetidor a terminal.

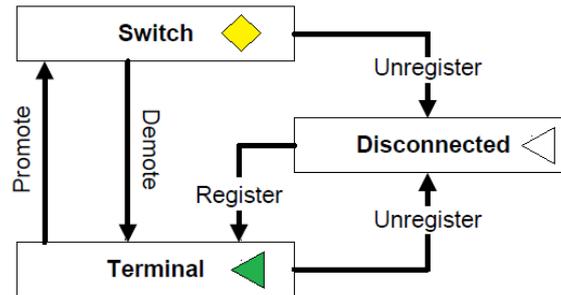


Figura 16. Diferentes estados posibles de un nodo de servicio en una subred PRIME [102].

Cuando un BN se conecta, automáticamente envía tramas *Beacon* en busca de posibles nodos que respondan a esas señales para sumarse a la subred. Por otro lado, los SNs conectados permanecen escaneando la banda en busca de una subred a la que conectarse. Los SNs que reciban los *Beacon* satisfactoriamente responderán a estas tramas y empezará su proceso de registro. Los SNs registrados se incluirán en la tabla de registros del BN y éste les asignará su identificador único en la subred o LNID (*Local Node Identifier*). Los SNs conectados directamente al BN forman el nivel cero de la subred. Aquellos nodos que no han sido capaces de conectarse directamente al BN envían peticiones *broadcast* que derivan en los nodos de niveles superiores solicitando su promoción a repetidores, proceso a cargo del BN, que es quien autoriza y gestiona dicha promoción. Una vez que la promoción solicitada se completa, al nodo promocionado se le asigna un identificador SID (*Switch Identifier*) y los nodos que no eran capaces de registrarse directamente en el BN lo harán a través del nodo repetidor [102].

En cualquier momento el BN, atendiendo a criterios de autoconfiguración, puede promocionar un SN de estado “terminal” a repetidor y viceversa. De esta forma, un nodo puede ser identificado en la subred a la que pertenece a través de su SID+LNID, denominado como NID (*Node Identifier*). Si al NID se le añade el SNA se obtiene el identificador de un nodo a nivel global (red). La estructura global de direccionamiento se completa con un identificador de la conexión a nivel de subred LCID (*Local Connection Identifier*) que se genera con la conexión de un nodo. Una conexión puede ser identificada a nivel local con la combinación NID+LCID. Una vez más, si se le añade el SNA se podrá identificar una conexión concreta a nivel global. La estructura y longitudes de direccionamiento se pueden ver en la Figura 17 [102].

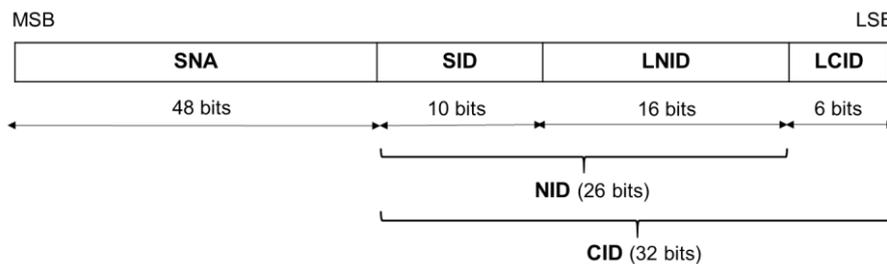


Figura 17. Estructura del direccionamiento y tamaños en PRIME [102].

Además de tramas concretas con información (por ejemplo, datos de medidas de los contadores), periódicamente se envían y reciben tramas *Keep Alive*, encargadas de garantizar la presencia de los nodos de la subred y por extensión, mantener la conectividad. Estas tramas se intercambian de forma periódica entre los SNs y el BN. Tras la recepción de un *Keep Alive* por parte del BN, el SN tiene que enviar otro *Keep Alive* como respuesta antes de que finalice un tiempo prefijado para ello, valor que es ajustado en los parámetros de configuración del BN. En caso contrario, el BN considerará que el SN ya no forma parte de la subred y comenzará el proceso de baja de ese SN. Si el tiempo para recibir tramas *Keep Alive* se incrementa, se reduce el tráfico circulante, lo que puede derivar en un mejor rendimiento del canal. Sin embargo, los cambios en la topología de la red serán más lentos. Por otro lado, si se reduce el tiempo de recepción de *Keep Alives*, la topología de la red se adaptará más rápidamente, pero a costa de incrementar el tráfico en el canal y por extensión, la probabilidad de colisiones y retransmisiones [102].

El acceso al canal en PRIME emplea CSMA/CA y el acceso múltiple por división de tiempo o TDM, por lo que el tiempo se divide en unidades temporales para el uso del canal llamadas *frames*. El BN y SNs pueden hacer uso del canal compartiendo éste con el resto de nodos conectados o SCP (*Shared Contention Period*) o también pueden solicitar un periodo libre de colisiones o CFP (*Contention-Free Period*). El acceso al canal en SCP no precisa de arbitraje alguno, pero sí que los nodos emisores han de respetar los límites de tiempo del SCP marcados en el *frame*. Por otro lado, en CFP los nodos han de solicitarlo previamente al BN, quien, dependiendo del nivel de ocupación del canal en ese momento, puede aceptar o denegar la solicitud. Un *frame* siempre estará formado por uno o más *Beacons*, un SCP y uno o ningún CFP, siguiendo el esquema de la Figura 18 [102].

La capa MAC en PRIME tiene cuatro tipos de unidades de datos características o PDUs (*Protocol Data Units*), con diferentes propósitos:

- MAC genérica: se emplean para datos y control en la mayor parte de aplicaciones de la subred, salvo aquellas que requieran otra PDU específico. La mayoría del tráfico de la subred es de este tipo. Esta PDU está formada por una cabecera MAC genérica y unos o más paquetes MAC así como el CRC calculado, tal y como se puede ver en la Figura 19. La cabecera contiene información sobre la dirección de la transmisión (hacia o desde el BN) y el nivel jerárquico del dispositivo emisor. Cada paquete tiene a su vez su propia cabecera y los datos. En la cabecera del paquete se incluye el origen/destino del paquete, tipo de datos que transporta y longitud así como información para la recepción del paquete.

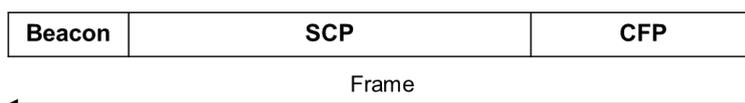


Figura 18. Estructura de un *frame* en PRIME [102].

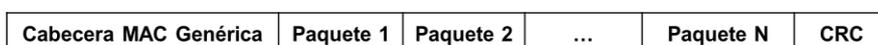


Figura 19. Estructura de una PDU MAC genérica en PRIME.

- **Petición de promoción:** este tipo de PDU es enviada por los SNs en estado “desconectado” cuando no reciben los *beacons* durante un periodo de tiempo. Cualquier nodo en estado “terminal” que reciba la petición iniciará el proceso de promoción que, si se completa con éxito, culminará con la promoción del SN a repetidor. En este caso, podrá retransmitir los *beacons* al nodo desconectado para que pueda formar parte de la subred.
- **Beacon:** se transmiten por el BN y SNs en estado repetidor por toda la subred con el objetivo de hacer circular información sobre el acceso al canal entre todos los nodos. En concreto, los *beacons* tienen información sobre el perfil de seguridad empleado en la subred, el dispositivo generador del *beacon* y su nivel jerárquico, el SNA de la subred y detalles de la estructura de la trama que sigue al *beacon* en cuestión.
- **Paquetes de control:** se encargan de transportar información de control de la capa MAC. Los paquetes de control aguas abajo son enviados por el BN y los nodos en estado repetidor para trasladar la información de control a uno o a todos los nodos. Por otro lado, los paquetes de control aguas arriba son enviados por los SNs para comunicarse con el nodo repetidor del que dependen o bien con el BN. Hay diez tipos distintos de paquetes de control MAC para transmitir diferentes tipos de información, tal y como se puede ver en la Tabla 8.

| Paquetes de control MAC | |
|-------------------------|---------------------------------------------------|
| Tipo Paquete | Descripción |
| REG | Gestión del registro de nodos en la subred. |
| CON | Gestión de las conexiones en la subred. |
| PRO | Gestión de la promoción de nodos. |
| BSI | Indicación del <i>slot</i> del <i>beacon</i> . |
| FRA | Cambios en la estructura del <i>frame</i> . |
| CFP | Petición de periodo libre de colisiones. |
| ALV | Señal de conexión de nodos (<i>Keep Alive</i>). |
| MUL | Gestión de envíos multidifusión. |
| PRM | Gestión de parámetros de robustez de la capa PHY. |
| SEC | Información sobre seguridad. |

Tabla 8. Tipos de paquetes de control MAC en PRIME [PRIME].

De manera práctica, y en el caso de la instalación de PRIME v1.3.6. disponible en la microrred del CEDER-CIEMAT, la topología de la red y su evolución se puede ver a través de conexiones *Web Services* o con la aplicación propietaria *ZIV PRIME Manager*, en adelante ZPM. Esta herramienta resulta muy útil para el análisis de las subredes PRIME ya que proporciona información detallada de la topología y el intercambio de tramas de comunicaciones. En concreto ofrece la siguiente información y utilidades [108]:

- **Evolución topológica de los SN y sus roles:** esta información se puede ver directamente en la herramienta u obtenerse en forma de ficheros *log* y proporciona, entre otros, la siguiente información cuando se conecta al BN de una subred PRIME:

- Dirección EUI48 de cada nodo.
- SID, LNID, SSID (identificadores para cada nodo en la subred, según la especificación del estándar PRIME)
- Nivel de cobertura, definido como la probabilidad P de una comunicación satisfactoria entre el BN y un SN en una misma subred. Estos valores son fijados por el BN y se cuantifica de 1 a 6 siguiendo el criterio indicado en la Tabla 9
- Versión *firmware* de cada nodo.
- Tiempo que un nodo lleva desconectado y tiempo transcurrido desde la activación del nodo.
- Además, sobre la topología de subred puede actuarse sobre los SNs y darlos de baja, promocionarlos o descenderlos de nivel.
- Tramas MAC: las tramas MAC intercambiadas entre el BN y los SNs recogen eventos tales como registros, promociones y bajas, paquetes de datos y cualquier evento de control de la red. El flujo de tramas MAC se puede ver en tiempo real en la aplicación a la par que se guarda en un fichero.
- Tramas 432: las tramas con el tráfico de medida se pueden ver en tiempo real en la aplicación e igualmente se guardan en un fichero.

| Nivel de Cobertura | Probabilidad P |
|--------------------|------------------------|
| 1 | $0 < P < 0.5$ |
| 2 | $0.5 < P < 0.75$ |
| 3 | $0.75 < P < 0.875$ |
| 4 | $0.875 < P < 0.9375$ |
| 5 | $0.9375 < P < 0.96875$ |
| 6 | $0.96875 < P < 1$ |

Tabla 9. Correspondencia entre el nivel de cobertura de un SN y la probabilidad P de que exista una comunicación satisfactoria entre el BN y un SN de la misma subred.

La Figura 21 muestra la herramienta ZPM conectada a una de las subredes de la microrred del CEDER-CIEMAT. En este caso, se puede ver el BN como raíz del árbol topológico (marcado con un círculo azul) y los 5 SNs registrados en él, donde el rombo amarillo denota el rol de repetidor o *switch* y el triángulo verde el rol de "terminal", de acuerdo a los estados explicados en la Figura 16. Además, se ha incluido la visualización del intercambio de tramas MAC. La herramienta presenta las tramas tanto en formato hexadecimal sin procesar (recuadradas en la figura) como decodificadas para una mejor interpretación del tráfico. En primer lugar se muestra el sentido de la trama, donde "TX" o "RX" representa una trama enviada por el BN hacia un SN o una trama recibida en el BN por parte de un SN, respectivamente. A continuación se muestran la fecha y el *timestamp* así como el tipo de modulación. Las siguientes líneas varían según el tipo de trama, pero en general todas incluyen el *SNA* de la subred (dirección *MAC* del BN), parámetros relacionados con la posición topológica del nodo en la subred y su repetidor (si lo hubiera) así como datos sobre la capa física. Las posibles tramas que identifica la herramienta son:

- *Beacon*: estas tramas las envía cada repetidor de la subred así como el BN con el objetivo de hacer circular información sobre el canal y el acceso a la capa MAC entre todos los nodos de la subred.
- BSI_IND: una trama puede contener más de un *Beacon* y la unidad de tiempo en la que se transmite un *Beacon* se denomina *Beacon-slot*. En determinados momentos, la frecuencia de envío de *Beacons* o sus *slots* pueden variar a criterio del BN, para lo que enviará esta información a los SNs repetidores de la subred vía tramas BSI_IND. Éstos a su vez confirman su recepción con la trama BSI_ACK.
- ALV: son tramas *Keep-Alive*, que sirven como señalizadores entre SNs y el BN. Estas tramas son bidireccionales, por lo que la trama enviada por un SN, ALV_S, es contestada por el BN con una trama ALV_B. Si un SN no recibe una trama ALV_B durante el periodo de escucha prefijado para ello, asume que ha sido dado de baja por parte del BN.
- CON_REQ: esta trama de petición de conexión (*Connection Request*) la envía un SN cuando solicita el establecimiento de una conexión entre él y un nodo o con el BN mediante la trama CON_REQ_S, a lo que el BN le envía la trama de confirmación de regreso, CON_REQ_B. Esta trama también la envía el BN cuando es él quien inicia la petición de la conexión.
- CON_CLS: esta trama indica la finalización de una conexión. Cuando la envía el SN, CON_CLS_S, lo hace porque él lo solicita, porque rechaza una petición de conexión que previamente ha recibido o bien porque confirma un finalización de conexión iniciada por el BN, CON_CLS_B. De la misma forma, el BN puede iniciar el proceso de finalización de una conexión, rechazando una conexión solicitada por el SN, CON_REQ_S, o bien confirmando una petición de cierre, CON_CLS_S.
- REG_REQ: esta trama es enviada por un nodo cuando solicita su ingreso (*Registration Request*) en la subred PRIME.
- REG_RSP: con esta trama el BN responde a la petición de registro (*Request Response*) e incluye el identificador LNID asignado al SN.
- REG_ACK: mediante esta trama el SN que solicitó el registro confirma que ha recibido la aceptación con su correspondiente LNID.
- REG_REJ: el BN envía esta trama en caso de que rechace la solicitud de registro por parte de un nodo (*Registration Rejected*).
- REG_UNR: un SN registrado puede darse de baja de la subred porque el BN inicie ese proceso mediante una trama REG_UNR_B, que el SN confirma con el envío de un REG_UNR_S; o bien solicitarlo de forma autónoma. En este último caso, es el BN el que confirma la recepción de la trama con un REG_UNR_B.

- *Promotion Needed*: estas tramas son enviadas por los nodos que no son capaces de conectarse por sí mismos a la subred para que un SN vecino promocioe a repetidor y pueda conectarse a través de él.
- PRO_REQ: los SNs que reciben las tramas *Promotion Needed* pueden enviar solicitudes de promoción, *Promotion Request*, al BN mediante tramas PRO_REQ_S. Si el BN acepta ese ascenso, enviará al SN en cuestión una trama PRO_REQ_B que contiene su identificador como *switch*. A continuación el SN promocionará a repetidor, y el nodo que antes no podía registrarse lo hará a través de él. La petición de promoción también puede iniciarla el BN.
- PRO_ACK: mediante esta trama el SN confirma que ha recibido la confirmación de su promoción a repetidor.
- PRO_REJ: esta trama es enviada por el BN si éste no acepta una solicitud de promoción a repetidor. Por lo tanto, el BN considera que el SN permanece en estado terminal.
- PRO_DEM: también es posible que se den descensos de estado repetidor a terminal. Si el proceso lo inicia el BN, envía una trama PRO_DEM_B al SN. Esta trama también sirve de respuesta a una solicitud de descenso iniciada por el SN, PRO_DEM_S.

Además de estas funcionalidades relacionadas con la capa MAC, la herramienta proporciona una serie de funcionalidades adicionales:

- Espectro de ruido: el receptor PRIME integrado en el BN puede utilizarse como un analizador que envía muestras a la herramienta para que sean procesadas y visualizadas en la pantalla.
- Constelación de la modulación: la herramienta también permite visualizar los datos de la capa PHY relacionados con la constelación IQ.
- Funcionalidad APPEMU: permite la emulación de tráfico a nivel de aplicación definido en la especificación de PRIME para la realización de pruebas.
- Plataforma para la actualización del firmware de los equipos.

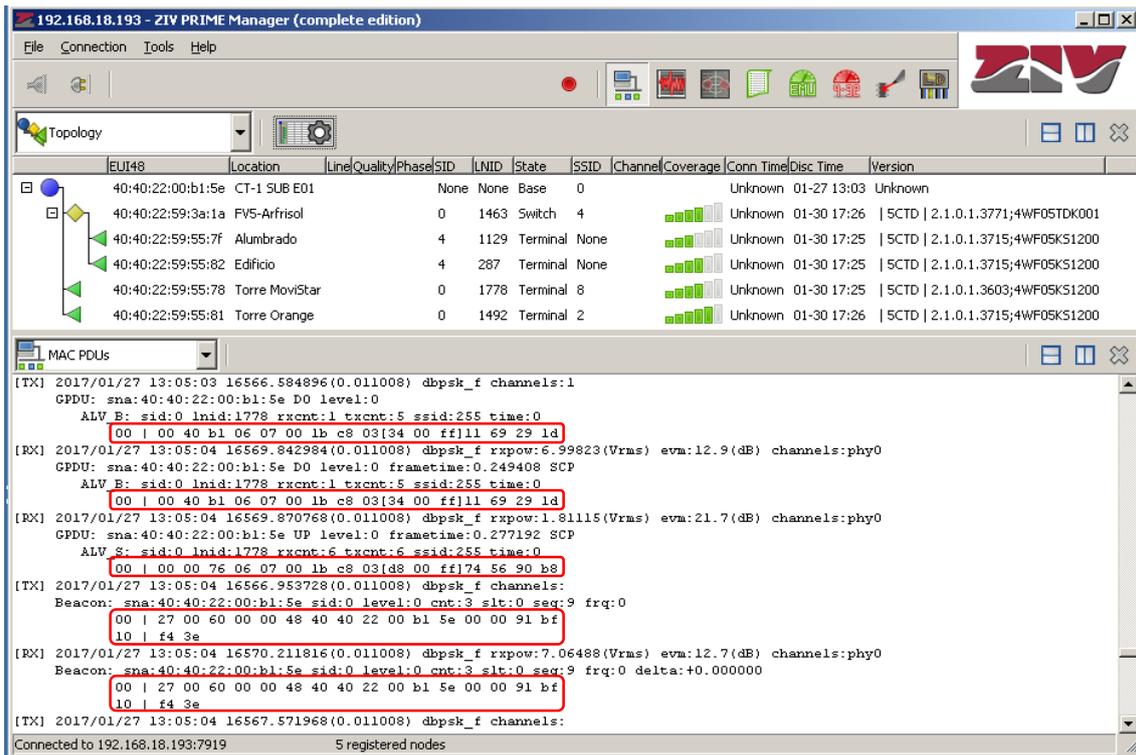


Figura 20. Captura del programa ZPM para una de las subredes de la microrred del CEDER-CIEMAT.

2.2.5.3. Capa de convergencia (CL)

Esta subcapa clasifica el tráfico asociándolo a su conexión MAC correspondiente y puede incluir alguna funcionalidad adicional, como la de supresión de cabeceras [102]. La capa CL está a su vez separada en dos subcapas, como refleja la Figura 21:

- La subcapa de la parte común o CPCS (*Common Part Convergence Sublayer*): encargada de proveer una serie de servicios genéricos. Actualmente sólo hay una CPCS y es la subcapa de segmentación y reensamblado o SAR (*Segmentation and Reassembly*), que se encarga de segmentar la unidad de datos del servicio o SDU en segmentos más pequeños cuando sobrepasan un tamaño prefijado y son reensamblados de nuevo en la SAR de destino antes de ser enviadas a la aplicación correspondiente. En PRIME todas las capas de convergencia tiene el mismo tamaño de segmento, con el objetivo de simplificar las implementaciones.
- La subcapa del servicio específico o SSCS (*Service Specific Convergence Sublayer*): encargada de proveer servicios que son específicos de una capa de aplicación. Normalmente hay varias SSCS, típicamente una por aplicación. PRIME define cuatro subcapas de este tipo:
 - IEC 61334-4-32: esta capa permite el uso de tráfico definido en el estándar IEC 61334-4-32, empleado para la transmisión de datos de contadores eléctricos, de agua y de sistemas SCADA sobre PLC [91]. Por lo tanto, la IEC 61334-4-32 SSCS proporciona las funciones de convergencia para aplicaciones que usen servicios definidos en el estándar. En este caso, un SN puede intercambiar datos solamente con

el BN y no con otros SNs. Cada sesión de esta capa, iniciada siempre por el SN, establece una conexión OFDM dedicada para el intercambio de datos con el BN.

- IPv4: esta capa permite la transmisión de paquetes IPv4 en las redes PRIME. De esta forma, un SN puede transmitir este tipo de paquetes al BN u otros SNs y viceversa. Para ello, el BN actúa como *router* entre la subred PRIME y cualquier otra red. Cada dirección local IPv4 admite sólo una ruta y es el BN el encargado de resolver el direccionamiento IPv4 a EUI-48. Cada SN registra su dirección IPv4 en el BN tal y como lo hace con la dirección EUI-48, lo que implica el establecimiento de una conexión específica con el BN. Tras ello, la capa SSCS IPv4 se encarga del enrutado de los paquetes IPv4 hacia el destino especificado, bien sea a otro nodo de la subred o a un *gateway*. Pese a que IPv4 no está orientado a la conexión, la SSCS IPv4 sí que lo es, por lo que una vez que se resuelve la dirección, se establece una conexión entre el transmisor y el receptor para la transmisión de los paquetes que se mantiene durante toda la transmisión y que se cierra tras un periodo de inactividad.
- IPv6: de manera similar a IPv4, la capa IPv6 permite la transmisión de paquetes IPv6 en las redes PRIME.
- Capa “null”: proporciona un paso “transparente” hacia las capas superiores de la forma más simple posible y minimizando el cómputo total. Está pensado para aplicaciones que no necesiten ninguna funcionalidad especial en la capa de convergencia.

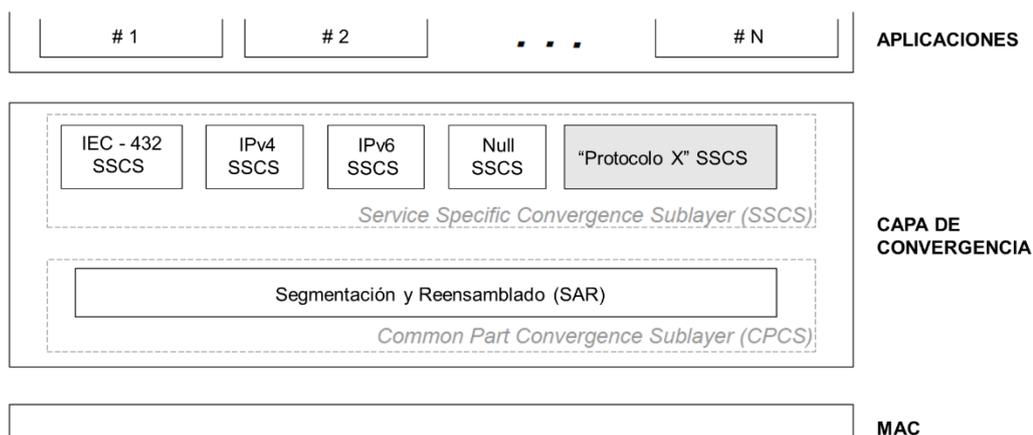


Figura 21. Capa de convergencia y subcapas en PRIME.

2.2.5.4. Capa de gestión

Finalmente, el plano de gestión incluido en la definición del estándar es el que permite que una entidad de control local o remota pueda ejecutar acciones sobre un nodo. Para ello ha de establecerse una conexión de gestión con el BN, que es el encargado de establecer dicha conexión. La gestión de los nodos se hace mediante atributos

definidos tanto para la capa PHY como para la capa MAC. A través del plano de gestión también se puede realizar actualizaciones de *firmware*.

3. LA MICRORRED DEL CEDER-CIEMAT

3.1. Introducción

Este trabajo se ha desarrollado en las instalaciones del CEDER (Centro de Desarrollo de Energías Renovables). Se trata de un centro nacional para la investigación, el desarrollo y el fomento de las energías renovables que pertenece al CIEMAT (Centro de Investigaciones Energéticas, MedioAmbientales y Tecnológicas), a su vez Organismo Público de Investigación dependiente del Ministerio de Economía y Competitividad de España. El CIEMAT es un organismo focalizado principalmente en los ámbitos de la energía y el medio ambiente y los campos tecnológicos relacionados con ambos. El CEDER-CIEMAT está ubicado en el término de Cubo de la Solana, junto a la pedanía de Lubia, provincia de Soria, con una extensión total de 640 hectáreas. En la Figura 22 se muestran dos fotografías aéreas en las que se puede ver la vista general de la finca y la localización de los diferentes Centros de Transformación (CTs) con que cuenta el centro, que se abordan en detalle más adelante.



Figura 22. Fotografías aéreas del CEDER-CIEMAT: vista general y localización de los diferentes Centros de Transformación.

La infraestructura desplegada en el CEDER-CIEMAT corresponde a la definición de una microrred: múltiples puntos de generación distribuida y almacenamiento conectados con los consumidores (en este caso, edificios y maquinaria) en baja tensión. Además, se puede considerar un *living-lab* en cuanto a que presenta un ecosistema en el que concurren la investigación y las actividades cotidianas del centro.

El centro se compone de más de 20 edificios, incluyendo talleres y casetas, tres de ellos con paneles solares en la cubierta; tres Parques de Ensayo de Pequeños Aerogeneradores (PEPAs), una zona de Ensayo de Volantes de Inercia (LEVI) y de Ensayo de Componentes de Aerogeneradores (LECA) además de cuatro pérgolas fotovoltaicas, cuatro bancadas de baterías, un sistema de bombeo y turbinado.

La red del CEDER se puede describir en dos niveles bien diferenciados entre sí: a nivel eléctrico y a nivel de comunicaciones, si bien ambos se caracterizan por compartir el cableado eléctrico como medio de transmisión, ya que como se describe más adelante la tecnología de comunicaciones empleada es PLC. A continuación se describen detalladamente los elementos más importantes de ambos niveles [109].

3.2. Nivel eléctrico

Por nivel eléctrico se entiende el transporte y la distribución de energía eléctrica desde los puntos de generación hasta los puntos de demanda y consumo del vector electricidad. En el caso de la microrred del CEDER-CIEMAT, los puntos de generación serán la DG instalada o bien la energía importada desde el exterior y suministrada por la compañía eléctrica. En la Figura 29 está representado el esquema unifilar de las conexiones de los diferentes CTs, identificados también en la Figura 22, cuya operación normal es radial. Se pueden observar un total de 7 CTs (CT-SUB, CT-1, CT-2, CT-LEVI, CT-PEPAI, CT-PEPAII y CT-PEPAIII) así como los diferentes *feeders* a cada edificio o planta. También existe la posibilidad de trazar diferentes caminos al disponer de un anillo entre CTs, estando en la actualidad abierto entre CT-1 y CT-2.

El centro tiene un potencia contratada de 150 kW, según la tarifa 3.0A y la compañía distribuidora suministra energía eléctrica a un nivel de tensión de 45 kV que, mediante un transformador a la entrada del centro, baja hasta los 15 kV. Por lo tanto, el elemento transformador de entrada es de 45/15 kV y cuenta con una potencia de 1000 kVA. A partir de ese punto la electricidad se distribuye por el centro a través de los 7 CTs, con denominaciones y características como siguen a continuación. Además, la Figura 23 recoge en detalle todas las fuentes de generación y almacenamiento existentes en el centro en la actualidad y en la Figura 24 se pueden identificar sus localizaciones en los diferentes CTs.

- CT-SUB: 15/0.4 kV y 250 kVA. Se trata del transformador de MV a LV que baja el nivel de tensión suministrado por la compañía de 45 KV a 15 KV. Posteriormente y tras el paso por las diferentes celdas, alimenta el transformador que a su vez hace lo propio con los diferentes *feeders* en LV que sirven a diferentes dispositivos:
 - Edificio Arfrisol [110]: se trata de un edificio rehabilitado con estrategias bioclimáticas. Además, integra un sistema fotovoltaico en cubierta de 12 kW conectado a red mediante un inversor INGECON SUN 10 trifásico, lo que lo convierte en un *prosumer*. En este edificio se desarrollan actividades de administración y gestión de recursos TIC.
 - Alumbrado del centro.
 - Dos torres de comunicaciones de distintos operadores.
- CT-1: 15/0.4 kV y 630 kVA. Este transformador está conectado a su vez en LV con el CT-2 para energizar uno a partir del otro mediante un mando y control automatizado que detecta la falta de red y conmuta en caso necesario. El CT-1 alimenta a las siguientes cargas:

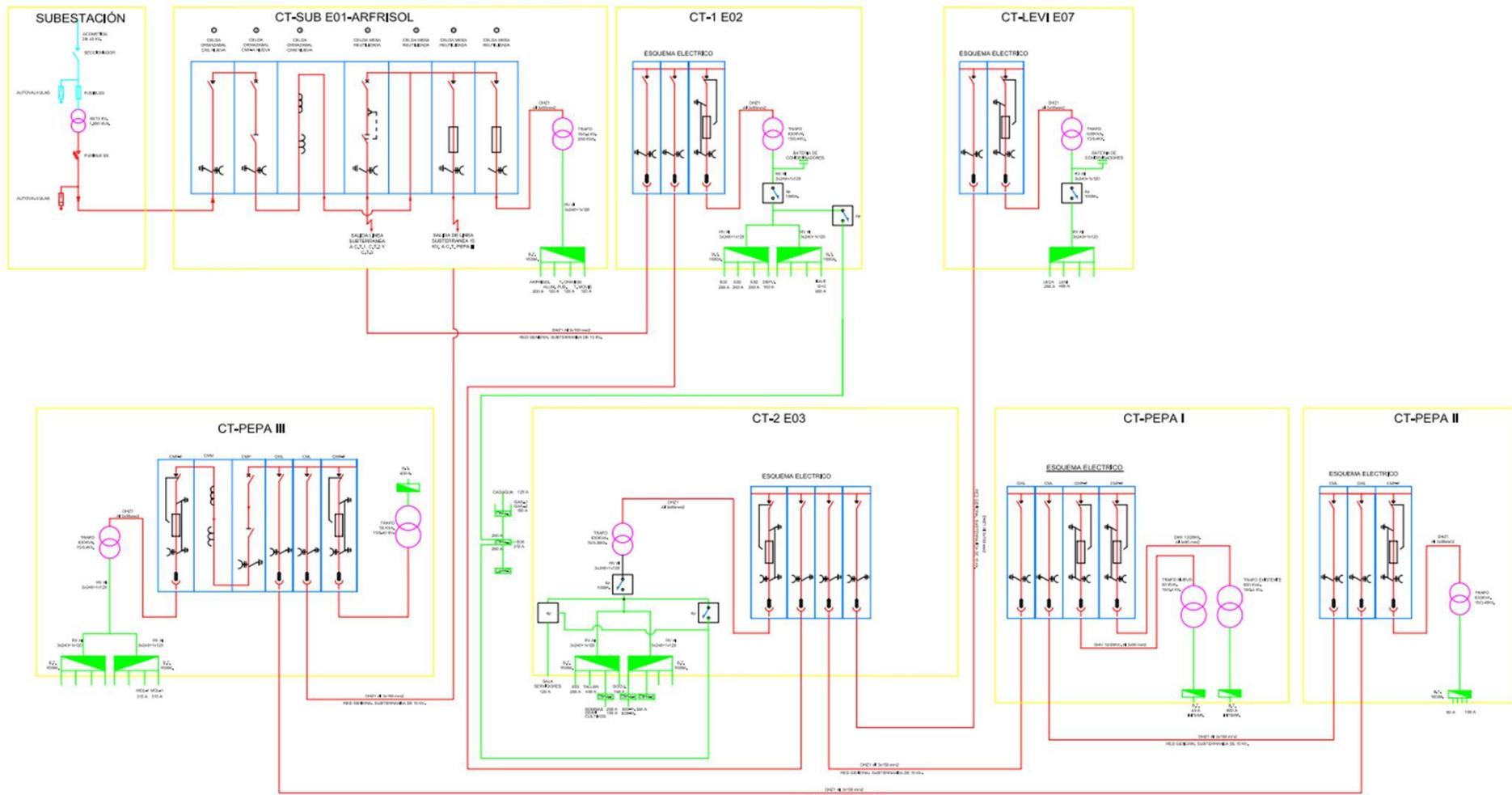


Figura 23. Esquema unifilar del conexionado entre CTs en la microrred del CEDER-CIEMAT.

| Tipo DER | ID en Figura 24 | Características | Potencia / Capacidad | Equipo asociado | Control | CT y Localización |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|---------------------------|
| Generación Distribuida | | | | | | |
| Eólica  | AER1 | Aerogenerador AOC 15/50 trifásico de inducción, tripala con diámetro de 15 m y orientación a sotavento. | 50 kW | Convertidor bidireccional AC/AC. Se sincroniza con la red cuando se acerca a las 1500 rpm. | Equipo propio de regulación, control, arranque y paro. | CT-PEPAI |
| | AER2 | Aerogenerador Bornay Inclín monofásico bipala con diámetro de 4 m y orientación a barlovento. | 3 kW | Inversor/cargador de baterías XANTREX SW-3024E. Puede verter a red o cargar baterías. | Equipo propio de regulación, control, arranque y paro. | |
| | AER3 | Aerogenerador Vergnet 7/10 trifásico de inducción, bipala con diámetro de 7 m y orientación a barlovento. | 10 kW | Se sincroniza con la red cuando se acerca a las 1500 rpm. | Equipo propio de control en desarrollo. | |
| | AER4 | Aerogenerador Solener monofásico tripala con diámetro de 4 m y orientación a barlovento. | 3 kW | Inversor/cargador de baterías XANTREX SW-3048e. Puede verter a red o cargar baterías. | Equipo de regulación propio y parte de control en desarrollo. | CT-PEPAII |
| | AER5 | Aerogenerador Ennera monofásico tripala con diámetro de 4.36 m y orientación a barlovento. | 3.2 kW | Inversor propio del fabricante con vertido directo a red. | Equipo propio de control y regulación. | |
| Fotovoltaica (Pérgola en suelo)  | FV1 | 24 paneles de silicio policristalino SOLON P200 distribuidos en 4 series de 6 paneles. | 5 kW | Inversor monofásico Ingeteam Ingecon SUN 5 IP65 de 5 kW con vertido a red. | Modbus RTU | CT-PEPAIII – Ramal Caseta |
| | FV2 | 32 paneles de silicio monocristalino, BP SOLAR BP-5140 formando 4 series de 8 paneles. | 4.5 kW | Inversor monofásico Ingeteam Ingecon SUN 5 IP54 de 5 kW con vertido a red. | | |
| | FV3 | 32 paneles de silicio monocristalino, BP SOLAR BP-5140 formando 4 series de 8 paneles. | 4.5 kW | Inversor monofásico Ingeteam Ingecon SUN 5 IP54 de 5 kW con vertido a red. | | |
| | FV4 | 64 paneles de silicio monocristalino RECOM RCM-250-6PB, alojados en 2 estructuras y formando 4 series de 16 paneles cada una. | 16 kW | Inversor trifásico Ingeteam SUN 3 PLAY TL, IP65 de 15 kW con vertido a red. | | CT-PEPAIII – Ramal Hidro |

Tabla 10. Listado de los diferentes recursos distribuidos (generación y almacenamiento) con que cuenta la microrred del CEDER-CIEMAT en la actualidad.

| Tipo DER | ID en Figura 24 | Características | Potencia / Capacidad | Equipo asociado | Control | CT y Localización |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|----------------------------|
| Generación Distribuida | | | | | | |
| Fotovoltaica (sobre cubierta)  | FV5 | 64 paneles de silicio monocristalino Gamesa Solar GS5-1501, distribuidos en 5 series de 16 paneles cada una. | 12 kW | Inversor trifásico Ingeteam Ingecon SUN 10 IP54 de 10 kW con vertido a red. | | CT-SUB – Edificio Arfrisol |
| | FV6 | 54 paneles fotovoltaicos de silicio monocristalino (36 paneles LDK-230P-20 de 230 W y 18 paneles Saclima SCL-240P de 240 W), distribuidos en 3 series de 18 paneles cada una. | 12.5 kW | Inversor trifásico Ingeteam Ingecon SUN 10 IP54 de 10 kW con vertido a red. | Modbus RTU | CT-2 – Edificio EO3 |
| | FV7 | 238 paneles de lámina delgada First Solar FS-397-Plus distribuidos en 17 series de 14 paneles cada una. | 23.5 kW | Inversor trifásico Ingeteam Ingecon SUN 3 PLAY de 20 kW con vertido a red. | | CT-2 – Edificio EO9 |
| Hidráulica  | Turb | Turbina hidráulica CMCHydro tipo Pelton Horizontal 2-Jets, salto de 60 m, caudal 0.12 m/s y velocidad de 750 rpm. | 60 kW | Generador asíncrono trifásico IPS tipo ASL315 M8 B3 de 60 kW acoplado directamente al rodete de la turbina. | SCADA | CT-PEPAIII - Ramal Hidro |
| | Arq | Turbina hidráulica basada en el tornillo de Arquímedes | 1 – 1.5 kW | Generador síncrono de 5 kW | - | CT-PEPAIII - Ramal Hidro |
| Almacenamiento Distribuido | | | | | | |
| Electroquímico  | Bat1 | Baterías Plomo-Ácido, 24 elementos Tudor Classic OPZS 660 de 2 V. | 660 Ah y 48 Vdc | Inversor/cargador Studer Xtender XTH 8000-48 de 8 kW. | Modo isla | CT-PEPAIII - Ramal Caseta |
| | Bat2 | Baterías Plomo-Ácido, 120 elementos Tudor 7EAN100 de 2 V, 50 kW. | 826 Ah y 240 Vdc | Convertidor bidireccional fabricado "ad hoc" para carga y descarga. | Herramienta específica | CT-PEPAI |
| | Bat3 | Baterías Plomo-Ácido, 120 elementos Tudor 5EAN70 de 2 V, 20 kW. | 595 Ah y 240 Vdc | Convertidor bidireccional fabricado "ad hoc" para carga y descarga. | Herramienta específica | CT-PEPAII |

Tabla 10. Listado de los diferentes recursos distribuidos (generación y almacenamiento) con que cuenta la microrred del CEDER-CIEMAT en la actualidad (cont.).

| Tipo DER | ID en Figura 24 | Características | Potencia / Capacidad | Equipo asociado | Control | CT y Localización |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|------------------------------------------------------------------------------|------------------------|-------------------|
| Almacenamiento Distribuido (cont.) | | | | | | |
| Electroquímico | | | | | | |
|  | Bat4 | Baterías lón-litio, 2 racks de 196 células de 3.2 V. Potencia nominal de 31.36 kW. | 50 Ah y 627.2 Vdc | Inversor trifásico Ingecon Sun 30 kW. | Herramienta específica | CT-LEVI |
| Potencial | | | | | | |
|  | Bmb | Motor-bomba SIHI series AKH 6100 (6103), autocebante con velocidad de 1450 rpm (máxima de 1800 rpm). | 2 x 18.5 kW | Bombeo directo del agua turbinada en el depósito inferior hacia el superior. | Modbus TCP/IP | CT-PEPAIII |

Tabla 10. Listado de los diferentes recursos distribuidos (generación y almacenamiento) con que cuenta la microrred del CEDER-CIEMAT en la actualidad (cont.).

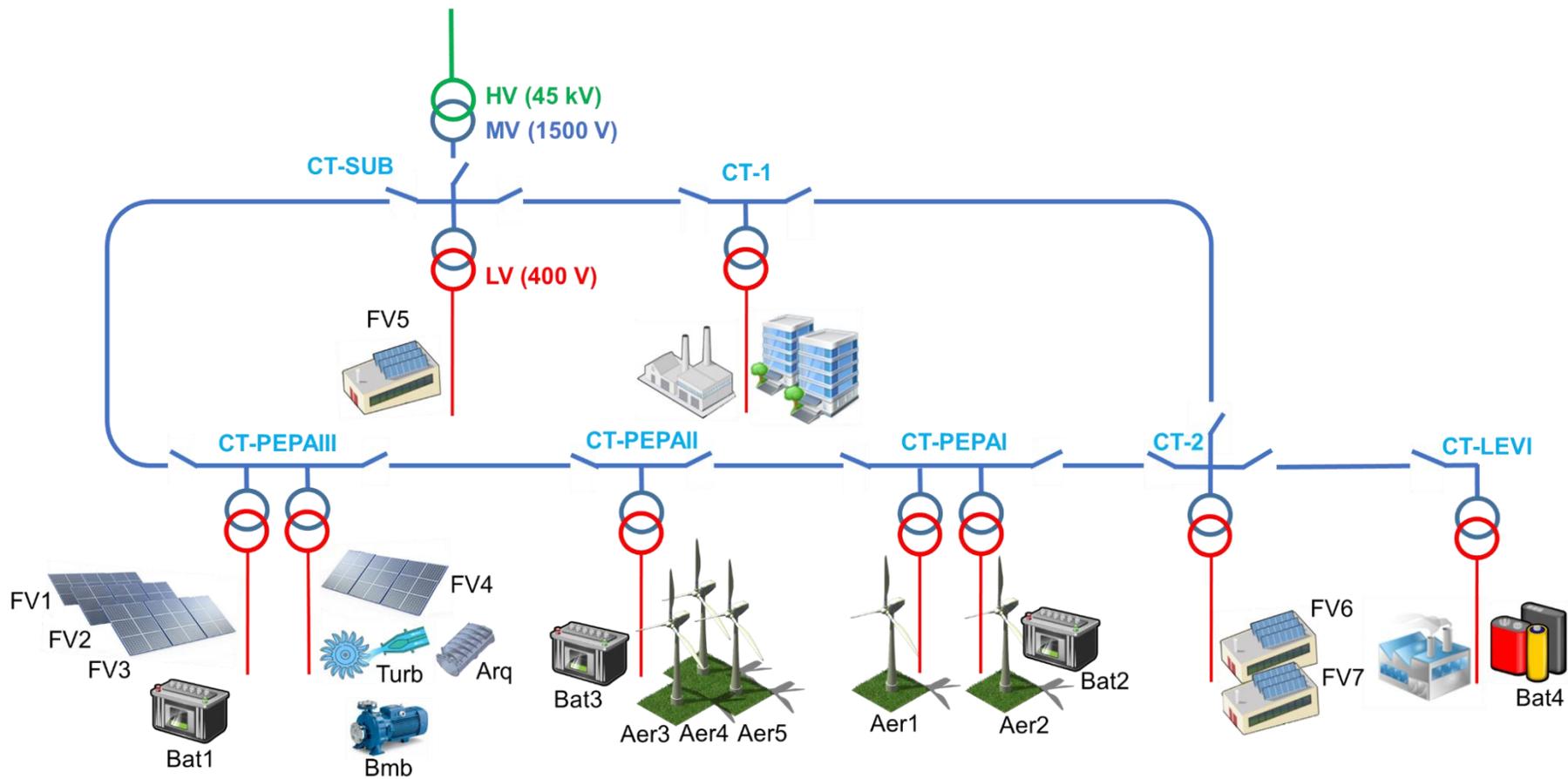


Figura 24. Localización de los diferentes recursos distribuidos (generación y almacenamiento) con que cuenta la microrred del CEDER-CIEMAT en la actualidad

- Edificio E02: donde se realizan actividades de oficina.
- Plantas de gasificación y combustión de biomasa.
- Depuradora de aguas residuales y pluviales.
- CT-2: 15/0,4 kV y 630 kVA. Este transformador alimenta en LV a los siguientes cargas:
 - Sala de servidores.
 - Edificio E03: donde además de labores de oficina existen laboratorios de tratamiento de biomasa. Este edificio cuenta además con un tejado fotovoltaico de 8.28 kW conectado a red mediante un inversor INGECON SUN 10 trifásico.
 - Taller mecánico: con maquinaria y equipamiento diverso tales como torno, fresadora y soldadura “inverter” y TIG/MIG.
 - Grupo de bombas: bomba sumergida de elevación de agua desde el pozo a los depósitos, dos bombas de la red sanitaria y una bomba del grupo de incendio.
 - Edificio BSRN + Cultivos: seguidor solar y estación meteorológica.
 - Edificio de peletización: contiene maquinaria de peletización, un secadero rotativo y un molino de refino.
 - Edificios de molienda: cuenta con una trituradora de biomasa y varios tipos de molinos (martillos, cuchillas, etc.). Este edificio dispone de un tejado fotovoltaico de 23.5 kW conectado a red mediante un inversor INGECON SUN 20 trifásico.
 - Edificio de Cadagua: donde se realizan ensayos de combustión de lodos de depuradora.
 - Edificio de documentación: lugar de impartición de clases docentes de Formación Profesional para lo que cuenta con maquinaria industrial de climatización y refrigeración industrial.
 - Edificio E05: donde se realizan ensayos con diferentes tipos de estufas de biomasa.
- CT-LEVI: 15/0,4 kV y 630 kVA. Este transformador a su vez alimenta en LV a los siguientes dispositivos:
 - Edificio LECA: este laboratorio alberga los bancos de trabajo requeridos para ensayar los diferentes elementos utilizados en los aerogeneradores de pequeña potencia (bancos de ensayo, rotores, generadores, cajas multiplicadores y convertidores) y en los sistemas eólicos aislados (relés y elementos de protección y medida).
 - Edificio LEVI: se trata de un laboratorio que, además de la maquinaria para la fabricación, montaje y ensayo de volantes de inercia, cuenta con

una bancada de baterías de ión-litio de 60 kW. La bancada está conectada a un inversor trifásico Ingecon Sun 30.

- CT–PEPAI: cuenta con dos transformadores: 15/0.4 kV y 50 kVA; 15/0.4 kV y 500 kVA (ver Figura 25). Aguas abajo de estos transformadores existen:
 - Aerogenerador AOC de 50 kW con convertidor bidireccional AC–AC.
 - Aerogenerador Bornay de 3 kW, que puede verter a red o a baterías mediante un inversor/cargador.
 - Bancada de baterías de plomo–ácido de 240 Vdc. Cuenta con un convertidor bidireccional AC–DC.
- CT–PEPAII: 15/0.4 kV y 630 kVA (ver Figura 25). Este transformador alimenta a dos casetas que incluyen:
 - Aerogenerador Vergnet de 10 kW con vertido a red.
 - Aerogenerador Solener de 3 kW, que puede verter a red o a baterías mediante un inversor/cargador.
 - Aerogenerador Ennera de 3.2 kW con vertido a red.
 - Bancada de baterías de plomo–ácido de 240 Vdc. Incluye un convertidor bidireccional AC–DC.
- CT–PEPAIII: cuenta con dos transformadores: 15/0.4 kV y 50 kVA; 15/0.4 kV y 630 kVA. Este CT se explica más detalladamente en el subapartado 3.2.c. Por un lado, uno de los transformadores alimenta una caseta en la que además se incluyen:
 - Tres pérgolas fotovoltaicas, dos de ellas formadas por un total de 66 módulos, haciendo un total de 9.24 kW, y una tercera con 24 módulos y 5 kW. Las tres están conectadas a sendos inversores monofásicos INGECON SUN de 5 kW cada uno.



Figura 25. Fotografías de los CTs PEPAI y PEPAII, respectivamente, con los aerogeneradores.

- Un rack de baterías de plomo-ácido de 48 Vdc asociadas a un inversor/cargador de 8 kW. Este conjunto opera de forma aislada, sin verter a red.
- Volante de inercia o *flywheel*: proporciona 50 kW de punta durante breves períodos de tiempo, actualmente está en reparación.

Por otro lado, el segundo transformador alimenta un grupo bombeo-turbinado compuesto por:

- Turbina Pelton con un generador asíncrono trifásico de 60 kW acoplado directamente al rodete de la turbina y con una tensión de salida 400 Vac. Debido a las condiciones de pérdidas de carga hidráulicas, la potencia eléctrica máxima son aproximadamente 40 kW. La regulación de la potencia entregada por la turbina se hace a través de un sistema SCADA.
- Turbina basada en el tornillo de Arquímedes. Este tipo de turbinas sigue el principio del tornillo de Arquímedes, en el que una máquina gravimétrica helicoidal o tonillo sin fin se hace girar dentro de un cilindro hueco, situado sobre un plano inclinado. En sus orígenes se utilizaba para elevar un cuerpo o fluido situado por debajo del eje de giro pero en esta variante se emplea para generar electricidad ya que el agua que circula por el tornillo hace que éste gire, accionando a su vez un generador eléctrico. En la actualidad el tornillo de la microrred está en fase de caracterización, pero se estima una producción de entre 1 y 1.5 kW.
- Bombas hidráulicas, consistentes en dos grupos SIHI motor-bomba con una potencia eléctrica de 18.5 kW cada uno que bombean agua desde un depósito inferior hasta uno superior. Para ello emplean una tubería diferente a la del turbinado, por lo que además de almacenamiento potencial se puede emplear como una carga controlable.
- Pérgola fotovoltaica de 15 kW con su correspondiente inversor trifásico INGECON SUN 15.
- Bancada de condensadores Circutor Optim que sirve como aporte de energía reactiva cuando la red lo solicita.

Finalmente, las distancias eléctricas entre CTs descritos en MV son:

- CT-SUB a CT-PEPAIII: 1.282 m.
- CT-PEPAIII a CT-PEPAII: 1.163 m.
- CT-PEPAII a CT-PEPAI: 503 m.
- CT-PEPAI a CT-2: 864 m.
- CT-2 a CT-LEVI: 80 m.
- CT-2 a CT-1: 243 m.
- CT-1 a CT-SUB: 152 m.

3.3. Nivel de comunicaciones

En el CEDER-CIEMAT existe una ubicación física donde se concentran los recursos necesarios para el procesamiento de la información del centro, el Centro de Procesado de Datos (CPD). Todos los edificios del centro se encuentran conectados con el CPD mediante tecnología Ethernet, de manera que se pueda enviar y recibir información desde cualquier punto del centro y procesarla a posteriori de manera descentralizada en cualquier otro punto del centro. Esto permite además realizar pruebas de comunicación paralelas, y así poder validar otras tecnologías diferentes. La Figura 27 muestra un mapa del centro con donde se pueden ver los enlaces entre diferentes dispositivos así como la tecnología empleada, ya que los tramos de fibra óptica están identificados en color verde mientras que los de cobre están en rojo, siendo en todos los casos enlaces de 1 Gbps. Como se puede apreciar en la figura, el centro cuenta con un importante despliegue de fibra óptica. También se pueden identificar los nombres de los edificios así como los diferentes *switches* a los que están conectados. Esta última relación puede verse en la Figura 28, que muestra la topología de la red implementada en el CEDER-CIEMAT. En este caso, los enlaces de fibra óptica están en rojo mientras que los de cobre están en verde.

Con el objetivo de dotar a la microrred de un sistema AML, se procedió al despliegue de medidores en puntos estratégicos de la microrred, basados en la tecnología PLC-PRIME. De esta forma, se aprovecha el cableado eléctrico ya existente y la capacidad de autoconfiguración de la red que incorpora PRIME. Esto implica que la red eléctrica física en LV se va a corresponder biunívocamente con una red de comunicaciones PLC. En la actualidad, el centro cuenta con un total de 46 SMS, monofásicos (Figura 26a) y trifásicos (Figura 26b), desplegados por toda la microrred, y 9 DCs (Figura 26c) que incluyen también un SM interno. La Tabla 11 recoge el listado con todos los SMS instalados, el recurso asociado y el tipo de contador, y en la Figura 29 se pueden ver imágenes de la instalación de los equipos. Los módems PLC integrados en los equipos emiten en la banda CENELEC-A según la norma CENELEC EN 50065 [111], y para ello cada SM lleva embebido un nodo de comunicaciones (SN), cuyos estados y funcionalidades se describen en el Capítulo 2. De la misma forma, cada DC incluye un BN, que se encarga de gestionar la red. Este BN permite transmitir señales por las 3 fases eléctricas simultáneamente o discriminar la mejor fase para transmitir señal para cada uno de los nodos. Simultáneamente realiza la recepción de la señal PRIME de forma independiente en las 3 fases.

Siguiendo la configuración habitual para estos casos, se instaló un DC por CT y en aquellos CTs con doble transformador, en concreto, CT-PEPAI y CT-PEPAIII, se colocó un DC para cada uno de ellos, formando una configuración maestro-esclavo, tal y como se puede ver en el esquema de la Figura 30 [112]. En este caso, el DC maestro hace el papel de gestor de la subred ya que su BN interno está habilitado. En cambio, esta opción se deshabilita en el DC esclavo y se configura como SN, quedando así como un módem PRIME que permite que los nodos de ese ramal puedan registrarse en el BN. Ambos DCs se comunican vía UDP a través de Ethernet. El DC maestro es también el encargado de desempeñar la función de concentrador de datos. La alternativa a esta configuración es la de instalar un sólo DC, de forma que éste inyecta la señal PRIME en las tres fases y la inyección en el segundo

transformador se hace mediante la cuarta salida PRIME con la que cuenta el DC. Entonces, la inyección en el segundo transformador es monofásica, por lo que el rendimiento no es tan bueno como en el caso de la instalación con dos DCs. El punto a favor de la instalación con un único equipo es que es más económica. La configuración con dos equipos, además de ser más robusta, optimiza las prestaciones de la red en cuanto a capacidad y reduce la latencia y también mejora el rendimiento, ya que se reducen los retardos y colisiones en el primer salto, sobre UDP, lo que optimiza la inyección PRIME en cada transformador.

Dado que hay un DC instalado en cada CT del CEDER-CIEMAT, con su correspondiente BN embebido, esto implica que se forman 7 subredes de comunicaciones PRIME, tal y como se puede ver en la Tabla. Estas subredes son independientes entre sí ya que cada una está gobernada por un BN distinto y para acceder a ellas ha de hacerse a través de su DC correspondiente.

Un DC tiene tres funciones diferentes, que son las que fijan el modo de acceder a él (ver Figura 31) [113]:

- Gestión de las comunicaciones PRIME: esta función la realiza mediante el BN que incluye y que, como se describió en el capítulo anterior, se encarga de gestionar la red de comunicaciones. A esta funcionalidad se puede acceder mediante una herramienta propietaria del fabricante (ZIV Prime Manager, ZPM) y también de forma local vía servidor web, telnet o puerto SRV.
- Supervisión de baja tensión: gracias al medidor trifásico instalado y que por lo tanto incluye todas las funcionalidades descritas más adelante para los SMs. Esta función es accesible vía servidor web, telnet o puerto SRV.
- Concentrador de datos: el DC recopila las medidas de los SMs miembros de su subred y del suyo propio, siguiendo el protocolo DLSP/COSEM. La base de datos del concentrador tiene capacidad para almacenar las lecturas de aproximadamente 2000 SMs. A esta funcionalidad se puede acceder vía FTP, a través de la herramienta ZPM y también de forma local vía servidor web, telnet o puerto SRV.

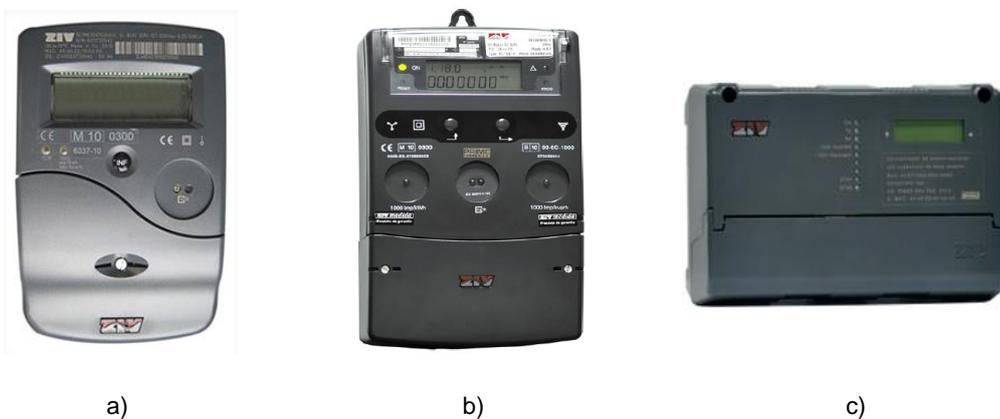


Figura 26. Dispositivos de medida y almacenamiento de datos: a) SM monofásico [114]; b) SM trifásico [115] y c) DC [113].

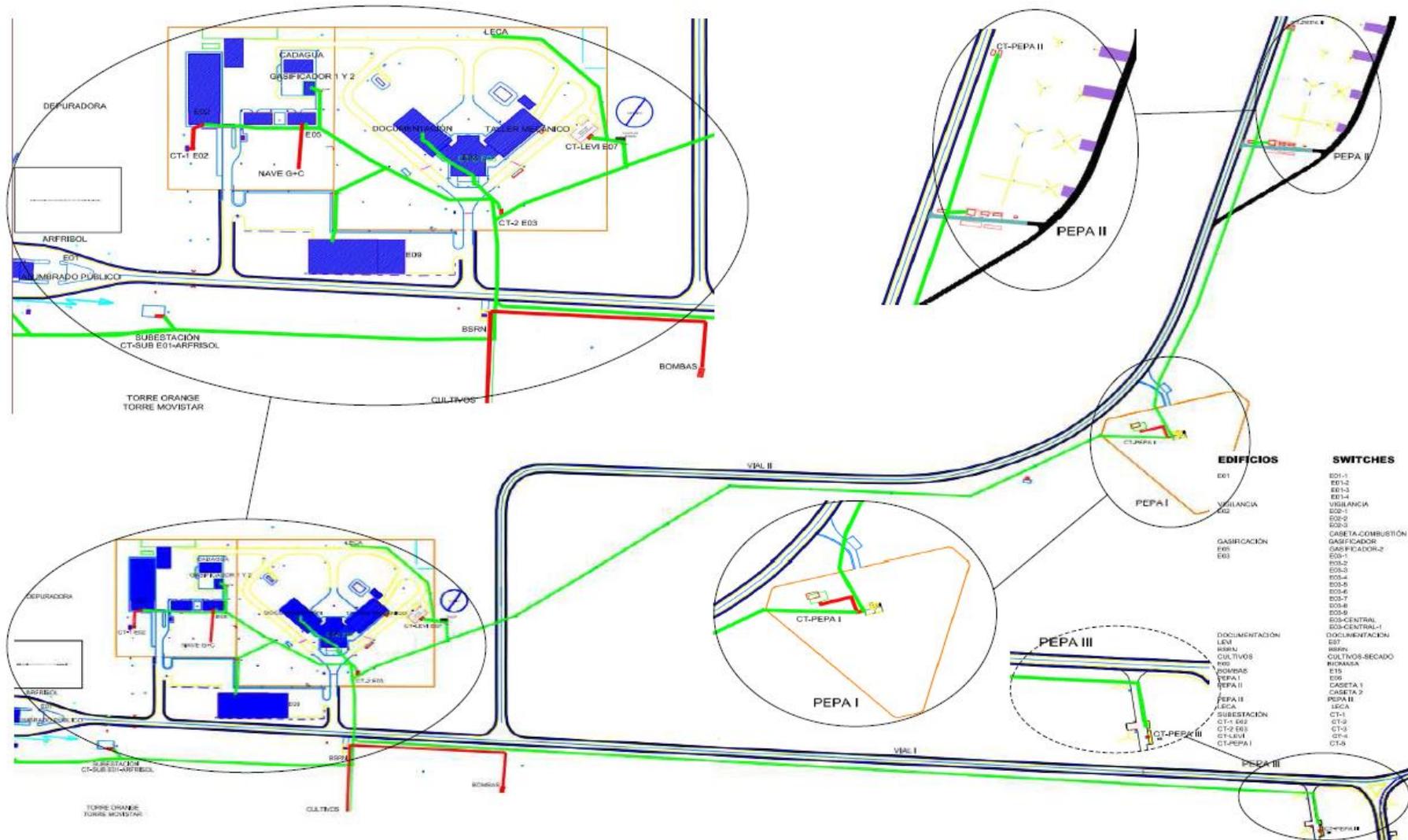


Figura 27. Despliegue de fibra óptica y cobre para conectar los switches de acceso en los diferentes puntos de la microrred del CEDER-CIEMAT.

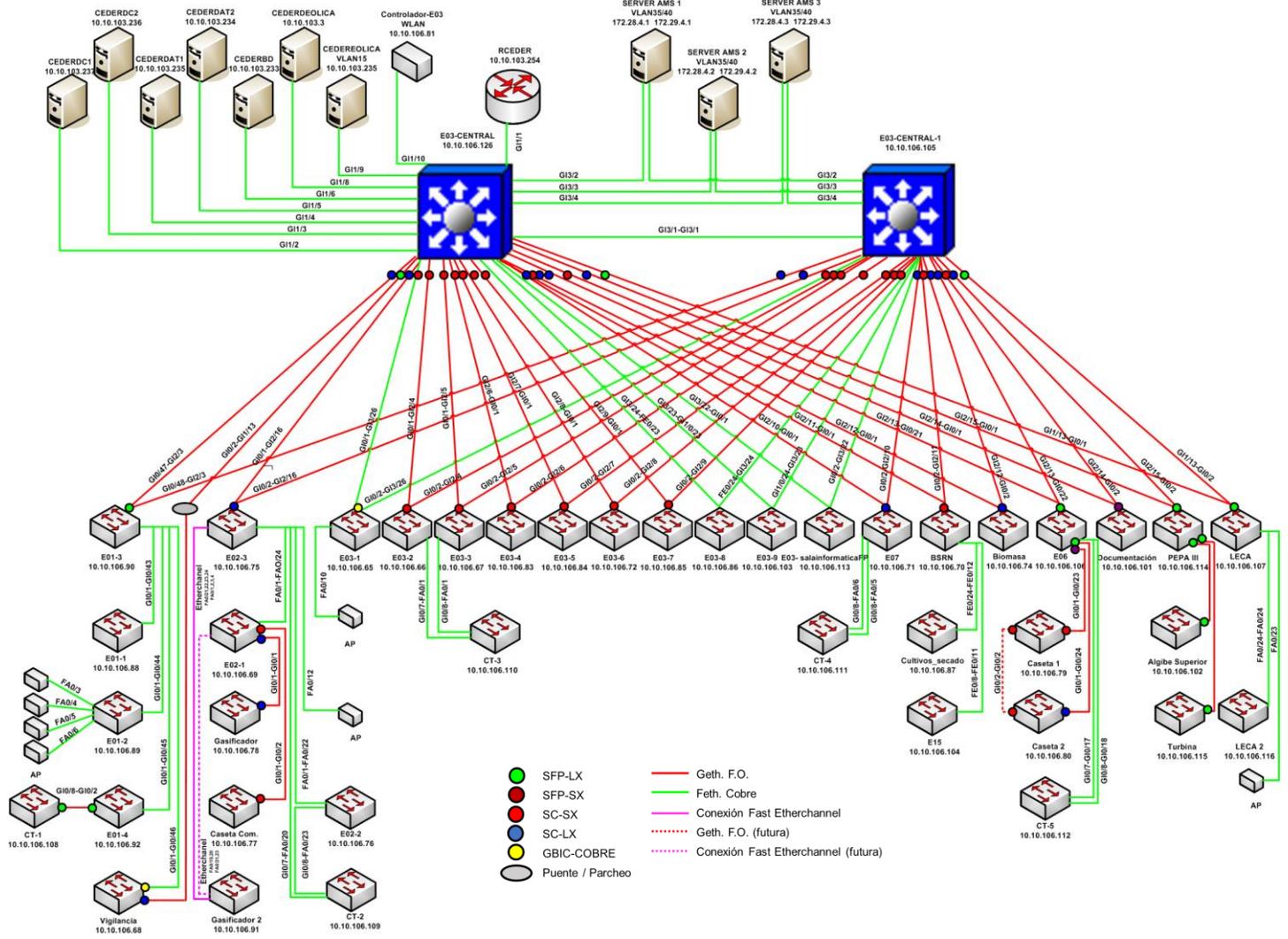


Figura 28. Topología de red de comunicaciones en el CEDER-CIEMAT.

| CT | Denominación | Clase | Tipo SM |
|------------|-----------------------|----------------|------------|
| CT-SUB | Torre Comunicaciones1 | Carga | Trifásico |
| | Alumbrado | Carga | Trifásico |
| | Torre Comunicaciones2 | Carga | Trifásico |
| | Edificio Arfrisol | Carga | Trifásico |
| | Fotovoltaica FV4 | Generación | Trifásico |
| | CT | General Trafo | Trifásico |
| CT-1 | Depuradora | Carga | Trifásico |
| | Nave G+C | Carga | Trifásico |
| | Gasificación | Carga | Trifásico |
| | Edificio E05 | Carga | Trifásico |
| | Cabecera E02 | Carga | Trifásico |
| | Cadagua | Carga | Trifásico |
| | CT | General Trafo | Trifásico |
| CT-2 | FV E09 | Generación | Monofásico |
| | FV E03 | Generación | Trifásico |
| | Documentación | Carga | Trifásico |
| | BSRN | Carga | Trifásico |
| | Molino | Carga | Trifásico |
| | Bombas | Carga | Trifásico |
| | Cabecera E03 | Carga | Trifásico |
| | Taller | Carga | Trifásico |
| | CPD Servidores | Carga | Trifásico |
| | E09-Pellets | Carga | Trifásico |
| | E09-Molienda | Carga | Trifásico |
| CT | General Trafo | Trifásico | |
| CT-LEVI | Batería lón-Li | Almacenamiento | Trifásico |
| | LECA | Carga | Trifásico |
| | Nave | Carga | Trifásico |
| | CT | General CT | Trifásico |
| CT-PEPAI | Bornay | Generación | Monofásico |
| | Trafo 50 kVA | Carga | Trifásico |
| | Atlantic | Generación | Trifásico |
| | Baterías PEPAI | Almacenamiento | Trifásico |
| | Trafo 500 kVA | Carga | Trifásico |
| | CT Máster (50) | General Trafo1 | Trifásico |
| | CT Esclavo (500) | General Trafo2 | Trifásico |
| CT-PEPAII | Solener | Generación | Monofásico |
| | Ennera | Generación | Monofásico |
| | Baiwind | Generación | Monofásico |
| | Caseta EO6-024 | Carga | Trifásico |
| | Baterías PEPAII | Almacenamiento | Trifásico |
| | Caseta Control | Carga | Trifásico |
| | CT | General Trafo | Trifásico |
| CT-PEPAIII | Fotovoltaica FV1 | Generación | Monofásico |
| | Fotovoltaica FV2 | Generación | Monofásico |
| | Fotovoltaica FV3 | Generación | Monofásico |
| | Caseta PEPAIII | Carga | Trifásico |
| | Cargador Baterías | Almacenamiento | Monofásico |
| | Grupo hidráulico | Carga | Trifásico |
| | Bombas | Almacenamiento | Trifásico |
| | FV4 | Generación | Trifásico |
| | Turbina | Generación | Trifásico |
| | Bancada condensadores | Generación | Trifásico |
| | CT Máster | General Trafo1 | Trifásico |
| CT Esclavo | General Trafo2 | Trifásico | |

Tabla 11. Listado de los SMs instalados en la microrred del CEDER-CIEMAT en la actualidad.



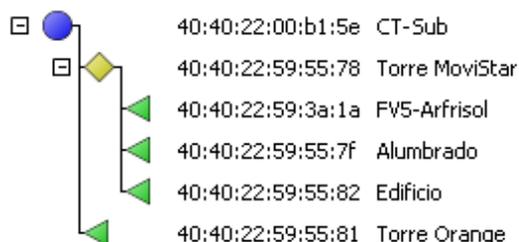
Figura 29. Fotografías con la instalación de SMs y concentradores de datos en la microrred del CEDER-CIEMAT.

Por su parte, los SMs permiten la realización de medidas de intensidad y tensión (3 intensidades de fase y 3 de tensión en el caso de medidores trifásicos), medida de potencia activa con signo y reactiva en los cuatro cuadrantes, medida de energía activa bidireccional y reactiva en los cuatro cuadrantes y medida del factor de potencia instantáneo total y por fase. Como los SMs llevan embebido el SN, cuando se alimentan eléctricamente la red de comunicaciones comienza a configurarse de forma automática.

Subredes de comunicaciones PRIME en los CTs del CEDER-CIEMAT



CT-SUB



CT-1

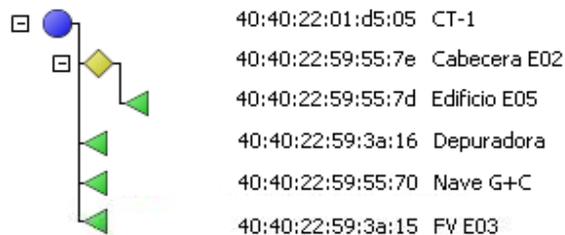
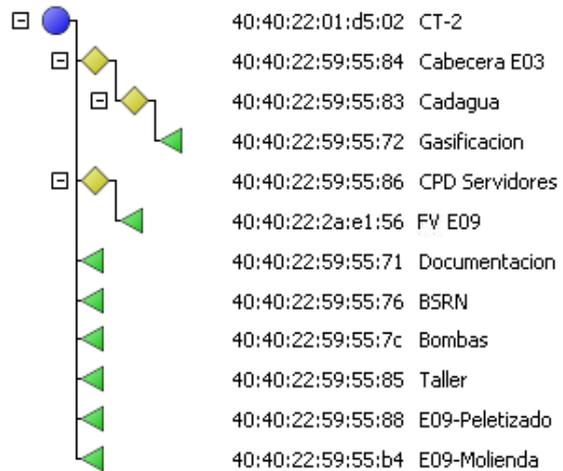


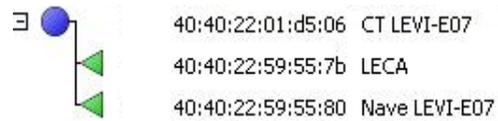
Tabla 12. Subredes PRIME existentes en la microrred del CEDER-CIEMAT y CTs correspondientes.



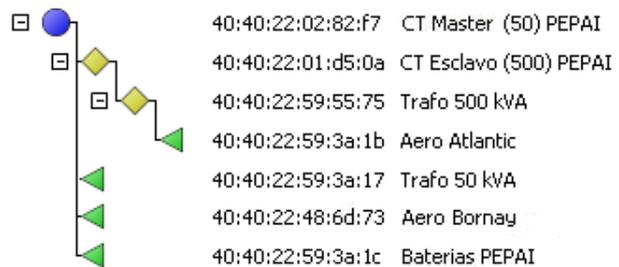
CT-2



CT-LEVI



CT-PEPAI



CT-PEPAII

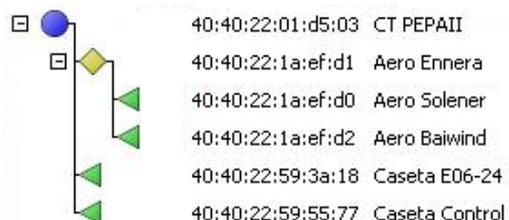


Tabla 12. Subredes PRIME existentes en la microrred del CEDER-CIEMAT y CTs correspondientes (cont.).

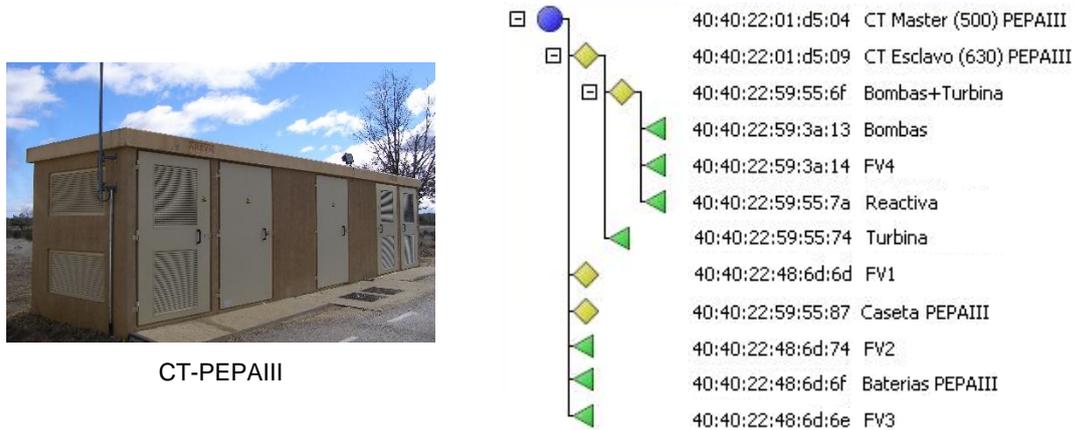


Tabla 12. Subredes PRIME existentes en la microrred del CEDER-CIEMAT y CTs correspondientes (cont.).

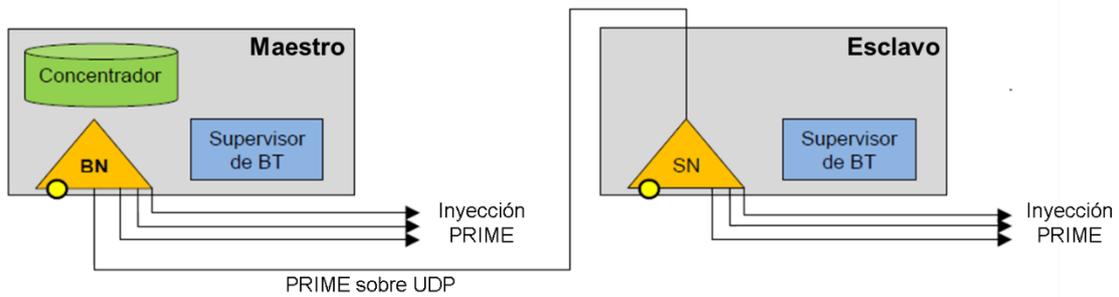


Figura 30. Diagrama de la conexión de dos DCs en configuración maestro-esclavo para CTs con doble transformador [113].

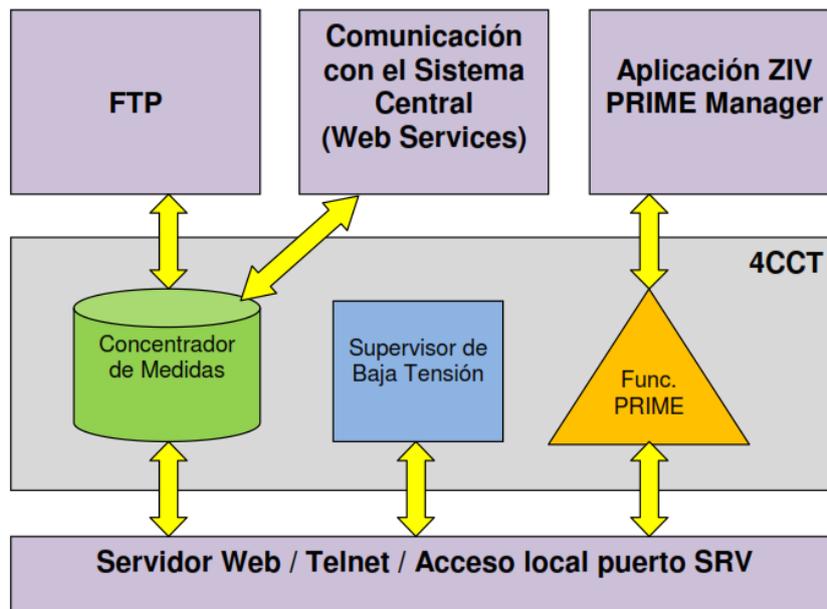


Figura 31. Esquema general de acceso y funcionalidades de los DCs instalados en la microrred del CEDER-CIEMAT [113].

3.3.1. Aspectos abordados con el sistema de comunicaciones

El despliegue de infraestructura de comunicaciones permite abordar los siguientes aspectos:

- **Monitorización:** el beneficio automático del sistema AMI es la posibilidad de monitorizar la microrred. El estado topológico de las subredes y su evolución en el tiempo es fácilmente accesible mediante servicios web y software específico. Además, es posible hacer consultas instantáneas y de perfiles temporales especificados por el usuario a cada uno de los SMs. Estas herramientas permiten analizar diferentes aspectos de la microrred tales como evolución de los roles de los dispositivos, disponibilidad de la red, disponibilidad de los SMs y operación del protocolo PRIME, entre otros. La Figura 32 muestra un ejemplo de acceso a un SM vía servicio web. Para ello, es necesario logarse en su DC correspondiente (en este caso, el asociado al CT-PEPAIII) y a continuación seleccionar el SM deseado del listado global de los SMs registrados en él. Es decir, el acceso a un SM pasa necesariamente por el DC. Una vez se haya accedido al SM, la pantalla principal muestra información general del medidor y un listado de la información adicional que se le puede solicitar: valores instantáneos, perfiles de consumo, valores diarios absolutos, eventos, calidad de potencia, etc. El SM formará el fichero que enviará de vuelta al DC vía PRIME y éste a su vez vía Ethernet al usuario.
- **Gestión de los datos de medida:** los datos de medida se envían diariamente mediante tareas programadas a través de servicios web implementados en los DCs. De esta forma, los DCs interrogan aguas abajo a los SMs de su subred acerca de la información especificada, éstos crean ficheros .xml con los datos solicitados y los envían vía FTP al sistema central, donde se almacenan en bases de datos, tal y como se puede ver representado en el esquema de la Figura 33. Las posibles aplicaciones de estos datos son múltiples: verificación de simulaciones, entrenamiento de redes neuronales, diseño de patrones de consumo y generación y cálculo de tarifas, entre otros. Además, el centro ha implementado una interfaz en la que se representan gráficamente los consumos y la generación renovable con fines informativos para los y las trabajadores del centro, y la información se actualiza desde los SMs cada 5 minutos (ver Figura 34).
- **Simulación de escenarios:** en concreto, en el CEDER-CIEMAT se han identificado y definido 5 posibles escenarios y en cada uno de ellos se han definido sus correspondientes recursos DG y DS, además de las cargas asociadas. Dado que cada uno de los siete transformadores puede ser virtualmente aislado, es posible estimar la correspondiente factura eléctrica, que puede ser distinta a la contratada o no.
 - **Rural:** correspondería con una pequeña población rural y se caracteriza por tener distancias grandes entre puntos de consumo finales y el CT, tal y como ocurre en el CT-PEPAIII, donde los dispositivos del ramal hidráulico están a aproximadamente 1.5 km de distancia del CT. Para

este escenario se consideran las cuatro pérgolas FV, la mini-hidráulica (bombas y turbina) y la bancada de baterías. Además, se cuenta con una carga eléctrica portátil de 5 kW.

- Industrial: equivaldría a un pequeño polígono industrial, en el que no habría sistemas de generación en suelo (pérgolas FV), pero sí en cubierta, por lo que encajarían los *prosumers* del CEDER-CIEMAT así como la diversa maquinaria industrial con la que cuenta el centro. Es por ello que para este escenario se consideran el CT-1 y el CT-2, de forma que las cargas estarían formadas por los sistemas de peletizado, gasificación, combustión, laboratorios y perfiles de oficina además del aporte de las dos cubiertas FV.
- Barrio urbano: para este escenario se propone el CT-2 por la variedad de cargas y de electrodomésticos a los que alimenta aguas abajo. Además, se mantendría el perfil *prosumer* del edificio E02, tal y como pueda ser un edificio de viviendas con una bancada FV en la cubierta, y se mantendrían apagados maquinaria y laboratorios.
- Centro tecnológico: correspondería con la situación del CEDER-CIEMAT, para lo que se mantendrían todos los CTs y los dispositivos, tanto DG como DS y cargas, con los que cuenta el centro.
- Perfil *prosumer*: este escenario sería el equivalente a una red doméstica. Para ello se ha considerado el CT-SUB, ya que el edificio al que abastece cuenta con una bancada FV en cubierta y las cargas que incluye el edificio son principalmente ordenadores y electrodomésticos. Por lo tanto, el edificio será autosuficiente mientras que la producción FV sea igual o superior al consumo de las cargas. En caso contrario, se producirá demanda de la red externa.

The screenshot displays a web interface for a smart meter (SM) in the CT-PEPAIII sub-network. At the top, there is a header with the ZIV logo and the following information: Product: 4CCT-EAB-332126BB, Hostname: CCT CT-PEPA III, Meters: 17/20, Hostname: CCT CT-PEPA III, Location: unknown, Contact: unknown, and CCT ID: ZIV0004416142.

The main content area is titled 'Meter overview: ZIV0036364631' and includes a 'Return to list' button. Below this, there is a table with the following data:

| | |
|----------------------------|---------------------|
| Serial number | ZIV0036364631 |
| ADDRESS | 40.40.22.2A:E1:57 |
| Version | |
| Prime version | |
| Present | A |
| ARQ | yes |
| Status changes | 3 |
| Active time | 47.33% |
| Last communication | 2017/01/19 14:33:39 |
| Last communication attempt | 2017/01/19 14:33:39 |

On the left side, there are several navigation menus:

- Operation**
 - Meter list
 - ZIV0036364631
 - Report stats
 - Order stats
 - XML cycles
 - DLMS reflash
- Configuration**
- Statistics**
- Apply
- Save
- Reboot
- Reflash
- Configuration files
- Log out

On the right side, there is a list of available data points:

- Details
- Control
- Profiles graph
- Instant values (S01)
- Profiles (S02)
- Profiles Lite (S2B)
- Daily absolutes (S03)
- Monthly billing (S04)
- Daily billing (S05)
- Meter parameters (S06)
- Power failure (S07)
- Power quality (S08)
- Events (S09)
- Voltage and cur. prof. (S14)
- Advanced instant values (S21)
- Activity calendar (S23)
- Instant vals. on dem. (S26)
- Current billing (S27)

Figura 32. Menú de consulta con la información disponible para un SM de la subred CT-PEPAIII.



Figura 33. Esquema de una tarea programada para petición de datos de medida a los SMS.



Figura 34. Visualización de consumos y generación en la microrred del CEDER-CIEMAT.

- Gestión de la carga: comparando la tarifa y facturas eléctricas del centro con las tarifas simuladas y los perfiles de carga, es posible diseñar patrones de comportamiento con el objetivo de reducir costes y mejorar la eficiencia energética. Un primer paso ha sido la programación de la mini-hidráulica para que bombee en horas en las que la el precio de la electricidad es más barato (horas “valle”), de acuerdo a la tarifa incluida en la Figura 35, y así disponer de agua en los tanques superiores para poder turbinarla y generar electricidad en las horas en las que su precio de mercado es más elevado (horas “pico”). Las horas en las que la electricidad tiene un precio intermedio se las denomina “llano”. Además, caracterizando los perfiles de consumo de cada edificio y maquinaria del centro, se puede adaptar su operación a la discriminación horaria de la tarifa. Los dispositivos con mayor demanda energética serán desplazados a horas valle con baja demanda energética, de manera que la curva total del centro se podrá suavizar, siguiendo las técnicas representadas en la Figura 36. El descenso de pico busca reducir los máximos de consumo, para lo que se pueden emplear dispositivos alternativos que suplan ese consumo extra, tales como baterías o volantes de inercia. El caso del CEDER-CIEMAT, éstos últimos resultan especialmente adecuados para el arranque de determinada maquinaria, ya que los volantes de inercia se caracterizan por suministrar un elevado nivel de potencia durante un corto

período de tiempo. Por el contrario, las baterías proporcionan un nivel de potencia menor, pero prolongado en el tiempo, por lo que se pueden emplear para aquellas operaciones que tengan un régimen continuado de demanda durante un periodo de tiempo en el orden de horas. La técnica del descenso de pico deberá ser aplicada en aquellos rangos de tiempo en los que la tarifa eléctrica penalice el consumo por encima del máximo indicado. Por otro lado, la distribución de carga consiste en el desplazamiento de consumos desde las horas pico a las horas valle o de llano, en su defecto. Esto se puede conseguir mediante la planificación de tareas con la realización de un calendario de actividades horario de acuerdo a la tarifa contratada. Finalmente, el relleno de valles consiste en introducir cargas en esas horas de bajo coste. En el CEDER-CIEMAT esta técnica es importante para no descender por debajo del valle contratado, ya que también se penaliza. Estas franjas horarias pueden ser empleadas para “recargar” los recursos de almacenamiento tales como baterías, bombeo y volantes de inercia así como cualquier otra actividad que haya podido ser desplazada desde las horas pico.

3.4. Selección del escenario de pruebas

El trabajo desarrollado se ha realizado en el CT-PEPAIII, debido al gran despliegue de DG y DS con que cuenta, además de disponer de una configuración flexible, heterogénea y reconfigurable. Como se comenta en la descripción de los CTs en el apartado 3.2, cada uno de los dos transformadores da lugar a dos ramales eléctricos, fácilmente identificables en la Figura 37 donde también se pueden ver los diferentes elementos DG y DS, cuyas características están recogidas en la Tabla 10. Los SMs de la caseta, de FV1, de FV2, de FV3 y del cargador de baterías están a una distancia aproximada de 13 m del DC, mientras que los SMs del ramal del grupo hidráulico, salvo el SM del grupo, que está a unos 5 m de distancia del DC, están a aproximadamente 1.5 km de distancia.

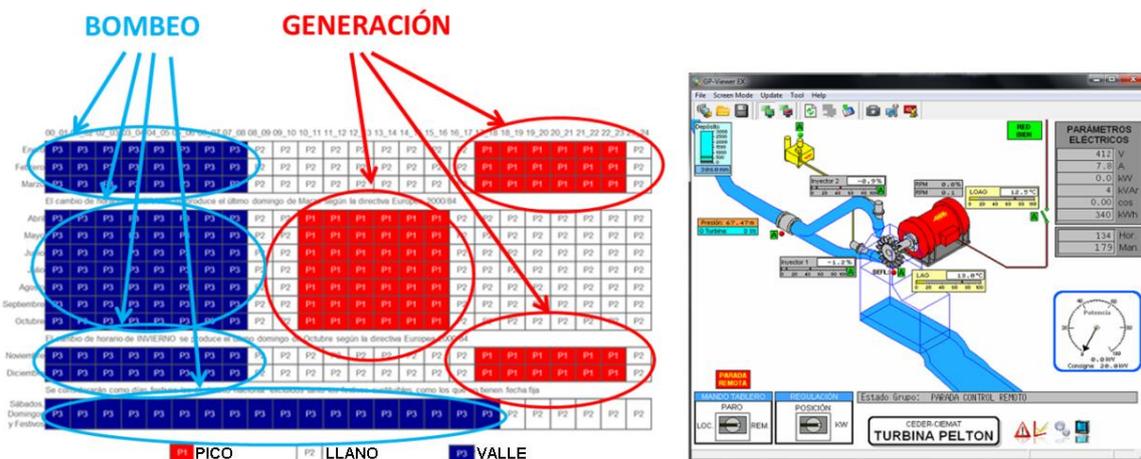


Figura 35. Programación del grupo bombeo turbinado de acuerdo a las características de la tarifa contratada en el CEDER-CIEMAT.

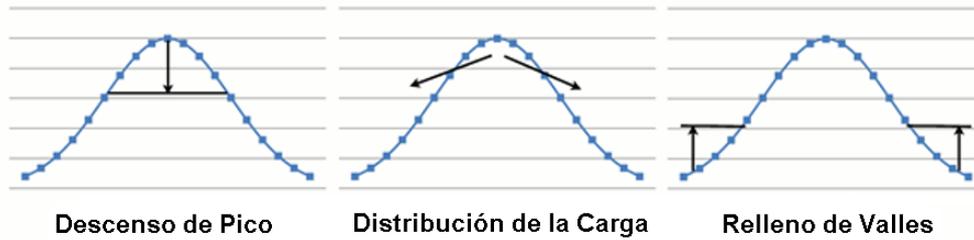


Figura 36. Técnicas de gestión de carga para optimización de recursos energéticos.

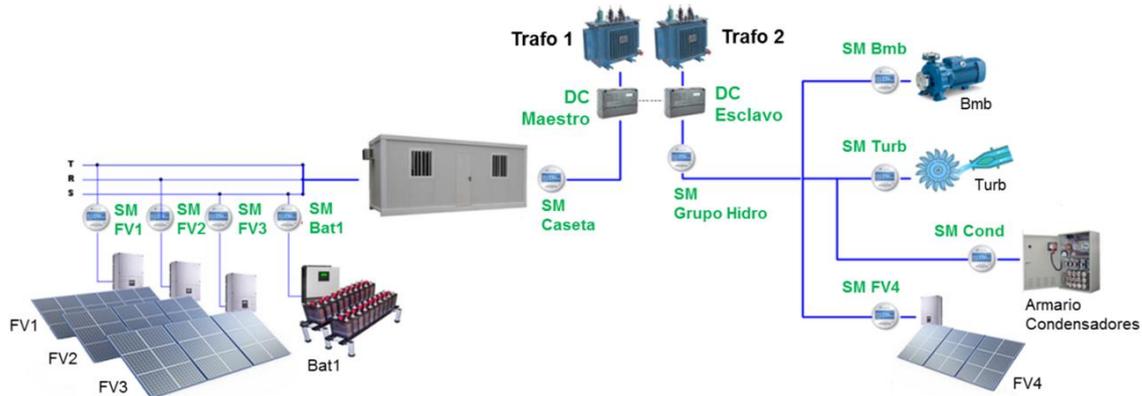


Figura 37. Esquema del CT-PEPAIII, parte de la microrred del CEDER-CIEMAT.

El ramal de la caseta se puede ver de forma global en la fotografía de la Figura 38, donde se pueden identificar las tres pérgolas FV, el CT con los dos transformadores a la izquierda, a continuación la caseta que aloja el volante de inercia y finalmente la caseta que contiene las baterías, el cargador de éstas y los SMs asociados tanto a las baterías como a los sistemas FV. Además, se pueden ver dos pequeños armarios detrás de las dos pérgolas FV2 y FV3 que contienen los inversores FV1 y FV2, y FV3, respectivamente. La Figura 39 muestra las tres pérgolas, donde se puede apreciar claramente la diferencia de materiales entre FV1 (silicio policristalino) y FV2 y FV3 (ambas de silicio monocristalino). Así mismo, sus tres inversores asociados están recogidos en las imágenes de la Figura 40. Las baterías de este ramal están alojadas dentro de la caseta, en una habitación contigua a la principal. Tanto ellas como su cargador asociado pueden verse en la Figura 41.

Por otro lado, en la fotografía de la Figura 42 se puede ver el ramal eléctrico del grupo bombeo-turbinado, situado aproximadamente a 1.5 km de distancia del CT y formado por la pérgola FV4, la caseta de operación de la turbina que alberga también al inversor FV4, el depósito al que va a parar el agua turbinada y finalmente una segunda caseta donde se alojan las dos bombas hidráulicas.

Así mismo, en la Figura 43 se aprecia una vista frontal del sistema FV4 y de su inversor asociado, que se encuentra en la misma caseta que la turbina hidráulica y su generador, mostrados en la Figura 44. En una sala anexa a ésta se encuentran los cuadros eléctricos, los SMs de los equipos, el cuadro de mandos de la turbina, consistente en un sistema SCADA y el armario con los condensadores recogidos en las fotografías de la Figura 45. Las imágenes de la Figura 46 muestran la instalación de la turbina hidráulica basada en el tornillo de Arquímedes y cuya caracterización está

en proceso. Finalmente, la caseta inferior, próxima al depósito, alberga las dos bombas hidráulicas y su cuadro eléctrico, mostrados en la Figura 47, donde también se puede ver su SM asociado.

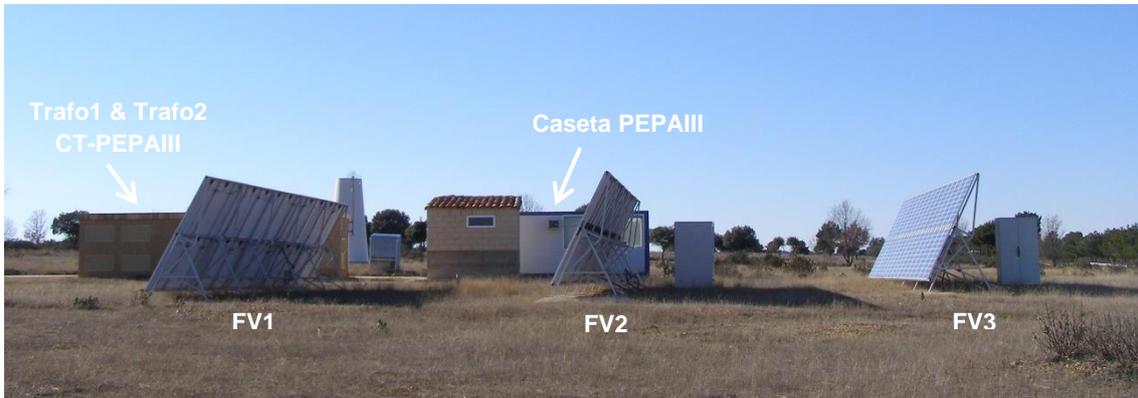


Figura 38. Imagen del ramal de la caseta en el CT-PEPAIII del CEDER-CIEMAT.



Figura 39. Imagen de las tres pérgolas fotovoltaicas, FV1, FV2 y FV3, del ramal de la caseta en el CT-PEPAIII del CEDER-CIEMAT.



Figura 40. Imágenes de los tres inversores fotovoltaicos de las pérgolas FV1, FV2 y FV3, respectivamente, del ramal de la caseta en el CT-PEPAIII del CEDER-CIEMAT [116].



Figura 41. Imagen de la bancada de baterías de Plomo-Ácido y el inversor-cargador asociado del ramal de la caseta en el CT-PEPAIII del CEDER-CIEMAT [117].



Figura 42. Imagen del ramal de la zona bombeo-turbinado en el CT-PEPAIII del CEDER-CIEMAT.



Figura 43. Imagen de la pérgola fotovoltaica FV4 y su inversor asociado de la zona bombeo-turbinado en el CT-PEPAIII del CEDER-CIEMAT [116].



Figura 44. Imagen de la turbina hidráulica y su generador asociado de la zona bombeo-turbinado en el CT-PEPAIII del CEDER-CIEMAT [118], [119].



Figura 45. Imágenes del armario de condensadores de la zona bombeo-turbinado en el CT-PEPAIII del CEDER-CIEMAT [120].

El despliegue de SMs en el CT-PEPAIII representado en el esquema de la Figura 37 forma una subred de comunicaciones PRIME cuya topología puede verse en la Figura 48. El BN alojado en el DC maestro es la raíz de la subred, del cual cuelgan el resto de SNs de la subred. El SN del DC maestro hace de repetidor para todos los SNs del ramal del grupo hidráulico. A su vez, los dos SNs que se encuentran conectados directamente a él (el SN del ramal y el SN de la bancada de condensadores) son repetidores del SN de la turbina (que también lo es del SN de FV4) y de las bombas, respectivamente. Esto quiere decir que el SN del sistema FV4 tiene que pasar por tres nodos repetidores para comunicarse con el BN y viceversa. Por otro lado, los SNs del ramal de la caseta (SNs de los sistemas FV1, FV2 y FV3, SN de las baterías y el SN de la propia caseta) están directamente conectados al BN, lo que significa que cada uno de ellos puede comunicarse directamente con el BN sin repetidores de por medio. Los nodos directamente conectados al BN son de nivel 0 (SNs de FV1, FV2, FV3, cargador, caseta y el SN del DC esclavo) y a medida que los nodos precisen de repetidores para llegar al BN se considerarán de niveles superiores, de forma que un SN que necesite un repetidor será de nivel 1 (como lo son el SN del grupo hidroeléctrico y el de la bancada de condensadores), el que necesite dos será de nivel 2 (tal y como sucede con el SN de la turbina y de la bomba) y así sucesivamente.



Figura 46. Imágenes de la turbina hidráulica basada en el tornillo de Arquímedes de la zona bombeo-turbinado en el CT-PEPAIII del CEDER-CIEMAT.



Figura 47. Imagen de las bombas hidráulicas y su cuadro eléctrico de la zona bombeo-turbinado en el CT-PEPAIII del CEDER-CIEMAT [121].

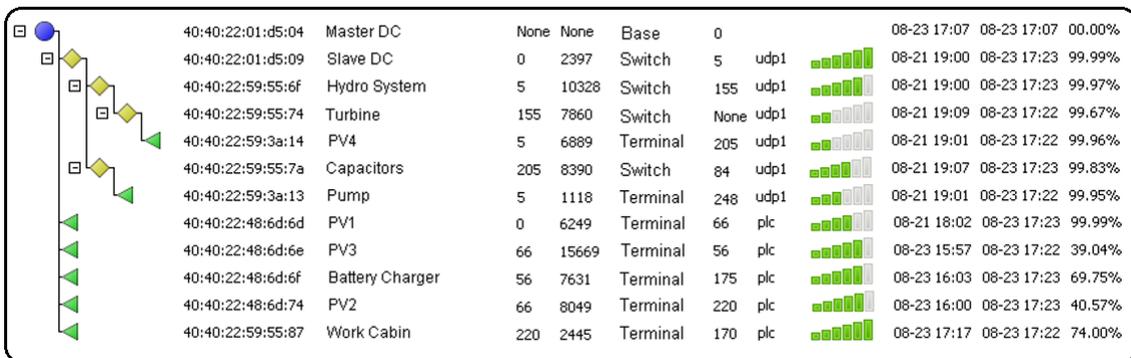


Figura 48. Topología de la subred de comunicaciones PRIME en el CT-PEPAIII del CEDER-CIEMAT.

4. EL RUIDO EN LAS COMUNICACIONES EN LA BANDA CENELEC-A

4.1. Introducción

El uso de diodos y tiristores en los comienzos de la electrónica de potencia supuso la aparición de ciertas distorsiones en la corriente eléctrica debido a la naturaleza de estos semiconductores, que no consumen energía de una forma continua en el tiempo. Estas distorsiones se pueden descomponer en diferentes componentes o *armónicos*. En general, las mayores distorsiones se encuentran en los armónicos 3, 5, 7 y 9, que corresponden con frecuencias de 150, 250, 350 y 450 Hz en el sistema de 50 Hz. El estudio de los armónicos ha venido siendo ampliamente estudiado [122] así como normalizado (IEEE 519 y EN 61000).

La naturaleza electrónica de muchos de los dispositivos conectados a la red en baja tensión, especialmente los que incluyen transistores, genera además emisiones a alta frecuencia, también conocidas como *supraarmónicos*, que pueden afectar a otros dispositivos electrónicos, incluyendo las comunicaciones PLC. Aunque este rango de frecuencias no está estrictamente definido, se suele considerar el abanico de frecuencias de 2 a 150 kHz [123]. Fuentes registradas de supraarmónicos son: inversores y unidades de velocidad variable, equipos con conmutación tales como televisores, DVDs y SAIs, dispositivos de iluminación (LEDs y fluorescentes), electrodomésticos (cocinas de inducción y lavadoras), baterías, así como sistemas de telemedida PLC. Por otro lado, los equipos conocidos a los que les afectan estas emisiones son: equipamiento electrónico que controle conmutaciones (lámparas con regulador de intensidad de luz, alarmas, alumbrado urbano, sistemas de calefacción y electrodomésticos, entre otros), sistemas de telefonía, portátiles, radiorreceptores y sistemas de telemedida, tanto en la parte de comunicaciones (PLC) como en la de medida [124]. Los problemas que causan los supraarmónicos van desde el sobrecalentamiento de capacitores (ampliamente presentes en dispositivos que incorporen un filtro LC), pudiendo llegar a estropearlos; la variación de la precisión en los dispositivos de medida; y la interferencia en las comunicaciones PLC, entre otros [125]. La Figura 49 resume las bandas de frecuencias donde se localizan las emisiones de diferentes equipos en el rango 2 – 500 kHz. Se distingue entre equipos electrónicos con emisiones no intencionadas en ese rango o NIE (*Non Intended Emissions*), como inversores e iluminación LED; y los equipos de comunicaciones eléctricos o MCS (*Mains Communicating Systems*), tales como sistemas AMI-PLC y los empleados en la automatización de la distribución eléctrica. Para el caso de equipos MCS también se incluye una diferenciación de uso de frecuencias entre el caso europeo (bandas CENELEC) y el resto del mundo [126].

Los supraarmónicos se originan en los circuitos de conmutación y se inyectan en la red mientras que el dispositivo que los genera esté funcionando. Además, dependen de la impedancia que presente la red en el punto de conexión, ya que una baja impedancia maximiza la conversión de la corriente supraarmónica en tensión [127]. Una de las principales diferencias entre la emisión en el rango de los supraarmónicos respecto a la emisión en el rango de los armónicos, más conocida y regulada, es la forma de propagación. Mientras que los armónicos se propagan hacia la red, los supraarmónicos tienden a quedarse en la instalación y como mucho se propagan hacia los equipos vecinos [128]. Esto da lugar a dos tipos de emisiones dentro del rango de los supraarmónicos: las generadas por un dispositivo en concreto, denominadas “emisiones primarias” o *primary emissions* y las generadas por otros

dispositivos vecinos, conocidas como “emisiones secundarias” o *secondary emissions* [129].

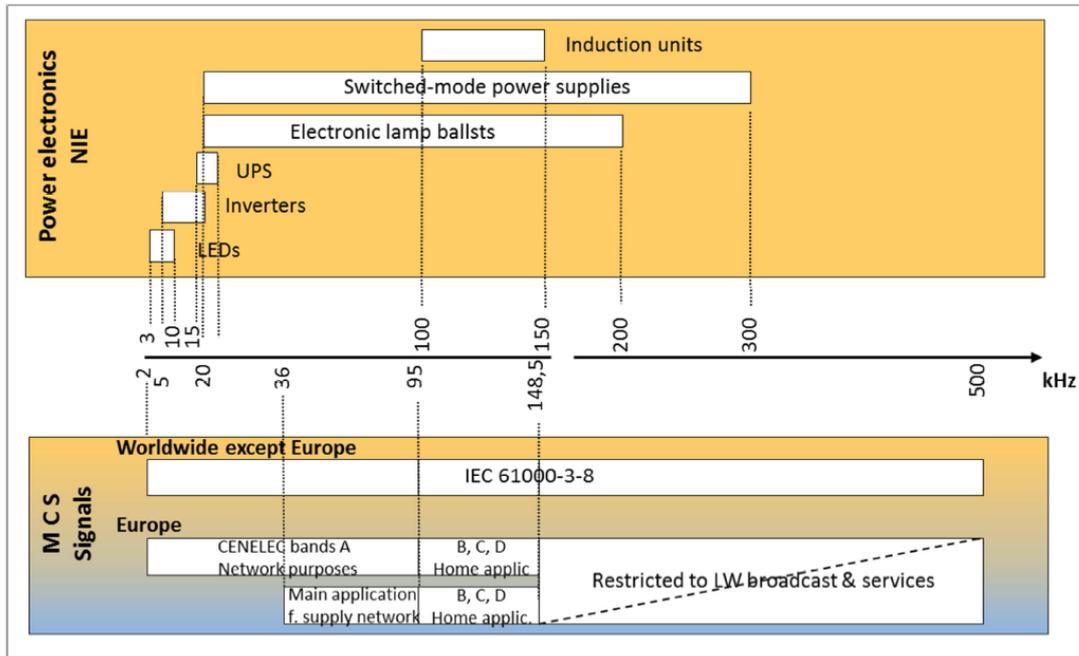


Figura 49. Localización de las emisiones por parte de diferentes equipos en el rango 2 - 500 kHz [126].

4.2. Estado del arte

Por un lado, el interés en los supraarmónicos se fundamenta en el progresivo incremento de fuentes generadoras de los mismos en la sección de baja tensión de la red eléctrica, ya sean dispositivos domésticos o recursos distribuidos, tales como DERs [130]. La frecuencia de conmutación presente en muchos de los equipos que están conectados a la red se encuentra normalmente dentro del rango de 2 a 150 kHz [131]. Esta situación afecta de forma directa a nuevos paradigmas eléctricos tales como SGs y microrredes, que van a encontrar más problemas en ese rango de frecuencias debido al incremento de fuentes de energía renovables, el comportamiento capacitivo de las cargas y una inevitable necesidad de sistemas de comunicaciones, lo que a su vez se traduce en más convertidores conmutados, más emisiones a alta frecuencia debido a la baja impedancia de las cargas, y más equipos de comunicaciones fuente y víctima a la vez de supraarmónicos [124].

4.2.1. Estudios previos

En la literatura al respecto existe un significativo número de trabajos que tratan sobre las emisiones supraarmónicas y que también recopilan medidas prácticas. Por ejemplo, [132] recoge medidas de emisiones de equipos de iluminación mientras que [133], [134] abordan la emisión generada por dispositivos domésticos y lámparas LED en el rango de 2 -150 kHz. En lo que a DER se refiere, el dispositivo más estudiado sin duda es el inversor fotovoltaico [135], [136], [137], [138]. El interés en los inversores FV radica en que emplean conmutadores, principalmente en el rango de 4-20 kHz, que suelen generar emisiones de elevada amplitud en frecuencias múltiplos de la frecuencia de conmutación, muchas de las cuales se ubican habitualmente dentro de

la banda de frecuencias CENELEC-A. En estos estudios se demuestra la relación directa entre la frecuencia de conmutación de los inversores y su emisión a alta frecuencia y la notable presencia de emisiones secundarias. Además, un aspecto interesante que se aporta en [138] es que las instalaciones fotovoltaicas tienden a “absorber” los supraarmónicos presentes en la red originados por otras fuentes tales como dispositivos electrónicos vecinos y señales PLC. Otros dispositivos de los que se han detectado emisiones supraarmónicas son las turbinas eólicas [139], [140] y vehículos eléctricos [141]. En cambio, no se han encontrado estudios para otros dispositivos que emiten señales no deseadas en el rango supraarmónico como sucede con DERs tales como microturbinas, bombas y cargadores de baterías.

Uno de los motivos que impulsan la necesidad de conocer las fuentes de los supraarmónicos y la naturaleza de estas emisiones es la importante influencia de éstos en las comunicaciones PLC, las cuales pueden llegar a degradarse de forma significativa [142] [143]. En este sentido, dado que las tecnologías PLC, concretamente NB-PLC, están siendo ampliamente introducidas por el sector eléctrico y especialmente en Europa de la mano de los despliegues AMI, garantizar la compatibilidad entre equipos es fundamental para asegurar la coexistencia de los dispositivos sin que se degraden las comunicaciones NB-PLC.

Diversos trabajos no sólo apuntan la influencia de las emisiones primarias, sino que también destacan el papel de las emisiones secundarias en las interferencias entre PLC y otros dispositivos [133]. En [144] se demuestra mediante simulaciones que tanto la tasa de bit como la latencia en PLC se ven fuertemente afectadas por el ruido. Respecto a los trabajos de campo recogidos, éstos se centran en las emisiones de electrodomésticos y demuestran que en el peor de los casos los supraarmónicos generados por electrodomésticos pueden afectar a PLC hasta el punto de impedir que algunas señales de comunicación lleguen al destino [145]. Pese a que hay abundantes estudios sobre las emisiones de los inversores FV en el rango 2-150 kHz, su influencia sobre PLC en un entorno real no ha sido abordada. Esta situación puede extenderse a otros DERs. Es por ello que se hacen necesarios más estudios que demuestren la influencia de las emisiones en el rango 2-150 kHz sobre PLC.

4.2.2. Situación actual de la normativa de compatibilidad electromagnética en el rango de frecuencias 2-150 kHz

La normalización de emisiones armónicas ha favorecido que progresivamente los equipos electrónicos hayan cumplido con los límites establecidos, en detrimento de las emisiones supraarmónicas, cuya presencia ha aumentado significativamente [146]. Esto se debe en gran parte a la falta de estandarización en el rango supraarmónico: estrictamente hablando, existe un déficit en cuanto a límites de emisión, compatibilidad e inmunidad en este rango de frecuencias [126], [147], [127], [148], que no sólo conlleva problemas en los equipos afectados sino que dificulta una clasificación y cuantificación estricta de las emisiones en el rango supraarmónico [138].

Para asegurar la compatibilidad electromagnética entre equipos y para minimizar las interferencias se ha de cumplir la condición (1):

$$\text{Nivel de emisión} < \text{Nivel de compatibilidad} < \text{Nivel de inmunidad} \quad (1)$$

Donde:

- Las **emisiones** son interferencias electromagnéticas originadas por equipos eléctricos y que pueden alcanzar a otros equipos [149];
- La **compatibilidad** es la habilidad de un equipo de funcionar de forma satisfactoria en un entorno electromagnético sin introducir interferencias electromagnéticas en ningún otro dispositivo de su entorno [125]. Por lo tanto, los niveles de compatibilidad se emplean como referencia para la coordinación entre las emisiones y la inmunidad;
- La **inmunidad** define la capacidad de un dispositivo de funcionar de forma adecuada en presencia de interferencias electromagnéticas. La falta de inmunidad de un equipo es la *susceptibilidad* [149].

La mayoría de estudios que abordan los supraarmónicos comparan las emisiones con los límites establecidos por la norma EN 50065-1, que fija los límites de las emisiones intencionadas y no intencionadas de equipos de señalización [150], y con CISPR 15, que limita las emisiones no deseadas de dispositivos de iluminación [151]. Por otro lado, la especificación técnica EC TS 62578 incluye los valores máximos recomendados de emisiones en convertidores [152], recogidos en la Figura 50, junto a las normas EN 50065-1 y CISPR 15. Para la comparativa en este trabajo se seguirá la norma EN 50065-1 que, además de ser sugerida como la norma a seguir para garantizar las comunicaciones en el rango 2-150 kHz [148], resulta ser la más restrictiva de ellas, tal y como se puede ver en la Figura 50. Actualmente, el debate se está centrando en la definición de los límites de compatibilidad y por el momento se ha alcanzado un consenso para el rango 2 – 30 kHz [123]. Sin embargo, la definición de límites en el rango 30 – 150 kHz sigue sin consensuarse y las propuestas se dividen entre los límites sugeridos por la industria relacionada con los dispositivos eléctricos y los sugeridos por las distribuidoras eléctricas y del ámbito de PLC. Precisamente, los avances en cuanto a límites de emisión se están viendo ralentizados debido a la falta de niveles de compatibilidad definidos [153]. Uno de los principales problemas es que aún son necesarios más espectros de emisiones en el rango 2 - 150 kHz que permitan obtener una visión global del comportamiento de los supraarmónicos, ya que el espectro de un mismo tipo de dispositivo varía en función de diferentes parámetros: las condiciones de la red, la presencia de otros equipos e incluso un mismo tipo de dispositivo puede mostrar diferentes espectros según el fabricante [152]. Finalmente, respecto a los niveles de inmunidad, la familia 61000-4 aborda específicamente la medida de la inmunidad en el rango de los supraarmónicos [152].

La relevancia de este tema en la comunidad científica se pone de manifiesto con la creación de diferentes grupos de trabajo en las principales asociaciones internacionales y comités de estandarización que están abordando este aspecto con el fin de cubrir los déficits regulatorios. CENELEC publicó a finales de 2015 la tercera versión de su informe “Interferencias Electromagnéticas entre Equipamiento Eléctrico en el rango de frecuencias de 2 a 150 kHz”, en el que incide en la necesidad de proveer medidas comparables entre sí tanto hechas tanto en laboratorio como en instalaciones reales y destaca la falta de regulación específica en cuanto a niveles de compatibilidad y límites de emisiones [126]. Otros grupos de trabajo destacados que

abordan los supraarmónicos son el grupo conjunto de CIGRE-CIRED, C4.24 [131], el grupo IEEE P1250 (Power and Energy Society) y el TC7 de IEEE EMC Society [154], [155] que en ocasiones ha trabajado en coordinación con el grupo SC 77A de IEC [156].

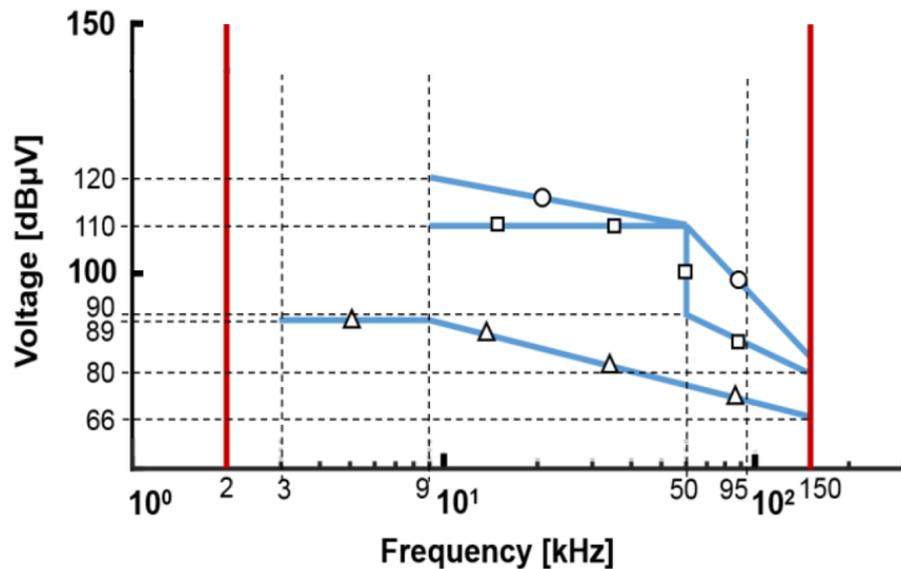


Figura 50. Valores límites de emisiones según EN 50065-1 (Δ), CISPR15 (□) y IEC TS 62578 (○). Las bandas verticales rojas delimitan el rango 2-150 kHz [152].

4.3. Objetivos

El objetivo de este trabajo es doble:

- Caracterización de las emisiones supraarmónicas, primarias y secundarias, de diferentes DERs localizados en un entorno real;
- Evaluación de la influencia de dichas emisiones en PLC-PRIME de forma empírica.

Con ello se pretende contribuir al estado del arte con nuevas medidas que puedan servir para caracterizar mejor las emisiones y con la demostración empírica de su influencia sobre PLC, de forma que esto ayude en la normalización de límites de EMC de este tipo de emisiones.

Concretamente, la consecución de estos objetivos afronta dos déficits identificados en el apartado anterior que de forma sintética se pueden describir como sigue:

- La mayor parte de los dispositivos abordados en la literatura son dispositivos domésticos e inversores fotovoltaicos y muchos de ellos en laboratorio, quedando patente la necesidad de ampliar este estudio a otros equipos que originan emisiones supraarmónicas y, especialmente, en un entorno real;
- La influencia de las emisiones supraarmónicas sobre PLC apenas ha sido analizada. Además, las medidas de emisiones en el rango 2-150 kHz de las que se tiene constancia son para equipamiento doméstico y vehículos eléctricos.

4.4. Metodología de medida

Las medidas realizadas en el CEDER-CIEMAT pretenden aportar resultados empíricos en un contexto real de una microrred con alta integración de DERs para profundizar en el estudio y comportamiento de los supraarmónicos. A continuación se definen estas medidas y se describe la configuración de las mismas.

4.4.1. Definición de las medidas

Para caracterizar las emisiones supraarmónicas generadas por diferentes DER localizados en la microrred se hizo un análisis en tres etapas.

En primer lugar, se realizaron medidas de las emisiones de un inversor FV trifásico en cada una de las fases eléctricas y a distintas distancias del inversor, con el objetivo de caracterizar las emisiones en cada una de las fases y su evolución con la distancia.

A continuación, se realizó una campaña de medidas aislando cada uno de los equipos bajo test. Estas medidas, tenían por objetivo caracterizar espectralmente las emisiones de cada uno de los dispositivos en distintos estados de funcionamiento. Además, se analizó su influencia de cada uno de los dispositivos sobre las comunicaciones de su SM asociado.

Finalmente, se realizó una tercera campaña de medidas sobre los mismos equipos, pero esta vez funcionando de forma conjunta en el entorno real de la microrred, es decir, con el resto de dispositivos funcionando de forma ordinaria. Esta situación permitió caracterizar las emisiones secundarias, así como hacer un análisis más profundo de la influencia de las emisiones en las comunicaciones NB-PLC y del comportamiento del estándar PRIME en entornos hostiles. Para llevar a cabo estas medidas se eligió el CT-PEPAIII de la microrred del CEDER-CIEMAT por contar con un amplio número de DERs: cuatro inversores FV distintos, bomba y turbina hidráulicas y un cargador de baterías.

El estudio descrito se aborda desde una doble vertiente: la caracterización espectral de las emisiones no deseadas y el análisis del impacto de las mismas en la topología de la subred PRIME:

- El análisis espectral de las emisiones interferentes se ha calculado promediando 15 medidas realizadas en cada escenario en particular y considerando solamente aquellas sin aportaciones de señales PRIME.
- El potencial impacto sobre la subred de comunicaciones se ha evaluado analizando la evolución de los estados de los nodos y su relación con las características de cada escenario. Además, también se analiza la evolución de la cobertura de los nodos debido a las emisiones. El nivel de cobertura cuantifica la probabilidad de éxito de una comunicación entre el BN y un SN.

4.4.2. Configuración de las medidas

A continuación se describe el equipamiento empleado en las medidas así como la configuración de dichos equipos.

El equipamiento empleado en las medidas es el siguiente:

- Acoplador capacitivo TABT-2, que permite la medida de señales de alta frecuencia en redes LV, proporcionando aislamiento galvánico y adaptación de impedancias entre el equipo y la línea eléctrica. El acoplador filtra frecuencias por debajo de los 10 kHz y sus correspondientes pérdidas de inserción y de retorno pueden verse en la Figura 51 [157]. El acoplador se conecta a la entrada AC del SM asociado al dispositivo a evaluar, entre una de las fases y el neutro.
- Osciloscopio Tektronix TPS-2024 con el que se obtienen los espectros del canal de transmisión. La frecuencia de muestreo es de 10^6 muestras/s con 8 bits por muestra. Se aplica una ventana Hanning y una FFT interna de 2048 puntos.
- *Sniffer* de comunicaciones o *Portable Base Node* (PBN), que captura el tráfico de tramas MAC. Este dispositivo es un BN portátil muy útil para la detección de errores en la subred de comunicaciones, ya que se puede configurar tanto como BN externo, SN o *sniffer*. En esta última configuración permite capturar tramas en cualquier punto de la red de forma transparente.
- BN de la subred PRIME, que facilita información sobre la topología de la subred, así como las tramas MAC que envía y recibe, entre otros. Tanto al PBN como al BN se acceden vía Ethernet a través de un programa específico.

La configuración de las medidas y la disposición de los equipos para la obtención de los espectros a la salida del DER bajo test y a la entrada de su SM asociado puede verse en los esquemas de la Figura 52 y Figura 53, respectivamente. Así mismo, la Figura 54 recoge una instantánea de la configuración de medida in situ.

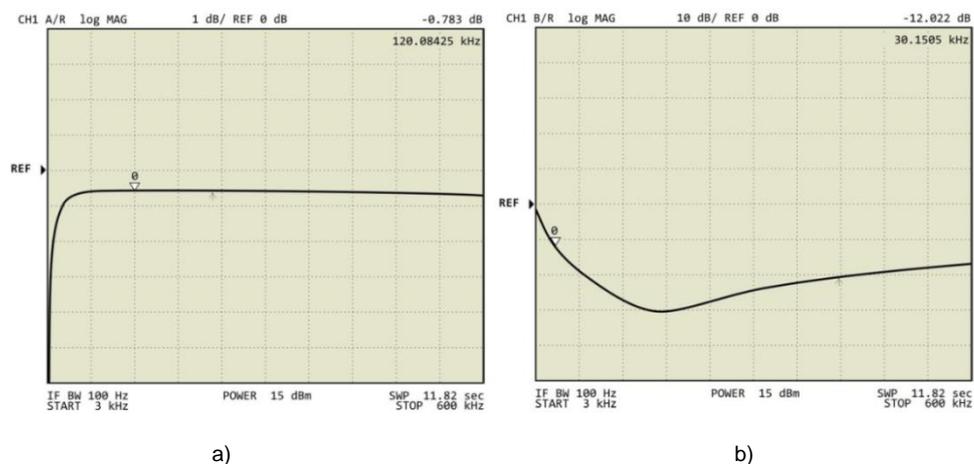


Figura 51. Pérdidas del acoplador capacitivo TABT-2: (a) inserción, inferiores a 1 dB y (b) de retorno, menor de - 12 dB a partir de 30 kHz y hasta frecuencias mayores de 600 kHz.

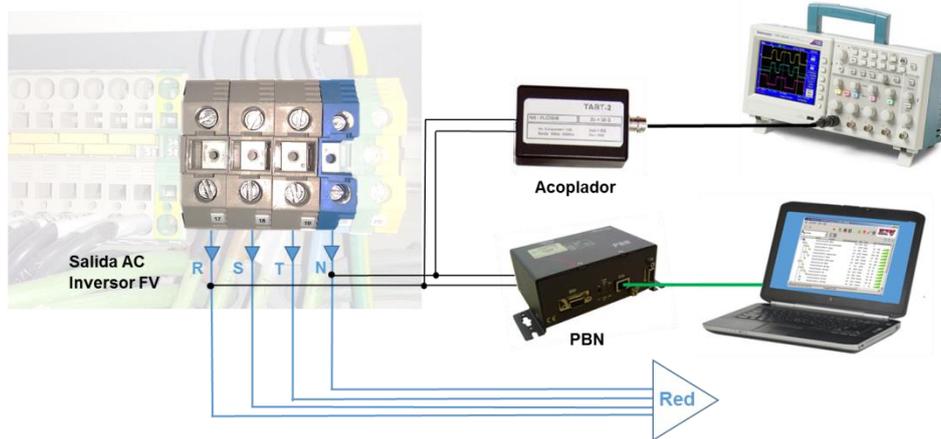


Figura 52. Configuración de las medidas realizadas en el CEDER-CIEMAT para la obtención de los espectros en la salida AC del DER bajo test.

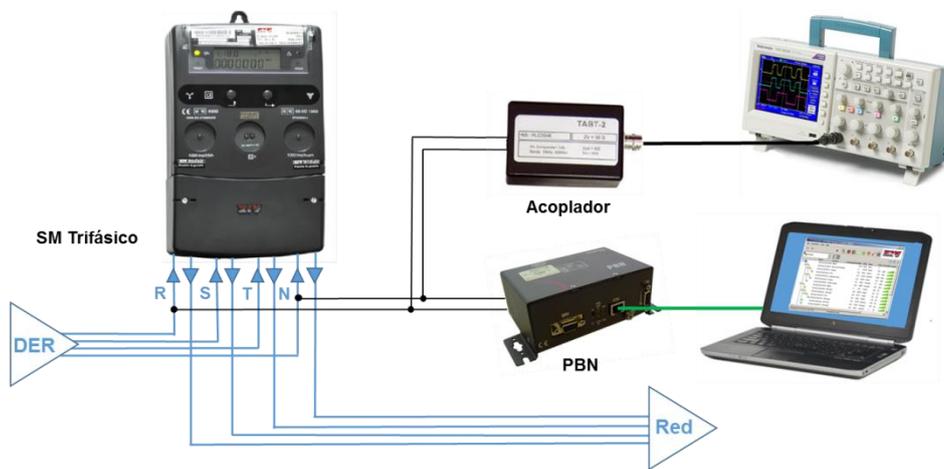


Figura 53. Configuración de las medidas realizadas en el CEDER-CIEMAT para la obtención de los espectros en la entrada del SM asociado al DER bajo test.

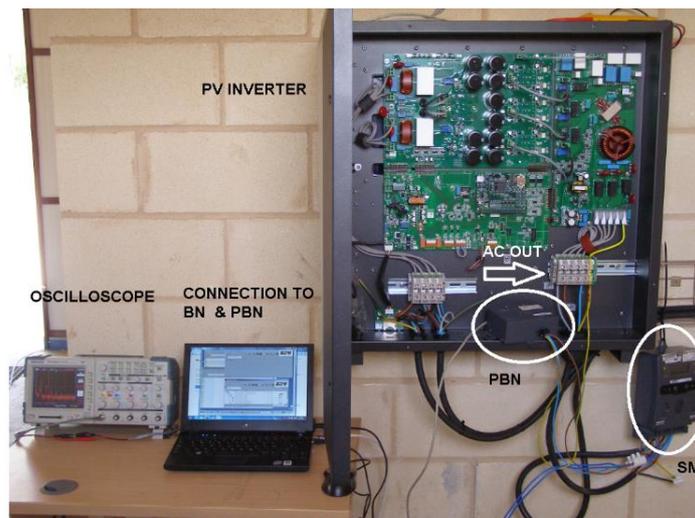


Figura 54. Equipos y configuración empleados en las medidas en el CEDER-CIEMAT para la obtención de espectros en el rango supraarmónico.

4.5. Caracterización del ruido y resultados obtenidos

4.5.1. Emisiones por fase e influencia de la distancia

Este apartado recoge las medidas realizadas en el inversor trifásico FV4, funcionando de forma aislada. Sus emisiones se han caracterizado mediante el espectro recogido en cada una de las fases, a diferentes distancias del mismo en el cable eléctrico.

El inversor fotovoltaico FV4 es un equipo trifásico de 15 kW con una frecuencia de conmutación de 16 kHz, localizado en el ramal del grupo bombeo – turbinado. Desde el momento en el que se enciende el inversor hasta el acople a red pasan unos 15 segundos, por lo que se han distinguido tres etapas distintas: *encendido* (el inversor está conectado a red pero no acoplado a red), *arranque* (el momento en el que se acopla a red) y *funcionamiento estable* (el inversor está operando de forma ordinaria).

La comparativa en distancias se hace en 3 puntos diferentes de la red: en la salida del inversor, en la entrada del SM en su emplazamiento original y finalmente trasladando el SM más cerca del inversor, con el objetivo de analizar la variación de la influencia del ruido con la distancia. La Tabla 13 recoge las principales características de las medidas.

| Puntos de Medida y Distancias respecto a BN e Inversor y Configuraciones del Inversor | | | | |
|---------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|
| | | Salida AC del Inversor | Entrada AC del SM (Posición original) | Entrada AC del SM (SM trasladado) |
| FV4 | Distancia al inversor | 0 m | 6.2 m | < 1 m |
| | Configuraciones | Apagado / Arranque / Estacionario | | |

Tabla 13. Resumen de la comparativa según distancias y características principales.

La Figura 55 y Figura 56 muestran el espectro obtenido a la salida AC del inversor trifásico FV4 para cada una de las fases, comparando los estados *paro* y *arranque*, y *paro* y *estable*, respectivamente. En todos los casos, las medidas muestran una inyección principal a 16 kHz y una serie de armónicos de esta inyección de amplitud decreciente, siendo el 3^{er}, 4^o y 5^o armónicos los que entran dentro de la banda PRIME.

Mientras que las inyecciones principales son de amplitudes similares para todas las fases, no ocurre lo mismo con los armónicos. Destaca especialmente el 2^o armónico de la fase T, que está fuera de la banda PRIME, y que tanto para el funcionamiento en *arranque* (Figura 55) como en *estable* (Figura 56), muestra una amplitud que decrece 13.6 dB y 11.24 dB, respectivamente, respecto del máximo valor de ese mismo armónico, que corresponde a la fase S. De la misma forma, el 3^{er} armónico de la fase T, que sí entra en la banda PRIME, tiene una amplitud inferior a las otras dos fases para los dos estados del inversor (*arranque* y *estable*) pero las diferencias son menores que en el caso del 2^o armónico (6.54 dB y 5.33 dB de diferencia respecto al máximo, en el estado *arranque* y *estable*, respectivamente). Los armónicos de las fases S y R mantienen valores muy similares entre sí en todos los casos.

También se aprecian diferencias en cuanto al ruido de fondo en las emisiones en los estados de *arranque* (Figura 55) y *estable* (Figura 56). La fase T, cuyos armónicos de la inyección primaria muestran una amplitud inferior a la de las otras dos fases,

presenta, en cambio, un mayor nivel de ruido de fondo, alcanzado hasta los 10 dB de diferencia con la fase R. Respecto a los niveles de voltaje del ruido de fondo cuando el inversor está en paro apenas muestra diferencias entre las tres fases.

A continuación se repitieron las pruebas midiendo a la entrada del SM FV4, localizado en una habitación contigua a la del inversor y a una distancia eléctrica de éste de unos 6.2 m. Los resultados representados en la Figura 57 y Figura 58 muestran un espectro muy similar al obtenido a la entrada del inversor (Figura 55 y Figura 56), con una diferencia máxima inferior a los 2 dB (diferencia entre las inyecciones principales de la Figura 56 y de la Figura 58). En cambio, se observa la misma situación respecto a los armónicos de la fase T: tanto en *arranque* como en *estable*, la amplitud del 2º y 3º armónico son inferiores. En concreto, las diferencias son de 13.53 dB y 10.4 dB para el estado *arranque* (ver Figura 57) y 15.25 dB y 13.74 dB para el estado *estable* (Figura 58), respectivamente. Además, en este caso también se registró un descenso del 4º armónico de la fase T en el estado *estable* de 13.53 dB. Los armónicos de las fases S y R mantienen valores muy similares entre sí.

Respecto al ruido de fondo en las emisiones en los estados de *arranque* y *estable*, los valores obtenidos midiendo a la entrada del SM muestran menores diferencias que a la salida del inversor (Figura 55 y Figura 56). Únicamente la fase R muestra unos niveles superiores en torno a su 3º armónico en la fase de *arranque* (Figura 57). De la misma forma que en el caso anterior, los niveles de voltaje del ruido de fondo cuando el inversor está en paro apenas muestra diferencias entre las tres fases.

Finalmente, se caracterizó el espectro midiendo a la entrada del SM del inversor FV4 una vez trasladado éste a la misma habitación que la del inversor y a una distancia eléctrica de 0.85 m. Los espectros registrados pueden verse en la Figura 59 y Figura 60 y siguen la misma tónica que los dos anteriores escenarios. Mientras que la inyección principal se mantiene en valores similares para las tres fases, las amplitudes del 2º y 3º armónico de la fase T descienden 16.54 dB y 8.16 dB, respectivamente, para el estado *arranque* (Figura 59), y 13.52 dB y 6 dB, respectivamente, para el estado *estable* (Figura 60). Una vez más, las fases R y S muestran valores similares entre sí, tanto en los armónicos como en el ruido de fondo, situación que también ocurre cuando el inversor está en *paro*.

En cuanto a los valores máximos de las inyecciones, no muestran diferencias destacables frente a las anteriores medidas realizadas (a la salida del inversor, Figura 55 y Figura 56 y a la entrada del SM en su posición original, Figura 57 y Figura 58) ni en los armónicos introducidos, ni en sus niveles de fondo, independientemente del estado del inversor. Por lo tanto, para las distancias consideradas, la amplitud de las emisiones no se ve afectada con la distancia.

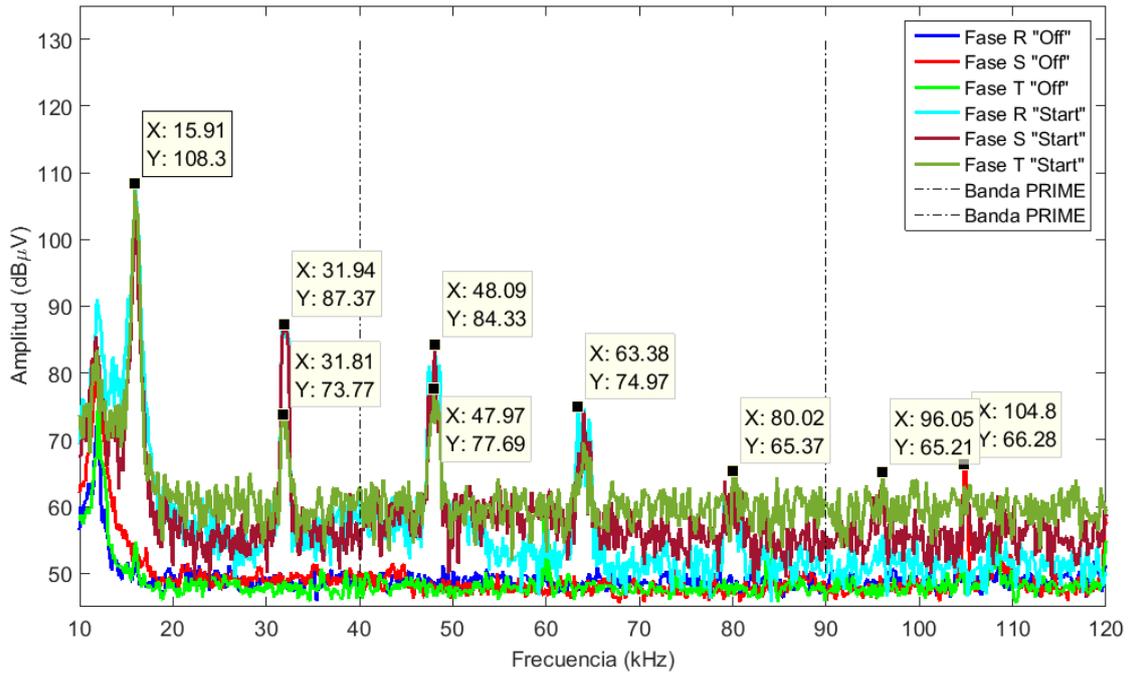


Figura 55. Espectro obtenido a la salida AC del inversor FV4 para los estados *paro* ("off") y *arranque* ("start").

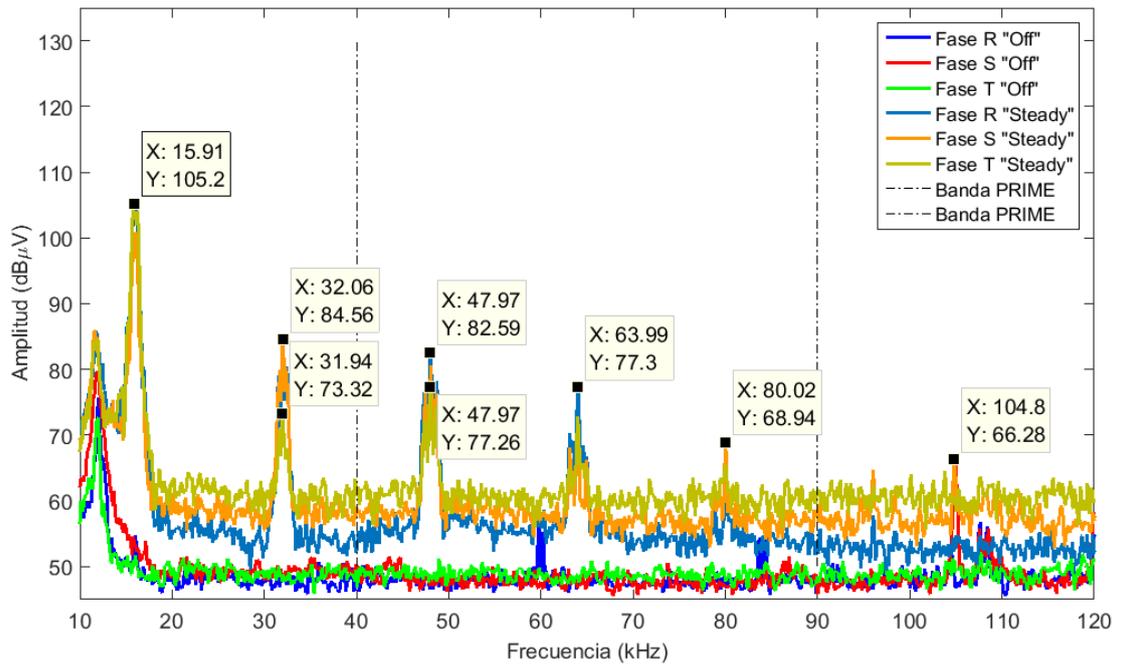


Figura 56. Espectro obtenido a la salida AC del inversor FV4 para los estados *paro* ("off") y *estable* ("steady").

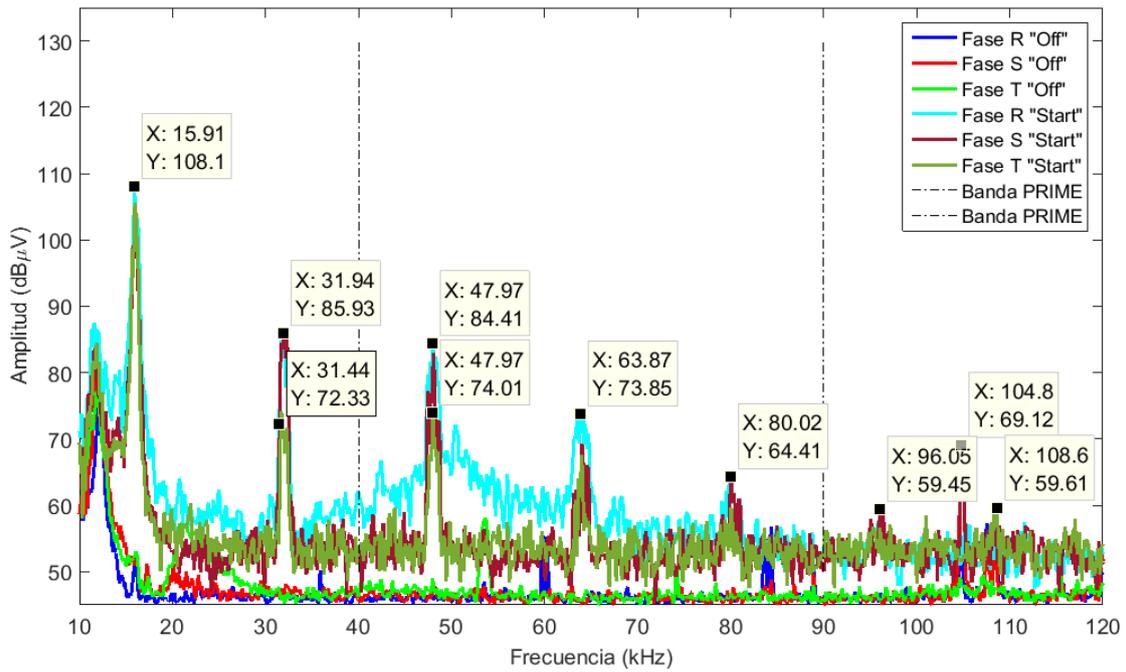


Figura 57. Espectro obtenido a la entrada del SM FV4 en su posición original para los estados *paro* ("off") y *arranque* ("start").

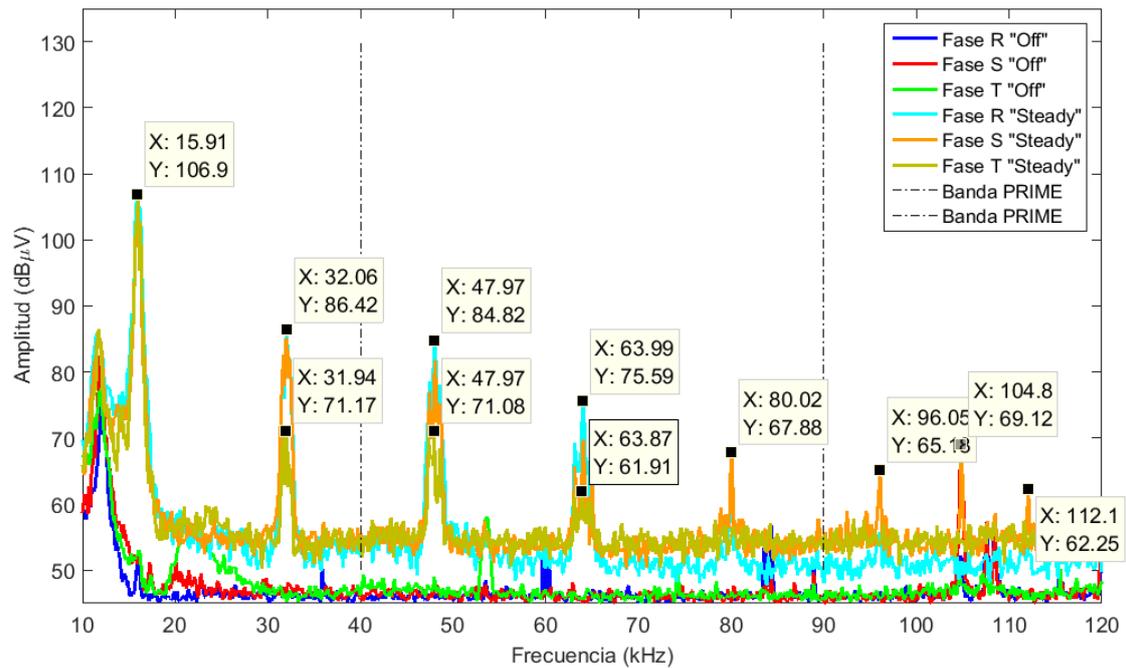


Figura 58. Espectro obtenido a la a la entrada del SM FV4 en su posición original para los estados *paro* ("off") y *estable* ("steady").

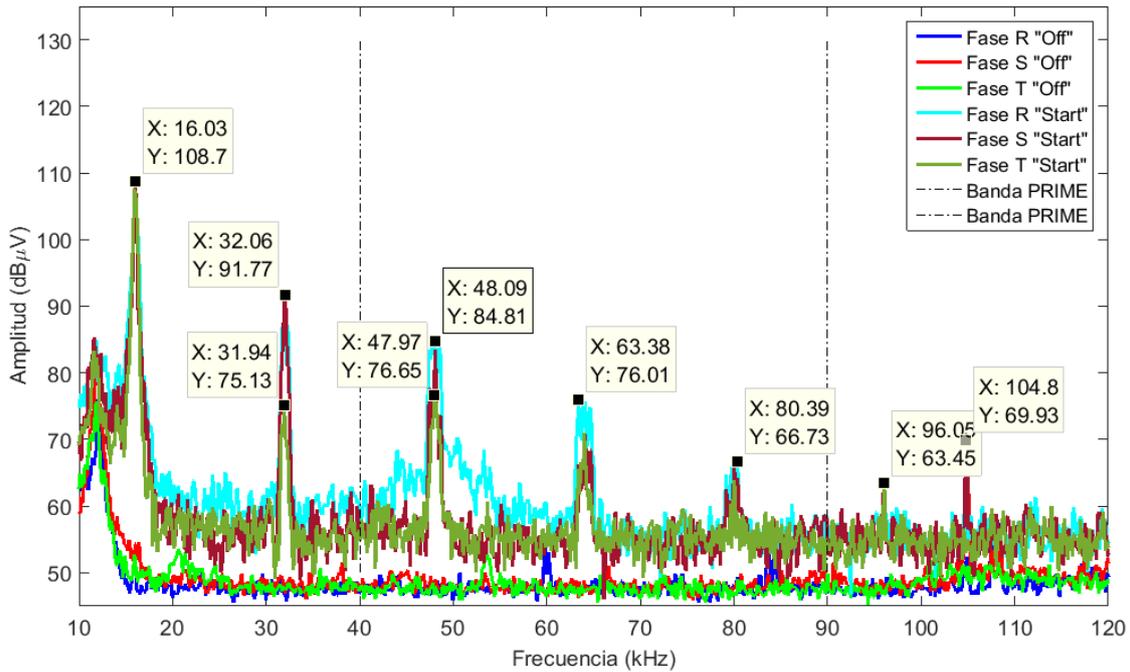


Figura 59. Espectro obtenido a la entrada del SM FV4 trasladado de sitio para los estados *paro* ("off") y *arranque* ("start").

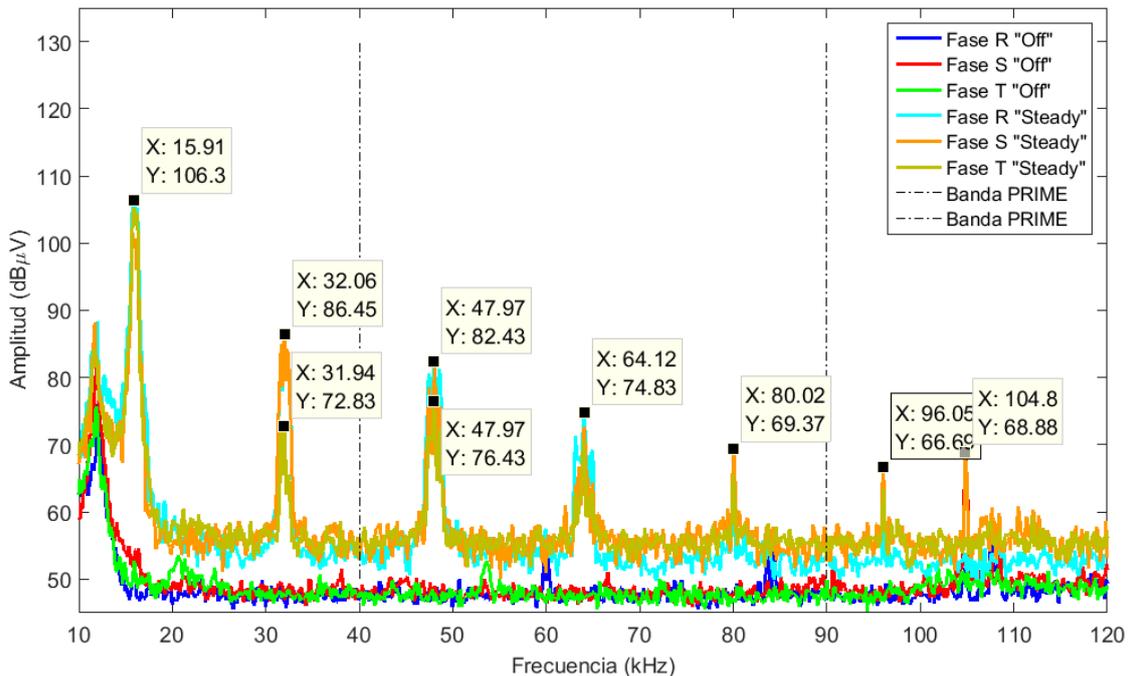


Figura 60. Espectro obtenido a la a la entrada del SM FV4 trasladado de sitio para los estados *paro* ("off") y *estable* ("steady").

Tras analizar las medidas realizadas, se ha demostrado que existe variación entre fases en los niveles tanto de las emisiones supraarmónicas, como en los niveles de ruido de fondo. Mientras que las diferencias en el ruido de fondo se han reducido con la distancia, las diferencias entre los armónicos de la inyección principal se han mantenido en todos los casos. Estas variaciones entre las fases se pueden atribuir a la diferencia de impedancias entre las fases y a la electrónica del inversor. Finalmente,

en las distancias eléctricas consideradas no se observa una variación significativa de las emisiones.

4.5.2. Emisiones generadas por recursos distribuidos

En este subapartado se recogen las medidas realizadas para cada uno de los DER funcionando de forma aislada. Teniendo en cuenta los resultados del apartado 4.5.1 :

- Se decidió tomar la entrada del SM asociado a cada dispositivo como el punto de medida más adecuado para caracterizar el ruido que le llega al equipo;
- Además, tal y como se demostrado de forma empírica y de acuerdo a [123], los valores de las emisiones no muestran diferencias notables con la distancia.;
- En los equipos trifásicos puede existir variación entre las fases, por lo que se decidió tomar válida la medida en la fase identificada con las mayores emisiones.

Por lo tanto, se conectó la sonda a la entrada de cada SM asociado, desconectando el resto de dispositivos con el fin de obtener únicamente la emisión del dispositivo analizado. Además, las figuras incluyen señales PRIME capturadas durante las pruebas, a modo de referencia.

Los diferentes dispositivos considerados para las pruebas, así como las configuraciones empleadas y la normativa referente a EMC/EMI que cumplen están recogidos en la Tabla 14.

| Tipo de DER | Características | Configuraciones | Normativa |
|------------------------|-------------------------------|--------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
| Turbina hidroeléctrica | 60 kW, trifásico | Apagado / Encendido / Arranque / Estacionario | - |
| Bomba hidroeléctrica | 18 kW, trifásico | Apagado / Arranque / Estacionario | - |
| Inversor FV – FV1 | 5 kW, monofásico, @ 16 kHz | Apagado / Arranque / Estacionario | Directiva 2004/108/CE EN 61000-6-2 EN 61000-6-4 |
| Inversor FV – FV2 | 5 kW, monofásico, @ 16 kHz | Apagado / Arranque / Estacionario | |
| Inversor FV – FV3 | 5 kW, monofásico, @ 16 kHz | Apagado / Arranque / Estacionario | |
| Inversor FV – FV4 | 15 kW, trifásico, @ 16 kHz | Apagado / Arranque / Estacionario | |
| Cargador de baterías | 8 kW, monofásico | Apagado / Stand-by / Encendido | Directiva 2004/108/CE EN 61000-6-1 EN 61000-6-3 EN 61000-3-2 EN 55014 EN 55022 |

Tabla 14. Listado de recursos considerados, características y configuraciones de medida.

4.5.2.1. Turbina hidroeléctrica

La turbina hidroeléctrica de la microrred es una máquina trifásica de 60 kW de tipo *Pelton*. Cuando la turbina se enciende, pasan aproximadamente 13 segundos antes de que se acople a la red, siendo este último proceso prácticamente instantáneo. Por lo tanto, pueden considerarse tres etapas distintas: *encendido*, *arranque* (cuando se acopla a la red), y *funcionamiento estable* (cuando está operando a la potencia indicada).

La Figura 61 recoge el espectro del ruido generado por la turbina en estas tres etapas, formado principalmente por una serie de supraarmónicos de amplitud decreciente cuya inyección principal se encuentra en torno a los 13 kHz. La amplitud de las emisiones está alrededor de 4 dB sobre el nivel de ruido de fondo hasta los 57 kHz, mientras que de ahí en adelante no se observan emisiones destacables por parte de la turbina. En la fase de *arranque*, los niveles de potencia a frecuencias más bajas suben, mientras que para frecuencias superiores a los 41 kHz permanecen similares a la fase de *funcionamiento estable*.

En cualquier caso, la amplitud de la señal PRIME registrada, y recogida también en la Figura 61, es superior a las emisiones generadas por la turbina en toda la banda PRIME, incluso teniendo en cuenta que la señal PRIME registrada está altamente degradada por el canal de transmisión. Durante toda la tanda de medidas el SN de la turbina permaneció conectado a la subred de comunicaciones y su cobertura permaneció estable, con valores entre 4 y 5.

Finalmente, la Figura 62 muestra el espectro obtenido para diferentes potencias de operación de la turbina, donde se puede observar que no hay diferencias destacables en los niveles de las emisiones generadas.

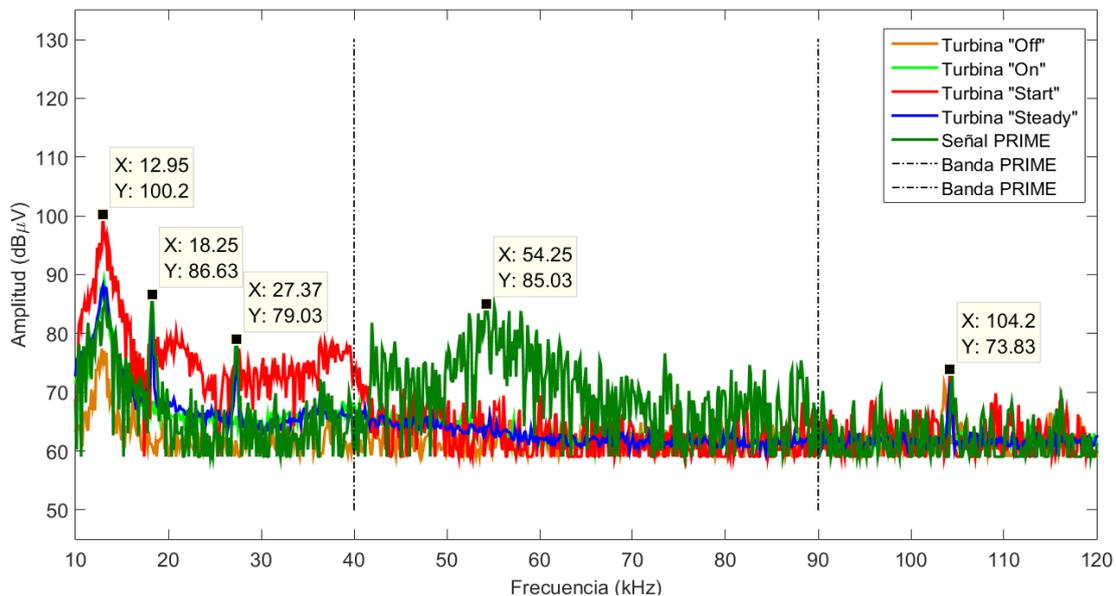


Figura 61. Espectro obtenido a la entrada del SM de la turbina para diferentes estados de operación: *apagado* ("off"), *arranque* ("start") y *funcionamiento estable* ("steady"), con el resto de dispositivos desconectados.

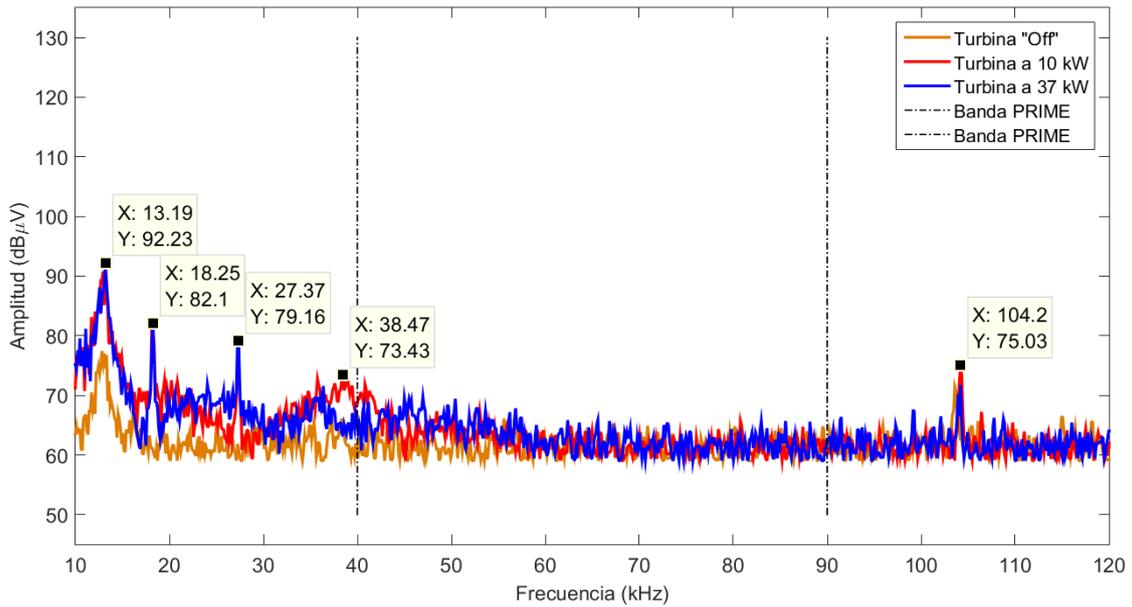


Figura 62. Espectro obtenido a la entrada del SM de la turbina para diferentes potencias de operación con el resto de dispositivos desconectados.

4.5.2.2. Bomba hidroeléctrica

La bomba hidroeléctrica que forma parte del grupo bombeo-turbinado es una máquina trifásica de 18 kW. A diferencia de la turbina, donde existía un lapso de tiempo entre el encendido y el acople, en la bomba este paso es prácticamente instantáneo, por lo que se consideran sólo las fases *arranque* y *funcionamiento estable*.

El espectro recogido para la etapa de *arranque* (Figura 63) muestra un ruido coloreado cuya potencia está significativamente por encima del ruido de fondo, alcanzando los 20 dB de diferencia por debajo de los 40 kHz. A partir de esta frecuencia, la diferencia se reduce progresivamente. Durante la fase de *funcionamiento estable*, los niveles de potencia de las emisiones se mantienen constantes y a niveles similares a los del ruido de fondo y sin ninguna emisión relevante dentro de la banda PRIME, donde tan sólo destacan los niveles de ruido originados por la fase *arranque* y ligeramente superiores a los anteriores. En cualquier caso, los niveles de ruido en la banda PRIME están entre 5 y 20 dB por debajo de la señal PRIME registrada.

En cuanto a la influencia en las comunicaciones, el SN de la bomba permaneció conectado durante todas las medidas realizadas y con una cobertura estable de nivel 4.

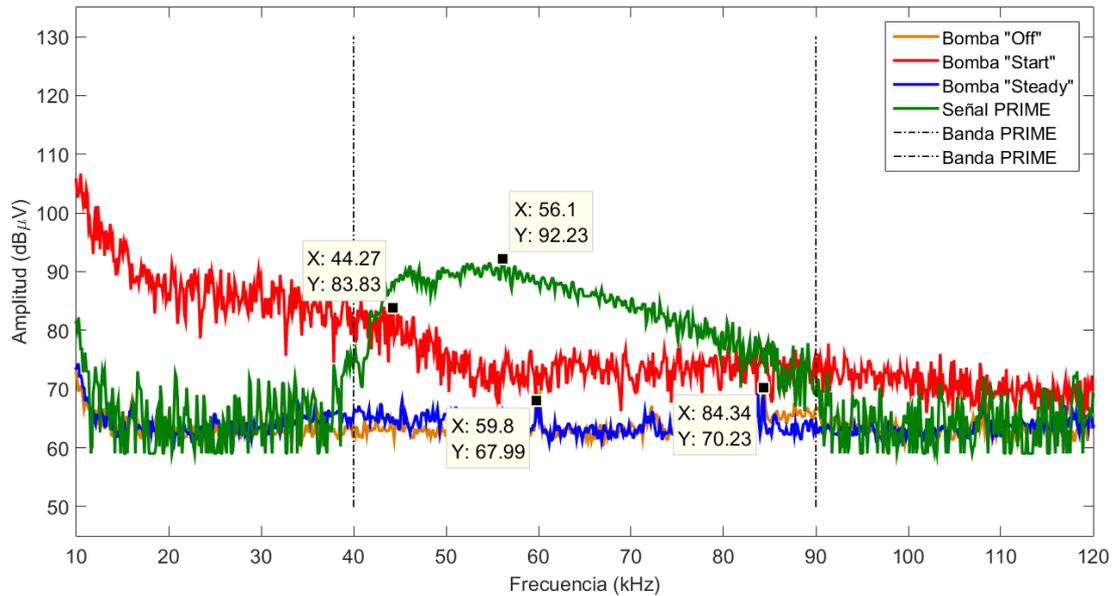


Figura 63. Espectro obtenido a la entrada del SM de la bomba para diferentes estados de operación: *apagado* ("off"), *arranque* ("start") y *funcionamiento estable* ("steady") con el resto de dispositivos desconectados.

4.5.2.3. Inversor fotovoltaico FV4

La Figura 64 recoge el espectro obtenido a la entrada del SM del inversor FV4, con el resto de dispositivos vecinos desconectados, además de dos señales PRIME registradas durante las medidas. En la figura se puede ver con una inyección principal a 16 kHz (coincidiendo con la frecuencia de conmutación) para las etapas *arranque* y *funcionamiento estable*, cuyo nivel de potencia está aproximadamente 37.3 dB por encima del ruido de fondo para la fase de *arranque* y unos 35 dB para la de *funcionamiento estable*. Los niveles de los armónicos de esta inyección, a 32 kHz, 48 kHz y 64 kHz, descienden de forma lineal. Se observa también que en todos los casos los niveles de potencia de los supraarmónicos para la fase *arranque* son ligeramente superiores a los obtenidos para la fase de *funcionamiento estable*, con una diferencia máxima de 5.82 dB en 32 kHz.

En lo referente a la posible afección a las comunicaciones PRIME, sólo dos de los armónicos de la inyección principal entran dentro de la banda CENELEC-A (en 48 kHz y 64 kHz) y sus niveles están por debajo de las señales PRIME registradas y a igual nivel para el caso de la señal PRIME más "débil" que se registró. En lo referente a la influencia sobre las comunicaciones de su SM asociado, éste permaneció conectado durante todas las medidas, pero su cobertura varió entre los niveles 3 y 5 durante la fase de *funcionamiento estable*.

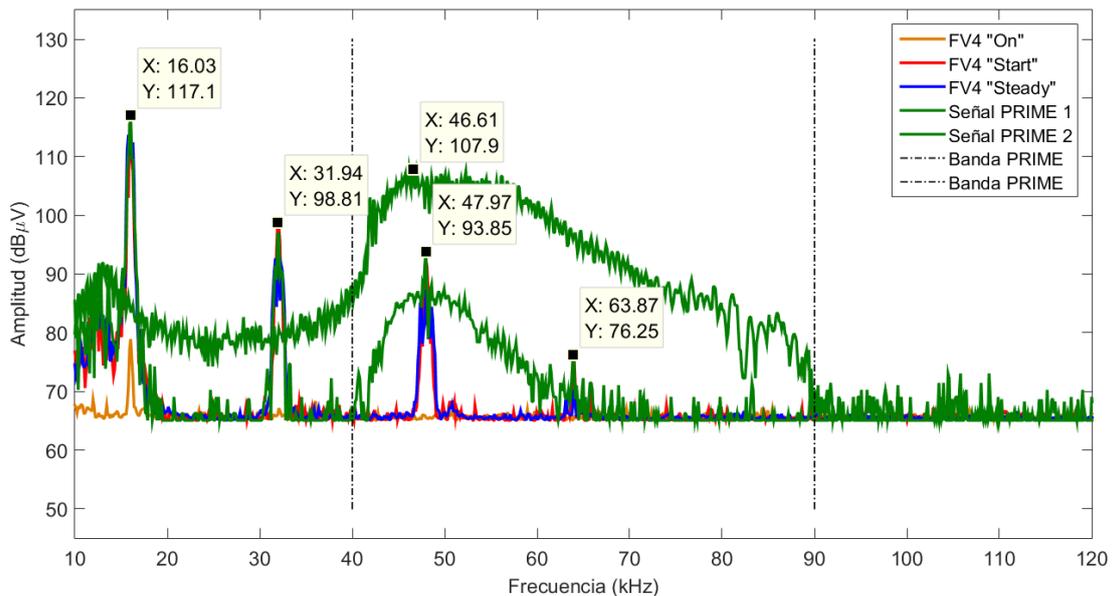


Figura 64. Espectro obtenido a la entrada del SM del inversor fotovoltaico FV4 para diferentes estados de operación: *encendido* ("on"), *arranque* ("start") y *funcionamiento estable* ("steady") con el resto de dispositivos desconectados.

4.5.2.4. Cargador de baterías

El cargador de baterías y los sucesivos recursos analizados (inversores monofásicos) se encuentran en el ramal de la caseta, y por lo tanto, en un transformador distinto al de la turbina, la bomba y el inversor FV4. El cargador es un equipo monofásico de 8 kW, en el que se pueden diferenciar dos estados: *stand-by* (cuando está conectado, pero no está cargando) y *encendido* (cuando está cargando las baterías).

El espectro obtenido a la salida de su SM asociado, y representado en la Figura 65, se caracteriza por ser un ruido coloreado, cuyas emisiones en fase *stand-by* están principalmente formadas por una inyección principal en 12 kHz, y por lo tanto fuera de la banda PRIME. A partir de esta inyección, la potencia de las emisiones decrece hasta niveles de ruido de fondo. Durante esta fase, el SN permaneció conectado y con cobertura estable (valores entre 5 y 6).

Sin embargo, las emisiones durante la fase de carga (*encendido*) están formadas por una serie de supraarmónicos de amplitud decreciente, con una inyección principal a 24 kHz, cuyo nivel de potencia está casi 57 dB por encima del ruido de fondo (Figura 65). El segundo y tercer armónico de esa inyección están dentro de la banda PRIME. Estas emisiones afectan mucho a las comunicaciones PRIME ya que imposibilitan la comunicación entre el SN y el BN, y por lo tanto, el SM se desconecta de la subred. Observando las señales PRIME registradas en la Figura 65, parece evidente que la señal PRIME de mayor potencia corresponde a una señal transmitida por el SN, mientras que la señal más débil parece provenir del BN y ha sido atenuada por el ruido presente en el canal de transmisión. Los problemas en la comunicación podrían deberse por tanto a la influencia de las emisiones del cargador en las señales recibidas desde el BN.

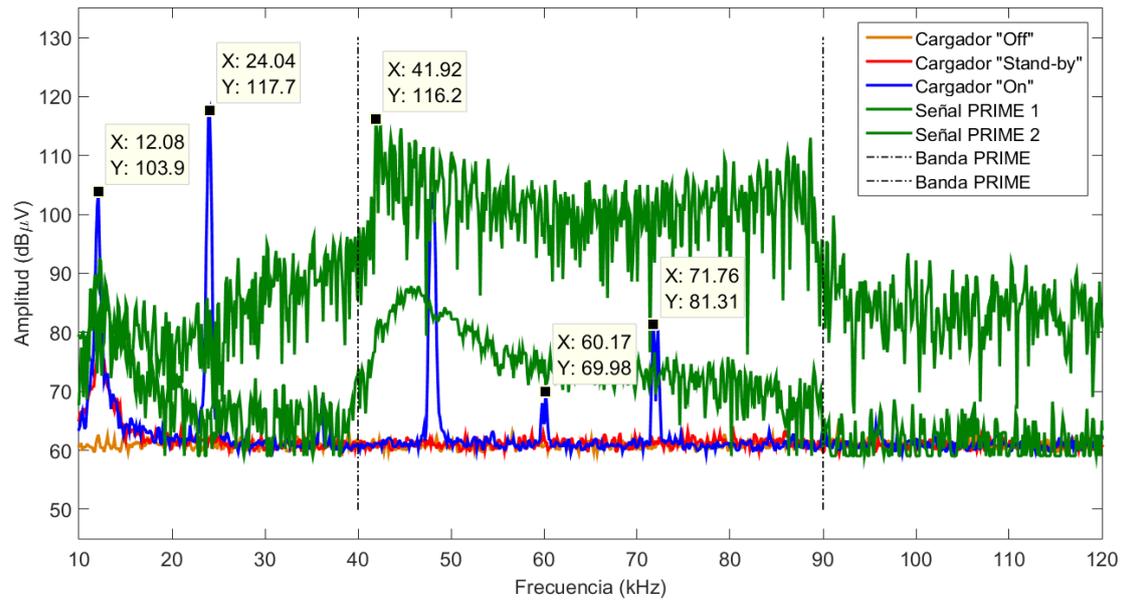


Figura 65. Espectro obtenido a la entrada del SM del cargador de baterías para diferentes estados de operación: *apagado* ("off"), *stand-by* y *encendido* ("on") con el resto de dispositivos desconectados.

4.5.2.5. Inversor fotovoltaico FV1

El inversor fotovoltaico FV1 es el primero de los tres inversores monofásicos analizados, estando cada uno de ellos instalado en una fase eléctrica distinta. El inversor FV1 tiene una potencia de 5 kW y una frecuencia de conmutación de 16 kHz. Tal y como ocurría con FV4, se pueden distinguir tres etapas distintas: *encendido* (el inversor está conectado a red pero no acoplado a red), *arranque* (el momento en el que se acopla a red) y *funcionamiento estable* (el inversor está operando de forma ordinaria).

El análisis del espectro obtenido a la salida del SM asociado (representado en la Figura 66) muestra un patrón de ruido coloreado similar en los casos *encendido* y *arranque*, con una inyección principal a 16 kHz, que coincide con la frecuencia de conmutación del inversor, y con un nivel de potencia 65 dB por encima del ruido de fondo. Sólo el tercer armónico de esta inyección (y sucesivos, aunque su amplitud es mucho menor) está dentro de la banda PRIME y su nivel es aproximadamente 12 dB por debajo de la señal PRIME a la misma frecuencia.

Durante las medidas, el SN asociado al inversor FV1 permaneció conectado y su cobertura estable con valores entre 5 y 6.

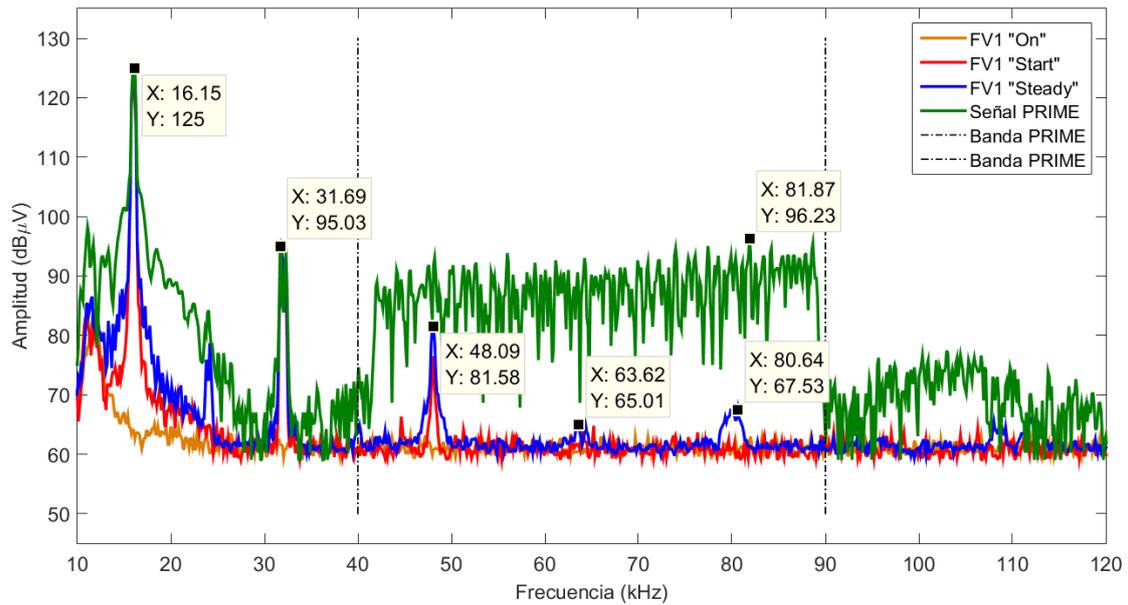


Figura 66. Espectro obtenido a la entrada del SM del inversor fotovoltaico FV1 para diferentes estados de operación: *encendido* ("on"), *arranque* ("start") y *funcionamiento estable* ("steady") con el resto de dispositivos desconectados.

4.5.2.6. Inversor fotovoltaico FV2

El inversor fotovoltaico FV2 también tiene una potencia de 5 kW y una frecuencia de conmutación de 16 kHz.

El espectro obtenido a la salida de su SM asociado está recogido en la Figura 67 y en ella se puede ver un patrón de ruido coloreado compuesto por una serie de supraarmónicos de amplitud decreciente, más apreciable en los armónicos pares de la componente principal a 16 kHz. Tanto la fase de *arranque* como la de *funcionamiento estable* presentan un patrón similar y en el *arranque* se aprecia un ligero descenso de los niveles de tensión medidos, de entre 5 y 10 dB. La inyección principal a 16 kHz (coincidiendo con la frecuencia de conmutación del inversor), está 60 dB por encima del ruido de fondo y fuera de la banda PRIME mientras que su 3^{er}, 4^o y 5^o armónicos sí que están dentro de la banda de interés. El 3^{er} y 5^o armónicos están 5 dB y 7 dB respectivamente por encima de la señal PRIME registrada durante la fase *arranque*, mientras que durante la fase de *funcionamiento estable* los niveles de esos armónicos son similares a los de la señal PRIME. En ambas fases el 4^o armónico está por debajo de la señal PRIME.

A pesar del nivel de las emisiones, el SN asociado permaneció conectado en todo momento y con una cobertura estable con valores entre 5 y 6.

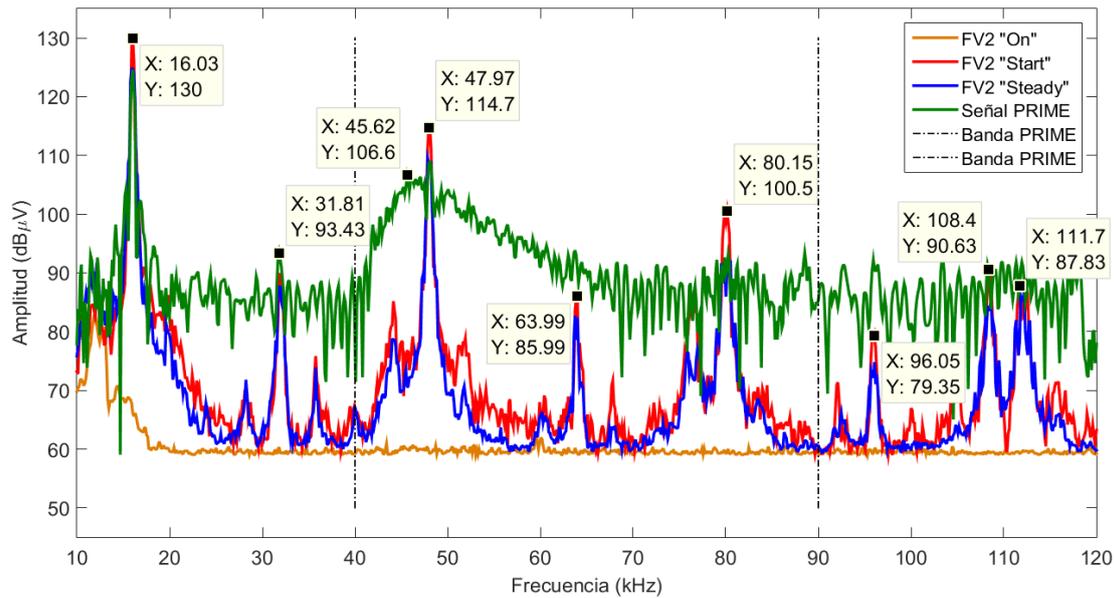


Figura 67. Espectro obtenido a la entrada del SM del inversor fotovoltaico FV2 para diferentes estados de operación: *encendido* ("on"), *arranque* ("start") y *funcionamiento estable* ("steady") con el resto de dispositivos desconectados.

4.5.2.7. Inversor fotovoltaico FV3

El inversor fotovoltaico FV3, como ocurre con los anteriores, es monofásico, de 5kW y con una frecuencia de conmutación de 16 kHz y está instalado en la misma fase eléctrica que el cargador de baterías.

La Figura 68 recoge el espectro obtenido a la entrada del SM asociado. En ella se muestra la emisión con una inyección principal en 16 kHz (frecuencia de conmutación), con un nivel 65 dB por encima del ruido de fondo, y de sus dos primeros armónicos. Como ocurría con FV1, las fases *encendido* y *arranque* muestran un patrón similar. El tercer armónico de la inyección principal, localizado a 48 kHz, y por lo tanto dentro de la banda PRIME, alcanza el mismo nivel de potencia que la señal PRIME registrada (82 dBµV). El resto de emisiones dentro de la banda de interés están claramente por debajo de la señal PRIME. Respecto a la influencia en el SN asociado, éste permaneció conectado durante todas las pruebas y su cobertura no se vio afectada, manteniendo un nivel de entre 5 y 6.

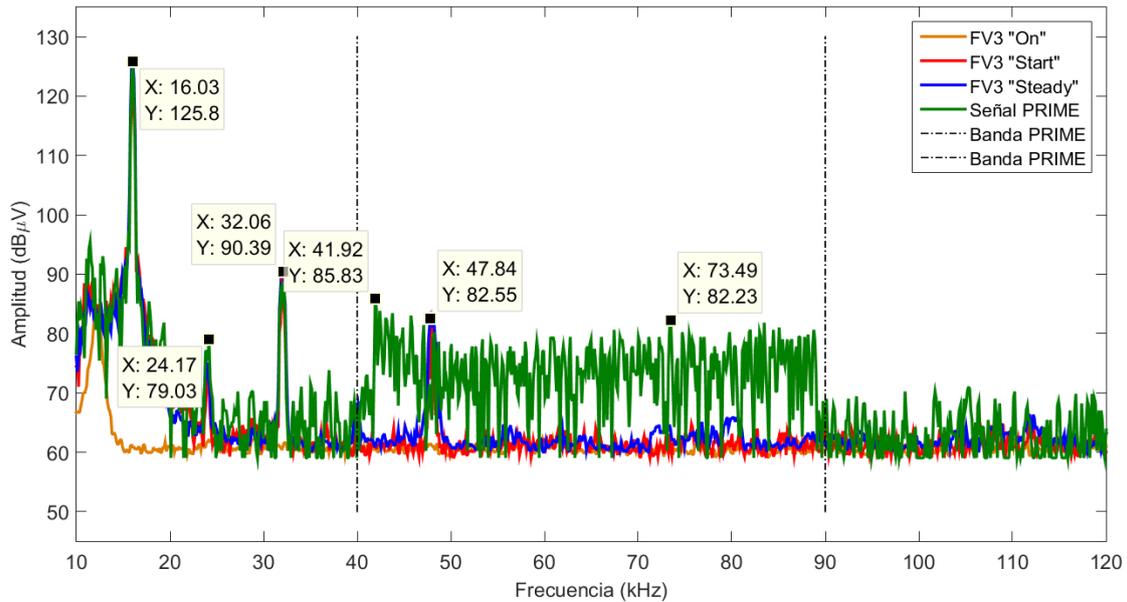


Figura 68. Espectro obtenido a la entrada del SM del inversor fotovoltaico FV3 para diferentes estados de operación: *encendido* ("on"), *arranque* ("start") y *funcionamiento estable* ("steady") con el resto de dispositivos desconectados.

4.5.3. Influencia de las emisiones en las comunicaciones NB-PLC

Esta sección analiza la influencia de las emisiones no deseadas de los diferentes DER en las comunicaciones PRIME, mediante medidas realizadas en condiciones normales de operación de la microrred, esto es, con los inversores encendidos y con la turbina, la bomba y el cargador de baterías en funcionamiento cuando los requerimientos de energía lo precisen. A diferencia de las medidas de la anterior sección, que buscaba la caracterización de las emisiones de cada dispositivo de forma aislada, esta campaña de medidas analiza el efecto de las emisiones de cada DER en las comunicaciones del resto de recursos, estando todos ellos en funcionamiento normal.

En concreto, se analiza la evolución topológica de la subred y el nivel de cobertura de los SNs asociados a través de ficheros *log*. Además, dado que el cargador de baterías es el equipo que genera una afección más importante, se analiza en mayor profundidad mediante las tramas MAC obtenidas.

A pesar de que la topología de la subred puede cambiar con el tiempo según el criterio del BN, una topología real registrada para el CT PEPAlII de la microrred del CEDER-CIEMAT se recoge en la Figura 69, donde se pueden ver los diferentes estados, la dirección MAC y los niveles de cobertura de cada nodo. Tal y como se describe en el Capítulo 3, el CT PEPAlII está formado por dos ramales eléctricos, cada uno con diferentes equipos instalados. En la Figura 69 se puede comprobar que todos los SNs localizados en el ramal de la caseta están directamente conectados con el BN sin necesidad de ningún *switch*, mientras que los SNs del ramal del grupo bombeo-turbina necesitan varios niveles de *switching* para comunicarse con el BN.

En cuanto al efecto de las emisiones interferentes, la disminución del nivel de cobertura de un *switch* afectará también a todos los SNs que dependan de él. Por lo

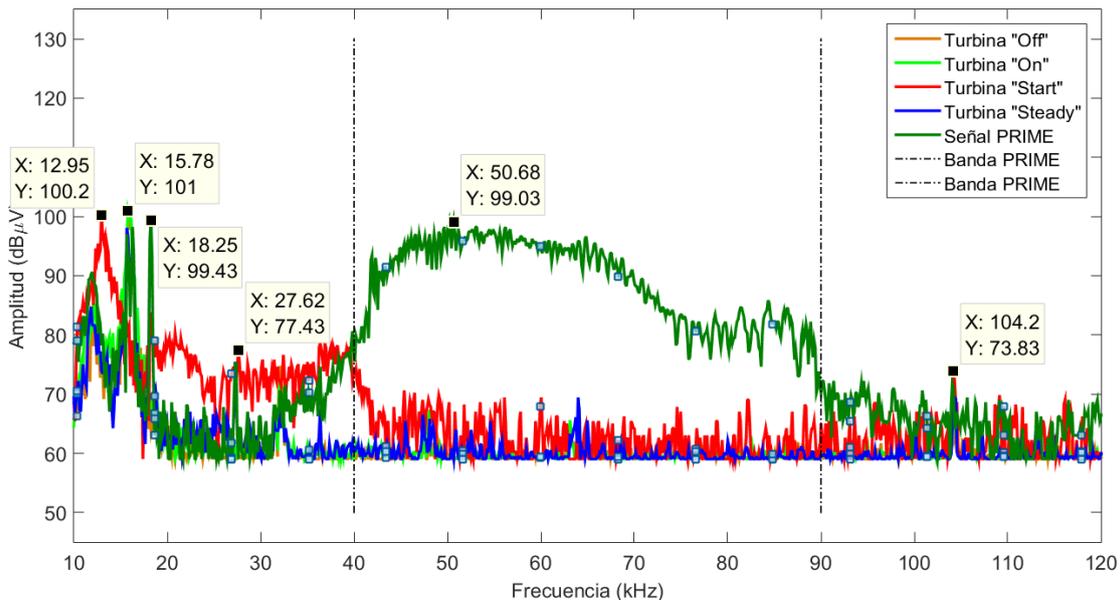


Figura 70. Espectro obtenido a la entrada del SM de la turbina para diferentes estados de operación: apagado ("off"), encendido ("on"), arranque ("start") y funcionamiento estable ("steady") con el resto de dispositivos encendidos.

4.5.3.2. Bomba hidroeléctrica

El espectro obtenido en el SM de la bomba hidroeléctrica para diferentes modos de operación, con la turbina y el inversor FV4 operando, puede verse en la Figura 71. En contraste con el espectro obtenido en la Figura 63 (emisiones generadas por la bomba de forma aislada), la Figura 65 muestra unas inyecciones destacables en 16 kHz y 18 kHz, de niveles aproximados de 101 dBµV y 99.43 dBµV, respectivamente, que también aparecen cuando la bomba está apagada. Por lo tanto, estas emisiones están causadas por otros DER cercanos y constituyen emisiones secundarias. Observando la Figura 61 y la Figura 70, estas contribuciones pueden atribuirse a la turbina. Dentro de la banda PRIME, los niveles de las emisiones están por debajo del nivel de la señal PRIME registrada y sólo la fase *arranque* genera interferencias superiores a las de la señal PRIME.

Esta transición de *arranque* a *estable* es prácticamente inmediata y no afecta a la topología o a la cobertura de los nodos. Sin embargo, las emisiones secundarias sí que afectaron a la topología de la subred. El nivel de cobertura del SN de la bomba descendió de 4 a 2, e incluso se registró algún cambio a nivel 1, y en lo que a topología se refiere, el SN de la bomba promocionó a *switch*. Dado que tanto la cobertura del SN de la bomba y de uno de sus *switch* previos, "bancada de condensadores", descendió (ver Figura 72) y atendiendo a criterios de mantenimiento de la subred fijados por el BN, el SN de la bomba pasó a conectarse a través del SN *switch* de la turbina.

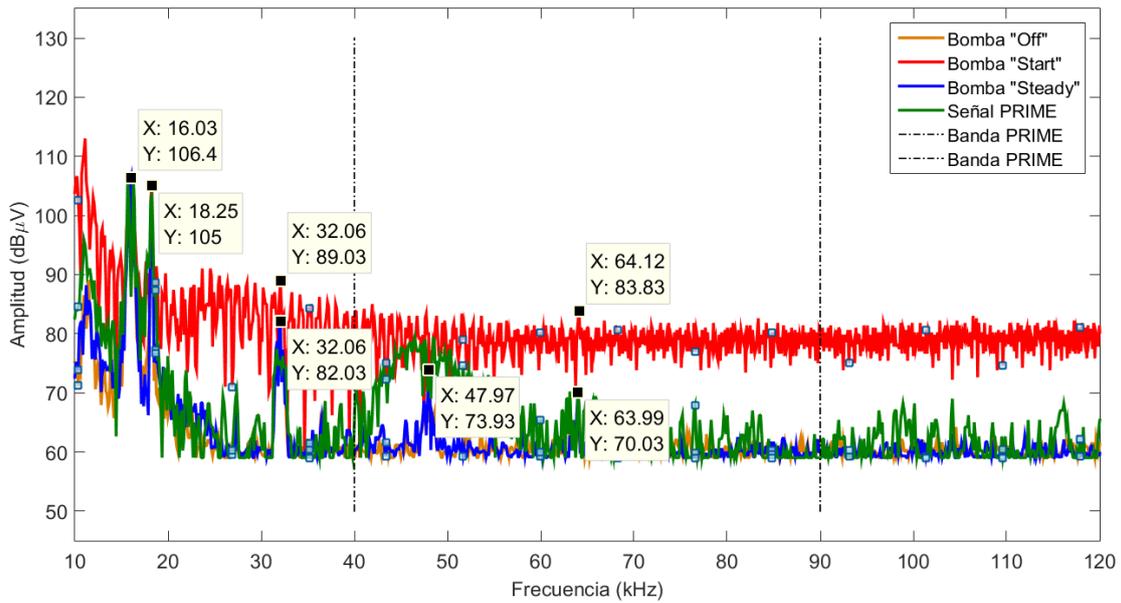


Figura 71. Espectro obtenido a la entrada del SM de la bomba para diferentes estados de operación: *apagado* ("off"), *arranque* ("start") y *funcionamiento estable* ("steady") con el resto de dispositivos encendidos.

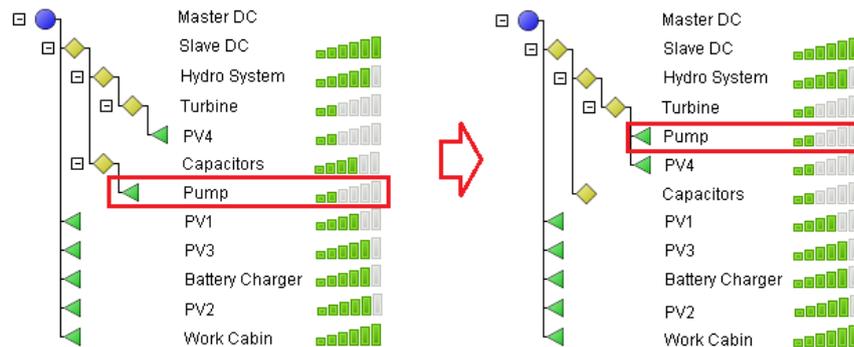


Figura 72. Cambio de *switch* del SN de la bomba cuando la bomba está operando y el resto de dispositivos encendidos.

4.5.3.3. Inversor fotovoltaico FV4

El espectro obtenido para los diferentes estados del inversor FV4, con la turbina y bombas encendidas y operando, puede verse en la Figura 73. El espectro es similar al obtenido en la Figura 64 (emisiones generadas por el inversor aislado), pero los niveles de tensión de la mayor inyección y sus armónicos son ligeramente inferiores con los DER cercanos funcionando (la mayor diferencia es de 12 dB a 48 kHz en la fase arranque), fenómeno también recogido en [138]. Además, en la Figura 73 se puede observar una contribución adicional a 18 kHz que no aparece en la Figura 64. Como ocurría en el escenario de la bomba (Figura 71), y teniendo en cuenta la Figura 61 y la Figura 64, la inyección a 18 kHz puede atribuirse a la turbina (emisión secundaria). De la misma forma, el inversor FV4 es el causante de las emisiones a 16 kHz que se ven en la Figura 70 y Figura 71, en los casos de la turbina y la bomba respectivamente, y que no aparecen cuando operan de forma aislada.

En lo que a comunicaciones PRIME se refiere, se registraron cambios en la cobertura del SN del inversor FV4 (niveles 1, 2 y 3) durante las medidas. Sin embargo, el SN permaneció conectado a través de tres mismos *switches* (Figura 69) en todo momento.

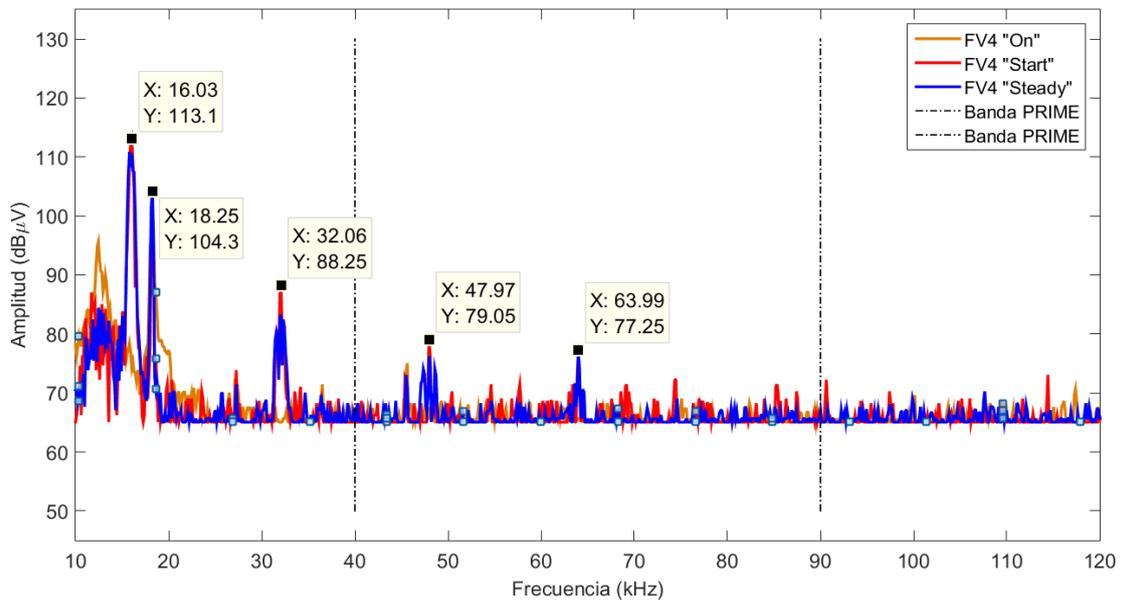


Figura 73. Espectro obtenido a la entrada del SM del inversor FV4 para diferentes estados de operación: *encendido* ("on"), *arranque* ("start") y *funcionamiento estable* ("steady") con el resto de dispositivos encendidos.

4.5.3.4. Cargador de baterías

Anteriormente vio que las emisiones del cargador de baterías afectan mucho a las comunicaciones PRIME, especialmente cuando está en modo *carga*, que es cuando su correspondiente SN se desconecta de la subred. Observando la Figura 65 y la Figura 74, que recogen las emisiones para diferentes estados del cargador, se puede observar que los dispositivos cercanos también contribuyen a las emisiones registradas a la entrada del SM del cargador, ya que hay una notable contribución a 16 kHz que no aparece cuando el cargador se mide de forma aislada. El análisis topológico mostró que ni el estado *stand-by* del cargador ni la aportación de los inversores FV1, FV2 y FV3 encendidos y operando afectaron a la cobertura o topología del SN del cargador.

La influencia del cargador en las comunicaciones se puede ver en la Figura 75 a) y b), que muestra la evolución de la subred PRIME en las fases *stand-by* y *encendido*, respectivamente. Tras el encendido del cargador, tanto el SN de éste como el del inversor FV3 son incapaces de comunicarse con el BN y se desconectan de la subred. Como se explica en detalle más adelante en el análisis MAC (sección 4.5.3.4), FV1 promueve a *switch* porque tanto el SN de FV3 como el SN del cargador envían peticiones para que sus nodos vecinos promuevan, y así ellos sean capaces de establecer conexión con el BN. A pesar de ello, tanto el SN de FV3 como el SN del cargador permanecen desconectados hasta que el cargador se apaga de nuevo.

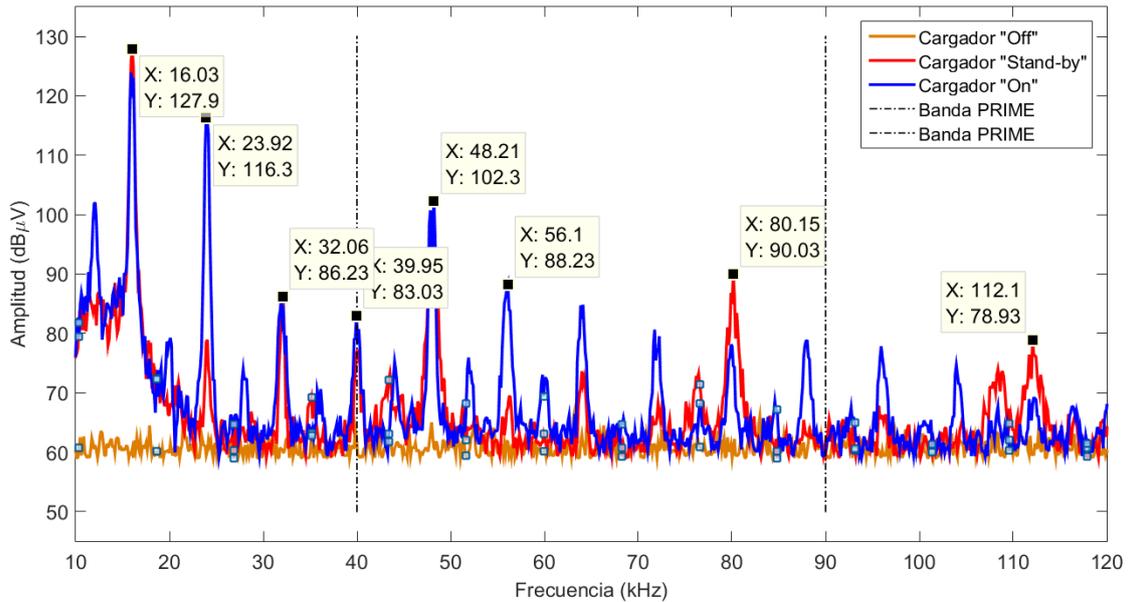


Figura 74. Espectro obtenido a la entrada del SM del cargador de baterías para diferentes estados de operación: *apagado* ("off"), *stand-by* y *encendido* ("on"), con el resto de dispositivos encendidos.

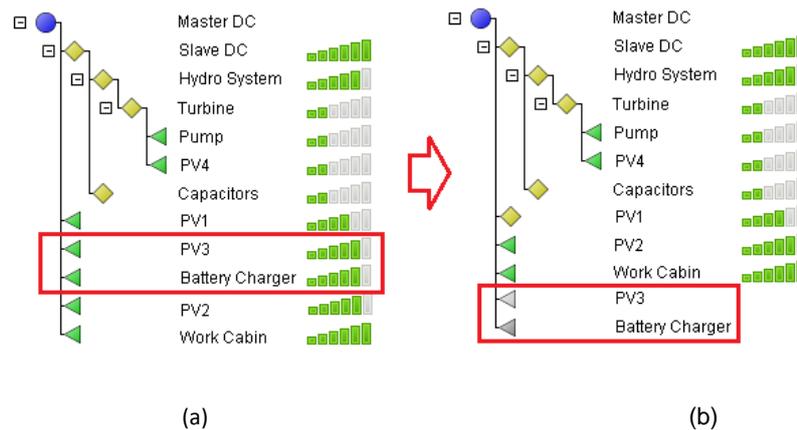


Figura 75. Evolución de la subred PRIME durante (a) fase *stand-by* y (b) fase *encendido* del cargador de baterías. Los estados del SN de FV3 y del SN del cargador cambian a *desconectado* cuando el cargador se enciende.

4.5.3.4.a. Análisis MAC

Las tramas MAC se obtienen de dos formas: mediante el registro de tramas enviadas y recibidas por el BN, y a través de un *sniffer* de tramas MAC (PBN) conectado en un punto de la subred. En ambos casos, se obtiene un fichero *log* con el tráfico de tramas intercambiado, similar al que se puede ver en la Figura 76. Para este escenario, el PBN se conectó en el SM del cargador (localizado en la misma fase eléctrica que el inversor FV3) y se grabó una sesión en la que el cargador comenzó en *stand-by*, tras 10 minutos pasó a *encendido* y tras 21 horas en este estado finalmente volvió a *stand-by*. Por lo tanto, se contó con dos ficheros *log* diferentes: el obtenido en el BN y el que generó el PBN conectado a la entrada del SM del cargador. La Figura 76 muestra algunas de las tramas MAC registradas durante esta sesión y la Figura 77 muestra la secuencia de tramas MAC intercambiadas entre el BN y el SN del inversor FV3 y entre el BN y el SN del cargador, respectivamente.

Como parte de la gestión de la subred PRIME, el BN envía periódicamente paquetes *Keep Alive* (ALV_B) a los SNs de la subred, a los cuales los SNs responden con sus propios mensajes *Keep Alive* (ALV_S). Tras el encendido del cargador, el BN sigue enviando mensajes *Keep Alive* tanto al SN del cargador (Inid: 1737 en la Figura 76) como al SN del inversor FV3 (Inid: 832 en la Figura 76). Sin embargo, dado que el BN no recibe mensajes *Keep Alive* por parte de los SNs, da comienzo al proceso de baja de éstos (paquete de control REG_UNR_B), tal y como muestran la Figura 76 y la Figura 77. El BN espera 3 segundos tras el envío de su último mensaje ALV_B antes de iniciar el proceso de baja de los SNs. A pesar de que el *sniffer* no registró ningún mensaje REG_UNR_B por parte del BN, el proceso de baja comenzó y los dos SNs aparecieron como *desconectados* 34 segundos después del envío de su correspondiente REG_UNR_B. Considerando los espectros de la Figura 65 y de la Figura 74, es probable que la comunicación se haya visto interrumpida debido a que los mensajes *Keep Alive* por parte del BN no hayan sido capaces de llegar hasta los SNs.

Dos segundos después de que el paquete REG_UNR_B se enviara, la topología mostró que los estados tanto del SN del inversor FV3 como del SN del cargador cambiaron a *zombie* (un estado previo a la desconexión). Dado que los SNs dejan de recibir mensajes ALV_B por parte del BN, éstos asumen su desconexión de la subred. Sin embargo, siguen enviando mensajes *Promotion Needed* con el objetivo de ser parte de la subred de nuevo (el *sniffer* registró 4006 peticiones *Promotion Needed* por parte del SN del inversor FV3 y 4239 por parte del SN del cargador). Los nodos desconectados de una subred envían tramas *Promotion Needed* a sus nodos vecinos para indicarles la necesidad de promoción a *switch* de alguno de los nodos *Terminal* disponibles. Si un nodo *Terminal* escucha esta petición y el BN lo estima oportuno, el SN puede promocionar a *switch*.

Junto con el envío de peticiones *Promotion Needed* por parte del SN del inversor FV3 y del SN del cargador, los SNs de los inversores FV1 y FV2 y el SN de la caseta, localizados bajo el mismo transformador, cambiaron su estado constantemente. Concretamente, el SN del inversor FV1 cambió a *switch* 190 veces, el SN del inversor FV2 189 veces y el SN de la caseta 191 veces antes de que el cargador se volviera a apagar. Para el mismo periodo de tiempo, el *sniffer* grabó 1047 peticiones *Promotion Needed* por parte del SN del inversor FV3 y 1104 peticiones por parte del SN del cargador, mientras que el BN recibió 1026 peticiones *Promotion Needed* por parte del SN del inversor FV3 y 998 peticiones por parte del SN del cargador. Una vez más, puede ser que algunas tramas no consiguieran llegar al BN debido a las emisiones del cargador. Pese a todo, ni el SN del inversor FV3 ni el SN del cargador pudieron conectarse con el BN a través de ningún SN vecino promocionado a *switch* mientras que el cargador estuvo encendido y permanecieron desconectados hasta que el cargador se apagó de nuevo.

```
[TX] 2016-02-11 11:17:23 9069.459180(0.000000) dbpsk_f channels:0
GPDU: sna:40:40:22:01:d5:04 DO level:0
ALV_B sid:3 Inid:1737 rxcnt:0 txcnt:7 ssid:255 time:0
00 | 00 40 7d 06 07 03 1b 24 03[1c 00 ff]01 b3 e9 ed
[TX] 2016-02-11 11:17:26 9072.289852(0.000000) dbpsk_f channels:0
GPDU: sna:40:40:22:01:d5:04 DO level:0
REG_UNR_B: eui48: 40:40:22:48:6d:6f sid:3 Inid:1737
00 | 00 40 7d 06 01 03 1b 24 08[80 00 40 40 22 48 6d
10 | 6f]6d 3e 6c 1b
[TX] 2016-02-11 11:17:27 9072.826392(0.011008) dbpsk_f channels:0
GPDU: sna:40:40:22:01:d5:04 DO level:0
ALV_B sid:0 Inid:832 rxcnt:5 txcnt:2 ssid:255 time:0
00 | 00 40 7d 06 07 00 0d 00 03[a8 00 ff]d2 c1 9f d9
[TX] 2016-02-11 11:17:30 9075.673172(0.013248) dbpsk_f channels:0
GPDU: sna:40:40:22:01:d5:04 DO level:0
REG_UNR_B: eui48: 40:40:22:48:6d:6e sid:0 Inid:832
00 | 00 40 7d 06 01 00 0d 00 08[80 00 40 40 22 48 6d
10 | 6e]8a cf d1 93
```

Figura 76. Tráfico MAC que muestra los últimos mensajes *Keep Alive* registrados y los procesos de baja iniciados por el BN para el SN del inversor FV3 y el SN del cargador tras el encendido del cargador.

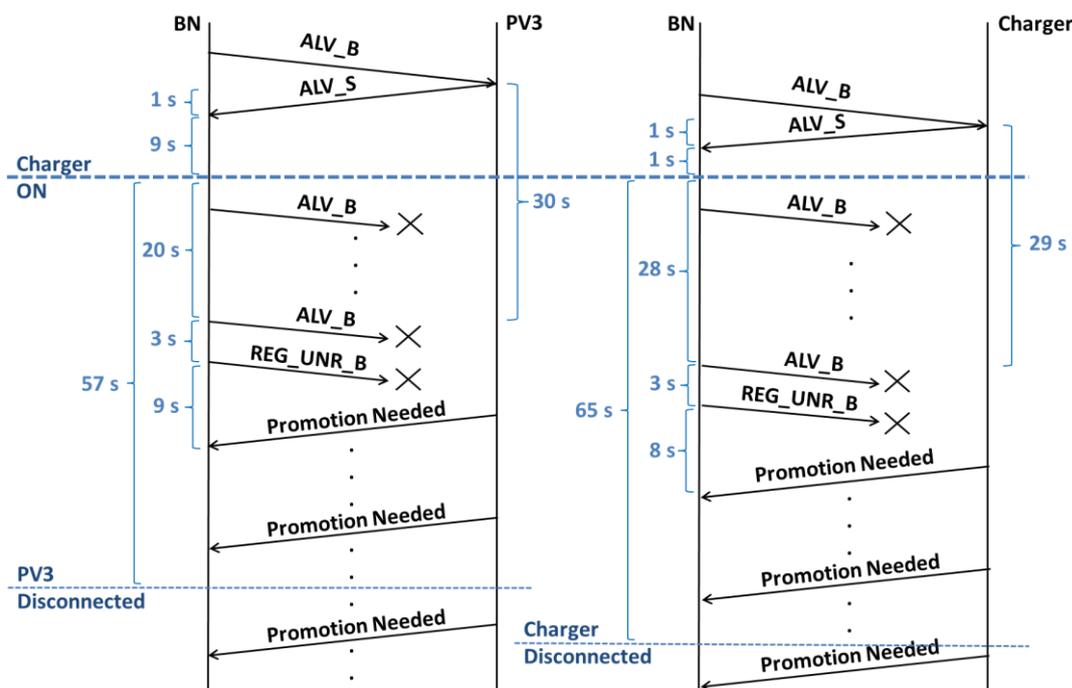


Figura 77. Secuencia de tramas MAC entre el BN y el SN del inversor FV3 y entre el BN y el SN del cargador, respectivamente.

4.5.3.5. Inversor fotovoltaico FV1

La Figura 78 recoge el espectro obtenido a la entrada del SM del inversor fotovoltaico FV1 con el resto de dispositivos conectados y el cargador apagado. Como ocurría en la Figura 66, que mostraba el espectro obtenido con sólo la aportación del inversor FV1, la inyección principal se produce a 16 kHz y sus armónicos (especialmente el 2º y el 3º armónicos) son muy notorios y ligeramente superiores a lo que mostraba el espectro de la Figura 66. El mayor incremento de los niveles de potencia se produce a 80 kHz y es 12.7 dB por encima del mismo armónico generado cuando el inversor opera solo. El 3º armónico, a 48 kHz, que es el de mayor potencia dentro de la banda PRIME, aumenta 5 dB. Estas contribuciones adicionales están causadas por dispositivos cercanos y constituyen emisiones secundarias. Respecto a la influencia en

el SN del inversor FV1, éste permaneció conectado y su cobertura estable y sin variaciones.

Además, otra serie de medidas se llevó a cabo en las mismas condiciones pero para diferentes estados del cargador. La Figura 79 muestra el espectro obtenido a la entrada del SM del inversor FV1, donde se pueden ver emisiones secundarias (contribución a 24 kHz) por parte del cargador, que está instalado en una fase eléctrica distinta a la de FV1. Los niveles de cobertura del SN del inversor FV1 descendieron (desde niveles 5-6 a nivel 3), pero permaneció directamente conectado al BN sin necesidad de ningún *switch*.

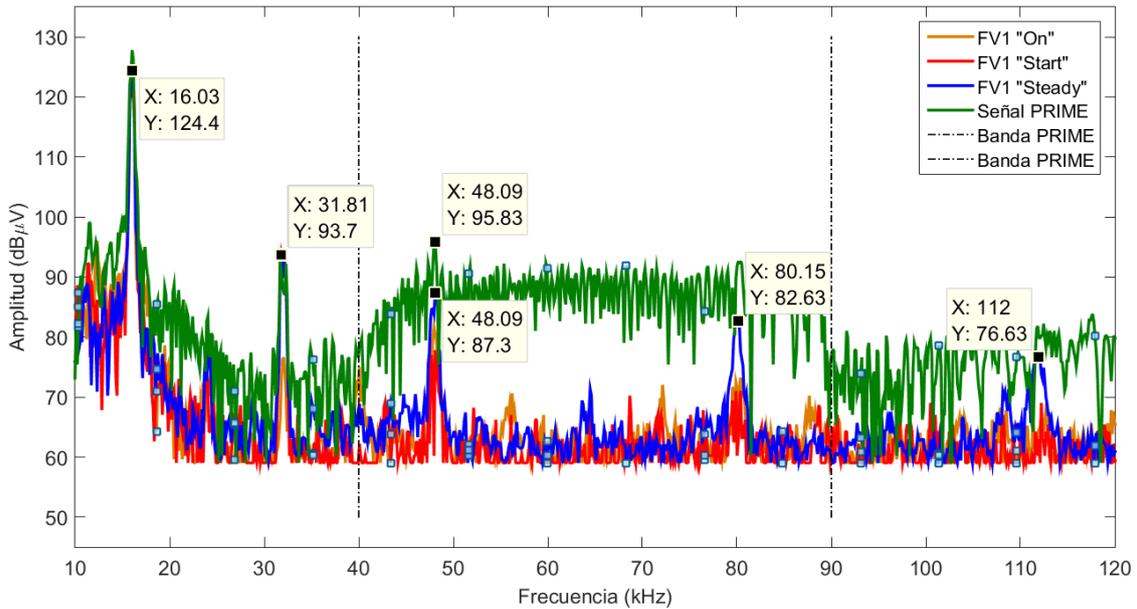


Figura 78. Espectro obtenido a la entrada del SM del inversor FV1 para diferentes estados de operación: *encendido* ("on"), *arranque* ("start") y *estable* ("steady") con el resto de inversores encendidos y el cargador apagado.

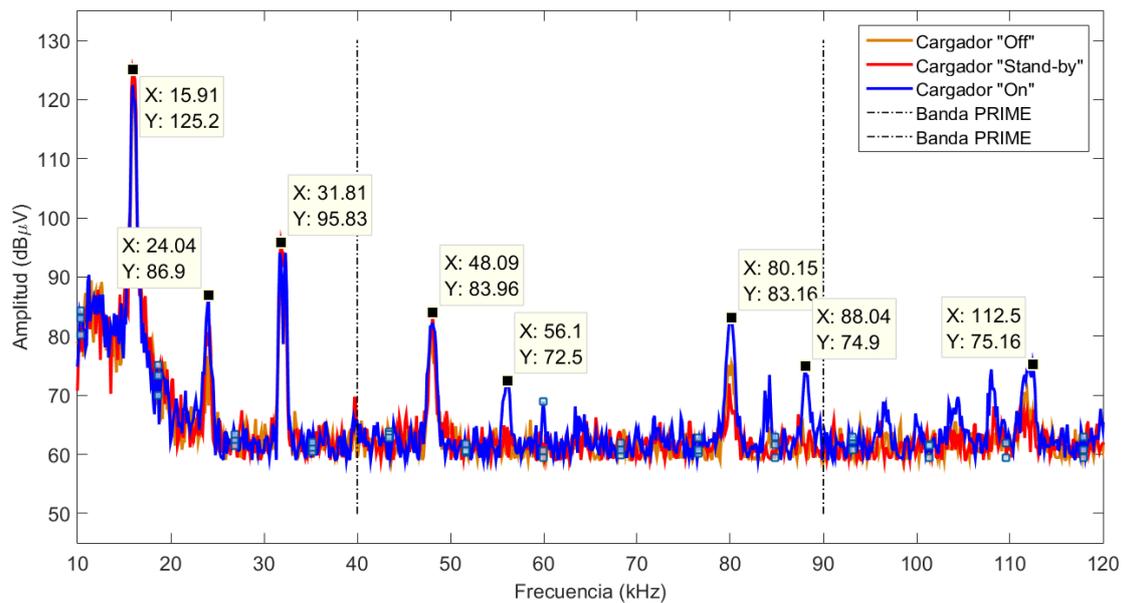


Figura 79. Espectro obtenido a la entrada del SM del inversor FV1 para diferentes estados de operación del cargador: *apagado* ("off"), *stand-by* y *encendido* ("on"), con el resto de inversores encendidos.

4.5.3.6. Inversor fotovoltaico FV2

El espectro obtenido a la entrada del SM del inversor FV2 con el resto de inversores funcionando y el cargador apagado puede verse en la Figura 80. Como ocurría con el espectro obtenido cuando sólo funcionaba el inversor FV2 (Figura 67), se puede apreciar una ligera diferencia entre los niveles de tensión de las emisiones durante las fases *arranque* y *estable*. El patrón del espectro es muy parecido en ambos escenarios y no se pueden apreciar contribuciones destacables por parte de algún dispositivo cercano en la Figura 80, que también incluye una señal PRIME registrada durante las medidas. A pesar de que la potencia del 3^{er} armónico de la inyección principal, que cae dentro de la banda de interés, está por encima de la señal PRIME registrada, el SN del inversor FV2 permaneció conectado y su cobertura no se vio afectada.

Tal y como ocurre en el caso de FV1, el espectro registrado a la entrada del SN del inversor FV2 para diferentes estados de funcionamiento del cargador (Figura 81) mostró emisiones secundarias significativas por parte del cargador de baterías que afectaron al SN del inversor FV2 en términos de cobertura (se registraron niveles 2 y 3) pero éste permaneció directamente conectado al BN durante todas las pruebas.

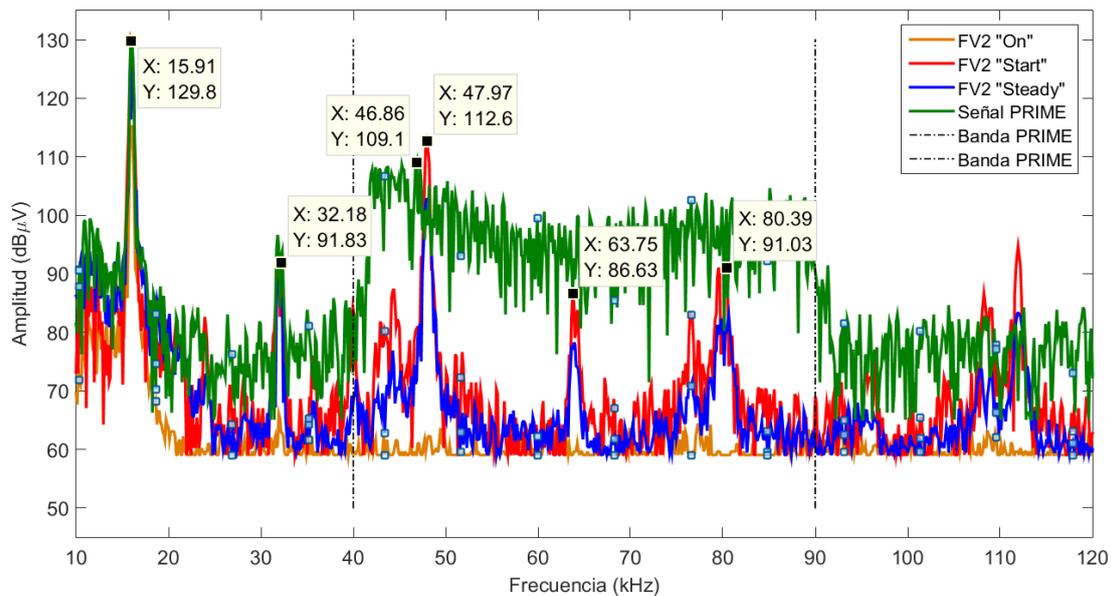


Figura 80. Espectro obtenido a la entrada del SM del inversor FV2 para diferentes estados de operación: *encendido* ("on"), *arranque* ("start") y *funcionamiento estable* ("steady") con el resto de inversores encendidos y el cargador apagado.

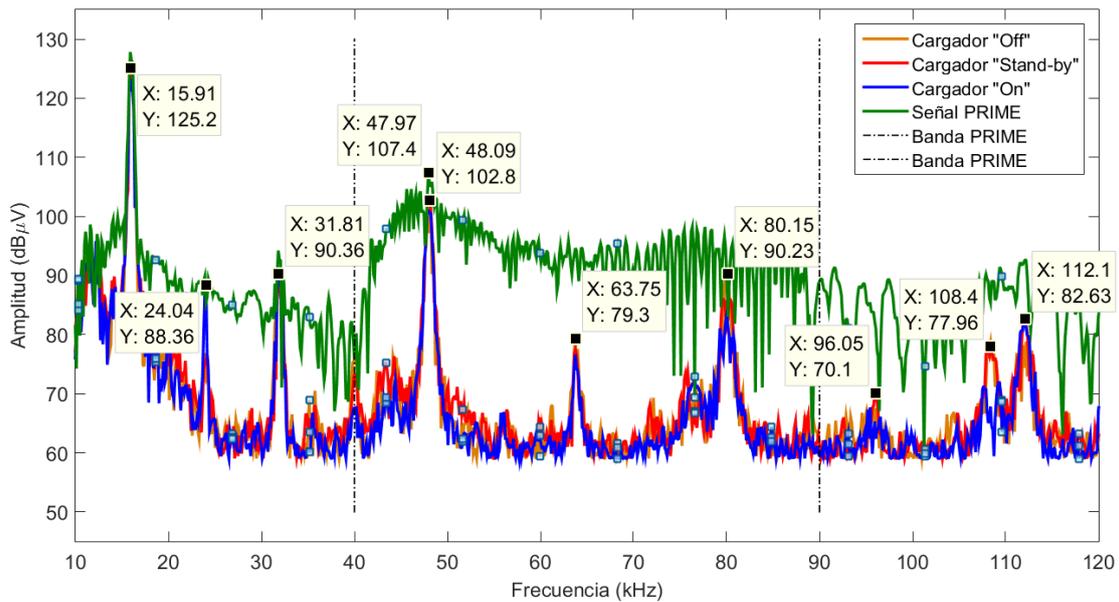


Figura 81. Espectro obtenido a la entrada del SM del inversor FV2 para diferentes estados de operación del cargador: *apagado* ("off"), *stand-by* y *encendido* ("on"), con el resto de inversores encendidos.

4.5.3.7. Inversor fotovoltaico FV3

Las emisiones del cargador afectan mucho al SN del inversor FV3 ya que están instalados en la misma fase eléctrica, tal y como se describe en el Capítulo 3. De hecho, las emisiones son lo suficientemente dañinas como para desconectar no sólo el SN del cargador sino también el SN asociado al inversor FV3 (ver Figura 75). La Figura 82 recoge el espectro obtenido a la entrada del SM del inversor FV3 con el resto de inversores funcionando y el cargador desconectado. El armónico a 48 kHz incrementa su potencia 10 dB con respecto a las emisiones registradas con sólo el inversor FV3 funcionando (Figura 68), lo que sugiere que los inversores FV1 y FV2 están contribuyendo a las emisiones reflejadas en la Figura 82. Además, los armónicos a 64 kHz y 80 kHz, que tampoco aparecían en la Figura 68, parecen ser generados por el inversor FV2 (ver Figura 67).

A continuación se realizó una nueva tanda de medidas en el mismo escenario, con los inversores FV1, FV2 y FV3 operando y para distintos regímenes de funcionamiento del cargador. El espectro recogido a la entrada del SM del inversor FV3, representado en la Figura 83, muestra claramente la contribución del cargador a 24 kHz, 48 kHz y 71 kHz (ver Figura 65), mientras que el resto de armónicos permanecen a niveles similares a los obtenidos en la Figura 82. Tal y como se esperaba, el SN del inversor FV3 se desconecta cuando el cargador se enciende. Estas mismas medidas se repitieron con los inversores FV1 y FV2 apagados y una vez más tanto el SN del inversor FV3 como el SN del cargador se desconectaron cuando el cargador se puso en funcionamiento.

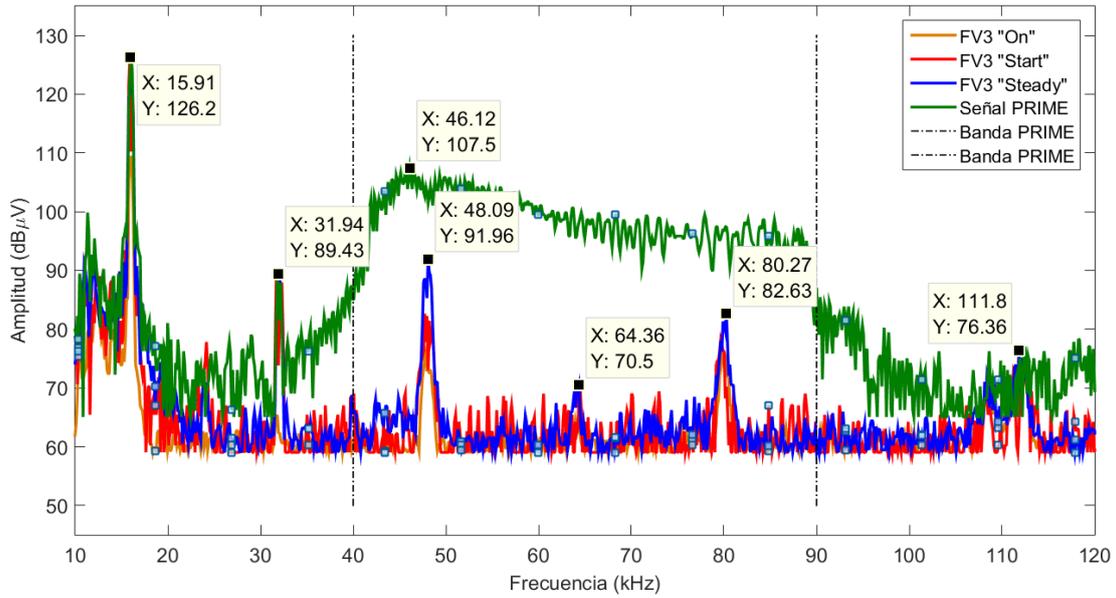


Figura 82. Espectro obtenido a la entrada del SM del inversor FV3 para diferentes estados de operación: *encendido* ("on"), *arranque* ("start") y *estable* ("steady") con el resto de inversores encendidos y el cargador apagado.

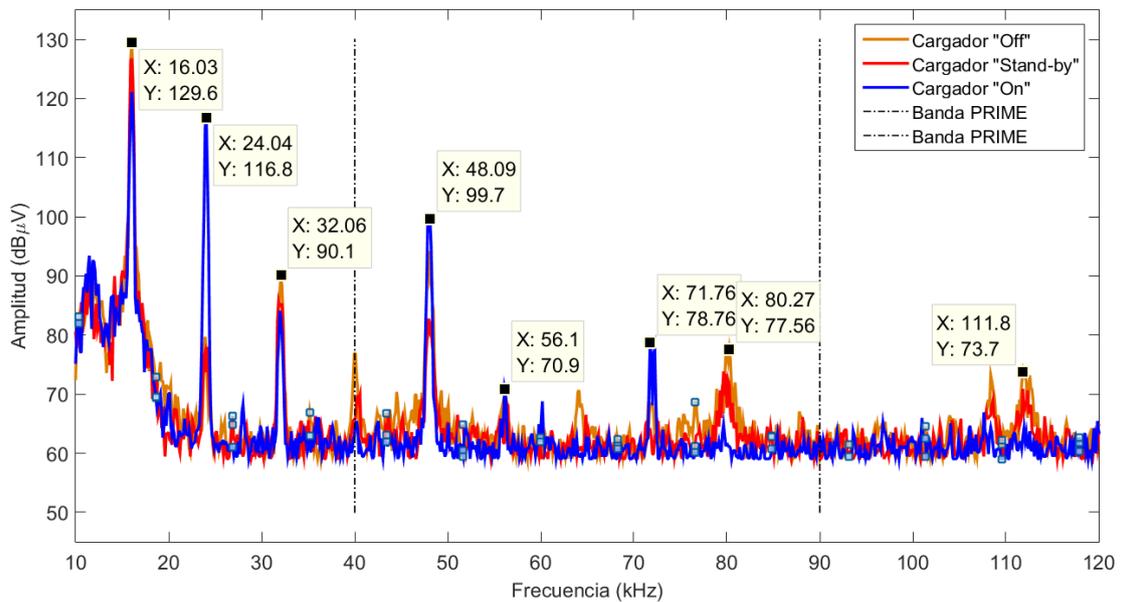


Figura 83. Espectro obtenido a la entrada del SM del inversor FV3 para diferentes estados de operación del cargador: *apagado* ("off"), *stand-by* y *encendido* ("on"), con el resto de inversores encendidos.

4.6. Comparativa con límites propuestos y medidas de mitigación

4.6.1. Comparativa con límites propuestos y normativa de los equipos

Tal y como se presenta en el apartado 4.1, de entre los límites de emisiones empleados en los estudios de los supraarmónicos, la norma EN 50065-1 es la que se ha venido tomando como referencia y además es la más restrictiva [148].

A modo indicativo, ya que no se ha seguido una metodología de medida estandarizada, y tomando como referencia la norma EN 50065-1, la Figura 84 localiza de forma aproximada las emisiones de los distintos recursos analizados, recogidos en la Tabla 15, en comparación con los límites de emisión definidos por EN 50065. En la gráfica de la Figura 84 se puede observar que la inyección primaria de todos los recursos analizados supera los límites de emisión.

Considerando las mayores inyecciones dentro del rango de operación de PRIME (40 – 90 kHz), que en el caso de los inversores FV y en el cargador son armónicos de la inyección principal, una vez más ocurre que en todos los casos, salvo en el de la turbina hidroeléctrica, las emisiones están por encima del nivel.

Respecto a la normativa que cumplen tanto los DERs como la tecnología PRIME implementada, tan sólo ésta última cumple con el estándar EN 50065. Los equipos hidroeléctricos (bomba y turbina) no incluyen referencias a normas relacionadas EMI/EMC. Los inversores FVs y el cargador cumplen con la normativa incluida en la Tabla 14. Ambas cumplen la Directiva 2004/108/EC, una norma europea regula la compatibilidad electromagnética de equipos electrónicos de forma muy genérica sin especificar las bandas de frecuencia. Los requisitos de esta directiva son muy básicos y no ofrece figuras ni guías de cómo deben ser los niveles de emisión o inmunidad requeridos ni especifica las bandas de frecuencia a las que afecta.

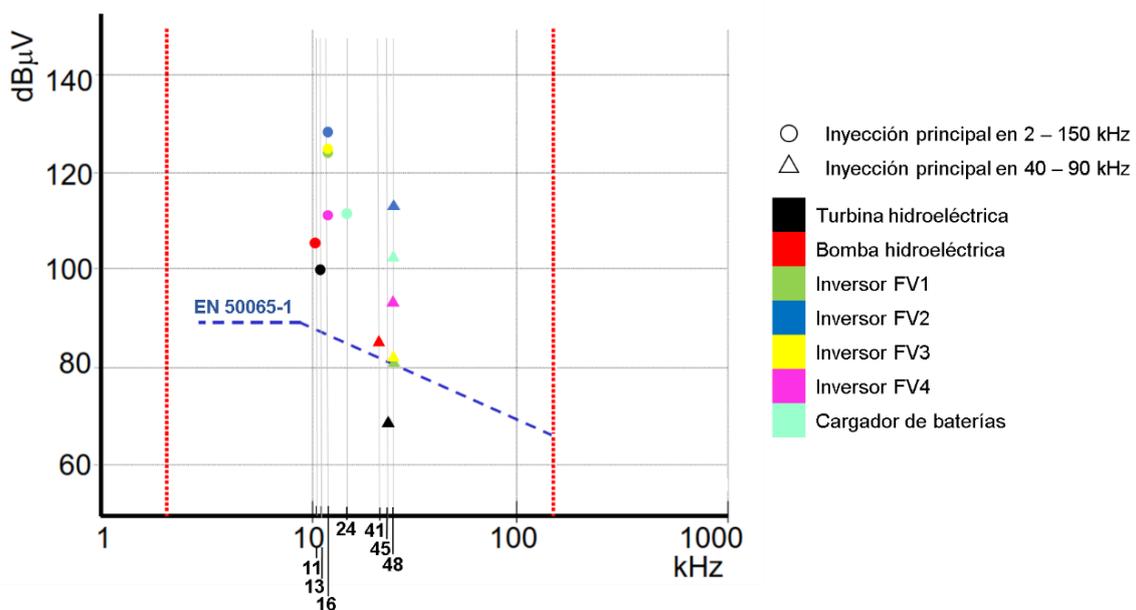


Figura 84. Localización aproximada de las emisiones supraarmónicas de los DER analizados de acuerdo a los límites de emisión fijados por EN 50065-1. Las líneas rojas delimitan el rango 2- 150 kHz.

| Espectro generado por cada DER aislado y efecto en PRIME | | | | | | | | |
|----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|------------|---------------------------------------|------------|----------|-----------------------------------------|----|
| Tipo de DER | Descripción | Máxima Inyección (10-120 kHz) | | Máxima Inyección en PRIME (40-90 kHz) | | | Efecto en PRIME (40-90 kHz) | |
| | | Amplitud | Frecuencia | Amplitud | Frecuencia | Armónico | Nivel de cobertura del SN y Desconexión | |
| Turbina Hidroeléctrica 60 kW, trifásica | Inyección principal a 13 kHz | 100.2 dBμV | 13 kHz | 70.63 dBμV | 45 kHz | - | Estable (4-5) | No |
| Bomba Hidroeléctrica 18 kW, trifásica | Ruido coloreado con niveles decrecientes de potencia | 106.7 dBμV | 11 kHz | 85.27 dBμV | 41 kHz | - | Estable (4) | No |
| Inversor FV1 5 kW, monofásico, 16 kHz | Inyección principal a la frecuencia de conmutación y dos armónicos destacables | 125 dBμV | 16 kHz | 81.58 dBμV | 48 kHz | 3º | Estable (5-6) | No |
| Inversor FV2 5 kW, monofásico, 16 kHz | Inyección principal a la frecuencia de conmutación y cuatro armónicos destacables | 130 dBμV | 16 kHz | 114.7 dBμV | 48 kHz | 3º | Estable (5-6) | No |
| Inversor FV3 5 kW, monofásico, 16 kHz | Inyección principal a la frecuencia de conmutación y dos armónicos destacables | 125.8 dBμV | 16 kHz | 82.55 dBμV | 48 kHz | 3º | Estable (5-6) | No |
| Inversor FV4 15 kW, trifásico, 16 kHz | Inyección principal a la frecuencia de conmutación y dos armónicos destacables | 117.1 dBμV | 16 kHz | 93.85 dBμV | 48 kHz | 3º | Inestable (3-5) | No |
| Cargador de Baterías 8 kW, monofásico | Inyección principal a 24 kHz y dos armónicos destacables | 117.7 dBμV | 24 kHz | 103.8 dBμV | 48 kHz | 2º | Altamente afectado | Sí |

Tabla 15. Resumen de los espectros generados por cada DER, amplitudes e influencia sobre PRIME en las medidas realizadas en el CEDER-CIEMAT.

Los inversores cumplen otros dos estándares; EN 61000-6-2 y EN 61000-6-4, que definen requisitos de inmunidad y emisiones, respectivamente, en el rango 0 Hz – 400 GHz. Se trata de un estándar genérico que se aplica cuando no existe otro estándar específico del equipo en cuestión o de equipos de la misma familia.

Por su lado, el cargador cumple además otros cinco estándares; EN 61000-6-1, EN 61000-6-3, EN 61000-3-2, EN 55014, EN 55022. En general se trata de estándares genéricos salvo el EN 55014, que define los requisitos de compatibilidad electromagnética y emisiones para equipos domésticos y herramientas eléctricas, pero en el rango 150 kHz – 30 MHz.

Por lo tanto, la normativa que incluyen estos dispositivos, que precisamente son los que más afcción tienen sobre PLC, es laxa en el rango 2-150 kHz.

La aplicación del estándar EN 50065 a equipos como los analizados podría solventar los daños sobre PLC. Sin embargo, los valores de amplitud no son lo único a tener en cuenta ya que, por ejemplo, las emisiones del inversor FV2 son superiores a las del cargador de baterías y en cambio la operativa del inversor no afecta significativamente a las comunicaciones, al contrario que el cargador. En este escenario, la aplicación del estándar EN 50065 no estaría injustificada.

En cualquier caso, es necesario considerar más factores a la hora de fijar límites y comparativas. La configuración de la red, la presencia de otros equipos e incluso la fabricación de los equipos son factores a tener en cuenta [152] Así mismo, es importante definir una metodología de medida. En definitiva, se trata de un problema complejo que pone de manifiesto la importancia de las medidas de campo.

4.6.2. Posibles medidas de mitigación

Ante estas situaciones se pueden plantear dos posibles medidas de mitigación:

La solución a corto plazo pasa por la acción local, actuando para cada caso particular. En este caso, se puede optar por filtros aisladores de ruido [126], o bien reubicar el dispositivo generador de ruidos [158]. Estas soluciones presentan como ventajas su relativa sencillez de implementación (especialmente en el caso de los filtros) y un menor coste global, pues esta acción se aplicará sólo en los casos en los que las emisiones produzcan una degradación en las comunicaciones. Sin embargo, esto requiere una detección y aislamiento del ruido. Es decir, en un entorno con múltiples dispositivos sin filtros incorporados y potenciales generadores de ruido, será necesario un trabajo de campo previo para identificar las fuentes de las emisiones; cuanto mayor sea el abanico de dispositivos, más compleja será la búsqueda, y en consecuencia, más costosa. Finalmente, en cualquiera de los casos habría que determinar quién asume el gasto del filtro, del desplazamiento del dispositivo o de la campaña de búsqueda, según el caso.

En segundo lugar, la solución óptima pasa por estandarizar y plantear normativas que describan los límites de las emisiones no deseadas en toda la banda de frecuencias. Tal como se presentó al principio de este capítulo, diversos grupos de estandarización están dedicando esfuerzos en este sentido.

En línea con estas dos posibles acciones, el grupo IEC SC 77A WG8 estructura el debate respecto a los límites de las emisiones y requisitos de inmunidad desde dos focos distintos: la estandarización de las mismas o una normativa más laxa en la que se actúe únicamente en caso de afección. Esto deriva en dos posturas respecto a las soluciones a aplicar: la primera, la limitación estricta de los dispositivos electrónicos independientemente de que se encuentren en un entorno PLC o no, por lo que el coste asociado lo tendrán que asumir los fabricantes; la segunda postura aboga por no restringir las emisiones y abordar cada caso de forma particular. Esto pone de manifiesto que la dificultad en la estandarización sobre emisiones a alta frecuencia no radica únicamente en el análisis detallado del problema (con medidas de campo y pruebas que evalúen la eficiencia de las medidas aplicadas), sino también en las posturas de los diferentes agentes implicados (fabricantes de dispositivos y operadores de red, fundamentalmente).

4.7. Conclusiones

4.7.1. Características de las emisiones no deseadas en la banda CENELEC-A

Las medidas realizadas para cada una de las fases de un inversor FV trifásico han puesto de manifiesto las diferencias de ruido que existen entre las fases:

- Por un lado, existen diferencias en las emisiones supraarmónicas. Si bien la inyección principal se mantiene en valores similares para las tres fases, el segundo y tercer armónico muestran diferencias en todos los escenarios, y siempre se trata de la misma fase, la fase T, mientras que las otras dos mantienen valores similares.

En el peor de los casos se registró una diferencia de 16.54 dB (2º armónico en la Figura 59). Las mayores variaciones de amplitud se han observado en los 2ºs armónicos, que están fuera de la banda PRIME. El tercer armónico, que sí está dentro de la banda de interés, registró una diferencia máxima de 13.74 dB (Figura 58). En este mismo escenario el 4º armónico muestra una reducción de 13.58 dB respecto a las otras dos fases. En el resto de casos los valores del 4º armónico de la inyección principal se encuentran en valores similares.

Atendiendo al funcionamiento del inversor, el estado *estable* es el más interesante desde el punto de vista del análisis del ruido ya que es el estado (junto con *off*) en el que previsiblemente más tiempo estará el inversor FV. Pese a que las mayores diferencias se observan en estado de *arranque*, todos los escenarios en estado *estable* muestran también reducciones notables, con la máxima diferencia registrada de 15.25 dB (2º armónico de la Figura 57).

Finalmente, ni las inyección principales, ni los armónicos de estas inyecciones, ni las diferencias entre los armónicos según la fase, se ven afectadas por la distancia.

- Por otro lado, también existen diferencias en cuanto al ruido de fondo según la fase, aunque de forma menos notable que la que existe entre los armónicos de la máxima inyección. Concretamente, sólo en las medidas a la salida del inversor (Figura 55 y Figura 56) se identificaron diferencias significativas, de hasta 10 dB entre la fase T y las otras dos fases.

En el ruido de fondo no se observan variaciones significativas ni con el estado del inversor ni con la distancia.

Estas diferencias entre fases pueden atribuirse a la electrónica del inversor y a las impedancias de las fases, dependientes a su vez de las cargas que estén conectadas.

Respecto a los espectros generados por diferentes DERs, la sección 4.5.2 recoge las gráficas con las emisiones de cada dispositivo de la microrred. En general, se pueden hacer dos grandes grupos:

- Inversores FV y cargador de baterías: se caracterizan por tener una inyección principal que coincide con la frecuencia de conmutación del equipo y una serie de armónicos, en general, de amplitud decreciente, salvo en el caso del inversor FV2 (Figura 67), cuya amplitud decreciente se aprecia más en los armónicos pares que en los impares. En todos los casos, las emisiones de los inversores se localizan en la banda PRIME a partir del 3^{er} armónico (Figura 64, Figura 66, Figura 67 y Figura 68), mientras que en el caso del cargador es a partir del 2^o armónico (Figura 65). Respecto a los estados de funcionamiento, en general la fase de *arranque* es ligeramente superior a la fase *estable* en los inversores. En el caso del cargador de baterías, su estado más significativo en cuanto a emisiones es el de *encendido*, ya que en reposo o *stand-by* los niveles de las emisiones están prácticamente al nivel del ruido de fondo.
- Las máquinas hidroeléctricas, bomba y turbina, se caracterizan por un ruido coloreado en toda el rango de medida y resultan ser los dispositivos que menos supraarmónicos introducen en la banda PRIME. En cambio, en estos dispositivos sí que se aprecia una mayor diferencia según el estado de funcionamiento. Las emisiones de la turbina son superiores en el estado de *arranque* a las del estado *estable* hasta los 41 kHz, frecuencia a partir de la cual en ambos casos los niveles se igualan a los del ruido de fondo. En el caso de la bomba, en el estado de *arranque* los niveles de las emisiones están significativamente por encima del ruido de fondo, hasta los 40 kHz. A partir de esa frecuencia su nivel se reduce hasta los del ruido de fondo. En el estado *estable*, las emisiones se mantienen a los niveles del ruido de fondo para todo el rango de frecuencias considerado. En cualquier caso, estos niveles de mayor amplitud, detectados en la fase de *arranque* tanto para la bomba como para la turbina, están fuera de la banda PRIME. Además, precisamente por ser el estado de *arranque*, los dispositivos están en esta fase durante un espacio de tiempo muy breve.

Finalmente, la sección 4.5.3 recopila las medidas realizadas para cada uno de los dispositivos anteriores en el contexto real de la microrred, es decir, con el resto de

recursos funcionando normalmente. Estas medidas ponen de manifiesto la importancia de estudiar las emisiones en un entorno real en su conjunto y también la influencia de dispositivos cercanos en cada uno de los SMS, debido a la generación de emisiones secundarias. En concreto se han detectado tres escenarios en torno a las emisiones secundarias:

- Presencia de emisiones en una red trifásica procedentes de un dispositivo vecino: se ha detectado en el caso de la turbina, cuyo espectro muestra emisiones del inversor FV4 (Figura 70). También se observa en el espectro de FV4 debido a las emisiones de la bomba (Figura 73).
- Presencia de emisiones en una red monofásica procedentes de un dispositivo vecino localizado en otra fase eléctrica: el espectro del cargador muestra emisiones procedentes de los inversores FV vecinos (Figura 74). Esta situación también se observa en FV2 (Figura 80) y en FV3 (Figura 82). Además, estas emisiones también pueden añadirse a las del dispositivo bajo análisis, como ocurre con el inversor FV1, donde las amplitudes de sus armónicos puede aumentan debido a las emisiones secundarias de los inversores vecinos (Figura 78)
- Descenso de los niveles de los supraarmónicos de un equipo en presencia de otros DERs vecinos, como ocurre en el escenario del inversor FV4 (Figura 73). Las amplitudes de las emisiones del inversor FV4 descienden ligeramente en presencia de otros equipos vecinos funcionando.

4.7.2. Influencia en las comunicaciones PRIME

A la hora de analizar los supraarmónicos, no sólo es importante caracterizar los espectros, sino también evaluar su influencia en las comunicaciones, tal y como recoge Tabla 15 de forma sintética.

Además, se han identificado diferentes tipos de afecciones del ruido sobre las comunicaciones, no sólo a causa de la emisión primaria de los dispositivos, sino también por las emisiones secundarias. Aunque los tipos de afecciones identificadas son similares en ambos casos, a continuación se identifican los escenarios para cada tipo de emisión. Por un lado, en cuanto a emisiones primarias, se han detectado los siguientes casos:

- Reducción de la cobertura de los SNs, esta situación ocurre en el caso del inversor FV4 (Figura 64), cuyo funcionamiento aislado reduce la cobertura de su SN asociado.
- Cancelación de las comunicaciones de un nodo, situación que ocurre con el cargador de baterías, cuyas emisiones bloquean a su SN asociado. Además, tal y como se detalló en el análisis MAC, a pesar de todas las tramas *Promotion Needed* enviadas por parte del SN del cargador y del SN del inversor FV3, no hubo cambios en la subred capaces de permitir que se volvieran a conectar mientras el cargador estuviera operando. Por lo tanto, permanecen inaccesibles hasta que el cargador se vuelva a apagar.

Por otro lado, en cuanto a las emisiones secundarias, este fenómeno no sólo se demuestra en los espectros sino también en el estudio de su influencia sobre las comunicaciones. En escenarios con emisiones secundarias puede ocurrir:

- Reducción de la cobertura de los nodos, tal y como ocurre con el SN del inversor FV1 (sección 4.5.3.5), el SN del FV2 (sección 4.5.3.6). Las emisiones que provocan esta afección en la cobertura proceden de equipos instalados en fases eléctricas distintas a la que están conectados los inversores FV1 y FV2, respectivamente.
- Cancelación de las comunicaciones de un nodo, tal y como sucede con el SN del inversor FV3 (Figura 75), cuyo estado pasa a *desconectado* cuando el cargador de baterías, localizado en su misma fase eléctrica, está encendido.
- Reconfiguración de la topología de la subred, tal y como ocurre con el SN de la bomba, que cambia de *switch* debido al ruido presente (Figura 72).

En vista de lo anterior, se pueden dar los siguientes escenarios:

- Pese a que una emisión no sea lo suficientemente dañina como para impedir la comunicación de un SN, puede causar cambios en la topología que den lugar al aislamiento de SNs. Además, la inhabilitación de un SN que estuviera actuando como *switch* puede provocar que todos los nodos que dependen de él queden también bloqueados. Aplicado al caso práctico de la microrred del CEDER-CIEMAT, si el SN del inversor FV3 o el SN del cargador actuaran como *switch* de otros SNs que sólo pudieran comunicarse a través de ellos, su bloqueo (al entrar en funcionamiento el cargador) provocaría que el resto de nodos dependientes de ellos también quedarán inhabilitados. Esto es especialmente importante en instalaciones con un número elevado de DERs, ya que su acción conjunta puede cancelar las comunicaciones de múltiples SNs.
- La influencia del ruido en las comunicaciones va más allá de cambios en la topología de la subred, en la cobertura o en el bloqueo de SNs, ya que también afecta al tráfico de medida. En primer lugar, el ruido puede corromper las tramas de datos o impedir su llegada al destino. En cualquier caso, será necesaria una retransmisión de esas tramas. En segundo lugar, el incremento del tráfico en el canal (ya sea por cambios en la topología de la subred, por retransmisiones o ambos) influye en la operativa global de la subred dado que el ancho de banda disponible se ve reducido. Una consecuencia directa del incremento del tráfico es el aumento de colisiones de paquetes, que a su vez se traduce en más tramas perdidas y más retransmisiones. Si el tráfico perdido no fuera de vital importancia, su retransmisión puede solventar el problema. Sin embargo, si se tratara de tráfico de control, su pérdida podría causar inestabilidades en la microrred.

Algunas de las funcionalidades más importantes de las microrredes son la monitorización y el control. Por lo tanto, las emisiones que afecten a las comunicaciones también pueden afectar a las acciones que desempeñen dichas

comunicaciones, como el acceso a un SN específico o la información proporcionada por éste.

Finalmente, atendiendo a las señales PRIME registradas en las diferentes sesiones, se puede observar cómo la calidad de las mismas varía. Considerando los escenarios con la mayor inyección supraarmónica en la banda PRIME: FV4 (Figura 64), cargador (Figura 65) y FV2 (Figura 67), ocurre que en el caso de la mayor inyección supraarmónica, FV2, la señal PRIME detectada es de buena calidad. Además, en este escenario no se detectaron efectos en las comunicaciones. Sin embargo, no ocurre lo mismo con FV4 y el cargador, cuyas inyecciones supraarmónicas son inferiores a la que genera FV2. A pesar de ello, las señales PRIME detectadas en el escenario de FV4 y del cargador son de una calidad inferior a la del escenario de FV2 y precisamente los escenarios de FV4 y del cargador son los que han registrado influencia en PRIME.

Por lo tanto, el análisis de la afección en las comunicaciones no debe basarse únicamente en la amplitud de las emisiones, sino que existen otros factores del canal de propagación (por ejemplo; impedancias de la red, degradación de la señal) que influyen en el estudio. Este hecho refleja la complejidad que entraña el análisis de las emisiones supraarmónicas y su influencia en las comunicaciones y pone en valor la realización de medidas empíricas.

5. GESTIÓN DISTRIBUIDA MEDIANTE PRIME

5.1. Introducción

Incorporar aplicaciones relacionadas con la gestión de la red y de sus diferentes recursos es el siguiente paso natural hacia un mejor control de una red eléctrica, además de estar en línea con las funcionalidades que se esperan de la futura SG [159]. Para abordar estas nuevas aplicaciones, una opción es aprovechar la infraestructura de comunicaciones ya desplegada inicialmente con otros fines. En el caso de PLC, los despliegues AMI han sentado las bases para ampliar su uso a otras aplicaciones de la SG más allá de la medida y que están relacionadas con el estado de la red, el control de diferentes recursos y el lado de la demanda, entre otras [55], [160].

De las características que posee PLC, a continuación se recogen algunas especialmente válidas para la gestión de SGs y microrredes [161].

- Amplia cobertura, debido al tendido eléctrico existente;
- Bajo coste, ya que no es necesario el despliegue adicional de un medio de transmisión;
- Fácil instalación;
- Estabilidad, puesto que el tendido eléctrico, salvo excepciones, no se va a eliminar.

Por otro lado, los mayores inconvenientes son:

- Características del canal: el cable eléctrico no ha sido diseñado para la correcta transmisión de señales de comunicaciones, por lo que presenta problemas relacionados con emisiones de dispositivos conectados a la red, así como atenuaciones y distorsiones en la propagación de la señal de comunicaciones;
- Capacidad: las prestaciones de tasa binaria y eficiencia espectral que ofrece PLC son inferiores a las de otras tecnologías;
- Desconexiones y circuitos abiertos: en el momento que exista un corte en la red eléctrica también lo habrá en las comunicaciones;
- Seguridad: los cables eléctricos no incluyen las protecciones a nivel de comunicaciones que tienen otras tecnologías, por lo que pueden surgir problemas de seguridad.

5.2. Estado del arte

En la literatura se pueden encontrar diversos trabajos que abordan el uso de PLC en aplicaciones orientadas a la gestión de la red eléctrica. A principios de los años 90 algunos estudios ya apuntaban a PLC como habilitador no sólo del sistema AMR y del posterior AMI, sino también de aplicaciones de control de la red [162]. Más adelante, el prepago y el control de la carga serían también identificados como aplicaciones adicionales de PLC [163]. En [55], [164], [165] se recogen ejemplos de aplicaciones para detección de fallos, control de tensión y potencia reactiva, señalización de emergencia, sistemas de seguridad y mantenimiento en general, así como

aplicaciones de control remoto. También se han propuesto combinaciones de PLC con otras herramientas para abarcar más aspectos de control: como por ejemplo con un sistema SCADA [166] y con un arquitectura multiagentes [167]. Ambos casos permiten detectar fallos en la sección MV.

El hecho de que muchos de estos trabajos se centren en la sección MV del sistema eléctrico no es casualidad. Además de que históricamente las secciones MV y HV han venido incorporando más sistemas de telecontrol que la sección LV (principalmente porque contaban con una infraestructura de comunicaciones y porque se consideraban las partes más críticas de la red), ocurre que en la sección MV se encuentran aplicaciones muy prometedoras de PLC para las SGs, como la detección de fallos y su gestión y de equipos en remoto [168], [169], [170]. Sin embargo, con el auge de los despliegues AMI, la sección LV se ve dotada de un sistema de comunicaciones. Este escenario abre una nueva vía para la gestión de las SGs y aplicaciones derivadas en LV, donde el SM, más allá de un contador digital, pasa a ser un habilitador de nuevas aplicaciones

Existen diversos proyectos que han aprovechado el auge de PLC en la sección LV. Por ejemplo, en los proyectos PRICE, Grid4EU, Sustainable, Smart City Málaga y Discern utilizan sistemas AMI basados en PRIME y G3-PLC para la optimización y gestión de la red [20], [25], [171], [172], [173]. Siguiendo una filosofía similar, pero integrando además DG se encuentran los proyectos Smart Grid Vendee y Nice Grid, ambos haciendo uso de G3-PLC [174] [175]. Sin embargo, todos estos proyectos se caracterizan por emplear PLC únicamente para las aplicaciones AMI.

En este sentido, en [176] se demuestra mediante simulaciones que los despliegues NB-PLC existentes (en concreto, los basados en PRIME) cuentan con capacidad extra en el canal para aplicaciones más allá del AMI. Una de las funcionalidades que más rápidamente puede venir a la mente para aprovechar esos recursos adicionales del canal es la implementación de comunicaciones basadas en IP. Aunque aún no hay un consenso claro al respecto, parece que el soporte de IP podría garantizar la interoperabilidad entre diferentes tecnologías, clave para el éxito de las SGs, así como la inclusión de aplicaciones ya existentes pero basadas en IP [160] [177]. Entre las grandes ventajas que han fomentado la amplia difusión de la tecnología IP destacan su fiabilidad, sencillez, seguridad, robustez y el ser un estándar abierto. De hecho, IP está siendo cada vez más empleado en aplicaciones de supervisión y control en el sector energético, tales como la gestión de la demanda, el control de la generación distribuida y la integración del consumidor [178]. Como se apunta en [177], IP ha de ser implementado hasta en el último nodo de la red para que se convierta realmente en el protocolo de referencia. Por ello, llegar a la red LV es fundamental.

En esta línea se desarrolla el proyecto UPGRID [179], cuyo objetivo es desarrollar y validar soluciones que permitan la implementación de funciones avanzadas sobre PLC para formar un sistema integrado, con la idea de mejorar la monitorización y el control, tanto de la sección MV como de la LV. Para ello, se busca que los valores de medida, los históricos de consumo y los voltajes obtenidos por los SMs sean enviados vía PRIME al gestor central, que implementa un sistema SCADA, con el objetivo de detectar fallos en la red y planificar las correspondientes intervenciones. Las primeras pruebas en laboratorio consistieron en una subred con un BN, un DC y seis SMs que

generaban tráfico de medida en la que se incluyeron dos SNs directamente conectados al BN (sin repetición) que contaban con capacidades IP [180].

Continuando con este enfoque, el presente trabajo pretende comprobar de forma experimental el rendimiento de IP sobre NB-PLC en una microrred real, ya que es la forma de demostrar que el canal adicional existente en PLC puede incorporar funcionalidades basadas en IP, más allá del AMI. Además, este trabajo busca profundizar en los parámetros y configuraciones que permitan maximizar dicha implementación, nuevamente de forma empírica y en un entorno real.

5.3. Objetivos

Siguiendo en la línea del estudio de la capacidad de despliegues AMI basados en PRIME para aplicaciones más allá de la medida avanzada, los objetivos específicos de este capítulo se centran en:

- Cuantificar y describir la ocupación de canal en PRIME en diferentes escenarios de tráfico de medida existente en el canal de comunicaciones;
- Obtener la latencia de la comunicación entre nodos con capacidades IP sobre PRIME, en diferentes configuraciones y bajo varios escenarios de tráfico de medida en el canal;
- Validar los resultados obtenidos en pruebas de laboratorio referentes a la tasa de bits de IP sobre PRIME en un entorno real controlado (la microrred del CEDER-CIEMAT);
- Extender el análisis de tasa de bits en diferentes escenarios: tipo de comunicación, tipo de tráfico de medida en el canal, número de nodos, configuraciones IP y tipo de protocolo (TCP/UDP);
- Identificar los parámetros que delimitan la tasa de bits y proponer mejoras al respecto;
- Analizar la viabilidad de un sistema de gestión de una microrred mediante un sistema AMI basado en PLC con funcionalidades añadidas vía IP.

5.4. Metodología de medida

Para comprobar de forma empírica las capacidades de PRIME para aplicaciones basadas en IP más allá del AMI en un entorno real y controlado, se escogió el CT PEPA-III de la microrred del CEDER-CIEMAT, en condiciones habituales de funcionamiento, por contar con un amplio número de nodos y por la flexibilidad que permite en la configuración.

A continuación se describe en detalle la metodología de medida, comenzando por la definición de las medidas en cuanto a parámetros y variables, así como el equipamiento empleado. Finalmente, se incluye un resumen de las medidas consideradas.

5.4.1. Definición de las medidas

En este apartado se explican las medidas llevadas a cabo en la microrred del CEDER, así como los parámetros que se evaluarán con las medidas y las variables de las mismas.

5.4.1.1. Parámetros a evaluar

Las cualidades de PRIME para la gestión de aplicaciones basadas en IP se van a definir a través de los siguientes parámetros:

- **Latencia:** especifica el tiempo que le lleva a un paquete de datos ir de un punto a otro de la red;
- **Tasa de bits:** es el número de bits que se transmiten por unidad de tiempo a través de un sistema de transmisión o máxima velocidad de transferencia;
- **Porcentaje de datagramas perdidos:** puesto que en UDP los paquetes no se retransmiten en caso de que no lleguen al destino, este parámetro permite evaluar el comportamiento de UDP como complemento al resultado de la tasa de bits;
- **Jitter:** es la variación en el tiempo en la llegada de los paquetes (latencia), causada por congestión de red, pérdida de sincronización o por las diferentes rutas seguidas por los paquetes para llegar al destino. Este parámetro se presenta para UDP.

5.4.1.2. Variables de análisis

Las variables escogidas para el análisis se han tenido en cuenta considerando su influencia en el sistema de comunicaciones de una microrred o SG. En base a esto, se consideró:

- **Tipo de comunicación:** es la forma en la que los nodos de una subred PRIME se comunican entre ellos. Se consideraron dos posibles casos:
 - Comunicación entre BN y SN: es la comunicación que existe entre el BN y un SN conectado a su subred (en una misma rama dentro de la sección LV).
 - Comunicación entre dos SNs: además de con el BN, un SN puede comunicarse con otro SN. Sin embargo, dado que el BN hace las veces de gestor de la subred, todo el tráfico pasa por él. Esto implica que, pese a que jerárquicamente dos SNs estén directamente conectados entre sí, el tráfico que se intercambien entre ellos necesariamente ha de pasar por el BN.
- **Niveles de repetición:** tal y como se describe en el Capítulo 2, los nodos que no sean capaces de conectarse directamente al BN lo harán a través de un nodo vecino en estado *switch* que hace las veces de repetidor. Los nodos que estén directamente conectados al BN serán de nivel 0, mientras que si necesitan repetidores serán de niveles distintos a cero, siendo el valor del nivel el número de repetidores que existen entre el BN y el nodo. Por ejemplo, un nodo de nivel 2 o con dos niveles de repetición implica que

emplea dos repetidores para llegar al BN. Como nomenclatura en este trabajo, se emplea el valor del nivel entre paréntesis, SN(2), para indicar los niveles de *switching* en el que se encuentra un nodo en concreto.

- **Tipo de tráfico:** el tráfico que fluye por el sistema se puede clasificar según los datos que contenga. Se consideraron tres tipos de tráfico diferente en la red con el objetivo de analizar las capacidades del canal en diferentes situaciones. Además, las aplicaciones que puedan surgir de la implementación IP han de ser compatibles con las tareas de medida.
 - Tráfico de control PRIME: este tipo de tráfico es el que se genera de forma automática para el mantenimiento y operativa de la subred, y se compone principalmente de datos de señalización e información topológica. Es un tráfico siempre presente en la subred. Esta situación se dará en aquellos momentos en los que no exista ningún tráfico de medida adicional.
 - Datos de medida instantáneos: se trata de peticiones configuradas en el DC, que a su vez interroga cada minuto a todos los SMs de su subred sobre los datos de medida instantáneos, ya sean de consumo o de generación. Este tráfico se añade al tráfico de control de la subred. En términos de ocupación de canal, implica intervalos con una ocupación de canal elevada (coincidiendo con las peticiones simultáneas) seguido de periodos sin peticiones. Esta situación se dará en los momentos en los que el gestor central solicite información instantánea de todos los SMs con fines operativos, para almacenarlos en la base de datos o bien para alimentar alguna aplicación complementaria, tales como redes neuronales.
 - Perfiles de valores temporales: estas peticiones también se originan en el DC, quien interroga a un SM concreto sobre sus datos de medida almacenados entre una fecha inicio y una fecha fin vía servicio web, tal y como se puede ver en la Figura 85. Como ocurre con el tráfico instantáneo, se le suma también el tráfico de control. En las pruebas realizadas, el rango temporal se escogió lo suficientemente amplio como para que el canal estuviera ocupado con este tráfico de medida durante toda la sesión y se volvió a lanzar la petición en caso de que ésta se completara antes que la sesión, con el objetivo de establecer un escenario en el que los datos IP tuvieran que convivir durante toda la transmisión con tráfico adicional en el canal. Los perfiles se solicitaron a un SM localizado en el mismo nivel jerárquico que el SN analizado, y en caso de que no hubiera un SM al que interrogar al mismo nivel que el SN, se interrogó al SM más próximo en nivel jerárquico. En los SMs de las medidas, los perfiles devuelven valores de consumo cinco-minutal.

Figura 85. Petición de perfil temporal al SM con número de serie ZIV0038301037 vía servicio web, especificando fecha inicio, fecha fin y fuente (SM).

- **Número de nodos:** es la cantidad de nodos de comunicaciones existentes en la subred analizada. Se establecieron cuatro escenarios diferentes, atendiendo a la disposición de equipamiento: 9, 13, 17 y 21 nodos. La localización de los nodos se aborda en la sección 5.4.2.
- **Protocolo de comunicaciones:** se han considerado los dos protocolos de transporte más importantes en IP y en todos los casos utilizando transmisiones de 100 kB.
 - TCP: el más extendido, orientado a la conexión y, además de ofrecer comprobación de la entrega de datos, es flexible en la configuración de sus parámetros. En el estudio se han considerado los parámetros que más influyen en el rendimiento de TCP: el segmento y la ventana.
 - El segmento fija el tamaño máximo de datos que el receptor puede recibir en un único segmento TCP, por lo que el tamaño óptimo de segmento será el más grande posible, sin que ello implique fragmentación de los datagramas. Para los tamaños de segmento se consideraron los tamaños de 536 B, 1220 B (valor por defecto) y 1440 B al ser éstos los valores recomendados de acuerdo a las especificaciones de IPv4 e IPv6 [181] [182]. Valores más pequeños implicarían una elevada proporción ente cabeceras y datos, lo que originaría un uso ineficiente del ancho de banda disponible, mientras que tamaños mayores harían que, en caso de colisiones (algo frecuente en canales con alto nivel de ocupación), fuera necesario retransmitir un mayor número de bytes.
 - La ventana especifica el tamaño del *buffer* del receptor, por lo que representa la cantidad de datos enviados por el transmisor que el receptor puede gestionar antes de continuar con su tarea. El tamaño de ventana idóneo es aquel en el que el transmisor pueda enviar datos tan rápido como el receptor sea capaz de gestionar. Para las medidas se eligieron tamaños de ventana que tuvieran relación con los del segmento, resultando en 4 kB, 8 kB (valor por defecto), 16 kB y 32 kB para el segmento de 536 B, y 8 kB, 16 kB y 32 kB para los segmentos de 1220 B y 1440 B. El tamaño de ventana más pequeño (4 kB) no se ha considerado para los tamaños de segmento mayores ya que esto implica que cada

relativamente pocos datagramas recibidos se ha de enviar la confirmación de recepción, por lo que el cliente estará ocioso durante más tiempo.

- UDP: no está orientado a la conexión, lo que reduce el número de recursos destinados al establecimiento de la conexión.

5.4.2. Equipamiento para las medidas

Este apartado describe el equipamiento necesario así como la configuración empleada para medir las posibilidades de IP sobre PRIME, ambos recogidos en el esquema de la Figura 86 y Figura 87.

En cuanto a equipos, se emplearon los siguientes:

- Nodo de comunicaciones portátil o PBN: tal y como se describió en el Capítulo 4, este equipo puede hacer las veces tanto de *sniffer* como de nodo de comunicaciones. Para estas medidas se empleó la segunda opción, además con capacidades IP, ya que implementa la subcapa IP-SSCS de PRIME. Se emplearon tres PBNs, tal y como se puede ver en la Figura 86 y Figura 87. Además, en la Figura 88 se muestra la topología equivalente a nivel de comunicaciones del conexionado, identificando los roles de cada uno de los nodos.
 - PBN-BN: uno de los PBNs se configuró como BN externo, por lo que es necesario deshabilitar esta opción en el DC Maestro, cuyo nodo embebido es el que normalmente hace las veces de BN. Entonces, el PBN-BN pasa a ser el gestor de la subred. El PBN-BN se mantiene en esta función para todas las medidas.
 - PBN-SNA y PBN-SNB: los otros dos PBNs se configuraron como nodos de servicio, SNs, pasando a denominarse SNA y SNB, respectivamente. Estos PBN-SNs se registrarán en la subred gobernada por el PBN-BN.
- SMs: todos los SMs del CT-PEPAIII forman parte activa de las medidas y más específicamente, sus nodos embebidos, ya que se registrarán en la red y serán los que generarán los tipos de tráfico detallados en el apartado 5.4.1.2. El CT-PEPAIII cuenta con 13 nodos en su configuración estándar: 10 nodos embebidos en los SMs, el nodo del DC esclavo, y los nodos de los dos PBNs configurados como SNs (PBN-SNA y PBN-SNB).

Para realizar medidas con diferente número de nodos, es posible desconectar un ramal con 4 SMs y también se cuentan con hasta 8 SMs auxiliares (denominados "SM-Test"), formando así configuraciones de 9, 17 y 21 nodos, haciendo un total de 4 configuraciones diferentes en lo que a número de nodos se refiere: 9, 13, 17 y 21 nodos.

Herramienta "Iperf": este programa es el encargado de generar el tráfico IP y de medir el rendimiento de la red [183]. Se trata de una herramienta muy útil para medir el rendimiento de una red, ya que permite obtener la tasa de bits de un sistema de comunicaciones de forma sencilla. Para ello, se ejecutó iperf en dos ordenadores que

a su vez se conectan a los PBNs vía Ethernet para introducir ese tráfico en la subred PRIME. En el escenario de la comunicación entre el BN y un SN, iperf se ejecuta conectado al PBN-BN y al PBN-SNB, respectivamente (Figura 86). Para el escenario de la comunicación entre dos SNs, iperf se ejecuta conectado al PBN-SNA y al PBN-SNB, respectivamente (Figura 87).

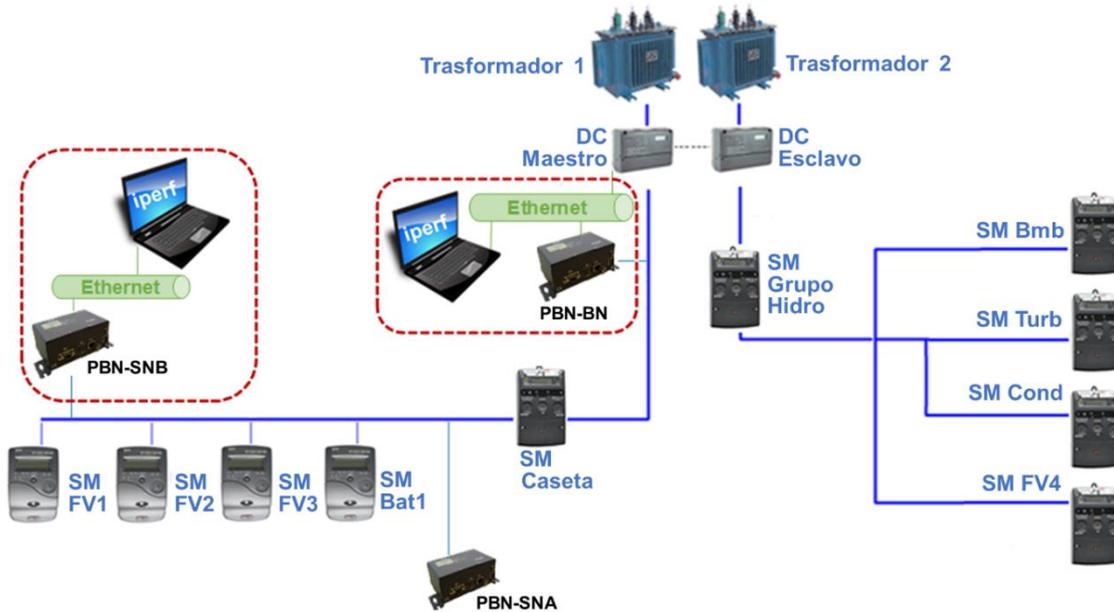


Figura 86. Esquema del despliegue de equipos para la medida de la capacidad del canal para la comunicación entre PBN-BN y PBN-SNB (áreas punteadas) en el CT-PEPAIII del CEDER-CIEMAT.

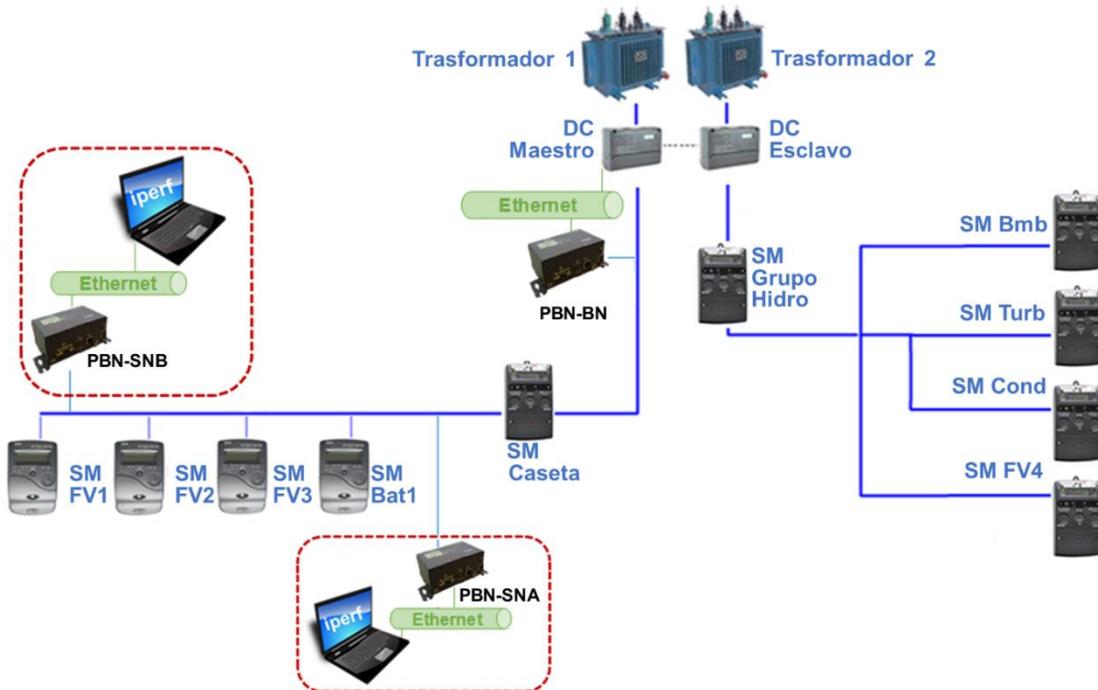


Figura 87. Esquema del despliegue de equipos para la medida de la capacidad del canal para la comunicación entre PBN-SNA y PBN-SNB (áreas punteadas) en el CT-PEPAIII del CEDER-CIEMAT.

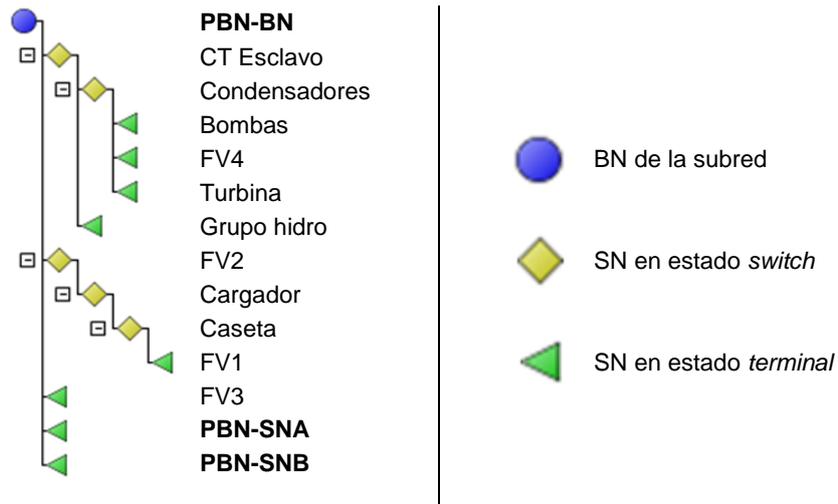


Figura 88. Ejemplo de topología a nivel de comunicaciones para los esquemas de la Figura 86 y Figura 87.

Los PBNs tienen dos direcciones IP: una dirección IP global de acceso universal al dispositivo y una segunda dirección IP local a nivel de la subred. La dirección IP global es la que se configura de cara al ordenador e *iperf*, mientras que la dirección local es la que utilizan los dispositivos para registrarse en el BN. El proceso de registro de los PBNs es similar al explicado en el Capítulo 2 y el intercambio de tramas puede verse además en [180]: los SNs embebidos en los PBNs inician automáticamente la petición de registro en el momento que se conectan, que se formalizará bajo la decisión del BN. Una vez se ha completado el proceso de registro, se abre una conexión (tipo 1) dependiente del perfil, que en ese caso será IP, que el BN utiliza para guardar en su base de datos las direcciones IP locales (además de las direcciones EUI-48). Para la transmisión de datos IP es necesaria una nueva conexión (tipo 2) que se ha de establecer entre el trasmisor y el receptor de dichos datos. La capa de convergencia IP (IP-CS) examina cada paquete IP para determinar la dirección de destino. Estas conexiones para el tráfico IP son diferentes de las empleadas en el envío de tráfico de medida, que son de tipo 3.

Finalmente, el tráfico IP se genera y se mide con *iperf*. Para ello, uno de los ordenadores permanece conectado a uno de los PBNs configurado como SN, y hace las veces de servidor (receptor de los datos), que en las medidas será el PBN-SNB, mientras que el otro ordenador varía entre el segundo PBN-SN (PBN-SNA para las medidas) y el PBN-BN, dependiendo del tipo de medida que se quiera realizar, y desempeña el papel de cliente, enviando los datos hacia el servidor. La Figura 89 muestra de forma sintética el conexionado entre los ordenadores ejecutando *iperf*, tanto en modo cliente como servidor, y los PBNs así como las comunicaciones en cada tramo. *Iperf* permite variar las configuraciones del tráfico IP enviado, permitiendo así una mayor flexibilidad. Los parámetros de configuración se introducen tanto en el lado del cliente como del servidor y en el caso de que no se definan, *iperf* usa el valor por defecto. Las Figura 90 y Figura 91 muestran, respectivamente, capturas del programa *iperf* en el lado del cliente y en el lado del servidor. En las capturas anteriores puede verse también el flujo de datos enviado y recibido y las tasas de bits obtenidas para cada intervalo así como la tasa de bits al final de la sesión.

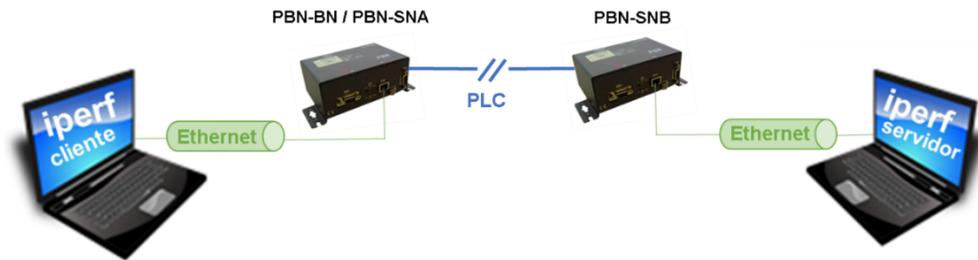


Figura 89. Esquema sintético del conexionado y comunicaciones existentes en las pruebas realizadas con iperf en el CT-PEPAIII del CEDER-CIEMAT.

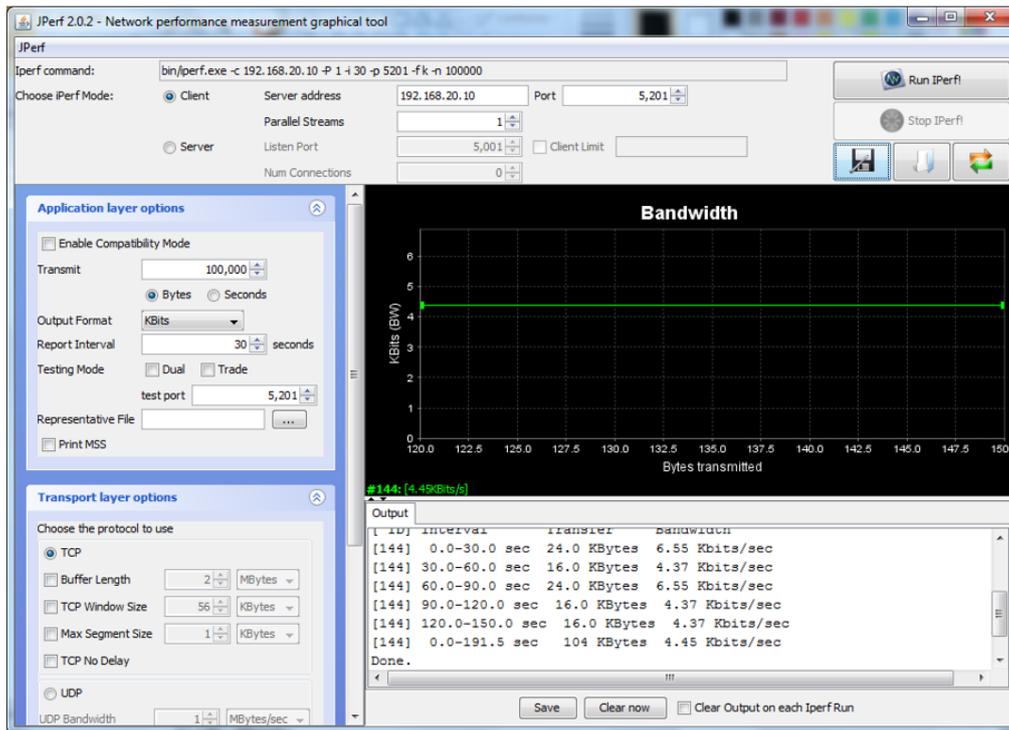


Figura 90. Captura del programa iperf en el lado del cliente.

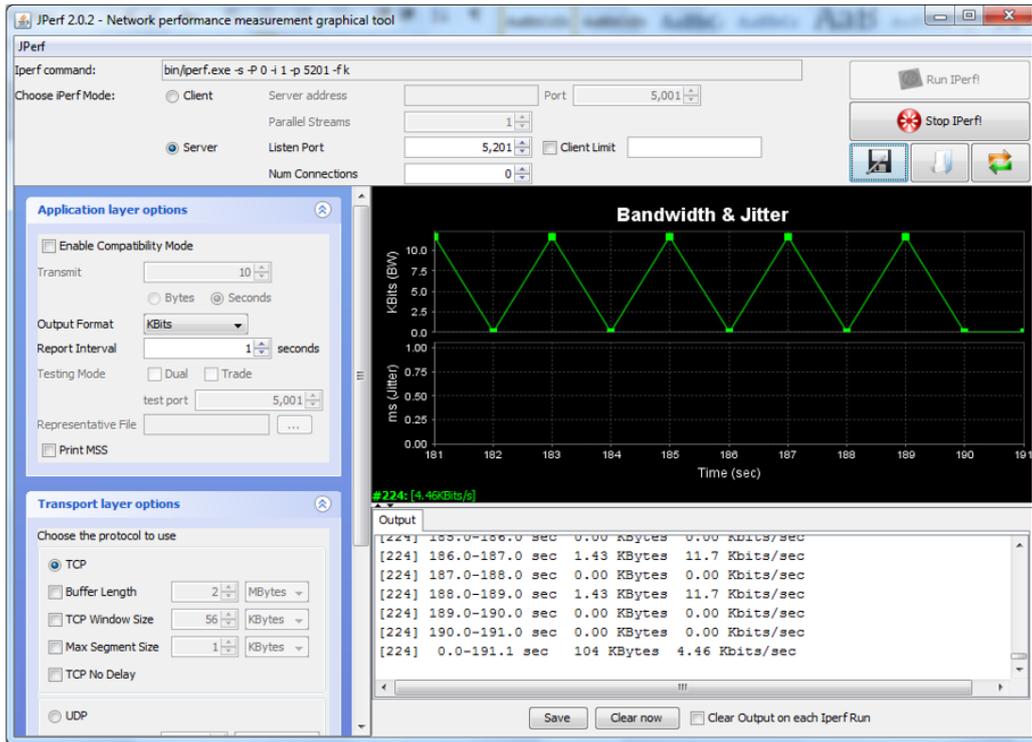


Figura 91. Captura del programa iperf en el lado del servidor.

5.4.3. Resumen de las medidas a realizar

La Tabla 16 recoge de forma resumida todas las configuraciones empleadas en las medidas en base a las variables descritas anteriormente. Los resultados que se presentan a continuación suponen una campaña con un total de 270 sesiones de medida junto con la creación de una herramienta ad-hoc que permite visualizar las tramas de datos en el tiempo.

| Configuraciones Empleadas | | | | | | | | | | | |
|-----------------------------------------|----------------------|--------------------------------------------------------------------------|------|---|----|----|------|----|------|---|----|
| Número de nodos en la subred | | 9, 13, 17, 21 | | | | | | | | | |
| Tipo de tráfico en la subred | | Control Control+ instantáneo Control+ perfiles | | | | | | | | | |
| Parámetros Iperf | TCP | Segmento [B] | 536 | | | | 1220 | | 1440 | | |
| | | Ventana [kB] | 4 | 8 | 16 | 32 | 8 | 16 | 32 | 8 | 16 |
| | UDP | Ancho de banda | 1 kB | | | | | | | | |
| Tipo de comunicación y switching | Entre BN y SN | BN - SNB(0) BN - SNB(1) BN - SNB(2) BN - SNB(3) | | | | | | | | | |
| | Entre SN y SN | SNA(0) - SNB(0) SNA(0) - SNB(1) SNA(0) - SNB(2) SNA(0) - SNB(3) | | | | | | | | | |

Tabla 16. Resumen de las diferentes configuraciones empleadas en las medidas para evaluar la capacidad de IP sobre PRIME en la microrred del CEDER-CIEMAT.

5.5. Resultados obtenidos

En este apartado se recogen los resultados de ocupación de canal, latencia y tasa de bits obtenidos con iperf, según las diferentes configuraciones consideradas, resumidas en la Tabla 16 y especificadas también en las tablas de resultados correspondientes.

Los resultados se han organizado según el siguiente esquema:

- En primer lugar, se presentan los resultados obtenidos sobre la ocupación de canal de las tramas y la latencia en las diferentes configuraciones; lo cual permite obtener una primera visión de las posibilidades que puede ofrecer PRIME para la transmisión de datos adicionales.
- Seguidamente, se muestran los valores obtenidos de la tasa de bits de datos IP que es posible transmitir, comenzando por los resultados obtenidos en las medidas en el CEDER-CIEMAT en comparación con los resultados de unas pruebas similares realizadas en laboratorio [180].
- A continuación, se aborda la influencia de diversos factores en la tasa de bits que se puede obtener mediante transmisión IP. Estos factores son: tipo de comunicación, nivel de repetición, tipo de tráfico y número de nodos.
- Un siguiente subapartado extiende el estudio a un mayor número de nodos, para evaluar la influencia del tráfico de datos de medida generado por un mayor número de nodos y los cambios en la topología en la tasa binaria disponible para tráfico IP.
- A continuación, se evalúa la influencia de los parámetros más relevantes de la configuración TCP, para compararlo después con el rendimiento de UDP. Esta parte del estudio permitirá conocer la influencia de estos parámetros, y en su caso, determinar los valores más adecuados de configuración.
- Finalmente, el análisis concluye con una extensión de los niveles de repetición, para analizar su influencia en el tráfico de datos IP.

5.5.1. Ocupación de canal

El nivel de ocupación de canal se ha calculado mediante un código desarrollado ad-hoc, a partir de la información de las tramas PRIME enviadas y recibidas en el BN, que son grabadas en cada sesión. Además, el código desarrollado representa la evolución temporal de dichas tramas, lo cual permite observar su variación con diferentes niveles de tráfico PRIME. Este cálculo resulta útil para ver la disposición de las tramas en el tiempo y para comprobar de forma empírica el espacio disponible en el canal para datos adicionales.

El nivel de disponibilidad del canal se ha calculado como el tiempo en el que no hay ninguna trama en el medio de transmisión respecto al tiempo de medida. La Tabla 17 recoge los resultados obtenidos, los cuales se clasifican según los tipos de tráfico existente en el canal descritos en el apartado 5.4.1.2:

- Tráfico de control PRIME: en la Figura 92 puede verse parte del flujo de tramas MAC que se generan con este tipo de tráfico, donde se aprecian únicamente tramas *Beacon* y *Alives*, ya que no existe tráfico adicional en el canal. La Tabla 17 recoge la ocupación de canal en cuanto a número de tramas enviadas y recibidas y el porcentaje de canal que queda desocupado en un escenario con 21 nodos conectados. En una sesión capturada de unos 8 minutos aproximadamente, con solamente tráfico de control en la subred, se estimó que el 97.3 % del tiempo el canal estaba desocupado. Este resultado está en línea con los valores presentados en [176]. Además, en las gráficas de la Figura 93, Figura 94, Figura 95 y Figura 96 se puede ver el flujo de tramas con el tiempo, así como su duración y distancia entre ellas. La duración de las tramas de control identificadas es en su gran mayoría de 0.011008 s.
- Datos de medida instantáneos: la Tabla 17 recopila las tramas identificadas generadas con peticiones instantáneas, para lo que se configuró en el DC una petición simultánea a todos los SMs de la subred (se hizo para el mayor número disponible de SMs, 19). Para la sesión grabada, de 8 minutos de duración, se estimó que el canal estaba libre en un 92.3 %. Es decir, que las peticiones simultáneas a 19 SMs con respecto al tráfico de sólo control incrementan la ocupación de canal en un 5 %. Además, parte del flujo de tramas MAC durante dicha petición puede observarse en la Figura 97, donde aparece uno de los identificadores de la conexión de datos de medida, *lcid:257* y los identificadores de dos de los nodos que están siendo interrogados, *Inid:15984* y *Inid:802*. Finalmente, en las gráficas de la Figura 98, Figura 99, Figura 100 y Figura 101 se puede ver la evolución temporal de las tramas, diferenciando las tramas de control de las de medida. Como se puede ver en la Figura 98, los bloques de tramas de medida se inician cada minuto tras acabar el bloque de peticiones inmediatamente anterior. Además, en la gráfica ampliada de la Figura 101 se puede ver cómo la duración de las tramas de medida no es siempre la misma: se identificaron duraciones de 0.011008; 0.013248; 0.015488, 0.017728; 0.022208; 0.024448 y 0.028928 s.
- Perfiles de valores temporales: la Tabla 17 recoge el número de tramas recibidas y enviadas, tanto de control como de medida, en una sesión de 8 minutos de duración, donde también se puede ver que la ocupación de canal aumentó respecto al caso de las peticiones instantáneas un 8.9 % en la sesión analizada, lo que hace disminuir el porcentaje en el que el canal está desocupado hasta el 83.4 %. Respecto al tráfico de sólo control, la introducción de los perfiles horarios generó una ocupación adicional del 13.9 %. Parte de las tramas MAC originadas en la petición de perfil temporal se puede ver en la Figura 102, donde aparece el identificador de esta conexión, *lcid:271*, y el identificador del nodo interrogado, *Inid:124*. El flujo temporal de las tramas durante dicha petición puede verse representado en la Figura 103, Figura 104, Figura 105 y Figura 106. En la Figura 103 se puede ver claramente la presencia de tráfico de medida durante toda la sesión. La

duración de las tramas identificadas de perfiles temporales es de 0.011008; 0.013248; 0.015488; 0.017728; 0.024448; 0.026688 y 0.028928 s.

La sesión representada en las gráficas de la Figura 98 - Figura 101 (tráfico instantáneo), cuyo número de tramas enviadas y recibidas está recogido en la Tabla 17, incluye los lapsos de tiempo (1 minuto) que pasan entre las peticiones instantáneas, situación que no ocurre con el tráfico de perfiles. Para comparar la distribución de las tramas en un rango temporal en el que sólo haya tráfico instantáneo con en el caso de los perfiles horarios, la Figura 107 recoge la evolución temporal superpuesta de ambos casos, con el mismo origen de tiempos, y la Figura 108 muestra gráficamente la versión ampliada de la zona en la que concurren ambos tipos de tráfico. En la figura se puede intuir una mayor presencia de tramas de perfiles temporales. En concreto, se contabilizaron un total de 267 tramas de medida de perfiles (entre transmitidas y recibidas) y 146 tramas de medidas instantáneas para dicho rango temporal (Figura 108). Por lo tanto, para el mismo rango temporal, la densidad de tramas en una petición de perfiles es mayor que en el caso de peticiones instantáneas.

```
[TX] 2017/03/29 13:35:29 1648.403200(0.011008) dbpsk_f channels:plc
    Beacon: sna:40:40:22:02:67:bb sid:0 level:0 cnt:3 slt:0 seq:14 frq:0
           00 | 27 00 60 00 00 70 40 40 22 02 67 bb 00 00 42 f4
           10 | 1c
[RX] 2017/03/29 13:35:30 1649.655520(0.011008) dbpsk_f rxpow:0.97193(Vrms)
evm:16.2(dB) channels:plc
    Beacon: sna:40:40:22:02:67:bb sid:150 level:2 cnt:3 slt:1 seq:16 frq:3
delta:+0.000144
           00 | 23 96 64 00 02 83 40 40 22 02 67 bb 08 08 1b a9
           10 | 5d 35
...
...
[RX] 2017/03/29 13:43:30 2130.016848(0.011008) dbpsk_f rxpow:3.64160(Vrms)
evm:27.9(dB) channels:plc
    Beacon: sna:40:40:22:02:67:bb sid:0 level:0 cnt:3 slt:0 seq:25 frq:0 delta:-
0.000128
           00 | 27 00 60 00 00 c8 40 40 22 02 67 bb 00 00 26 51
           10 | ed c0
[RX] 2017/03/29 13:43:30 2130.038864(0.011008) dbpsk_f rxpow:1.22077(Vrms)
evm:16.2(dB) channels:plc
    Beacon:  sna:40:40:22:02:67:bb  sid:70  level:1  cnt:3  slt:2  seq:25  frq:3
delta:+0.000000
           00 | 23 46 68 00 01 cb 40 40 22 02 67 bb 04 04 6e 7e
           10 | 32 3a
[TX] 2017/03/29 13:43:31 2130.630400(0.011008) dbpsk_f channels:plc
    Beacon: sna:40:40:22:02:67:bb sid:0 level:0 cnt:3 slt:0 seq:26 frq:0
           00 | 27 00 60 00 00 d0 40 40 22 02 67 bb 00 00 b0 56
           10 | f5 28
```

Figura 92. Flujo de tramas MAC generado por el tráfico de control existente en la subred.

| Ocupación del Canal según el Tipo de Tráfico | | | | | |
|----------------------------------------------|----------------|-----|------------------|------|---------------|
| Tipo de Tráfico | Tramas Control | | Tramas de Medida | | % Canal Libre |
| | Tx | Rx | Tx | Rx | |
| Sólo control | 849 | 313 | - | - | 97.3 |
| Control + Instantáneos (19 SMs) | 848 | 714 | 329 | 642 | 92.3 |
| Control + Perfil | 772 | 835 | 356 | 2171 | 83.4 |

Tabla 17. Resumen de la ocupación del canal según el tipo de tráfico, especificando las tramas enviadas (Tx) y recibidas (Rx) de cada tipo, así como el porcentaje de canal libre en cada caso.

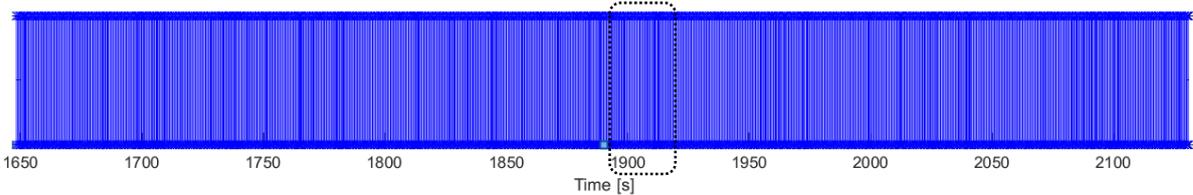


Figura 93. Representación temporal de tramas PRIME en el canal con sólo tráfico de control.

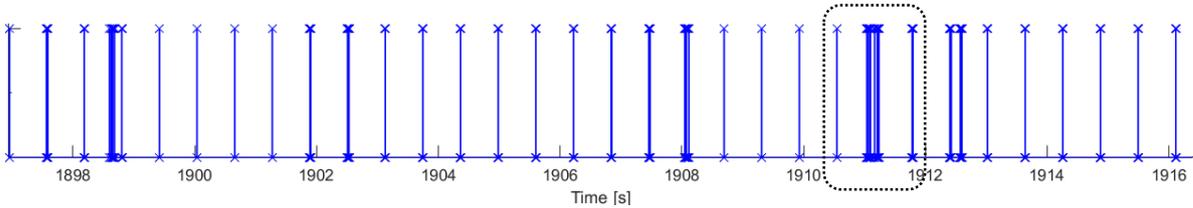


Figura 94. Representación temporal de tramas PRIME en el canal con sólo tráfico de control: vista ampliada de la sección punteada en la Figura 93

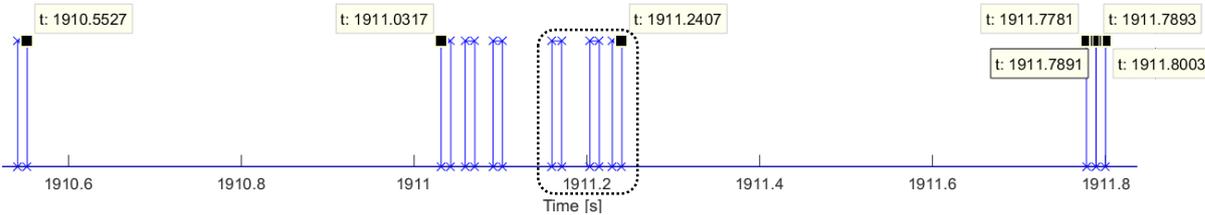


Figura 95. Representación temporal de tramas PRIME en el canal con sólo tráfico de control: vista ampliada de la sección punteada en la Figura 94

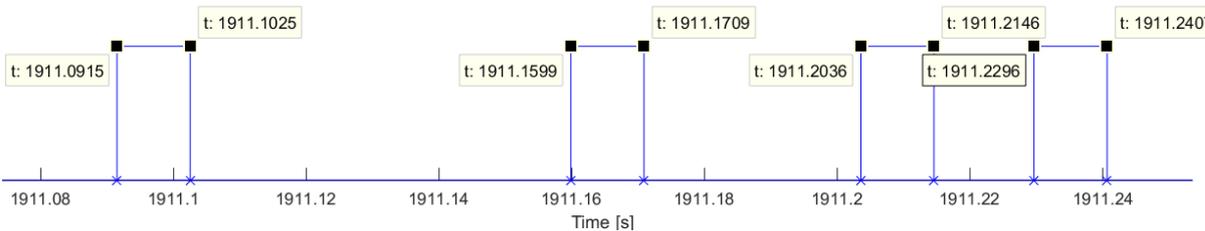


Figura 96. Representación temporal de tramas PRIME en el canal con sólo tráfico de control: vista ampliada de la sección punteada en la Figura 95.

```

[TX] 2017/03/28 14:12:44 3376.741664(0.024448) dbpsk_f channels:plc
GPDU: sna:40:40:22:02:67:bb DO level:0
  DATA sid:0 lnid:802 lcid:257
    00 | 00 40 c2 05 01 00 0c 88 27[e3 90 34 80 74 05 08
    10 | 02 01 ac 0a 80 08 30 30 30 30 30 30 31 be 10
    20 | 04 0e 01 00 00 00 06 5f 1f 04 00 00 10 14 00 fd
    30 |]8b 54 96 53
[TX] 2017/03/28 14:12:44 3376.846080(0.011008) dbpsk_f channels:plc
Beacon: sna:40:40:22:02:67:bb sid:0 level:0 cnt:3 slt:0 seq:28 frq:0
    00 | 27 00 60 00 00 e0 40 40 22 02 67 bb 00 00 98 99
    10 | d9 4f
[RX] 2017/03/28 14:12:44 3376.850768(0.011008) dbpsk_f rxpow:3.66707(Vrms)
evm:28.5(dB) channels:plc
Beacon: sna:40:40:22:02:67:bb sid:0 level:0 cnt:3 slt:0 seq:28 frq:0 delta:-
0.000032
    00 | 27 00 60 00 00 e0 40 40 22 02 67 bb 00 00 98 99
    10 | d9 4f
[RX] 2017/03/28 14:12:44 3376.997376(0.011008) dbpsk_f rxpow:1.54546(Vrms)
evm:14.0(dB) channels:plc
GPDU: sna:40:40:22:02:67:bb UP level:0 frametime:0.146608 SCP
  DATA sid:0 lnid:802 lcid:257
    00 | 00 00 05 05 01 00 0c 88 04[b4 90 e2 24]3f 6e de
    10 | b0
...
...
[RX] 2017/03/28 14:20:29 3841.720736(0.017728) dbpsk_f rxpow:1.21561(Vrms)
evm:17.1(dB) channels:plc
GPDU: sna:40:40:22:02:67:bb DO level:1 frametime:0.571696 SCP
  DATA sid:70 lnid:15984 lcid:257
    00 | 00 41 c5 05 01 46 f9 c0 14[d7 90 19 00 90 01 02
    10 | c0 01 c4 00 46 00 00 60 03 0a ff 03 00]88 7c d2
    20 | 3f
[TX] 2017/03/28 14:20:29 3841.762560(0.011008) dbpsk_f channels:plc
Beacon: sna:40:40:22:02:67:bb sid:0 level:0 cnt:3 slt:0 seq:12 frq:0
    00 | 27 00 60 00 00 60 40 40 22 02 67 bb 00 00 5a b1
    10 | 07 a7
[RX] 2017/03/28 14:20:29 3841.813440(0.015488) dbpsk_f rxpow:1.28414(Vrms)
evm:15.3(dB) channels:plc
GPDU: sna:40:40:22:02:67:bb UP level:1 frametime:0.046192 SCP
  DATA sid:70 lnid:15984 lcid:257
    00 | 00 01 02 05 01 46 f9 c0 0d[d9 90 18 00 90 02 01
    10 | c4 00 16 01]49 fe ae 0c

```

Figura 97. Flujo de tramas MAC generado por peticiones instantáneas a todos los SMs de la subred.

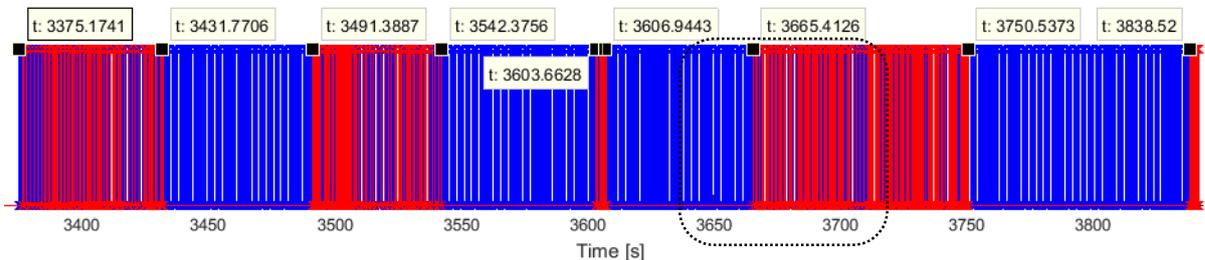


Figura 98. Representación temporal de tramas PRIME en el canal con tráfico de control (en azul) y peticiones instantáneas a todos los SMs de la subred (en rojo).

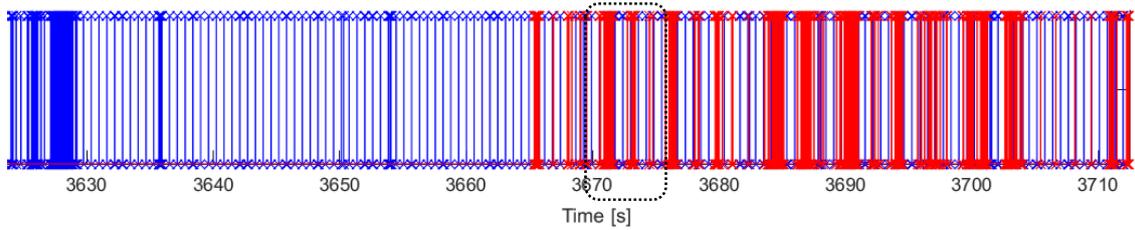


Figura 99. Representación temporal de tramas PRIME en el canal con tráfico de control (en azul) y peticiones instantáneas a todos los SMs de la subred (en rojo): vista ampliada de la sección punteada en la Figura 98.

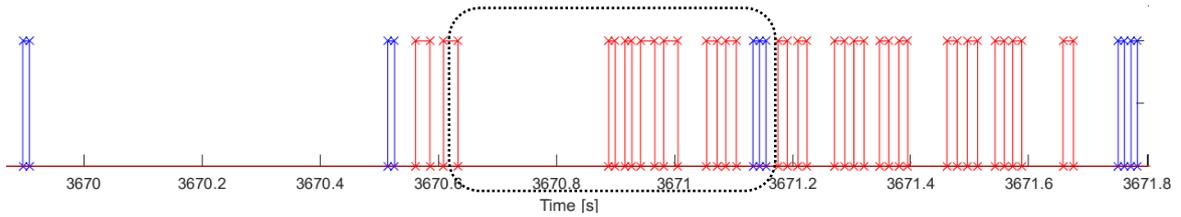


Figura 100. Representación temporal de tramas PRIME en el canal con tráfico de control (en azul) y peticiones instantáneas a todos los SMs de la subred (en rojo): vista ampliada de la sección punteada en la Figura 99.

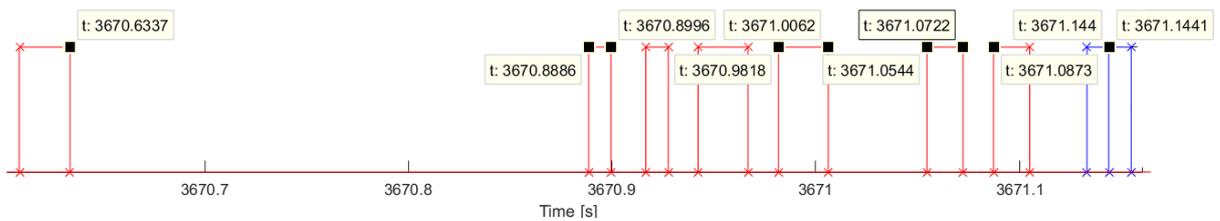


Figura 101. Representación temporal de tramas PRIME en el canal con tráfico de control (en azul) y peticiones instantáneas a todos los SMs de la subred (en rojo): vista ampliada de la sección punteada en la Figura 100.

```
[TX] 2017/03/27 13:50:18 1523.002424(0.024448) dbpsk_f channels:plc
  GPDU: sna:40:40:22:02:67:bb DO level:0
    DATA sid:70 lnid:124 lcid:271
      00 | 00 40 c2 05 0f 46 01 f0 28[a3 90 3c 01 90 01 02
      10 | 60 42 a1 09 06 07 60 85 74 05 08 01 01 a6 0a 04
      20 | 08 5a 49 56 00 00 43 62 8e 8a 02 07 80 8b 07 60
      30 | 85]0e 02 4a 9a
[RX] 2017/03/27 13:50:18 1523.046140(0.024448) dbpsk_f rxpow:1.25445(Vrms)
evm:17.8(dB) channels:plc
  GPDU: sna:40:40:22:02:67:bb DO level:1 frametime:0.453280 SCP
    DATA sid:70 lnid:124 lcid:271
      00 | 00 41 c5 05 0f 46 01 f0 28[a3 90 3c 01 90 01 02
      10 | 60 42 a1 09 06 07 60 85 74 05 08 01 01 a6 0a 04
      20 | 08 5a 49 56 00 00 43 62 8e 8a 02 07 80 8b 07 60
      30 | 85]ae 7f eb 29
[TX] 2017/03/27 13:50:18 1523.093620(0.024448) dbpsk_f channels:plc
  GPDU: sna:40:40:22:02:67:bb DO level:0
    DATA sid:70 lnid:124 lcid:271
      00 | 00 40 c2 05 0f 46 01 f0 27[e4 90 3c 80 74 05 08
      10 | 02 01 ac 0a 80 08 30 30 30 30 30 30 30 31 be 10
      20 | 04 0e 01 00 00 00 06 5f 1f 04 00 00 10 14 00 fd
      30 | ]09 61 6b a2
[RX] 2017/03/27 13:50:18 1523.140780(0.024448) dbpsk_f rxpow:1.22836(Vrms)
evm:16.9(dB) channels:plc
  GPDU: sna:40:40:22:02:67:bb DO level:1 frametime:0.547920 SCP
    DATA sid:70 lnid:124 lcid:271
      00 | 00 41 c5 05 0f 46 01 f0 27[e4 90 3c 80 74 05 08
      10 | 02 01 ac 0a 80 08 30 30 30 30 30 30 30 31 be 10
      20 | 04 0e 01 00 00 00 06 5f 1f 04 00 00 10 14 00 fd
      30 | ]a6 08 76 e8
[TX] 2017/03/27 13:50:18 1523.206400(0.011008) dbpsk_f channels:plc
  Beacon: sna:40:40:22:02:67:bb sid:0 level:0 cnt:3 slt:0 seq:8 frq:0
    00 | 27 00 60 00 00 40 40 40 22 02 67 bb 00 00 6a 3b
    10 | 30 1d
...
[RX] 2017/03/27 13:57:21 1946.206044(0.015488) dbpsk_f rxpow:1.35655(Vrms)
evm:15.4(dB) channels:plc
  GPDU: sna:40:40:22:02:67:bb UP level:1 frametime:0.118752 SCP
    DATA sid:70 lnid:124 lcid:271
      00 | 00 01 02 05 0f 46 01 f0 0c[d8 90 21 00 90 02 01
      10 | 63 03 80 01 00]72 95 48 bd
[RX] 2017/03/27 13:57:21 1946.238620(0.015488) dbpsk_f rxpow:1.20516(Vrms)
evm:14.3(dB) channels:plc
  GPDU: sna:40:40:22:02:67:bb UP level:0 frametime:0.151328 SCP
    DATA sid:70 lnid:124 lcid:271
      00 | 00 00 05 05 0f 46 01 f0 0c[d8 90 21 00 90 02 01
      10 | 63 03 80 01 00]70 d5 7e e4
```

Figura 102. Flujo de tramas MAC generado por petición de perfil temporal al SM con número de serie ZIV0038301037.

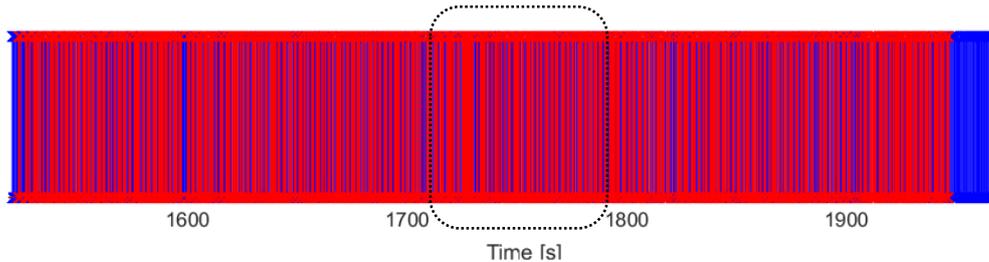


Figura 103. Representación temporal de tramas PRIME en el canal con tráfico de control (en azul) y peticiones de perfil temporal a un SMs (en rojo).

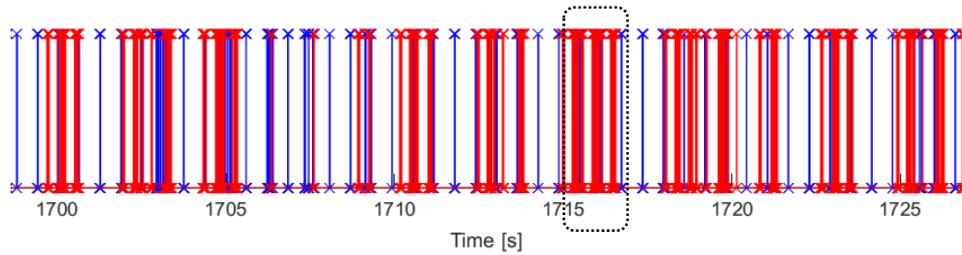


Figura 104. Representación temporal de tramas PRIME en el canal con tráfico de control (en azul) y peticiones de perfil temporal a un SMs (en rojo): vista ampliada de la sección punteada en la Figura 103.

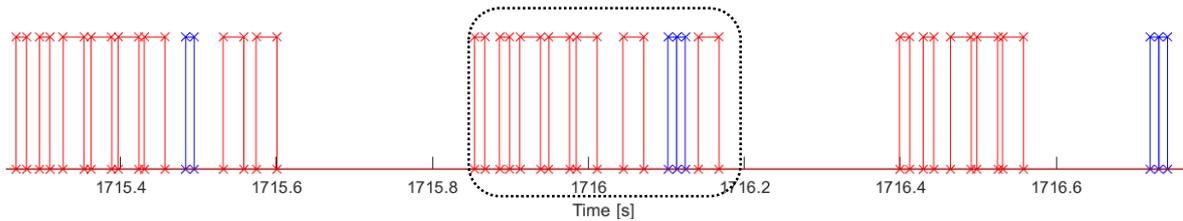


Figura 105. Representación temporal de tramas PRIME en el canal con tráfico de control (en azul) y peticiones de perfil temporal a un SMs (en rojo): vista ampliada de la sección punteada en la Figura 104.

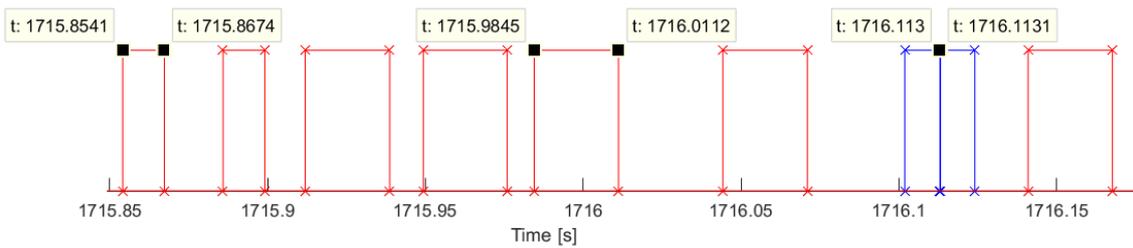


Figura 106. Representación temporal de tramas PRIME en el canal con tráfico de control (en azul) y peticiones de perfil temporal a un SMs (en rojo): vista ampliada de la sección punteada en la Figura 105.

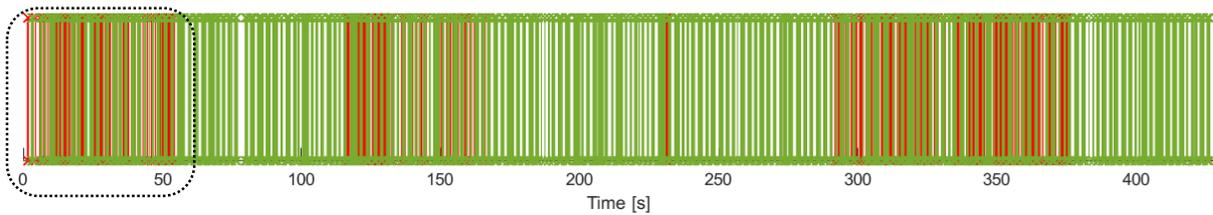


Figura 107. Superposición de tramas de medida sin tráfico de control: peticiones instantáneas a todos los SMs de la subred (en rojo) y peticiones de perfil temporal un SMs (en verde).

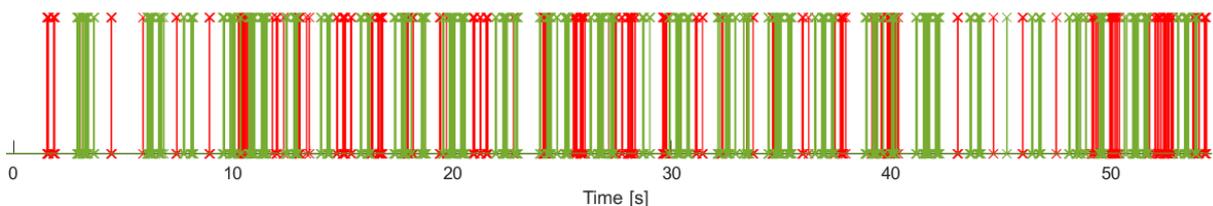


Figura 108. Superposición de tramas de medida sin tráfico de control: peticiones instantáneas a todos los SMs de la subred (en rojo) y peticiones de perfil temporal un SMs (en verde): vista ampliada de la sección punteada en la Figura 107

Los resultados de capacidad de canal demuestran de forma numérica y gráfica la existencia de canal adicional en PLC para los distintos tipos de tráfico considerados: sólo tráfico de control; tráfico de control con peticiones instantáneas y, finalmente, tráfico de control con tráfico de perfiles. La distinción según el tipo de tráfico ha permitido comprobar que el tráfico de perfiles genera más densidad de tramas que el tráfico instantáneo para el número de nodos considerado (21 SNs). Finalmente, comparando un mismo rango temporal en el que exista sólo tráfico de peticiones instantáneas (sin los lapsos entre peticiones) con un rango similar de tráfico de perfiles, la densidad de tramas en el tráfico de perfiles también es mayor.

5.5.2. Latencia

Los valores medios de latencia obtenidos en las medidas del CEDER-CIEMAT están representados en la Figura 109 y recogidos en la Tabla 18. Las medidas se han hecho mediante paquetes ICMPs (*pings*) de 32 B, considerando diferentes tipos de tráfico en el canal y diferentes tipos de comunicación (ver Figura 109).

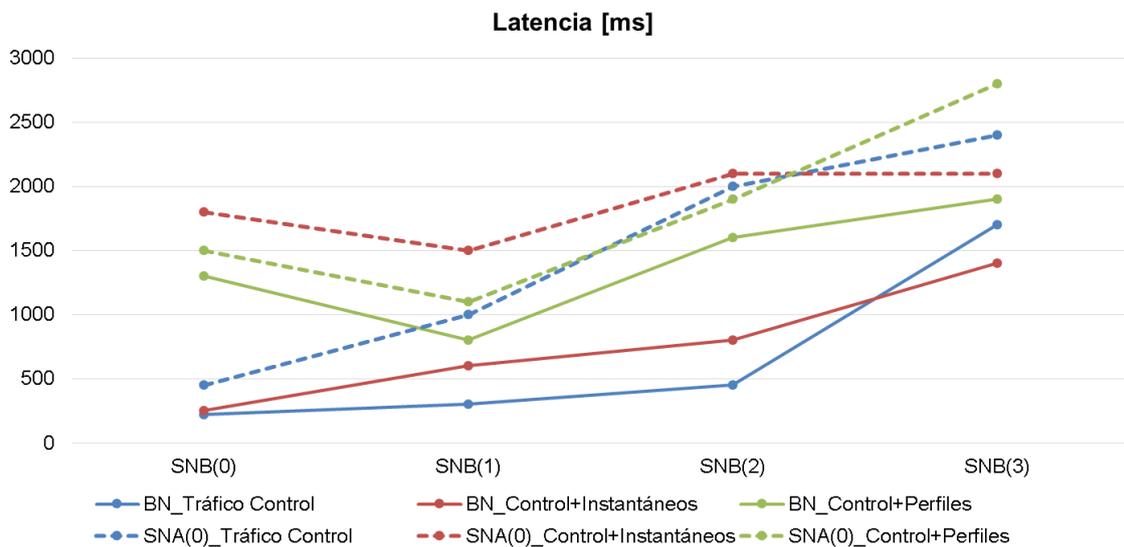


Figura 109. Valores medios de latencia para diferentes tipos de tráfico. Se incluyen dos tipos de comunicación: BN-SNB(i) (líneas sólidas) y SNA(0)-SNB(i) (líneas punteadas). Los niveles de repetición de SNB están indicados en el eje de abscisas.

El valor de latencia para el caso BN-SNB(0) sin tráfico de medida está en línea con el presentado en [180], donde cifran la latencia con una media de 214 ms. Además, las medidas en la microrred profundizan en más tipos de comunicación y varios niveles de repetición, de forma que se comprueba que los valores de latencia permanecen por debajo de 1 s en los casos BN-SNB(0), BN-SNB(1) y en BN-SNB(2) salvo en el caso con tráfico de perfiles. En la comunicación entre nodos, únicamente para el caso SNA(0)-SNB(0) con sólo tráfico de control la latencia es inferior a 1 s (ver Tabla 18). En el resto de situaciones, en general la latencia aumenta a medida que se introduce más tráfico en el canal (tráfico instantáneo y tráfico de perfiles, respectivamente) y con el nivel de repetición. Respecto a los valores máximos, en la comunicación en BN-SNB(2) hubo registros por encima de los 2 s e incluso alcanzando los 3 s en el caso BN-SNB(3). En la comunicación SNA-SNB, hubo valores máximos de 3 s desde el

primer nivel de repetición, llegando a alcanzar los 3.6 s en el peor de los casos, SNA(0)-SNB(3) con tráfico de perfiles.

A la vista de los resultados, se puede ver que la evolución es distinta, pero en ambos tipos de comunicación la gráfica muestra un rango de valores de latencia a partir del cual el incremento se ralentiza:

- En la comunicación BN-SNB: la latencia aumenta progresivamente con el tipo de tráfico (la latencia es mayor con tráfico de perfiles) y con el nivel de repetición, de forma que en el tercer salto las latencias se equiparan, independientemente del tipo de tráfico.
- En la comunicación SNA-SNB: el aumento de la latencia es más evidente con el nivel de repetición que con el tipo de tráfico (salvo en el escenario sin repetición). En cualquier caso, en la comunicación sin repetición, SNA(0)-SNB(0), ya se produce el factor limitante que resulta ser el paso por el BN. La forma en la que el BN gestiona los paquetes entre SNs aumenta la latencia hasta niveles similares a los que existen cuando hay tres niveles de repetición entre BN y SN (ver Figura 109).

En general, la latencia se ve afectada por el medio de transmisión, la distancia física y la existencia de enrutadores u algún otro proceso intermedio. Éste último es el caso aplicable al incremento de la latencia representado en la Figura 109 y cuyos valores están recogidos en la Tabla 18 . El factor más limitante es el paso por el BN en las comunicaciones entre SNs, de forma que las progresivas repeticiones que se introduzcan no afectan de forma significativa. En el caso de comunicación entre BN y SNs, son los niveles de repetición los que aumentan progresivamente la latencia. Esto se debe a que los *switches* no propagan automáticamente la información que reciben sino que lo hacen de forma selectiva, por lo que ese proceso de selección y posterior reenvío produce un retardo significativo.

| Latencia [ms] | | | | |
|--------------------------------|--------|--------|--------|--------|
| Tipo de Comunicación / Tráfico | SNB(0) | SNB(1) | SNB(2) | SNB(3) |
| BN-SNB(i) | | | | |
| Sólo control | ~ 220 | ~ 300 | ~ 450 | ~ 1700 |
| Control + Instantáneos | ~ 250 | ~ 600 | ~ 800 | ~ 1400 |
| Control + Perfil | ~ 1300 | ~ 800 | ~ 1600 | ~ 1900 |
| SNA(0)-SNB(i) | | | | |
| Sólo control | ~ 450 | ~ 1000 | ~ 2000 | ~ 2400 |
| Control + Instantáneos | ~ 1800 | ~ 1500 | ~ 2100 | ~ 2100 |
| Control + Perfil | ~ 1500 | ~ 1100 | ~ 1900 | ~ 2800 |

Tabla 18. Valores medios de latencia obtenidos en las medidas del CEDER-CIEMAT para diferentes tipos de tráfico y comunicación.

5.5.3. Tasa de bits

5.5.3.1. Comparativa con medidas de laboratorio

Los primeros resultados obtenidos de tasa de bits validan las pruebas realizadas en laboratorio recogidas en [180]. Dichas pruebas se realizaron con tráfico de control en una subred con dos y ocho SNs y con tráfico de medida (sin especificar el tipo) para ocho SNs. En todos los casos los nodos bajo prueba estaban a nivel 0 (sin repetición) y se emplearon las configuraciones por defecto de iperf para TCP (ventana de de 8 kB y tamaño de segmento de 1220 B). Para las medidas del CEDER-CIEMAT se desconectaron cuatro de los SMs de la configuración estándar, haciendo un total de 9 nodos y se hicieron medidas tanto para el tráfico de control, como para el instantáneo y el tráfico de perfiles.

Como se puede ver en la Tabla 19, que recoge la comparativa entre las pruebas de laboratorio y las medidas en el CEDER-CIEMAT, los resultados son muy similares. Por lo tanto, las medidas realizadas en campo no sólo constatan las pruebas hechas en laboratorio sino que confirman la capacidad adicional del medio para otras funcionalidades. Sin embargo, las pruebas de laboratorio no profundizan en más configuraciones. Este déficit se cubre en las medidas recogidas en los apartados que siguen, de acuerdo al planteamiento de la sección 5.4.1.2 (Variables de análisis).

| Comparativa de Resultados - Tasa de bits [kbps] | | | |
|-------------------------------------------------|-----------|-------------|-------------------|
| Pruebas en Laboratorio [180] | | | |
| Tráfico / Nº Nodos Tipo tráfico | Control | | Tráfico de medida |
| | 2 | 8 | 8 |
| BN-SN(0) | 4.50–5.29 | 4.06– 4.32 | 3.31–3.75 |
| SNA(0)-SNB(0) | 1.52–1.85 | - | - |
| Medidas en CEDER-CIEMAT | | | |
| Tráfico / Nº Nodos Tipo tráfico | Control | Instantáneo | Perfiles |
| | 9 | 9 | 9 |
| BN-SN(0) | 4.88 | 4.47 | 2.39 |
| SNA(0)-SNB(0) | 1.51 | 1.55 | 1.26 |

Tabla 19. Comparativa de resultados obtenidos en laboratorio [180] y en las pruebas en campo en el CEDER-CIEMAT para configuraciones por defecto de TCP (ventana de 8 kB y tamaño de segmento de 1220 B).

5.5.3.2. Evaluación de la influencia del tipo de comunicación en función de los niveles de repetición, número de nodos y tipo de tráfico

En este apartado se presentan los resultados obtenidos para diferente número de nodos y más tipos de comunicación. Es por lo tanto una ampliación del escenario considerado en las medidas de la sección 5.5.3.1.

En cuanto a número de nodos, se consideró el escenario con menor número de nodos, 9, y el escenario estándar de 13 nodos. Las medidas se hicieron para los tres tipos de tráfico y para los dos tipos de comunicación considerados (BN y SN y entre SNs), incluyendo además un nivel de repetición para el caso de comunicación entre BN y SN, tanto en el escenario de 9 SNs como en el de 13 SNs. La Figura 110 y la Figura 111 recogen las topologías de la subred en cada caso así como los tipos de

comunicación considerados. En todos los casos se mantuvo la configuración por defecto TCP en iperf. Finalmente, los resultados obtenidos se pueden ver en la gráfica de la Figura 112 y los valores en detalle se pueden consultar en la Tabla 20.

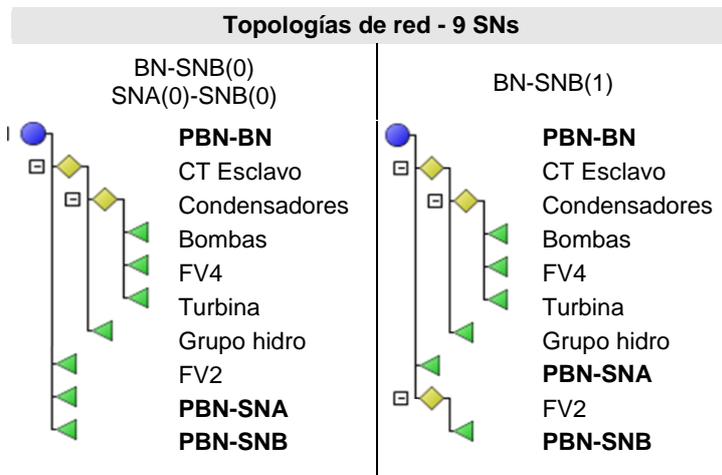


Figura 110. Topologías de la subred con 9 nodos conectados y tipos de comunicación medidos en cada caso.

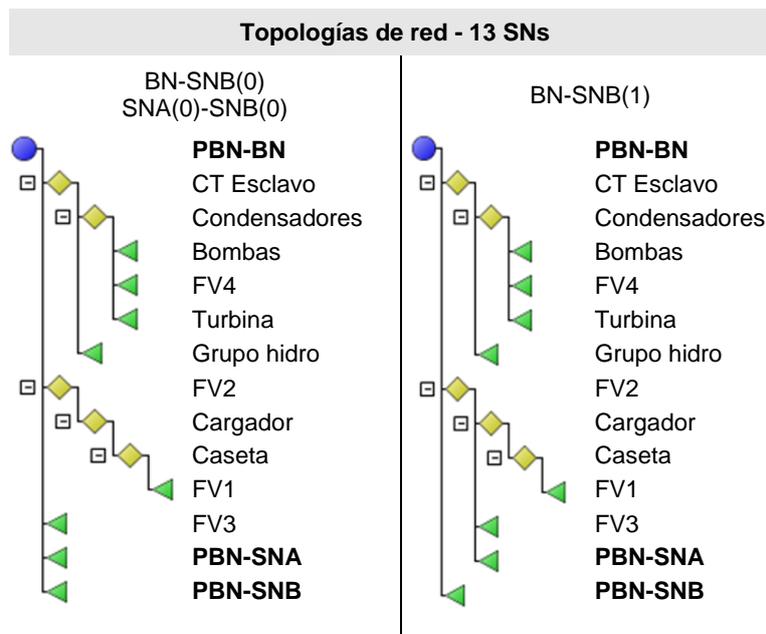


Figura 111. Topologías de la subred con 13 nodos conectados y tipos de comunicación medidos en cada caso.

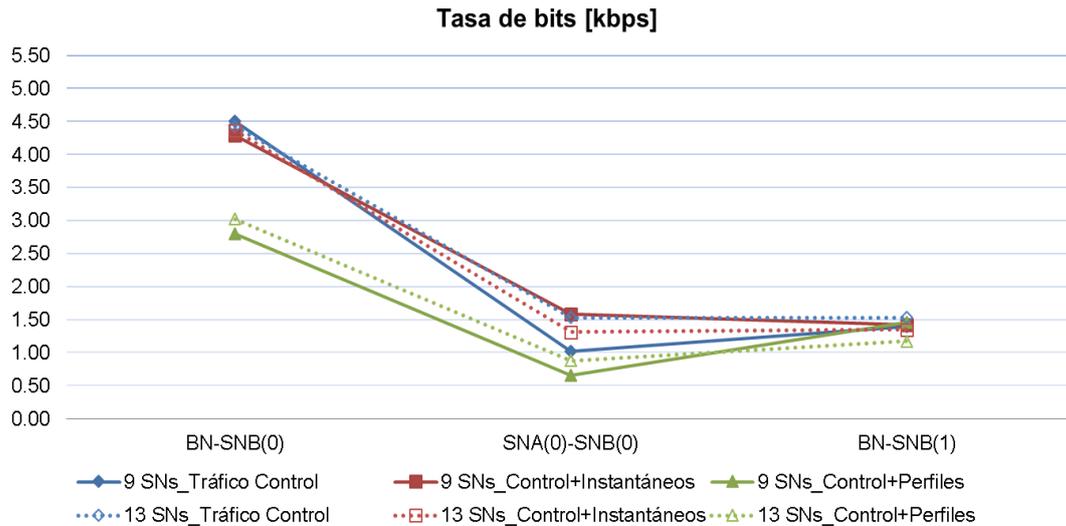


Figura 112. Representación de la tasa de bits obtenida para diferentes tipos de comunicación según tipo de tráfico y números de nodos.

El análisis de los resultados se puede hacer atendiendo a diferentes parámetros:

- Según el tipo de comunicación: ésta es la variable que mayores diferencias presenta. En todos los casos los mejores resultados se dan en comunicación BN-SN(0), mientras que en los casos de comunicación entre nodos, SNA(0)-SNB(0), o en los que exista un nivel de repetición, BN-SNB(1), la tasa de bits se reduce notablemente (hasta 3.48 kbps en el caso SNA(0)-SNB(0), como se puede ver en la Tabla 21). Sin embargo, en la comunicación SNA(0)-SNB(0) (Figura 112), las diferencias según el tipo de tráfico y nodos en la subred es menos pronunciada que en la comunicación entre BN y SN, algo que también ocurre en comunicación con repetición, BN-SNB(1). La comunicación entre nodos SNA(0)-SNB(0), pese a no tener niveles de repetición, puede considerarse como comunicación con un salto intermedio ya que todo el tráfico ha de pasar necesariamente por el BN, ejerciendo éste una función similar a la de un nodo repetidor, lo que hace que las tasas de bit disponibles de las comunicaciones SNA(0)-SNB(0) y BN-SNB(1) sean parecidas. En cambio, el BN, a diferencia de un nodo repetidor, ha de encargarse también del resto de tráfico y de la gestión de la subred, de ahí la mayor variación de resultados entre sí en el caso SNA(0)-SNB(0) que en BN-SNB(1).
- Según el tipo de tráfico en el canal: se trata del segundo factor en influencia sobre la tasa de bits. El tráfico de sólo control presenta los mejores resultados en prácticamente todos los casos, y es seguido de cerca por el tráfico instantáneo. En cambio, el tráfico de perfiles reduce notablemente la tasa de bits. Sin embargo, estas diferencias no son iguales en todos los casos y depende del tipo de comunicación. Es en el caso de la comunicación BN-SNB(0) donde estas diferencias son más evidentes: destaca el hecho de que una ocupación de canal incrementada en casi un 14 % (tráfico de perfiles frente a tráfico de sólo control) implique una reducción del ancho de banda en hasta 1.7 kbps (máxima diferencia

recogida en la Tabla 21). En cambio, para el mismo incremento de ocupación de canal, las máximas diferencias registradas para comunicación SNA(0)-SNB(0) y BN-SNB(1) fueron de 0.65 kbps y 0.36 kbps, respectivamente. Por lo tanto, en una microrred del tamaño considerado, la introducción de un nivel de repetición en la comunicación hace menos visible el efecto que producen los tráficos adicionales introducidos y será algo a tener en cuenta a la hora de enviar los datos de gestión en una microrred. Estos resultados destacan la relevancia del nodo repetidor en una subred y la importancia de plantear mejoras en la forma en que realiza la gestión del tráfico.

- Según el número de nodos en la subred: un mayor número de nodos en la subred genera más tráfico de control y, en el caso del tráfico con peticiones instantáneas, también hay más tráfico al existir más nodos a los que interrogar. Para el caso del tráfico de perfiles, el incremento de tráfico viene dado por el aumento del tráfico de control, ya que va añadido a la petición horaria. Con respecto a las medidas, las variaciones según el número de nodos considerados son poco significativas, tal y como recoge la Tabla 21. Por lo tanto, un incremento de cuatro nodos en una subred como la considerada no genera variaciones destacadas de la tasa de bits. Este aspecto se amplía en el apartado 5.5.3.4 con la introducción de más nodos en la subred.

Los parámetros que caracterizan a una subred de comunicaciones afectan en diferente medida al rendimiento en el canal. En base a los resultados de la Figura 112, recogidos en la Tabla 20, para los escenarios planteados el factor más limitante en el rendimiento es la presencia de un salto intermedio, bien sea por *switching* o por el paso del tráfico por el BN, requisito indispensable en la comunicación entre SNs, disminuyendo la tasa de bits en hasta 3.48 kbps (Tabla 21). A continuación, el tipo de tráfico introducido es la siguiente variable en cuanto a afección. El tráfico de perfiles afecta más que el tráfico instantáneo a la tasa de bits, produciendo reducciones de la tasa de bits en hasta 1.7 kbps (Tabla 21). Finalmente, para la variación de número de nodos considerada, no se produjeron variaciones significativas.

| Tasa de bits [kbps] | | | |
|---------------------|--------------|-------|--------|
| Nº Nodos | | 9 SNs | 13 SNs |
| Tipo Comunicación | Tipo Tráfico | | |
| BN-SNB(0) | Control | 4.50 | 4.42 |
| | Instantáneo | 4.29 | 4.36 |
| | Perfiles | 2.8 | 3.02 |
| SNA(0)-SNB(0) | Control | 1.02 | 1.53 |
| | Instantáneo | 1.58 | 1.31 |
| | Perfiles | 0.65 | 0.88 |
| BN-SNB(1) | Control | 1.39 | 1.53 |
| | Instantáneo | 1.42 | 1.35 |
| | Perfiles | 1.46 | 1.17 |

Tabla 20. Resultados de la tasa de bits obtenido en las medidas del CEDER-CIEMAT según el tipo de comunicación para diferentes tipos de tráfico y número de nodos.

| Variación de la tasa de bits [kbps] | | | | | |
|-------------------------------------------------------------------|---------------------|----------|---------|----------------------|----------|
| Control | 9 Nodos Instantáneo | Perfiles | Control | 13 Nodos Instantáneo | Perfiles |
| Según tipo de comunicación Respecto BN-SNB(0) | | | | | |
| Comunicación SNA(0) – SNB(0) | | | | | |
| -3.48 | -2.71 | -2.15 | -2.89 | -3.05 | -2.14 |
| Comunicación BN – SNB(1) | | | | | |
| -3.11 | -2.87 | -1.34 | -2.89 | -3.01 | -1.85 |
| Según tipo de tráfico Respecto sólo tráfico de control | | | | | |
| Comunicación BN – SNB(0) | | | | | |
| - | -0.21 | -1.7 | - | -0.06 | -1.4 |
| Comunicación SNA(0) – SNB(0) | | | | | |
| - | 0.56 | -0.37 | - | -0.22 | -0.65 |
| Comunicación BN – SNB(1) | | | | | |
| - | 0.03 | 0.07 | - | -0.18 | -0.36 |
| Según número de nodos Respecto 9 nodos | | | | | |
| Comunicación BN – SNB(0) | | | -0.08 | 0.07 | 0.22 |
| Comunicación SNA(0) – SNB(0) | | | 0.51 | -0.27 | 0.23 |
| Comunicación BN – SNB(1) | | | 0.14 | -0.07 | -0.29 |

Tabla 21. Variación de la tasa de bits obtenida según el tipo de comunicación para diferentes tipos de tráfico y número de nodos.

5.5.3.3. Evaluación de los parámetros de configuración TCP

Siguiendo con el escenario planteado en el apartado 5.5.3.2, a continuación se presentan los resultados obtenidos para diferentes parámetros de configuración de TCP, con el objetivo de identificar aquellas configuraciones que permitan sacar el máximo rendimiento del ancho de banda disponible en el canal. Se consideraron 3 tamaños de segmentos distintos y para cada uno de ellos diferentes tamaños de ventana, tal y como se recoge en la Tabla 16.

Los resultados de la tasa de bits se pueden ver de forma gráfica en la Figura 113, Figura 114 y Figura 115 y los valores se pueden consultar en detalle en la Tabla 22. Atendiendo a los diferentes parámetros de configuración se pueden analizar los resultados como sigue a continuación.

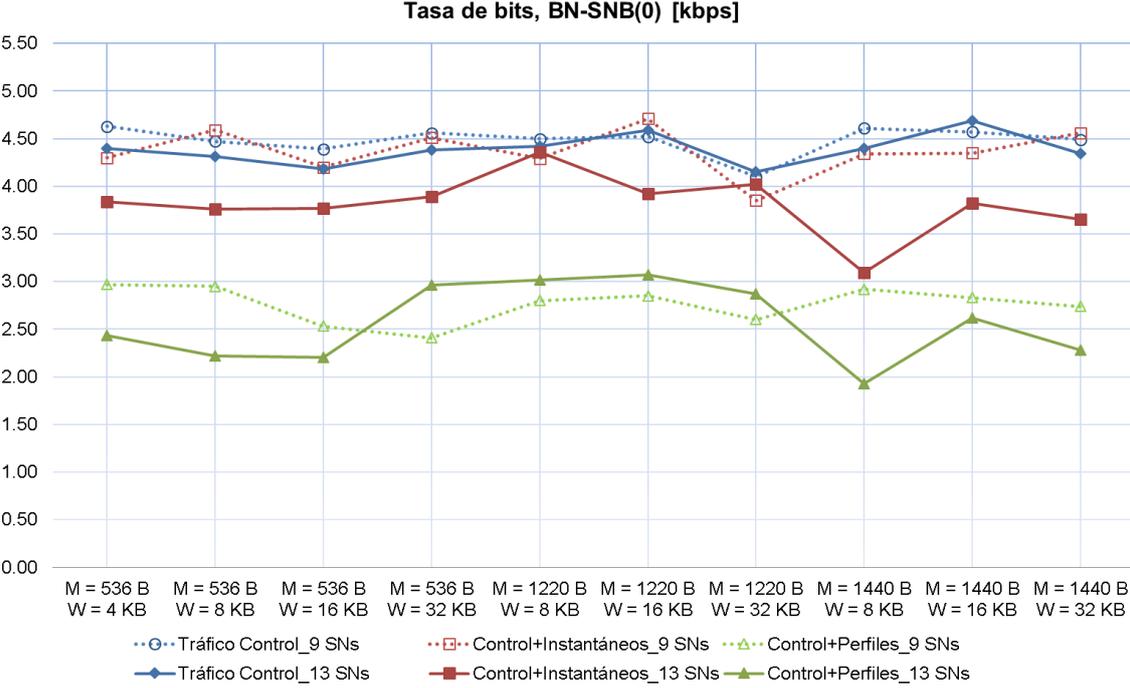


Figura 113. Representación de la tasa de bits obtenida según configuraciones TCP para comunicación entre BN y SN sin repetición. Se incluyen medidas para varios números de nodos y diferentes tipos de tráfico.

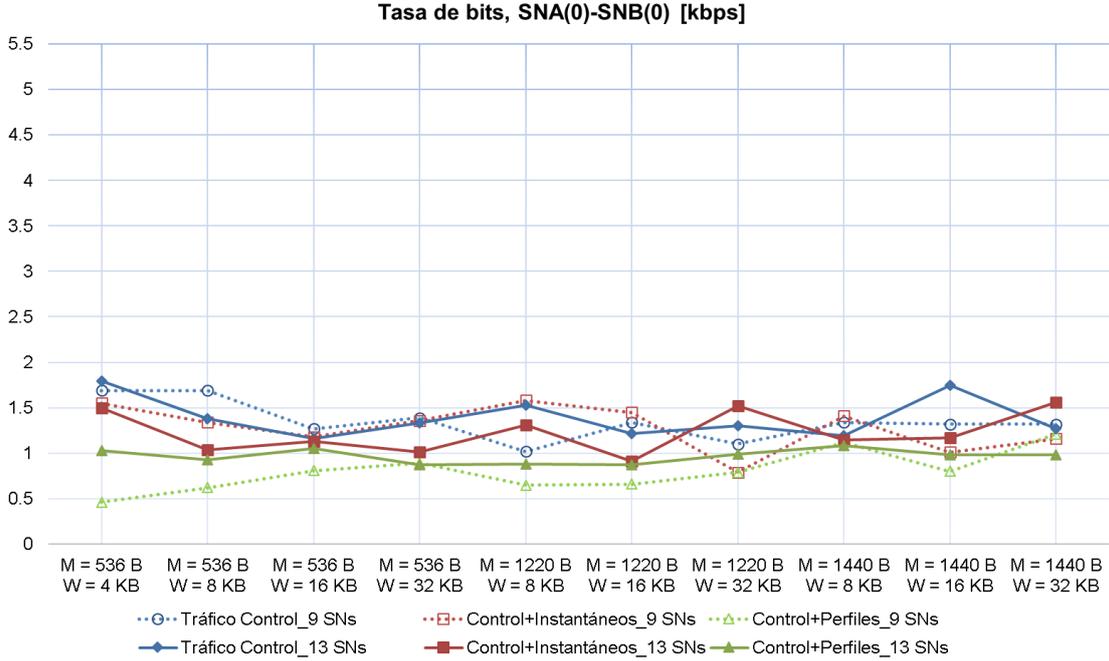


Figura 114. Representación de la tasa de bits obtenida según configuraciones TCP para comunicación entre dos nodos. Se incluyen medidas para varios números de nodos y diferentes tipos de tráfico.

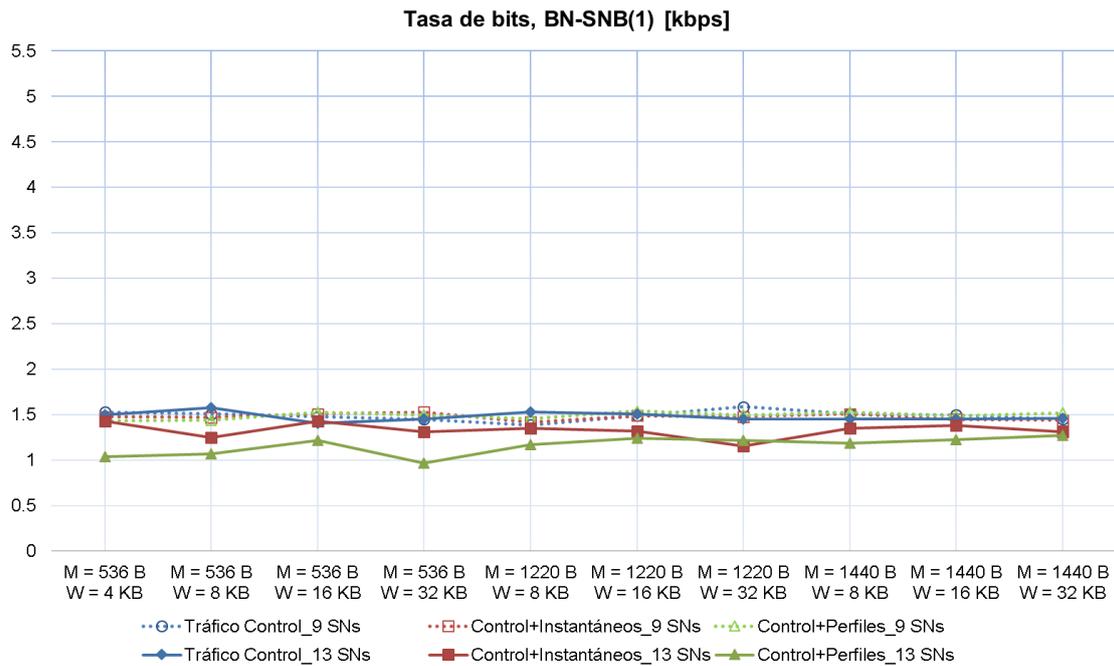


Figura 115. Representación de la tasa de bits obtenida según configuraciones TCP para comunicación entre BN y SN con un nivel de repetición. Se incluyen medidas para varios números de nodos y diferentes tipos de tráfico.

- Según el tamaño de segmento (M): teóricamente, cabe esperar mejores resultados de un tamaño de segmento mayor cuando el canal está más libre (caso de sólo tráfico de red), mientras que el tamaño de segmento menor dará mejores resultados con el canal ocupado, es decir, con tráfico instantáneo y con tráfico de perfiles. Sin embargo, esto no ocurre en todas los casos y tan sólo en comunicación directa (Figura 113) el mayor tamaño de segmento, 1440 B, ofrece los mejores resultados con tráfico de sólo red y los peores resultados en tráfico instantáneo y de perfiles y con 13 nodos. En el caso de la comunicación entre nodos (Figura 114) y en el de la comunicación con repetición (Figura 115), tampoco se aprecia un patrón definido según el tamaño del segmento.
- Según el tamaño de ventana (W): en teoría, una ventana muy pequeña es menos eficiente porque el cliente está más ocioso (a la espera de confirmaciones de recepción, ACKs, por parte del servidor) durante más tiempo. Cabe pensar entonces que una ventana grande es más adecuada cuando hay más tráfico (tráfico instantáneo y tráfico de perfiles) porque se generan menos ACKs y por tanto, menos tráfico adicional en el canal. Además, una ventana más grande en teoría aliviaría la congestión que presentan los tipos de comunicación BN-SNB(1) y SNA(0)-SNB(0). Sin embargo, la ventana más grande implica que en caso de colisión (más probable al haber más tráfico), si tiene que retransmitir toda la ventana, ésta recargará más el canal ya que es más grande. Observando los resultados obtenidos, no se aprecia una tendencia clara: en comunicación entre BN y SN sin repetición (Figura 113), la variación del tamaño de ventana parece influir poco en los casos con menor tráfico existente (tráfico de red con 9 y

13 nodos y tráfico instantáneo con 9 nodos), independientemente del tamaño del segmento. Para el resto de situaciones, la variación con la ventana se nota más en el caso del mayor tamaño de segmento (1440 B), pero no sigue un patrón fijo. En el caso de la comunicación entre nodos (Figura 114), el tamaño de ventana afecta de forma similar a todos los tipos de tráfico y número de nodos para los tres tamaños de segmento. Una vez más, no sigue un patrón definido, algo que también ocurre con en el caso de comunicación con repetición (Figura 115).

- Respecto al tipo de comunicación y de tráfico, se mantiene su influencia en la tasa de bits, tal y como se muestra en el apartado 5.5.3.2. Atendiendo al número de nodos en la subred, los resultados muestran una ligera mejora la tasa de bits con 9 SNs frente a 13 SNs, pero no se da en todos los casos.

Los resultados obtenidos para diferentes configuraciones de TCP no siguen una tendencia clara, los máximos y mínimos identificados en la Tabla 22 tampoco corresponden a una misma configuración en ninguno de los tipos de comunicación medidos, y además, las variaciones de la tasa de bits, recogidas en la Tabla 23, no son significativas (en tan sólo dos casos superan 1 kbps). Esto implica que para un microrred del tamaño considerado, la variación de los parámetros TCP no aporta mejoras significativas, por lo que, en los siguientes apartados del estudio, se considerará como válida la configuración por defecto para las siguientes pruebas, esto es, una ventana de 8 kB y un tamaño de segmento de 1220 B. De este análisis se extrae la conclusión que el tipo de comunicación y el tráfico influyen mucho más en la tasa de bits que la configuración del segmento y/o ventana TCP escogidos.

| Tasa de bits [kbps] – Parámetros TCP | | | | | | | |
|--------------------------------------|--------|---------|-------------|----------|----------|-------------|----------|
| Tipo de tráfico y nº de nodos | | 9 Nodos | | | 13 Nodos | | |
| M [B] | W [kB] | Control | Instantáneo | Perfiles | Control | Instantáneo | Perfiles |
| Comunicación BN – SNB(0) | | | | | | | |
| 536 | 4 | 4.63 | 4.3 | 2.97 | 4.4 | 3.84 | 2.43 |
| | 8 | 4.47 | 4.59 | 2.95 | 4.31 | 3.76 | 2.22 |
| | 16 | 4.39 | 4.2 | 2.53 | 4.18 | 3.77 | 2.2 |
| | 32 | 4.56 | 4.51 | 2.41 | 4.38 | 3.89 | 2.96 |
| 1220 | 8 | 4.50 | 4.29 | 2.8 | 4.42 | 4.36 | 3.02 |
| | 16 | 4.52 | 4.71 | 2.85 | 4.59 | 3.92 | 3.07 |
| | 32 | 4.10 | 3.85 | 2.6 | 4.15 | 4.02 | 2.87 |
| 1440 | 8 | 4.61 | 4.34 | 2.92 | 4.4 | 3.09 | 1.93 |
| | 16 | 4.57 | 4.35 | 2.83 | 4.69 | 3.82 | 2.62 |
| | 32 | 4.49 | 4.56 | 2.74 | 4.34 | 3.65 | 2.28 |
| Comunicación SNA(0) – SNB(0) | | | | | | | |
| 536 | 4 | 1.69 | 1.55 | 0.46 | 1.79 | 1.5 | 1.03 |
| | 8 | 1.69 | 1.34 | 0.62 | 1.38 | 1.04 | 0.93 |
| | 16 | 1.27 | 1.18 | 0.81 | 1.16 | 1.13 | 1.05 |
| | 32 | 1.39 | 1.36 | 0.89 | 1.33 | 1.01 | 0.87 |
| 1220 | 8 | 1.02 | 1.58 | 0.65 | 1.53 | 1.31 | 0.88 |
| | 16 | 1.34 | 1.45 | 0.66 | 1.22 | 0.91 | 0.87 |
| | 32 | 1.1 | 0.79 | 0.79 | 1.3 | 1.52 | 0.99 |
| 1440 | 8 | 1.34 | 1.41 | 1.12 | 1.19 | 1.15 | 1.08 |
| | 16 | 1.32 | 1.01 | 0.8 | 1.75 | 1.17 | 0.98 |
| | 32 | 1.32 | 1.16 | 1.21 | 1.27 | 1.56 | 0.98 |
| Comunicación BN – SNB(1) | | | | | | | |
| 536 | 4 | 1.53 | 1.48 | 1.43 | 1.5 | 1.43 | 1.04 |
| | 8 | 1.51 | 1.47 | 1.44 | 1.58 | 1.25 | 1.07 |
| | 16 | 1.48 | 1.51 | 1.53 | 1.41 | 1.43 | 1.22 |
| | 32 | 1.45 | 1.53 | 1.5 | 1.45 | 1.31 | 0.97 |
| 1220 | 8 | 1.39 | 1.42 | 1.46 | 1.53 | 1.35 | 1.17 |
| | 16 | 1.49 | 1.49 | 1.54 | 1.51 | 1.32 | 1.24 |
| | 32 | 1.59 | 1.48 | 1.5 | 1.45 | 1.16 | 1.22 |
| 1440 | 8 | 1.51 | 1.51 | 1.53 | 1.45 | 1.35 | 1.19 |
| | 16 | 1.5 | 1.45 | 1.49 | 1.45 | 1.38 | 1.23 |
| | 32 | 1.45 | 1.44 | 1.52 | 1.46 | 1.31 | 1.27 |

Tabla 22. Resultado de la tasa de bits según diferentes configuraciones TCP para comunicación sin repetición entre BN y SN, entre SNs sin repetición y entre BN y SN con un nivel de repetición. Se incluyen medidas para varios números de nodos y diferentes tipos de tráfico. Se han identificado en verde y rojo el mayor y menor valor, respectivamente, en cada tipo de tráfico.

| Variación de la tasa de bits [kbps] | | | | | | |
|-------------------------------------|---------|-------------|----------|----------|-------------|----------|
| | 9 Nodos | | | 13 Nodos | | |
| | Control | Instantáneo | Perfiles | Control | Instantáneo | Perfiles |
| Según configuración TCP | | | | | | |
| Caso más desfavorable | | | | | | |
| Comunicación BN – SNB(0) | -0.53 | -0.86 | -0.56 | -0.54 | -1.27 | -1.14 |
| Comunicación SNA(0) – SNB(0) | -0.67 | -0.79 | -0.75 | -0.63 | -0.65 | -0.21 |
| Comunicación BN – SNB(1) | -0.2 | -0.11 | -0.11 | -0.17 | -0.27 | -0.3 |

Tabla 23. Variación de la tasa de bits según la configuración TCP. El cálculo se hace respecto al mayor valor para cada tipo de tráfico y se muestran los valores más desfavorables.

5.5.3.4. Extensión del análisis a un mayor número de nodos

Siguiendo con los resultados obtenidos en el apartado 5.5.3.2, y como se ha podido comprobar también en el apartado 5.5.3.3, las medidas con 9 y 13 nodos en la subred, respectivamente, no ofrecen resultados concluyentes. Por ello se conectaron SMS adicionales por grupos de 4 hasta hacer un total de 21 nodos. De esta forma, se obtienen 4 escenarios diferentes de 9, 13, 17 y 21 nodos cuyas topologías pueden verse, además de las ya mostradas en la Figura 110 y en la Figura 111, en la Figura 116 y en la Figura 117, respectivamente.

Los resultados obtenidos de la tasa de bits para diferente número de nodos en el caso de comunicación BN-SNB(0) se pueden ver en la Tabla 24. En general, los valores son peores cuanto mayor es el número de nodos en la microrred, pero las variaciones son pequeñas, siendo la máxima diferencia alcanzada de 0.5 kbps (escenario de 13 SNs frente a 21 SNs con tráfico instantáneo). Los resultados muestran que, considerando que un mismo DC puede gestionar más de 400 SNs [184], el número de nodos disponible en el CEDER-CIEMAT no es suficiente para obtener resultados significativos.

Finalmente, la Figura 118 recoge los resultados obtenidos en las simulaciones de [180] para comunicaciones entre BN y SN sin repetición, a medida que el número de nodos en la subred crece y para distintos tipos de tráfico. Pese a que las medidas en el CEDER-CIEMAT validan los resultados obtenidos en las pruebas en laboratorio para 9 SNs, tal y como recoge la sección 5.5.3.1, las medidas para un mayor número de nodos, hasta 21 SNs, presentan una mayor tasa de bits que los resultados de las simulaciones para dicho número de nodos.

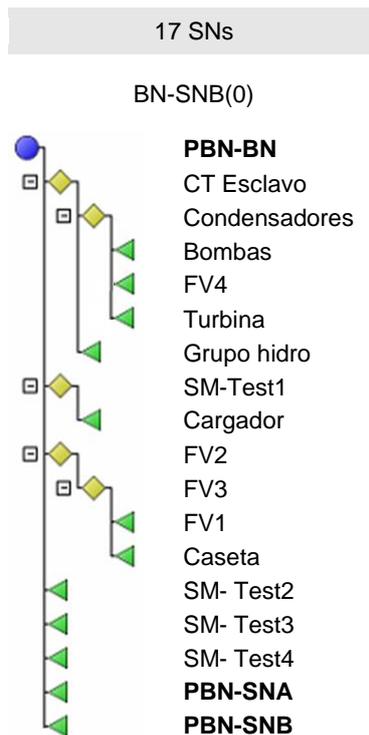


Figura 116. Topología de la subred con 17 nodos conectados y tipo de comunicación medido.

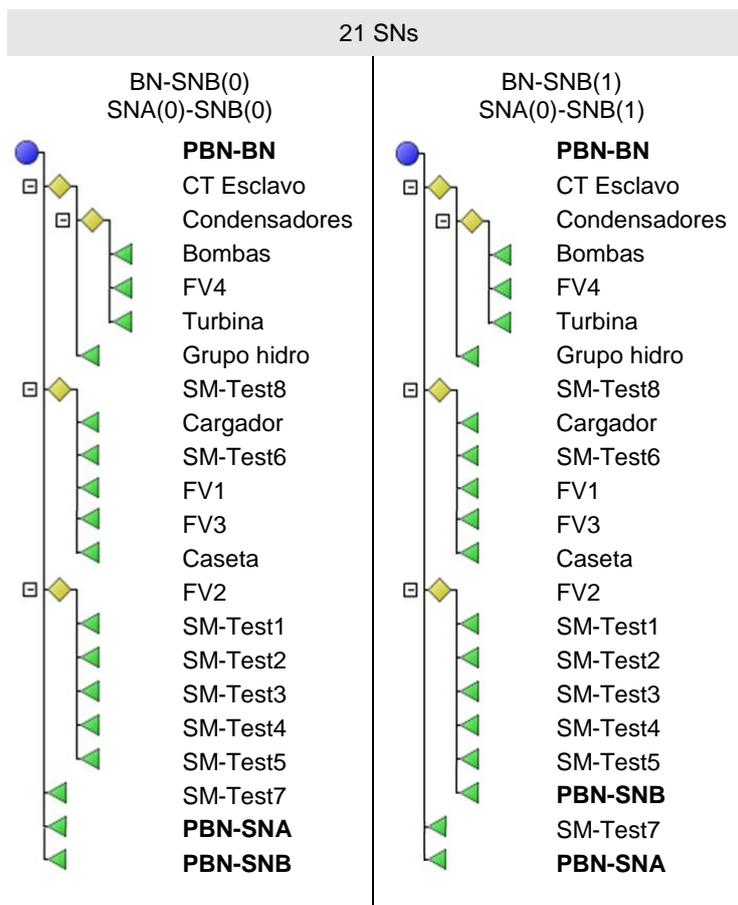


Figura 117. Topologías de la subred con 21 nodos conectados y tipos de comunicación medidos en cada caso.

| Tasa de bits [kbps] | | | | |
|---------------------------------|-------|--------|--------|--------|
| Nº Nodos / Tipo Tráfico | 9 SNs | 13 SNs | 17 SNs | 21 SNs |
| Comunicación BN – SNB(0) | | | | |
| Control | 4.50 | 4.42 | 4.2 | 4.54 |
| Instantáneo | 4.29 | 4.36 | 3.87 | 3.86 |
| Perfiles | 2.8 | 3.02 | 2.94 | 2.38 |

Tabla 24. Resultados de la tasa de bits obtenida para comunicación entre BN y SN sin repetición con diferente número de nodos y varios tipos de tráfico

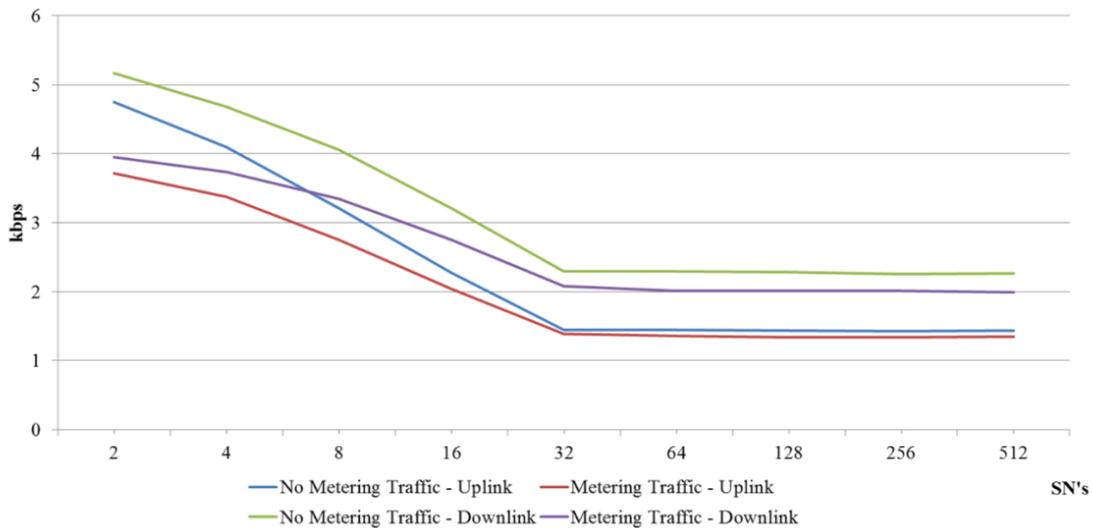


Figura 118. Resultados obtenidos de tasa de bits en un escenario simulado para comunicación BN-SN(0) según el número de nodos y para distintos tipos de tráfico [180].

5.5.3.5. Comparativa TCP frente a UDP

A continuación se procedió a comparar el rendimiento que ofrece TCP en comparación con UDP. Para ello se repitieron las pruebas en los cuatro escenarios en cuanto a número de nodos (9, 13, 17 y 21 SNs), al considerarse que pueden ser los escenarios típicos de una microrred. Además, se incluyeron los tres tipos de tráfico posibles. Las topologías de estas medidas corresponden a la Figura 110, la Figura 111, la Figura 116 y la Figura 117. La Figura 119 y la Tabla 25 recogen respectivamente los resultados obtenidos con el tipo de comunicación BN-SNB(0) y para diferente número de nodos.

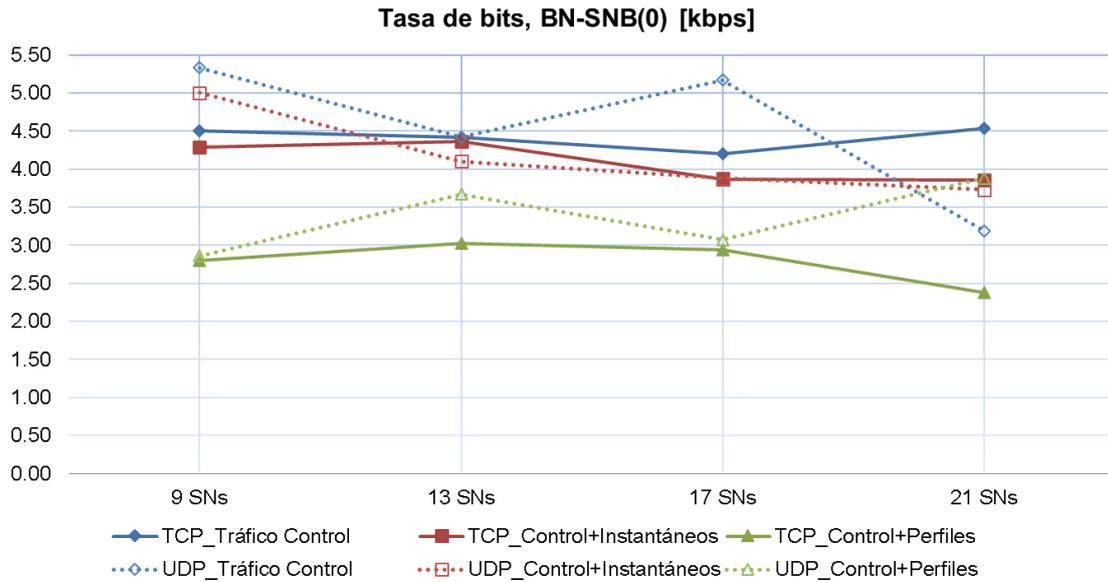


Figura 119. Representación de la tasa de bits obtenida para TCP y UDP en el caso de comunicación entre BN y SN sin repetición con diferente número de nodos y varios tipos de tráfico.

- Según el protocolo escogido: en general la tasa de bits es mejor con UDP que con TCP, siendo la mayor diferencia registrada de 1.5 kbps, en el caso de 21 SNs con tráfico de perfiles (Tabla 25). En el resto de casos las diferencias están en torno a unas pocas décimas de kbps. Esta mejora en los resultados radica en la naturaleza de UDP: al no contar con mecanismos que confirmen la recepción de los paquetes en el destino, no existen esas tramas adicionales de control que sí ocurren en TCP. UDP maximiza la tasa de bits a costa de sacrificar los mecanismos de control. Para el caso UDP, es interesante evaluar también el *jitter* y el porcentaje de datagramas perdidos, recogidos también en la Tabla 25.
 - En general los valores del *jitter* aumentan con el número de nodos y especialmente con el tipo de tráfico (los mayores valores de *jitter* se dan en las peticiones de perfiles), lo que evidencia el incremento de la congestión del canal en esos casos. En este escenario los valores del *jitter* son elevados en todos los casos, superando 1 s en todas las medidas e incluso en algunos casos están por encima de los 3 s.
 - Respecto al porcentaje de datagramas perdidos, este dato resulta un importante complemento a la tasa de bits obtenida para conocer el rendimiento de UDP. Para la comunicación BN-SNB(0), en ninguno de los cuatro escenarios en cuanto a número de nodos se perdieron datagramas.
- Según el número de nodos: tal y como ocurre con TCP, en UDP la variación de la tasa de bits tampoco muestra resultados concluyentes (ver Tabla 26). Por lo tanto, para una microrred del tamaño considerado, el incremento de 4, 8, y 12 SNs no supone grandes diferencias en cuanto a la tasa de bits, independientemente de usar TCP o UDP.

Por lo tanto, en la comunicación BN-SNB(0), UDP presenta mejoras frente a TCP, aunque ajustadas, ya que tan sólo en uno de los casos se superó 1 kbps (ver Tabla 25), y se comprueba que en ninguno de los casos se perdieron datagramas. Merece la pena recordar que en UDP, a diferencia de TCP, aquellos paquetes que no lleguen a destino no serán reenviados. Por lo tanto, para usos en los que esto no sea primordial o en los que se incluya algún otro mecanismo de control (por ejemplo, en la capa de aplicación) y sea importante maximizar el ancho de banda, UDP puede ser la opción a escoger ya que presenta mejor rendimiento que TCP. En cambio, si se precisa de un mecanismo de control, los resultados obtenidos con TCP justifican su uso respecto a UDP.

| Tasa de bits [kbps], <i>jitter</i> [ms] y datagramas perdidos (%) | | | | | | |
|-------------------------------------------------------------------|--------------|--------------|--------------|---------------|---------------------|-----------------------------|
| Protocolo | | TCP | | UDP | | Mejora UDP sobre TCP [kbps] |
| Nº Nodos | Tipo Tráfico | Tasa de bits | Tasa de bits | <i>Jitter</i> | Datagramas Perdidos | |
| Comunicación BN – SNB(0) | | | | | | |
| 9 SNs | Control | 4.50 | 5.33 | 1175.18 | 0 | 0.83 |
| | Instantáneo | 4.29 | 5 | 1224.13 | 0 | 0.71 |
| | Perfiles | 2.8 | 2.86 | 3205.28 | 0 | 0.06 |
| 13 SNs | Control | 4.42 | 4.42 | 1605.23 | 0 | 0 |
| | Instantáneo | 4.36 | 4.1 | 1653.38 | 0 | -0.26 |
| | Perfiles | 3.02 | 3.67 | 1666.75 | 0 | 0.65 |
| 17 SNs | Control | 4.2 | 5.17 | 1236.6 | 0 | 0.97 |
| | Instantáneo | 3.87 | 3.88 | 2096.26 | 0 | 0.01 |
| | Perfiles | 2.94 | 3.07 | 2600.84 | 0 | 0.13 |
| 21 SNs | Control | 4.54 | 4.82 | 1546.04 | 0 | 0.28 |
| | Instantáneo | 3.86 | 3.73 | 2189.81 | 0 | -0.13 |
| | Perfiles | 2.38 | 3.88 | 1300.32 | 0 | 1.5 |

Tabla 25. Resultados de la tasa de bits obtenida para TCP y UDP, *jitter* y porcentaje de datagramas perdidos para comunicación BN-SN(0) con diferente número de nodos en la subred.

| Variación de la tasa de bits [kbps] | | | |
|---------------------------------------------|--------------|--------------|--------------|
| Protocolo | | TCP | UDP |
| Nº Nodos | Tipo Tráfico | Tasa de bits | Tasa de bits |
| Según número de nodos Respecto 9 SNs | | | |
| Comunicación BN – SNB(0) | | | |
| 13 SNs | Control | -0.08 | -0.91 |
| | Instantáneo | 0.07 | -0.9 |
| | Perfiles | 0.22 | 0.81 |
| 17 SNs | Control | -0.3 | -0.16 |
| | Instantáneo | -0.42 | -1.12 |
| | Perfiles | 0.14 | 0.21 |
| 21 SNs | Control | 0.04 | 0.51 |
| | Instantáneo | -0.43 | -1.27 |
| | Perfiles | -0.42 | 1.02 |

Tabla 26. Variación de la tasa de bits obtenida para TCP y UDP según el número de nodos de la subred, para el tipo de comunicación BN-SNB(0) y para cada tipo de tráfico. La comparación se hace respecto a los resultados obtenidos con el menor número de nodos (9 SNs).

A continuación se evaluó el rendimiento de TCP frente a UDP para más tipos de comunicación, concretamente entre SNs, SNA(0)-SNB(0), y entre BN y SN con un nivel de repetición, BN-SNB(1), con las configuraciones de menor y mayor número de nodos presentes, 9 y 21 nodos (topologías de la Figura 110 y la Figura 117, respectivamente). La tasa de bits obtenida en cada caso está recogida en la Figura 120 y la Figura 121 y los valores se pueden consultar en detalle en la Tabla 27.

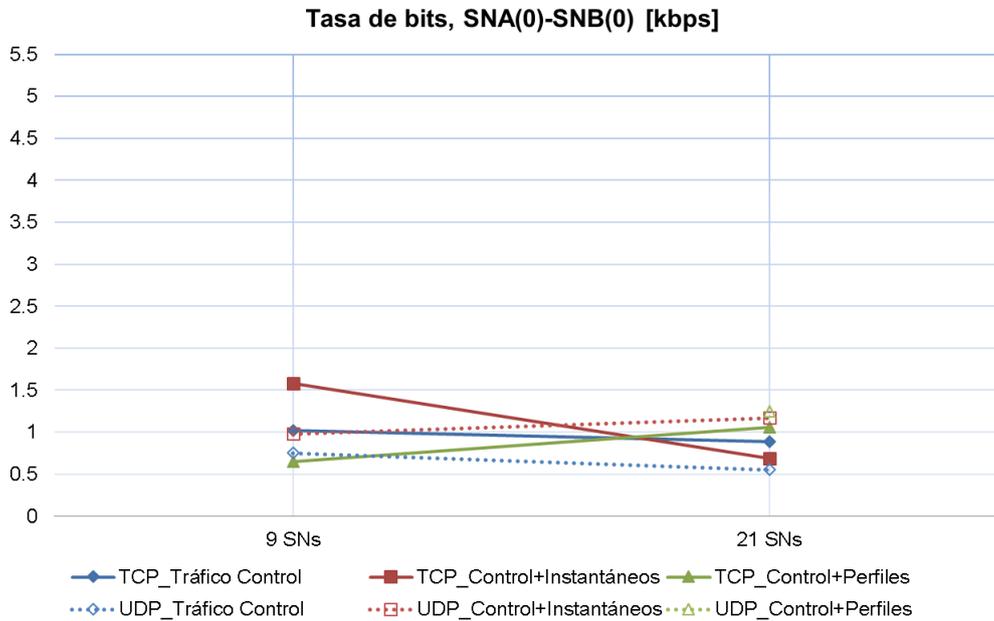


Figura 120. Representación de la tasa de bits obtenida para comunicación SNA(0)-SNB(0) con diferente número de nodos. Se incluyen medidas para TCP y UDP y varios tipos de tráfico.

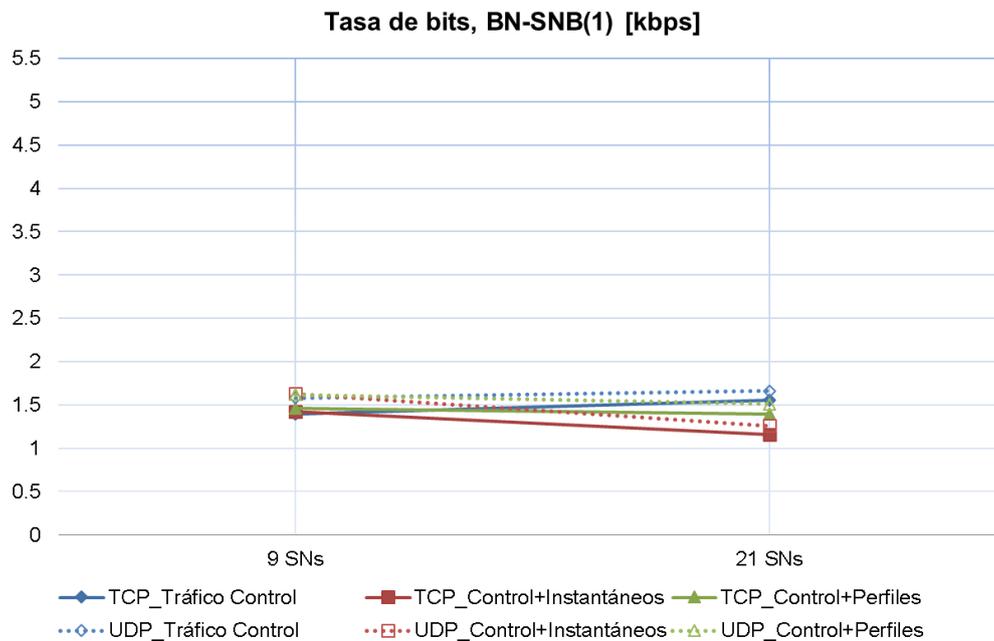


Figura 121. Representación de la tasa de bits obtenida en las medidas del CEDER-CIEMAT para comunicación BN-SN(1) y con diferente número de nodos. Se incluyen medidas para TCP y UDP y varios tipos de tráfico.

- Según el tipo de comunicación: la tasa de bits en UDP también se ve afectada por la introducción de un salto, bien sea entre BN y SN, BN-SNB(1), o entre nodos, SNA(0)-SNB(0). Este aspecto se aborda en profundidad en el apartado siguiente (5.5.3.6).
- Según el tipo de tráfico: tal y como ocurre en TCP, la introducción de “saltos” en la comunicación mitiga las diferencias que distintos tipos de tráfico producen de forma marcada en la tasa de bit de la comunicación BN-SNB(0).
- Según el protocolo escogido: en general la tasa de bits es mejor con UDP que con TCP, aunque esto no ocurre siempre y las diferencias son más ajustadas que en el caso BN-SNB(0) (ver Tabla 25). En el mejor de los casos, UDP presenta una mejora de la tasa de bits de 0.48 kbps, tal y como recoge la Tabla 27.
 - Respecto al *jitter*, los valores obtenidos no bajan de los 5.8 s en el mejor de los escenarios, incluso superando los 8 s en varios de ellos, independientemente del número de nodos y del tipo de tráfico. Esto contrasta con la comunicación BN-SNB(0), en la que los valores de *jitter* oscilan entre 1 y 3 s.
 - Respecto al porcentaje de datagramas perdidos, destaca el hecho de que en todos los escenarios de la comunicación SNA(0)-SNB(0) la pérdida de datagramas es muy significativa (entre el 39 % y el 83 %, como recoge la Tabla 27), algo que no ocurre en la comunicación BN-SNB(1) donde, tal y como sucede en BN-SNB(0), el porcentaje de datagramas perdidos es 0 en todos los casos.
- Según el número de nodos: los valores recogidos en la Tabla 28 muestran una vez más que las diferencias obtenidas no son significativas (la máxima disminución fue de 0.89 kbps y el resto de diferencias apenas superan los 0.4 kbps). Por lo que también se confirma que para las comunicaciones SNA(0)-SNB(0) y BN-SNB(1) el número de nodos aquí considerado no influye de manera decisiva, independientemente del emplear TCP o UDP.

La influencia negativa de los niveles de repetición en la tasa de bits disponible demostrada en TCP en el apartado 5.5.3.2 se confirma en este apartado también para UDP. En este caso, no sólo reduce su tasa de bits sino que aumenta notablemente el *jitter* (más de doble), y afecta de forma decisiva al porcentaje de datagramas perdidos en el caso de comunicación SNA(0)-SNB(0). Comparando ambos protocolos, UDP presenta una ligera mejora frente a TCP en la comunicación BN-SNB(1) (una vez más, a costa de suprimir los mecanismos de control), que podría justificar su uso en determinadas aplicaciones. Sin embargo, el uso de UDP se descarta en comunicaciones SNA(0)-SNB(0) por su elevado porcentaje de datagramas perdidos.

| Tasa de bits [kbps], <i>jitter</i> [ms] y datagramas perdidos (%) | | | | | | |
|-------------------------------------------------------------------|--------------|--------------|--------------|---------------|---------------------|-----------------------------|
| Protocolo | | TCP | | UDP | Datagramas Perdidos | Mejora UDP sobre TCP [kbps] |
| Nº Nodos | Tipo Tráfico | Tasa de bits | Tasa de bits | <i>Jitter</i> | | |
| Comunicación SNA(0) – SNB(0) | | | | | | |
| 9 SNs | Control | 1.02 | 0.75 | 8881.74 | 72 | -0.27 |
| | Instantáneo | 1.58 | 0.98 | 8718.02 | 55 | -0.6 |
| | Perfiles | 0.65 | 1.2 | 8859.17 | 51 | 0,55 |
| 21 SNs | Control | 0.89 | 0.55 | 8742.77 | 83 | -0.34 |
| | Instantáneo | 0.69 | 1.17 | 8007.26 | 39 | 0.48 |
| | Perfiles | 1.06 | 1.25 | 5822.63 | 49 | 0.19 |
| Comunicación BN – SNB(1) | | | | | | |
| 9 SNs | Control | 1.39 | 1.58 | 6617.87 | 0 | 0.19 |
| | Instantáneo | 1.42 | 1.63 | 6149.42 | 0 | 0.21 |
| | Perfiles | 1.46 | 1.62 | 6102.97 | 0 | 0.16 |
| 21 SNs | Control | 1.55 | 1.66 | 5846.96 | 0 | 0.11 |
| | Instantáneo | 1.16 | 1.26 | 8872.11 | 0 | 0.1 |
| | Perfiles | 1.39 | 1.51 | 6488.55 | 0 | 0.12 |

Tabla 27. Resultados de la tasa de bits, *jitter* y porcentaje de datagramas perdidos para comunicación BN-SNB(1) y SNA(0)-SNB(0) para diferente número de nodos en la subred.

| Variación de la tasa de bits [kbps] | | | |
|---------------------------------------------|--------------|--------------|--------------|
| Protocolo | | TCP | UDP |
| Nº Nodos | Tipo Tráfico | Tasa de bits | Tasa de bits |
| Según número de nodos Respecto 9 SNs | | | |
| Comunicación SNA(0) – SNB(0) | | | |
| 21 SNs | Control | -0.13 | -0.2 |
| | Instantáneo | -0.89 | 0.19 |
| | Perfiles | 0.41 | 0.05 |
| Comunicación BN – SNB(1) | | | |
| 21 SNs | Control | 0.16 | 0.08 |
| | Instantáneo | -0.26 | -0.37 |
| | Perfiles | -0.07 | -0.11 |

Tabla 28. Diferencias de la tasa de bits obtenida para TCP y UDP según el número de nodos de la subred, para el tipo de comunicación SNA(0)-SNB(0) y BN-SNB(1) y para cada tipo de tráfico. La comparación se hace respecto a los resultados obtenidos con el menor número de nodos (9 SNs).

5.5.3.6. Extensión del análisis a distintos niveles de repetición

Finalmente, se continuó con una serie de medidas centrada en profundizar en la influencia de la repetición en la tasa de bits. Los resultados de la Figura 112, la Figura 120 y la Figura 121 ya mostraban un notable descenso de la tasa de bits en los casos de repetición frente a la comunicación BN-SN(0). Por ello, se midieron varios escenarios, tanto para comunicación entre BN y SN como entre SNs con diferentes configuraciones de repetición. Para estas medidas se emplearon las topologías con 21 nodos y tipos de comunicación de la Figura 117 y además los de la Figura 122. Los resultados de estas medidas se pueden ver en la Figura 123 y Figura 124 y los valores en detalle en la Tabla 29.

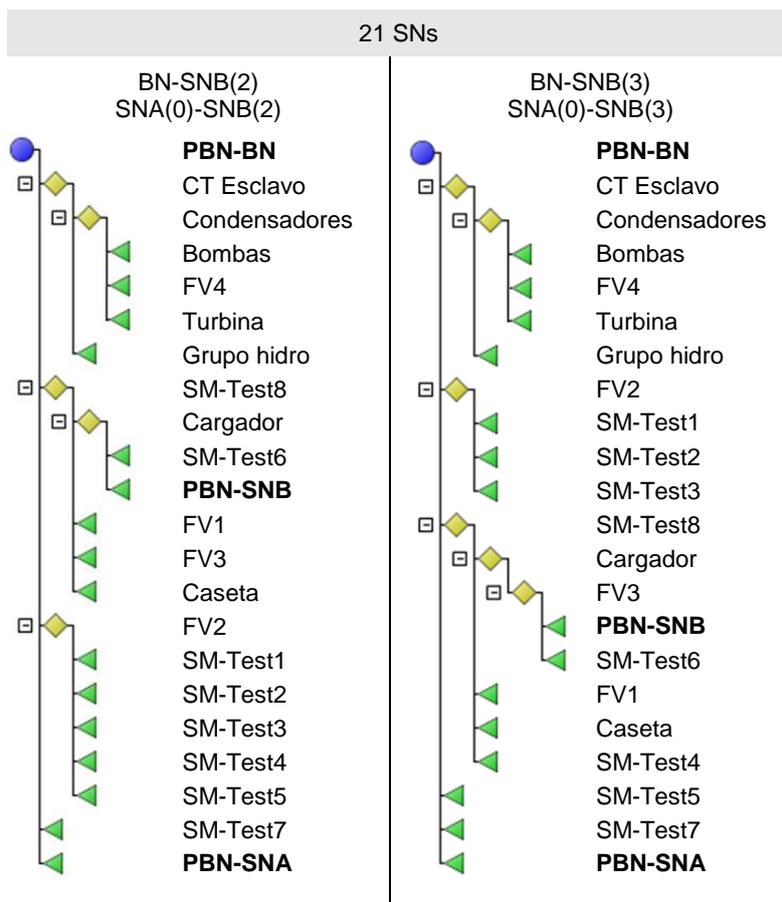


Figura 122. Topologías de la subred con 21 nodos conectados y tipos de comunicación medidas (II).

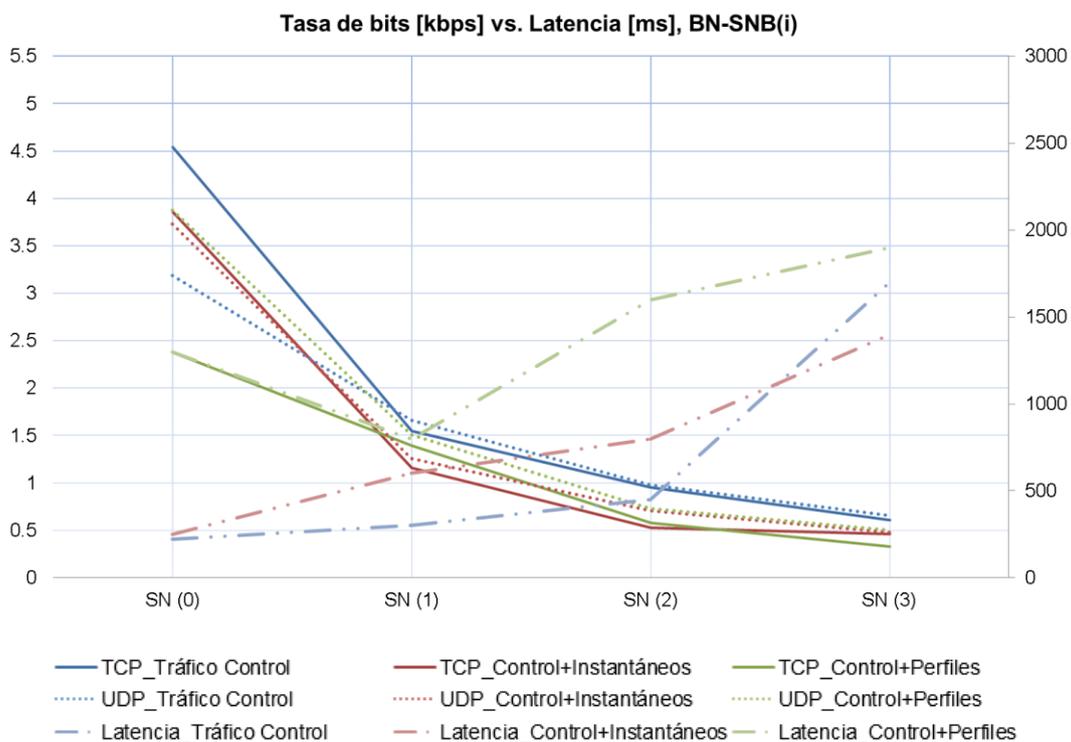


Figura 123. Representación de la tasa de bits obtenida para comunicación entre BN y SN con distintos niveles de repetición en el escenario de 21 nodos. Se incluyen medidas para TCP, UDP, varios tipos de tráfico y los valores medios de latencia.

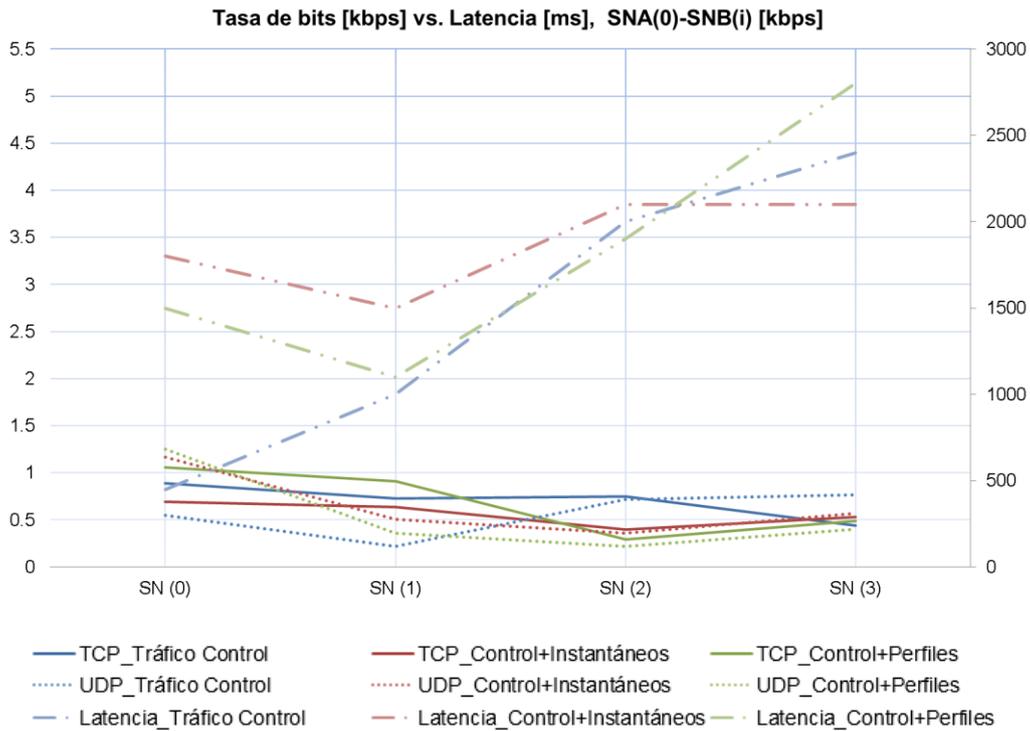


Figura 124. Representación de la tasa de bits obtenida para comunicación entre SNs: cliente a nivel 0 y servidor a distintos niveles de repetición en el escenario de 21 nodos. Se incluyen medidas para TCP, UDP, varios tipos de tráfico y los valores medios de latencia.

- En la comunicación entre BN y SN (Figura 123), se aprecia el notable descenso de la tasa de bit con el primer nivel de repetición, tal y como se vio en la Figura 112, de hasta 2.99 kbps (ver Tabla 30). Sin embargo, esta reducción de la tasa de bit no continúa produciéndose de forma gradual con el incremento de saltos ya que en segundos y posteriores niveles de repetición la reducción es bastante menor, y las diferencias se van atenuando conforme se incrementa el nivel de repetición. Respecto a UDP, la progresión del descenso de la tasa de bits conforme aumenta el nivel de repetición es muy similar a la de TCP, y las mejoras frente a éste son muy poco significativas y no se producen en todos los casos. Además, a partir del segundo nivel de repetición ya se registraron datagramas perdidos en todos los escenarios. Los valores de *jitter* aumentan mucho con la repetición, llegando a superar los 16 s en algunos casos.
- En la comunicación entre SNs (Figura 124), destaca que los valores son claramente inferiores respecto a la comunicación entre BN y SN (Figura 123) Además, la disminución de la tasa de bits con el número de saltos es mucho menos pronunciada, mostrando valores similares en el segundo y en el tercer nivel de repetición (ver Tabla 30). Por lo tanto, se puede concluir que el mayor descenso de la tasa de bits lo produce el paso por el BN, y a partir de ahí, el incremento progresivo de saltos intermedios no afecta de forma decisiva. Respecto a UDP, su ventaja frente a TCP en la tasa de bits deja de existir a medida que aumentan los niveles de repetición y especialmente destacable es el hecho de que en todos los escenarios, incluso SNA(0)-SNB(0), el porcentaje de datagramas perdidos fue muy elevado. El *jitter*

también se ve fuertemente afectado con la repetición, superando los 20 s en el peor de los escenarios.

Los niveles de repetición afectan de forma importante a la tasa de bit disponible. Sin embargo, una vez que se introduce un primer nivel de salto (bien sea BN-SNB(1) o SNA(0)-SNB(0)), la reducción que provocan posteriores saltos es menos significativa, especialmente en la comunicación entre nodos, SNA-SNB, donde las diferencias de las tasas de bits entre SNA(0)-SNB(0), SNA(0)-SNB(1), SNA(0)-SNB(2) y SNA(0)-SNB(3) son comparables a las que existen cuando se introducen 12 nodos en la subred (Figura 120). Esta situación afecta por igual tanto a TCP como a UDP. Además, en el caso de la comunicación entre nodos el uso de UDP no se justifica ya que en todos los escenarios, incluso SNA(0)-SNB(0), el porcentaje de datagramas perdidos fue muy elevado.

Los resultados muestran que la relación de la latencia con la tasa de bits es distinta para ambos tipos de tráfico. En el caso de la comunicación BN-SNB, la tasa de bits varía de forma inversamente proporcional a la latencia, es decir, la latencia aumenta a medida que la tasa de bits se reduce. Sin embargo, el primer nivel de repetición introduce una disminución importante de la tasa de bits que no se refleja en un aumento proporcional de la latencia. Esto se debe a que la gestión del encaminamiento y la transmisión de los datos por parte de los dispositivos intermedios condiciona el comportamiento de ambos parámetros. Por esta misma razón, en el caso de la comunicación SNA-SNB, la relación de proporcionalidad inversa entre la latencia y la tasa de bits no se observa, ya que la latencia aumenta con el número de dispositivos, mientras que la tasa binaria se ve totalmente condicionada por la comunicación a través del BN, y por tanto, de la gestión que este dispositivo realiza en la transmisión de los datos.

| Tasa de bits [kbps], <i>jitter</i> [ms] y datagramas perdidos (%) con 21 nodos | | | | | | |
|--------------------------------------------------------------------------------|--------------|--------------|--------------|---------------|---------------------|-----------------------------|
| Protocolo | | TCP | | UDP | | Mejora UDP sobre TCP [kbps] |
| Nivel | Tipo Tráfico | Tasa de bits | Tasa de bits | <i>Jitter</i> | Datagramas Perdidos | |
| Comunicación BN – SNB(i) | | | | | | |
| | Control | 4.54 | 3.19 | 1327.67 | 0 | -1.35 |
| SNB(0) | Instantáneo | 3.86 | 3.73 | 2189.81 | 0 | -0.13 |
| | Perfiles | 2.38 | 3.88 | 1300.32 | 0 | 1.5 |
| | Control | 1.55 | 1.66 | 5846.96 | 0 | 0.11 |
| SNB(1) | Instantáneo | 1.16 | 1.26 | 8872.11 | 0 | 0.1 |
| | Perfiles | 1.39 | 1.51 | 6488.55 | 0 | 0.12 |
| | Control | 0.95 | 0.98 | 10983.54 | 0 | 0.03 |
| SNB(2) | Instantáneo | 0.53 | 0.71 | 10961.77 | 65 | 0.18 |
| | Perfiles | 0.58 | 0.73 | 4772.22 | 40 | 0.15 |
| | Control | 0.61 | 0.66 | 16774.97 | 69 | 0.048 |
| SNB(3) | Instantáneo | 0.46 | 0.48 | 11142.45 | 81 | 0.02 |
| | Perfiles | 0.33 | 0.5 | 16185.86 | 71 | 0.17 |
| Comunicación SNA(0) – SNB(i) | | | | | | |
| | Control | 0.89 | 0.55 | 8742.77 | 83 | -0.34 |
| SNB(0) | Instantáneo | 0.69 | 1.17 | 8007.26 | 39 | 0.48 |
| | Perfiles | 1.06 | 1.25 | 5822.63 | 49 | 0.19 |
| | Control | 0.73 | 0.22 | 4775.44 | 93 | -0.51 |
| SNB(1) | Instantáneo | 0.64 | 0.51 | 13102.54 | 75 | -0.13 |
| | Perfiles | 0.91 | 0.36 | 10975.78 | 88 | -0.55 |
| | Control | 0.75 | 0.72 | 11532.93 | 59 | -0.03 |
| SNB(2) | Instantáneo | 0.4 | 0.36 | 13338.5 | 83 | -0.04 |
| | Perfiles | 0.29 | 0.22 | 14155.09 | 91 | -0.07 |
| | Control | 0.44 | 0.77 | 11083.11 | 36 | 0.33 |
| SNB(3) | Instantáneo | 0.53 | 0.57 | 14453.56 | 62 | 0.04 |
| | Perfiles | 0.49 | 0.4 | 20130.78 | 72 | -0.09 |

Tabla 29. Resultados de la tasa de bits, *jitter* y porcentaje de datagramas perdidos para comunicación entre BN y SN y entre SNs con distintos niveles de repetición para una subred de 21 nodos.

| Variación de la tasa de bits [kbps] | | | |
|-------------------------------------|--------------|--------------|--------------|
| Protocolo | | TCP | UDP |
| Nivel | Tipo Tráfico | Tasa de bits | Tasa de bits |
| Comunicación BN – SNB(i) | | | |
| Respecto BN – SNB(0) | | | |
| | Control | -2.99 | -1.53 |
| SNB(1) | Instantáneo | -2.7 | -2.47 |
| | Perfiles | -0.99 | -2.37 |
| | Control | -3.59 | -2.21 |
| SNB(2) | Instantáneo | -3.33 | -3.02 |
| | Perfiles | -1.8 | -3.15 |
| | Control | -3.93 | -2.53 |
| SNB(3) | Instantáneo | -3.4 | -3.25 |
| | Perfiles | -2.05 | -3.38 |
| Respecto BN – SNB(1) | | | |
| | Control | -0.6 | -0.68 |
| SNB(2) | Instantáneo | -0.63 | -0.55 |
| | Perfiles | -0.81 | -0.78 |
| | Control | -0.94 | -1 |
| SNB(3) | Instantáneo | -0.7 | -0.78 |
| | Perfiles | -1.06 | -1.01 |
| Respecto BN – SNB(2) | | | |
| | Control | -0.34 | -0.32 |
| SNB(3) | Instantáneo | -0.07 | -0.23 |
| | Perfiles | -0.25 | -0.23 |
| Comunicación SNA(0) – SNB(i) | | | |
| Respecto SNA(0) – SNB(0) | | | |
| | Control | -0.16 | -0.33 |
| SNB(1) | Instantáneo | -0.05 | -0.66 |
| | Perfiles | -0.15 | -0.89 |
| | Control | -0.14 | 0.17 |
| SNB(2) | Instantáneo | -0.29 | -0.81 |
| | Perfiles | -0.77 | -1.03 |
| | Control | -0.45 | 0.22 |
| SNB(3) | Instantáneo | -0.16 | -0.6 |
| | Perfiles | -0.57 | -0.85 |
| Respecto SNA(0) – SNB(1) | | | |
| | Control | 0.02 | 0.5 |
| SNB(2) | Instantáneo | -0.24 | -0.15 |
| | Perfiles | -0.62 | -0.14 |
| | Control | -0.29 | 0.55 |
| SNB(3) | Instantáneo | -0.11 | 0.06 |
| | Perfiles | -0.42 | 0.04 |
| Respecto SNA(0) – SNB(2) | | | |
| | Control | -0.31 | 0.05 |
| SNB(3) | Instantáneo | 0.13 | 0.21 |
| | Perfiles | 0.2 | 0.18 |

Tabla 30. Variación de la tasa de bits para TCP y UDP según el nivel de repetición, para el tipo de comunicación BN-SNB y SNA-SNB y para cada tipo de tráfico. Se incluyen las diferencias respecto a distintos niveles de repetición.

Tal y como se hizo con las tramas de sesiones que incluían tráfico de control y tráfico de medida (Figura 98 a Figura 101 y Figura 103 a Figura 106), así como en el análisis de la ocupación de canal (Tabla 17), a continuación se incluye la relación de tramas identificadas en cada sesión, de cada tipo de tráfico, tanto recibidas como enviadas, así como su representación temporal para los casos más significativos, que han resultado ser los que implicaban algún salto en la comunicación. Los valores registrados están recogidos en la Tabla 31 y se calcularon para cada una de las sesiones TCP, siendo la duración de éstas el tiempo que tardan todas las tramas IP en llegar al destino, parámetro también incluido en la Tabla 31. Estos resultados permiten extraer las siguientes conclusiones sobre el intercambio de tramas en el canal:

- Respecto al tráfico IP introducido: en la Tabla 31 se puede ver cómo, para el mismo tráfico IP enviado en todas las sesiones, el flujo de tramas IP se incrementa notablemente conforme aumenta la repetición. Esto pone de manifiesto un progresivo aumento de las retransmisiones IP, debido a las colisiones existentes y a las tramas erróneas en el tráfico IP que han de ser retransmitidas hasta que se reciban en destino con éxito.
- Respecto a la repetición: en el caso de BN-SNB(1) frente a SNA(0)-SNB(0), ambos con un nivel de repetición, el flujo de tramas IP es marcadamente superior en el segundo caso, lo que implica que el hecho de que los datos tengan que ser gestionados por el BN afecta de forma notable al flujo de tramas en el canal. Es decir, el mecanismo de transmisión de tramas IP del BN en la comunicación entre SNs genera más tráfico IP para el mismo volumen de datos enviados (Tabla 31).
- Respecto a la duración de las sesiones: debido a que en todos los casos se envió el mismo tamaño de datos (100 kB), la duración de las sesiones es inversamente proporcional a las tasas de bits obtenidas. El incremento progresivo de la duración de las tramas a medida que aumentan los niveles de repetición se aprecia de forma clara en la Tabla 31, donde se puede ver que el envío de un mismo volumen de datos se pueden llegar a retrasar hasta 35 minutos debido únicamente a la topología de la red (BN-SNB(0) frente a BN-SNB(3) con tráfico de perfiles). De la misma forma, a medida que aumentan los niveles de repetición, las diferencias según el tipo de tráfico no siguen un patrón definido, tal y como se refleja en la Figura 123 y Figura 124.

El análisis de la ocupación de canal refleja el incremento de los errores y las retransmisiones en las tramas IP, especialmente con el nivel de repetición. Por lo tanto, el mecanismo de transmisión de las tramas IP afecta de forma muy significativa a la tasa de bits y en general este déficit se acentúa con el nivel de repetición. Esta situación también se refleja en el aumento de duración del tiempo necesario para enviar el mismo volumen de tráfico IP, tal y como recoge la Tabla 31.

| Ocupación del canal según el tipo de tráfico | | | | | | | |
|----------------------------------------------|----------------|------|------------------|------|-----------|-------|-------------------------|
| Tipo de Tráfico | Tramas Control | | Tramas de Medida | | Tramas IP | | Duración sesión (mm:ss) |
| | Tx | Rx | Tx | Rx | Tx | Rx | |
| BN-SNB(0) | | | | | | | |
| Sólo control + IP | 363 | 92 | 0 | 0 | 1837 | 320 | 2:56 |
| Control + Instantáneos + IP | 400 | 117 | 228 | 272 | 1873 | 352 | 3:27 |
| Control + Perfil + IP | 639 | 170 | 317 | 1344 | 2094 | 406 | 5:36 |
| BN-SNB(1) | | | | | | | |
| Sólo control + IP | 1176 | 793 | 0 | 0 | 2715 | 2555 | 8:36 |
| Control + Instantáneos + IP | 1344 | 920 | 592 | 1420 | 2884 | 2653 | 11:29 |
| Control + Perfil + IP | 1163 | 802 | 242 | 1220 | 2710 | 2520 | 9:35 |
| BN-SNB(2) | | | | | | | |
| Sólo control + IP | 1577 | 884 | 0 | 0 | 3510 | 3817 | 14:02 |
| Control + Instantáneos + IP | 3150 | 1826 | 1569 | 3769 | 4243 | 4847 | 25:09 |
| Control + Perfil + IP | 2747 | 1621 | 286 | 2207 | 3777 | 3952 | 22:59 |
| BN-SNB(3) | | | | | | | |
| Sólo control + IP | 2463 | 1799 | 0 | 0 | 4935 | 7502 | 21:51 |
| Control + Instantáneos + IP | 3331 | 2711 | 1426 | 3839 | 5091 | 7945 | 28:59 |
| Control + Perfil + IP | 5174 | 4022 | 856 | 7194 | 6263 | 11214 | 40:24 |
| SNA(0)-SNB(0) | | | | | | | |
| Sólo control + IP | 1892 | 759 | 0 | 0 | 5863 | 5864 | 14:58 |
| Control + Instantáneos + IP | 2384 | 1030 | 1274 | 2150 | 6685 | 6993 | 19:19 |
| Control + Perfil + IP | 1433 | 576 | 648 | 2641 | 3086 | 3149 | 12:34 |
| SNA(0)-SNB(1) | | | | | | | |
| Sólo control + IP | 2064 | 962 | 0 | 0 | 3935 | 5967 | 18:15 |
| Control + Instantáneos + IP | 2551 | 1227 | 1032 | 2409 | 4178 | 6152 | 20:50 |
| Control + Perfil + IP | 2069 | 950 | 225 | 1282 | 3988 | 5471 | 14:39 |
| SNA(0)-SNB(2) | | | | | | | |
| Sólo control + IP | 1987 | 1202 | 0 | 0 | 4198 | 6670 | 17:46 |
| Control + Instantáneos + IP | 4917 | 2840 | 2840 | 5259 | 4823 | 8798 | 33:20 |
| Control + Perfil + IP | 5119 | 3259 | 1378 | 8155 | 5982 | 10457 | 45:58 |
| SNA(0)-SNB(3) | | | | | | | |
| Sólo control + IP | 3374 | 1461 | 0 | 0 | 3999 | 7774 | 30:18 |
| Control + Instantáneos + IP | 3406 | 2180 | 1515 | 3227 | 4635 | 7797 | 25:09 |
| Control + Perfil + IP | 3417 | 2119 | 559 | 3165 | 4540 | 7629 | 27:12 |

Tabla 31. Resumen de la ocupación del canal según el tipo de tráfico, incluyendo IP, especificando las tramas enviadas (Tx) y recibidas (Rx) de cada tipo, así como la duración total de la sesión en cada caso. La configuración TCP es la configuración por defecto (tamaño de segmento de 1220 B ventana de 8 kB) y en todos los casos hay 21 SNs.

Finalmente, las gráficas de la Figura 125 hasta la Figura 133 muestran el flujo temporal de las diferentes tramas en el canal con tráfico IP. En primer lugar se recoge una sesión con sólo tráfico de control (Figura 125 - Figura 127). En la Figura 125 y Figura 126 se puede ver cómo el tráfico IP se distribuye de forma relativamente homogénea en bloques de tramas, con espacios intermedios entre ellos de entre 0.17537 s y 0.23921 s (Figura 126). La Figura 127 recoge ampliada la sección punteada de la Figura 126 y permite ver con mayor claridad la distribución de las tramas así como su duración. La mayoría de tramas IP tienen una duración de 0.02836 s y aparecen cada 0.02564 o 0.03738.

A continuación se puede ver el mismo procedimiento para el flujo de tramas incluyendo tráfico con peticiones instantáneas (Figura 128 - Figura 130). En este caso las peticiones instantáneas están distribuidas de forma desigual a lo largo de la sesión. La Figura 129 muestra ampliada una sección de la Figura 128, donde confluyen los tres tipos de tráfico y se puede ver también la agrupación de las tramas IP por bloques, tal y como ocurría en el caso anterior. En la ampliación de la Figura 130 se puede ver con más detalle la disposición de las tramas, que en su mayoría tienen una duración de 0.035648 s, superior a la del caso de sólo tráfico de control.

Finalmente, las representaciones de la Figura 131 a la Figura 133 recogen el flujo de tramas de forma análoga a los casos anteriores, esta vez con tráfico de perfiles. La Figura 131 y la Figura 132 muestran una distribución heterogénea de las tramas y ya no se distinguen el flujo de tramas IP en bloques diferenciados. Como ocurre con el tráfico instantáneo, la mayoría de tramas IP tienen una duración de 0.035648 s.

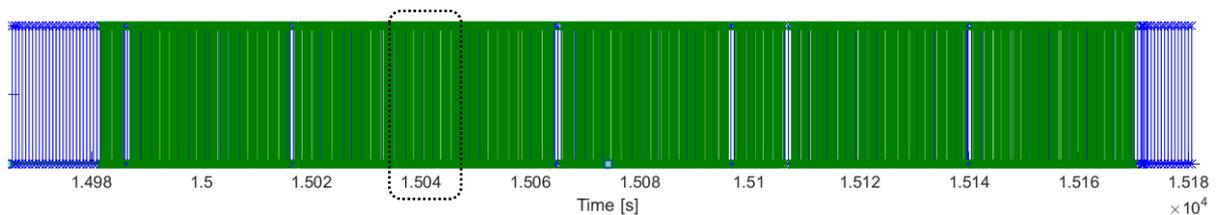


Figura 125. Representación temporal de tramas PRIME en el canal con tráfico de control (en azul), tramas IP (en verde) y sin tráfico de medida.

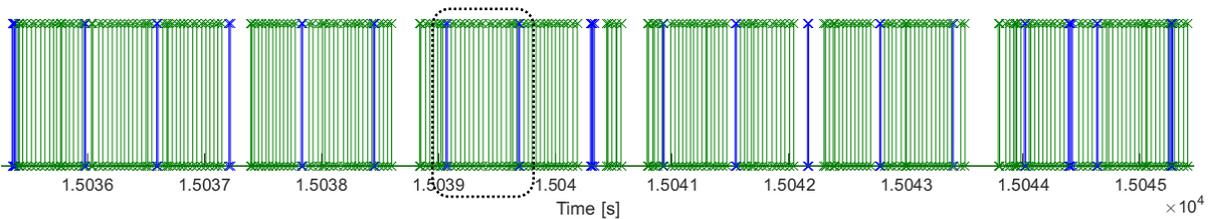


Figura 126. Representación temporal de tramas PRIME en el canal con tráfico de control (en azul), tramas IP (en verde) y sin tráfico de medida: vista ampliada de la sección punteada en la Figura 125.

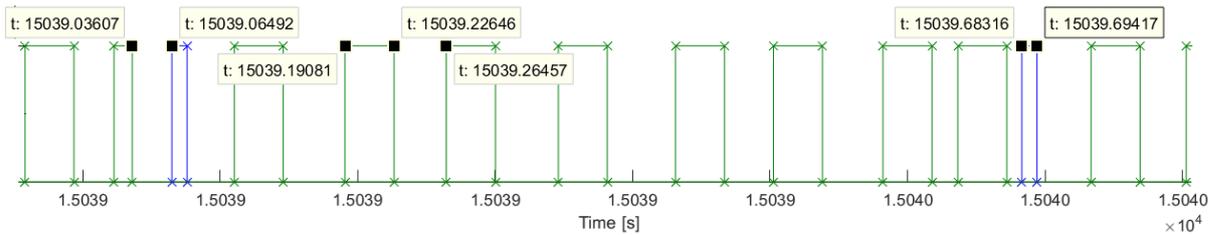


Figura 127. Representación temporal de tramas PRIME en el canal con tráfico de control (en azul), tramas IP (en verde) y sin tráfico de medida: vista ampliada de la sección punteada en la Figura 126.

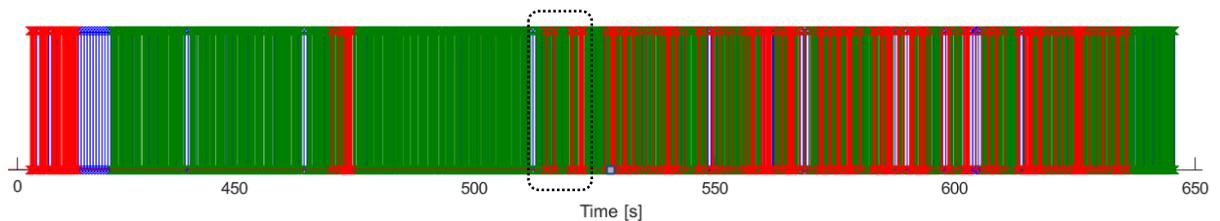


Figura 128. Representación temporal de tramas PRIME en el canal con tráfico de control (en azul), peticiones instantáneas a todos los SMs de la subred (en rojo) y tramas IP (en verde).

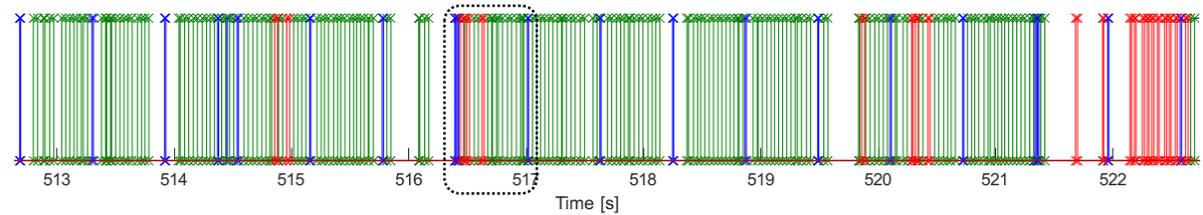


Figura 129. Representación temporal de tramas PRIME en el canal con tráfico de control (en azul), peticiones instantáneas a todos los SMs de la subred (en rojo) y tramas IP (en verde): vista ampliada de la sección punteada en la Figura 128.

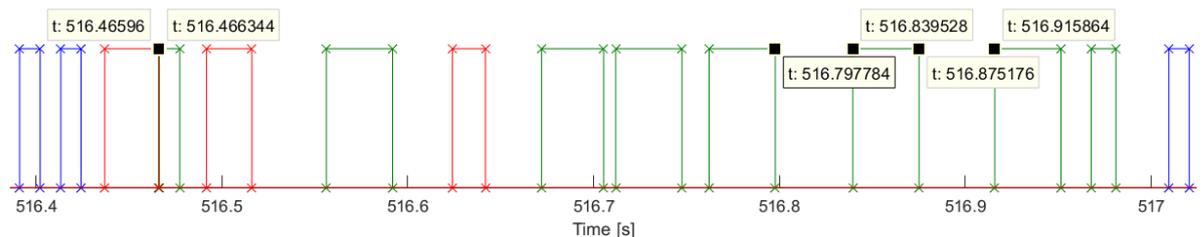


Figura 130. Representación temporal de tramas PRIME en el canal con tráfico de control (en azul), peticiones instantáneas a todos los SMs de la subred (en rojo) y tramas IP (en verde): vista ampliada de la sección punteada en la Figura 129.

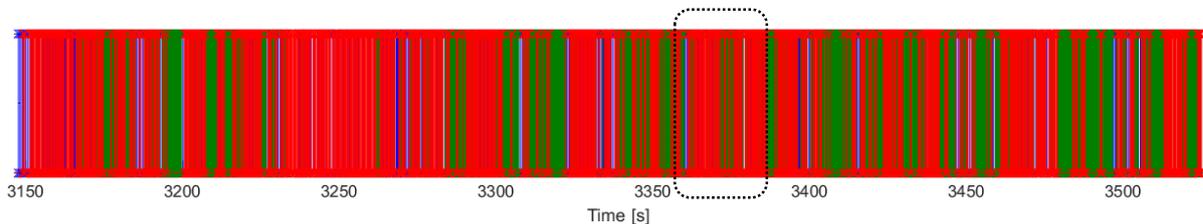


Figura 131. Representación temporal de tramas PRIME en el canal con tráfico de control (en azul), peticiones de perfil temporal un SMs (en rojo) y tramas IP (en verde).

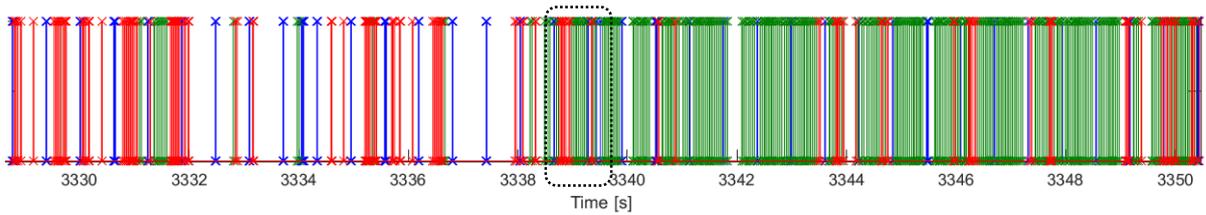


Figura 132. Representación temporal de tramas PRIME en el canal con tráfico de control (en azul), peticiones de perfil temporal un SMs (en rojo) y tramas IP (en verde): vista ampliada de la sección punteada en la Figura 131.

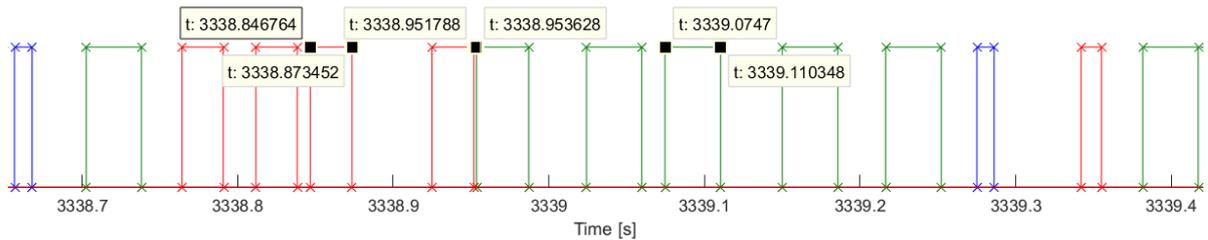


Figura 133. Representación temporal de tramas PRIME en el canal con tráfico de control (en azul), peticiones de perfil temporal un SMs (en rojo) y tramas IP (en verde): vista ampliada de la sección punteada en la Figura 132

5.6. Análisis de la capacidad adicional en un canal que implementa NB-PLC para AMI

5.6.1. Posibilidades del canal para la gestión de recursos distribuidos

Pese a que una gran parte de la literatura sobre microrredes incluye diferentes métodos de control y gestión, los requisitos a nivel de comunicaciones no han sido igualmente abordados, y es que éstos dependen en gran medida de las características particulares de la microrred y de las aplicaciones que se desean abordar [185].

Sin embargo, es posible establecer unos requisitos mínimos necesarios de forma aproximada a través de los trabajos realizados para las SGs. La Tabla 32 recoge las principales características en cuanto a tráfico de las aplicaciones más relevantes en la SG [185], [177], [186], [187]. Todas las fuentes consultadas coinciden en que el criterio más restrictivo, aunque no el único, viene dado por el ancho de banda.

Considerando los resultados obtenidos en la microrred del CEDER-CIEMAT, no serían factibles aquellas aplicaciones que requieran operación en tiempo real o próximo al tiempo real. De ahí en adelante, aplicaciones que precisen anchos de banda del orden de bps hasta unos pocos kbps podrían ser abordadas con el sistema de comunicaciones considerado.

Respecto a la latencia, este parámetro es crucial en aplicaciones analíticas a nivel local y en toma de decisiones a eventos que precisen de mucha rapidez [188]. En cambio, para aplicaciones de gestión menos estrictas el valor de la latencia es variable y los valores obtenidos en las medidas serían aceptables.

Finalmente, el *jitter* es relevante especialmente en aplicaciones en tiempo real que precisen de sincronismo entre emisor y receptor, por lo que en el resto de situaciones su importancia es menor en comparación con los parámetros anteriores.

Focalizando el análisis en la gestión de la DG, los requisitos para su monitorización y control van desde los 9.6 a los 56 kbps [187] y además las características del sistema presentado no serían aplicables a sistemas de gestión complejos [189] [190]. Sin embargo, sí sería posible implementar tareas relacionadas con la DG menos exigentes en cuanto a requisitos al tratarse de una microrred.

La gestión de la DG se puede abordar como un sistema consistente a su vez en un sistema de monitorización y las consecuentes acciones de control. El sistema de monitorización, implementado en un CC, sería el encargado de informar sobre la situación del sistema evaluando el estado de cada uno de los recursos distribuidos. Esta función podría ser implementada a través de señales sencillas de información del estado de cada recurso, aprovechando su SM asociado. Las señales de respuesta volverían al sistema central, CC, que junto con información adicional que pudiera recibir (datos de medida de los propios SMs vía PLC, planificación de tareas, previsión meteorológica, etc.), generará unas acciones a realizar. Llegados a este punto, resulta fácil pensar en un sistema SCADA. La implementación de un sistema SCADA con la tasa de bits presentada podría hacerse para las versiones menos exigentes en cuanto a ancho banda (ver Tabla 32). Sin embargo, estas acciones también pueden plantearse como señales sencillas con consignas P/Q. Las señales P/Q para control de recursos distribuidos son una forma ampliamente extendida para mantener los valores de voltaje dentro del rango deseado minimizando las pérdidas del sistema [191]. Estas consignas irían encapsuladas en paquetes que viajarían como tramas de datos en PRIME. Una vez lleguen al nodo destino, las señales serían convenientemente extraídas e interpretadas mediante actuadores. Finalmente, podrían implementarse señales de conexión/desconexión en los diferentes recursos en anchos de banda disponible de unos pocos kbps e incluso del orden de bps.

La Figura 134 recoge de forma esquemática esta propuesta de gestión, especificando las comunicaciones en cada punto así como el flujo de energía según el recurso. La ventaja de implementar IP (u otra alternativa) sobre un despliegue PRIME es que se sirve de todas las ventajas del protocolo (autoconfiguración de la red, modulaciones robustas, información topológica, etc.), además de contar con el acceso directo al punto de intervención (recursos distribuidos y cargas), a través de los SMs instalados como parte del despliegue. Además, dado que dos SNs pueden comunicarse entre sí, los datos no han de partir necesariamente siempre desde el BN (aunque sí pasarán por él, como parte de su rol de gestor de la subred). Esto resulta interesante de cara a la optimización de las comunicaciones: si un actuador precisa información de un recurso vecino (por ejemplo, su consumo) podrá enviárselo directamente. En una subred como la planteada, con hasta tres niveles de repetición (Figura 117) todos los nodos estarían accesibles con esta implementación.

| Tipos de Tráfico en <i>Smart Grids</i> y Principales Requisitos | | | | |
|-----------------------------------------------------------------|----------------------------------|---------------------|-------------------|-------------------------------|
| Aplicación | Regularidad de Medida | Tamaño de Datos | Ancho de Banda | Latencia |
| Redes domésticas y AMI (LV) | | | | |
| Comunicaciones domésticas | Periódica y bajo demanda | ~ cientos B | ~ kbps por equipo | 2 – 15 s |
| Lecturas SMS | Periódica y bajo demanda | cientos B hasta MB | ~ decenas kbps | ~ centenas ms 2 – 15 s |
| Conexiones y desconexiones | Ocasional | ~ cientos B | ~ bps | ~ centenas ms |
| Gestión de cortes | Ocasional | ~ cientos B | ~ bps | ~ Tiempo real (decenas ms) |
| Respuesta a la demanda | Ocasional y bajo demanda | 100 – 200 B | ~ decenas kbps | 500 ms - minutos |
| Gestión DG | Periódica y bajo demanda | Variable | ~ decenas kbps | 20 ms – 15 s |
| Tarificación | Periódica | 100 B | ~ bps | ~ decenas s |
| Iluminación, control de tráfico | Ocasional | ~ decenas B | ~ bps | ~ centenas s |
| Subestaciones eléctricas | | | | |
| Sincrofasor | Ocasional y bajo demanda | ~ decenas B | 600 – 1500 kbps | 20 – 200 ms |
| SCADA | “Polling” | ~ cientos B | ~ kbps | ~ centenas ms – s |
| Comunicaciones entre subestaciones | Regular | ~ decenas B | Variable | 10 – 20 ms |
| Vigilancia | Periódica y activada por eventos | ~ cientos B | kbps - Mbps | ~ s |
| Redes de distribución | | | | |
| Automatización distribución | Periódica | 100 – 1000 B | ~ Mbps | 25 – 100 ms |
| Señalización y gestión de eventos | Ocasional y activada por eventos | decenas – cientos B | Tiempo real | ~ Tiempo real |
| Gestión de equipos | Periódica y bajo demanda | ~ decenas B | Variable | Variable |

Tabla 32. Principales tipos de tráfico SGs incluyendo la regularidad de medida, el tamaño de los datos implicados y los requisitos de ancho de banda y latencia aproximados.

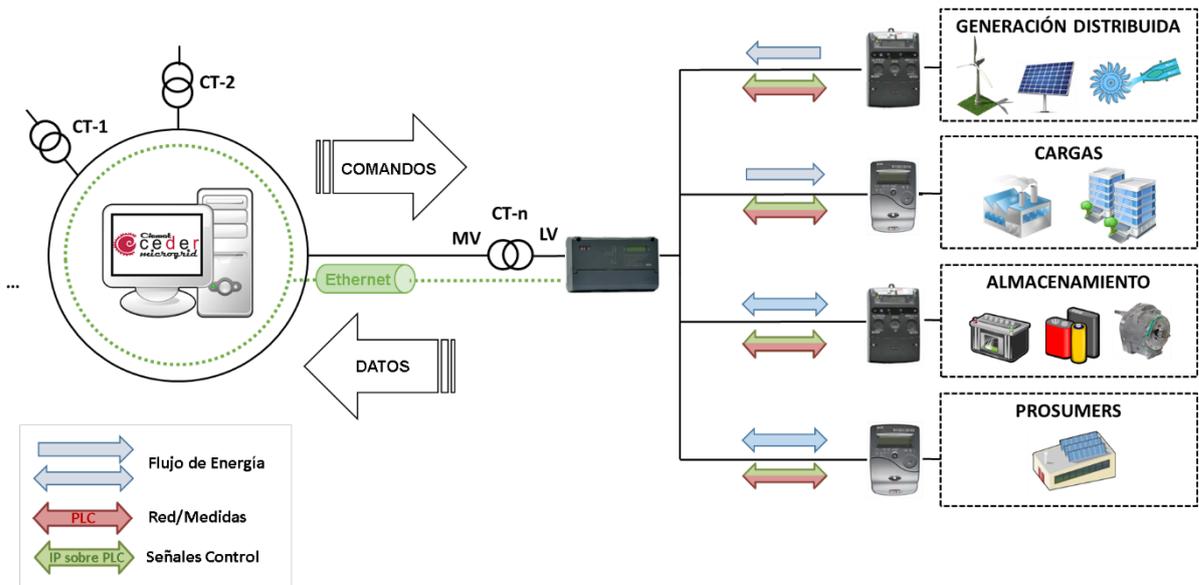


Figura 134. Esquema de la propuesta de gestión de recursos distribuidos en la microrred del CEDER-CIEMAT.

Además de la gestión de recursos distribuidos, existen otras aplicaciones que se podrían abordar con el escenario planteado, entre ellas cabe destacar:

- Comunicaciones en redes domésticas: los requisitos de comunicaciones se adecúan bien con las posibilidades del canal y además ya existen numerosos despliegues de NB-PLC en los que los usuarios finales cuentan con SMs que implementan esta tecnología. Además, existe un progresivo aumento de electrodomésticos que incluyen algún tipo de comunicación. Pese a que los hogares vienen siendo un entorno con múltiples protocolos y vendedores diferentes [1], IP sigue jugando un papel muy importante, lo que hace que la implementación de IP sobre PLC cobre relevancia. Las posibles aplicaciones irían encaminadas a la gestión del lado de la demanda, principalmente. Finalmente, cabe mencionar también las comunicaciones relacionadas con los vehículos eléctricos, en cuanto a gestión de cargas y envíos de señales de estado.
- Aplicaciones en redes de área extensa: en este apartado destaca el concepto de Ciudad Inteligente o *Smart City* y por extensión multitud de aplicaciones derivadas que precisan de anchos de banda del orden de bps o kbps tales como iluminación, riego, señalización, algunas relacionadas con la monitorización y la actuación en remoto e incluso los vehículos eléctricos y la propia gestión de los recursos energéticos de la ciudad. Como ocurre en el ámbito doméstico, las ciudades comienzan a ser un campo con múltiples vendedores y soluciones distintas en las que IP podría hacer las veces de integrador de compatibilidad entre sistemas.
- Aplicaciones para compañías eléctricas: el escenario presentado puede ser útil para algunas tareas importantes para las distribuidoras y comercializadoras eléctricas como la tarificación, la señalización y la gestión de conexiones y desconexiones, principalmente. Estas tareas no tienen requisitos muy estrictos de ancho de banda y la regularidad de medida es lo

suficientemente amplia como para abordarlas con el sistema analizado en este trabajo. Otras aplicaciones, como SCADA, podrían implementarse en las versiones menos exigentes de ancho banda disponible, tal y como se comentó para la DG. Sin embargo, dado que en la mayoría de casos están asociadas a tareas de control, sus necesidades de latencia y fiabilidad no encajarían con el escenario planteado. Lo mismo ocurre con aplicaciones de transmisión de información crítica [177].

Pese a que el estudio de aspectos relacionados con la seguridad está fuera del alcance de este trabajo, merece la pena mencionarlo por la gran importancia que tiene en aplicaciones como las que se plantean anteriormente. De hecho, es necesario abordar la seguridad en SGs y microrredes para garantizar su éxito, lo que también implica garantizar la disponibilidad, confidencialidad, integridad y la autenticación [1]. Tal y como se describe en [192], es posible establecer tres tipos de asociaciones de seguridad entre el nivel de aplicación y los equipos PLC, representados en la Figura 135. La elección del criterio más adecuado dependerá no sólo de las características de la aplicación final sino también de los protocolos de comunicaciones empleados.

1. Seguridad entre la aplicación y el nodo PLC (“end-to-end”). Para ello se establece un túnel de seguridad ininterrumpido entre ambos extremos de la comunicación;
2. Seguridad en la sección PLC y en a nivel de aplicación por separado. En este caso, el túnel se establece en dos dominios distintos: desde la red PLC hasta el *gateway*, y por otro lado, otro túnel desde éste hasta la aplicación destino.
3. Sin túnel de seguridad específico. En este caso se hace uso de las técnicas de seguridad implementadas en los protocolos de comunicaciones empleados en cada caso. En el caso concreto de PRIME, la versión 1.3.6 implementada en los equipos de las medidas incluye métodos de conexión segura, autenticación y privacidad. La versión 1.4 del estándar incluye además mecanismos de encriptación.

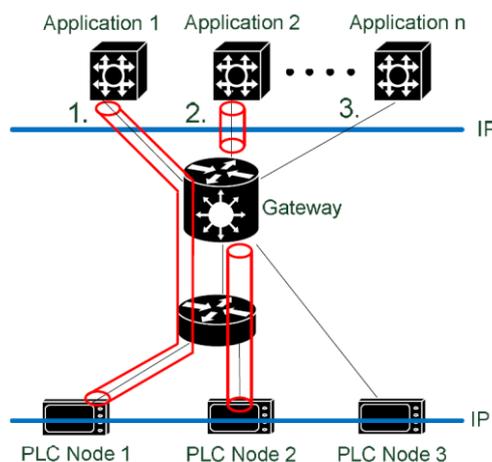


Figura 135. Asociaciones básicas de seguridad para aplicaciones IP sobre PLC [192].

5.6.2. Capacidad de PRIME para incrementar el rendimiento en el canal

En esta sección se analizan las características del estándar PRIME que podrían mejorar la tasa de bits en la implementación de IP sobre PRIME. Este análisis se hace para sus dos versiones: la que incluyen los equipos (v.1.3.6) y la posterior, v1.4.

- La versión 1.3.6 del estándar PRIME contempla características como la conexión directa entre SNs, que no incluyen los equipos de las medidas y que mejorarían la tasa de bit en algunos escenarios. En las repeticiones directas, el *switch* intercambia los paquetes directamente entre los nodos sin necesidad de pasar por el BN. En caso de que ambos nodos estén conectados directamente al BN (nivel 0), la función de repetición directa la seguiría ejerciendo el BN. Esta aplicación hace más efectiva la recepción de los datos entre SNs y en teoría reduciría el cuello de botella que supone el paso por el BN, tal y como se puede ver en la (Figura 123). Sin embargo, no solucionaría la reducción de tasa de bits que se produce en la repetición tradicional.

Focalizando el análisis en los nodos *switch*, estos nodos reenvían los datos de forma selectiva, tal y como se describe en el Capítulo 2, descartando aquellos paquetes que cuyo destino u origen no provenga de nodos conectados a ellos. Esto, por un lado, reduce el flujo de tráfico en la red. Por otro lado, retrasa el intercambio de paquetes ya que en cada uno se ha de comprobar que el identificador de *switch* asociado al nodo origen o destino corresponde con el *switch* que recibe el paquete. Eliminar esta opción supondría que los repetidores reenviarían toda la información que les llegara, ocupando el canal de forma innecesaria. Sin embargo, sería interesante evaluar el coste en tasa de bits que supondría incrementar el tráfico en el canal a costa de reducir a 0 el gasto computacional (y por extensión, el retardo) que supone el reenvío selectivo de las tramas. Además, es posible abordar la mejora de la operativa de los nodos repetidores desde dos puntos de vista:

- Selección del nodo *switch*: el criterio por el cual un nodo promociona a repetidor en lugar de otro que, a priori, cumple los mismos requisitos. En el estándar se incluye la definición de los *switches* y la forma en la que un nodo terminal promociona a *switch* pero no especifica el criterio bajo el cual un nodo promociona a *switch* en lugar de otro, aspecto que queda en manos de la implementación particular de los fabricantes de los equipos. En [193] se demuestra de forma empírica que conforme más se aleja el nodo candidato a *switch* del BN, más se reduce la velocidad de transmisión. De hecho, los resultados de las simulaciones en [194] muestran que la selección del nodo repetidor idóneo en una red de 30 SNs puede reducir la latencia en hasta 5 ms. Reducir la latencia es importante, pero tal y como se demostró en la sección 5.5.3.4, la latencia no es el único factor que influye en la reducción de tasa de bits.

- Reenvío de la información: está relacionada con el acceso al medio, mediante dos formas principalmente (introducidas en el Capítulo 2):
 - CFP: aunque está definida en el estándar, esta particularidad no está implementada en los equipos. En teoría, los nodos han de solicitar previamente acceso al medio libre de colisiones al BN, quien, según la ocupación del canal puede aceptarlo o no. En el caso de que sea una comunicación con varios niveles de repetición, el período CFP se asigna a todos los repetidores intermedios de manera que todo el camino tenga asignado CFP. Pese a la ventaja inherente de una transmisión libre de colisiones, el aumento de CFP conlleva una reducción del SFP (dado que ambas comparten la misma trama MAC, de tamaño fijo), que es precisamente el que utilizan las tramas de control MAC. Por lo tanto, la operativa de la subred puede quedar en entredicho [176]. Es por ello que CFP debería plantearse para aplicaciones críticas que no afectaran la estabilidad de la red.
 - SFP: este es el periodo de tiempo en el que cualquier nodo de la subred puede transmitir datos. Las colisiones que puedan surgir durante este periodo se evita con el algoritmo CSMA-CA, que fija niveles de prioridad en los paquetes a transmitir entre 1-4. Por ejemplo, las tramas MAC de control tienen la máxima prioridad (1). En los equipos de las medidas el periodo SFP es el de toda la trama MAC salvo los *beacons* iniciales, ya que no se incluye CFP. Debido a que el tamaño de la trama es fijo (276 símbolos OFDM), este periodo SFP no se puede cambiar. En cambio, sí que es posible modificar las prioridades MAC, aunque en los equipos de las medidas sólo es posible fijarlas para las tareas programadas en el DC. Las prioridades puede ser útiles para los casos en los que en el canal exista mucho tráfico de medida, ya que se podría priorizar la transmisión de IP. Sin embargo, en el caso de sólo tráfico de control, ambos tendrían prioridad 1, por lo que no es previsible que las tasas de bits resultantes fueran muy diferentes de las obtenidas en la gráfica (Figura 123).
- La versión más reciente de PRIME, v.1.4, incluye la ampliación de la frecuencia de trabajo hasta los 500 kHz, lo que se traduce en mayor flexibilidad y tasas de bits más elevadas, aunque en Europa su rango de operación permanecería delimitado a 95 kHz (CENELEC-A). Sin embargo, el incremento de la tasa de bits no garantiza que la funcionalidad IP sobre PRIME no se vea igualmente afectada por los niveles de repetición. Esta nueva versión también introduce una serie de mejoras (reducción de tramas *ALIVE*, flexibilidad del tamaño de las tramas MAC) que conllevan una reducción de tráfico a nivel global, como se recoge de forma empírica en [195]. Pese a esto, el tráfico global no ha resultado ser el aspecto más influyente en la tasa de bits obtenida, tal y como se ha demostrado con anterioridad. Respecto a la operativa de los nodos repetidores, la nueva versión tampoco especifica el criterio por el que un nodo promociona a

switch en lugar de otro. En cambio, sí introduce novedades respecto al acceso al medio:

- La principal mejora de la capa MAC para este estudio es que las tramas MAC se han redefinido. Por un lado, los *beacons* y CFP se incluyen en el mismo área CFP, al comienzo de la trama MAC. Como es el BN el que ha de autorizar el CFP en base a la situación del canal, la transmisión de *beacons* se hará de manera más óptima, optimizando los recursos. Por otro lado, el tamaño de la trama MAC es flexible (276, 552, 828 o 1104 símbolos). La ventaja automática de esta característica es que reduce el tiempo dedicado a la transmisión de *beacons* en cada trama y se puede dedicar más tiempo a la transmisión de datos. Esto es especialmente interesante para la mejora de la tasa de bits, ya que los datos IP pueden ir asociados a tramas MAC más largas por lo que, considerando la ocupación de canal recogida en las gráficas de la Figura 125 a la Figura 133, se aprovecharía mejor el canal disponible. En el caso de co-existencia con otros tipos de tráfico, la introducción de prioridades MAC resultaría ventajosa.

De este análisis se pueden extraer dos ideas principales. Por un lado, existen funcionalidades del estándar, tanto en su versión 1.3.6 como en la versión 1.4, que podrían contribuir a la mejora de la tasa de bits en aplicaciones IP sobre PRIME. Se trata de las conexiones directas entre SNs (lo que elimina el paso por el BN) y de una nueva trama MAC, más flexible en cuanto a tamaño. Además, el uso de prioridades MAC podría reducir la latencia del tráfico prioritario. Por otro lado, la repetición selectiva de los *switches* parece tener un peso importante teniendo en cuenta los resultados obtenidos, pero es difícil evaluar el retardo que produce la comprobación del origen y destino de las tramas en el rendimiento del canal con las herramientas de las que se dispone. Como alternativa para redes de un pequeño número de nodos podría ser interesante permitir la desactivación de esta opción y configurar los *switches* de forma que fueran meros repetidores de la tramas que les llegan.

5.7. Conclusiones

La evaluación de la idoneidad del canal adicional existente en un sistema AMI basado en PRIME se ha realizado de forma empírica a través de una campaña de medidas que ha evaluado diferentes aspectos:

- En primer lugar, es necesario verificar que efectivamente existe **espacio libre en el canal** cuando el sistema AMI está operativo. Esta situación se ha comprobado de forma empírica en tres escenarios distintos representativos del funcionamiento de un sistema de telemedida, tanto de forma numérica (Tabla 17) como con la representación temporal de las tramas (Figura 93 - Figura 96, Figura 98 - Figura 101 y Figura 103 - Figura 106), en sesiones de medida de la misma duración en todos los casos:
 - Tráfico de sólo control: en este escenario sólo existen las tramas de señalización y de control que permiten el buen funcionamiento y el mantenimiento de la subred de comunicaciones. Este es el tipo de

tráfico que está siempre presente. El canal disponible en este escenario alcanza el 97.3 %.

- Tráfico de medida, a su vez engloba dos tipos de tráfico:
 - Tráfico instantáneo: es el tráfico resultante de las peticiones de medida instantáneas a todos los SMs de la subred y se suma al tráfico de control existente por defecto. Se programan en el DC, quien interroga cada minuto a todos los SMs registrados en él. Se midió para el mayor número de SMs disponible, 19, y el porcentaje de canal disponible disminuyó hasta el 92.3 %. Por tanto, las peticiones instantáneas realizadas cada minuto a 19 SMs suponen un incremento de la ocupación del canal de un 5 % respecto al escenario de sólo tráfico de control.
 - Tráfico de perfiles: es el tráfico que se origina cuando se interroga a un SM sobre sus datos de medida en un rango de tiempo concreto, que se especifica en el momento de hacer la petición. Como ocurre con el tráfico instantáneo, también se añade al tráfico de control, que está siempre presente en la subred. En este escenario, el porcentaje de canal disponible descendió hasta el 83.4 %. Es decir, respecto al tráfico de sólo control y respecto al tráfico de peticiones instantáneas, la introducción de los perfiles horarios generó una ocupación adicional del 13.9 % y del 8.9 %, respectivamente.

Además, se comprobó de forma empírica que, en un mismo rango temporal equivalente, la densidad de tramas que genera el tráfico de perfiles es mayor que la que produce las peticiones instantáneas, para el número de nodos considerado.

La ocupación de canal también se analizó en los diferentes escenarios considerados (en cuanto tipo de comunicación, nivel de repetición y tráfico en el canal) en presencia de tramas IP, tal y como recoge la Tabla 31. Los resultados reflejan el aumento de tramas IP erróneas y retransmitidas a medida que aumenta el tráfico en el canal y, especialmente, con el nivel de repetición. Además, el incremento de la duración de las sesiones para el mismo tráfico enviado en todos los casos evidencia el bajo rendimiento del canal a medida que aumentan los niveles de repetición y con el paso intermedio por el BN.

- A continuación, se evaluó la **latencia** con el objetivo de identificar los cuellos de botella en el canal. Para ello, se evaluaron los tres tipos de tráfico considerados para estas medidas, dos tipos de comunicación (entre BN y SN, y entre SNs) y con diferentes niveles de repetición. La Figura 109 resultó muy ilustrativa para identificar los parámetros que más afectan a la latencia:
 - En la comunicación entre SNs, SNA-SNB, el cuello de botella se produce directamente en la comunicación sin repetición entre nodos,

para los escenarios con tráfico instantáneo y con tráfico de perfiles. Donde la latencia aumenta hasta en 1.45 ms con respecto al caso de tráfico de sólo control (ver Tabla 18). Esto se debe al paso por el BN, situación que ocurre en la comunicación entre nodos. A medida que se introducen niveles de repetición, las diferencias con el tráfico se diluyen y las latencias alcanzan valores medios de hasta 2.8 ms. El peor caso registrado fue de 3.6 s, en el tipo de comunicación SNA(0)-SNB(3) con tráfico de perfiles.

- En la comunicación entre BN y SNB, la latencia aumenta progresivamente con el tipo de tráfico (la latencia es mayor con tráfico de perfiles) y con el nivel de repetición, de forma que en el tercer salto las latencias se equiparan, independientemente del tipo de tráfico. Por lo tanto, los cuellos de botella se encuentran en los niveles de repetición. Las mayores valores medios registraron valores de hasta 1.9 ms, en el tipo de comunicación BN(0)-SNB(3) con tráfico de perfiles y el peor caso registrado superó los 3 s (BN-SNB(3))
- Finalmente, se cuantificó el rendimiento del canal adicional mediante la **tasa de bits**. Una forma práctica de evaluar la capacidad extra del canal es mediante una herramienta para medir el rendimiento de la red en cuanto a comunicaciones IP, como la utilizada en el sistema de medidas de este estudio.

Las primeras medidas realizadas en la microrred del CEDER permitieron validar los resultados de otro proyecto realizados en laboratorio [180], cuya comparación se recoge en la Tabla 19. De dicha comparativa se desprende que, para una subred con 9 SNs, la tasa de bits en la comunicación entre el BN y un SN, y entre SNs alcanza los 4.88 kbps y 1.51 kbps, respectivamente. La presencia de tráfico de medida disminuye la tasa de bits obtenida en todos los casos, resultando un rango de valores desde los 4.47 a los 2.39 kbps para la comunicación BN-SN, y desde los 1.55 kbps hasta los 1.26 kbps para la comunicación SN-SN.

Sin embargo, tal y como se desprende de los resultados obtenidos en la sección 5.5, es importante evaluar otros parámetros que afectan a la tasa de bits, ya que su correcto ajuste permitirá el máximo rendimiento del uso del canal. En el caso concreto de IP sobre PRIME estos parámetros resultan ser, de mayor a menor afcción en la tasa de bits obtenida:

- Existencia de un salto intermedio, bien sea por una comunicación entre SNs (ya que el tráfico ha de pasar por el BN), independientemente del número de niveles de repetición, o por una comunicación entre BN y SN con al menos un nivel de repetición. Según las medidas realizadas, esta situación es la que más influye en la tasa de bits resultante y el paso por el BN (comunicación entre SNs) ha resultado ser la más restrictiva de las dos. De hecho, tan sólo la introducción de un nivel de repetición en una subred de 21 SNs (bien sea un *switch* estrictamente hablando o en el paso por el BN en la comunicación entre SNs) reduce la tasa de bits a

los niveles a los que lo harían 512 SNs (Figura 118), de acuerdo a las simulaciones presentadas en [180] sobre la influencia del número de nodos de la subred en la tasa de bits. Esto obliga necesariamente a conocer la topología de la subred, y específicamente, los niveles jerárquicos en los que se encuentran los nodos receptores y, en caso de comunicación entre nodos, también el de los emisores.

- Si la comunicación es entre nodos, la disminución de la tasa de bits con el nivel de repetición es proporcional desde el primer salto, a diferencia del caso BN-SN, pero a partir del segundo salto las reducciones de ancho de banda son mínimas y no se notan diferencias significativas según el tipo de tráfico. Finalmente, aunque para los números de nodos considerados en las medidas no habido mucha variación de la tasa de bits, parece evidente pensar que variaciones mucho más grandes en el número de nodos tendrán una notable influencia en la tasa de bits.
- Si se trata de comunicación entre el BN y un nodo y sólo hay un salto intermedio, BN-SNB(1), es importante tener presente que la reducción de la tasa de bits es notable respecto al caso de comunicación entre BN y SN, BN-SNB(0), y en proporción, esta reducción será mayor en los casos de tráfico de sólo control (casi 3 kbps, tal y como se recoge en la Tabla 30). Sin embargo, para niveles de repetición mayores, la disminución es progresiva con el nivel de repetición y en proporción menor que la existente entre nivel 0 y nivel 1 (como máximo 0.81 kbps). Esta disminución es similar para todos los tipos de tráfico. Como ocurría en el caso anterior, la variación del número de nodos presentes no ha supuesto grandes modificaciones.
- Tipo de tráfico existente en el canal: se trata del siguiente factor a considerar, debido al incremento de tramas que producen. El tipo de tráfico tiene especial relevancia en las comunicaciones entre BN y SNB sin repetición, BN-SNB(0), donde el tráfico de perfiles puede disminuir la tasa de bits en hasta 1.7 kbps (Tabla 21). En cambio, el paso por el BN en las comunicaciones entre SNs y la introducción de repeticiones diluyen las variaciones que producen los diferencias tipos de tráfico.
- Elección del protocolo (TCP frente a UDP): En las medidas realizadas UDP presenta en general mayores resultados, de hasta 1.5 kbps, tal y como se recoge en la Tabla 25 y en la Tabla 27, aunque cuando se introducen niveles de repetición estas mejoras se diluyen (Tabla 29). Sin embargo, UDP maximiza la tasa de bits a costa de sacrificar mecanismos de control que garanticen la correcta recepción de los datos, por lo que será el tipo de aplicación final la que determine si esos ajustados incrementos de la tasa de bits compensan el hecho de no tener mecanismos de control. En cualquier caso, las medidas realizadas con UDP en comunicación entre BN y SN con dos o más niveles de repetición y entre SNs, sin importar nivel de repetición, presentaron

pérdidas de datagramas en todos los casos (Tabla 29), por lo que se habría que descartar el uso de UDP en estos casos. Respecto al *jitter*, se ha comprobado que el nivel de repetición hace que su valor aumente notablemente.

- El número de nodos considerado en las medidas ha resultado ser una de las variables que menos ha influido en la tasa de bits, con una disminución máxima de 0.5 kbps (Tabla 24). En cualquier caso, teniendo en cuenta que un que un mismo DC puede gestionar más de 400 SNs [184], el número de nodos disponible en el CEDER-CIEMAT no es suficiente para obtener resultados significativos.
- Parámetros de configuración TCP: para una microrred de las características consideradas, la variación del tamaño de segmento y de la ventana en TCP no presentan mejoras destacables y, sobre todo, no siguen un patrón definido: mientras que en un escenario concreto una configuración TCP puede suponer un incremento de hasta 1.27 kbps, en otro escenario distinto en cambio reduce el ancho de banda (Tabla 22 y Tabla 23). Por lo tanto, para un escenario como el considerado se han tomado como válidas las configuraciones por defecto: tamaño de segmento de 1220 B y tamaño de ventana de 8 kB.

Respecto a las posibilidades del canal adicional para aplicaciones relacionadas con la DG, del análisis del apartado 5.6.1 se puede extraer que la implementación de IP sobre PRIME podría emplearse para algunas tareas menos exigentes de gestión, tales como la monitorización y la actuación en remoto (conexiones/desconexiones). En concreto, la implementación de IP sobre PRIME en una microrred del tamaño considerado podría abordar aplicaciones en las que la tasa de bits no superara los 4.5 kbps y 5.3 kbps en TCP y UDP, respectivamente. Cabe destacar también que la flexibilidad de IP permite aplicaciones diferentes a las relacionadas con la gestión, con potenciales campos de aplicación en redes domésticas y de área extensa, como aplicaciones relacionadas con las *Smart Cities*.

Finalmente, el análisis de las posibilidades de PRIME para incrementar la tasa de bits (sección 5.6.2) muestra que la implementación de los fabricantes hace que exista margen de mejora y que algunas novedades introducidas en la nueva versión del estándar podrían mejorar el rendimiento en este sentido, ya que, tal y como se ha demostrado en estas medidas, el factor más limitante en cuanto al rendimiento del canal se encuentra en la gestión del tráfico entre nodos y en los niveles de repetición.

6. APORTACIONES DE LA TESIS Y LÍNEAS FUTURAS

6.1. Aportaciones

En esta Tesis se ha evaluado la capacidad de un sistema AMI basado en PLC para la gestión de recursos eléctricos distribuidos. Para ello, el trabajo se ha dividido en dos líneas de investigación principales. Por una parte, se han caracterizado las emisiones supraarmónicas de los recursos distribuidos en una microrred real y se ha evaluado su influencia en un sistema de comunicaciones NB-PLC basado en el estándar PRIME. Por otra parte, se ha analizado la viabilidad de introducir tráfico IP en esa misma red de comunicaciones PRIME.

Atendiendo a las emisiones supraarmónicas y siguiendo los objetivos planteados en el Capítulo 1, las aportaciones de esta primera línea de trabajo se pueden enumerar como sigue:

- **Caracterización de las emisiones supraarmónicas de los recursos distribuidos en el rango 2-150 kHz en una microrred real**

La caracterización de las emisiones supraarmónicas de los DER de una microrred real ha supuesto, por un lado, incrementar las medidas de carácter empírico de recursos conocidos como los inversores FV y, por otro lado, un aporte de medidas de equipos que hasta ahora no habían sido abordados, tales como turbinas, bombas hidráulicas, y cargadores de baterías.

En base a estas medidas se pueden clasificar los espectros obtenidos en dos grandes grupos:

- Inversores FV y cargadores (equipos con convertidores): su espectro se caracteriza por una inyección principal que coincide con la frecuencia de conmutación del equipo y una serie de armónicos, en general, de amplitud decreciente y con aparición en la banda PRIME a partir del 2º armónico (cargador) y del 3º armónico (inversores FV).
- Equipos hidráulicos, bomba y turbina (equipos sin convertidores pero con conmutación): se caracterizan por tener un ruido coloreado en todo el rango de medida sin apenas aparición en la banda PRIME. Los niveles de esas emisiones se equiparan al ruido de fondo conforme aumenta la frecuencia.

Así mismo, la medida por fases en un equipo trifásico ha demostrado que las inyecciones supraarmónicas no siempre se hacen por igual en todas las fases. En concreto, todas las medidas mostraron diferencias, y las mayores se han encontrado para el 2º y 3º armónico, superando los 16 dB en el peor de los casos. En el caso del ruido de fondo, se han identificado diferencias entre fases de hasta 10 dB, pero no en todos los casos. Estas variaciones estarían relacionadas con las impedancias de cada fase y con la electrónica de los dispositivos. Además se ha comprobado que para las distancias consideradas, ni el nivel de la inyección principal, ni los armónicos de dicha inyección ni las diferencias entre fases, varían con la distancia.

Finalmente, la realización de las medidas en dos fases, con el dispositivo aislado y con el dispositivo en funcionamiento con el resto de equipos vecinos encendidos, ha permitido caracterizar las emisiones secundarias. El contexto de una microrred ha aportado valor a las medidas ya que los dispositivos vecinos del equipo bajo prueba son a su vez DERs que generan emisiones en el rango supraarmónico y que han sido previamente caracterizados de forma aislada. En concreto, se ha demostrado la presencia de las emisiones secundarias en tres escenarios:

- Presencia de emisiones secundarias en una red trifásica procedentes de un dispositivo vecino;
 - Presencia de emisiones secundarias en una red monofásica procedentes de un dispositivo vecino localizado tanto en la misma fase como en otra fase eléctrica;
 - Descenso de los niveles de los supraarmónicos producidos por un dispositivo en presencia de otros DERs vecinos. Se ha demostrado de forma empírica que algunas instalaciones FV tienden a “absorber” los supraarmónicos presentes en la red originados por otras equipos cercanos [LVPV].
- **Análisis de la influencia de las emisiones supraarmónicas en el rango 2-150 kHz en PLC-PRIME**

El análisis empírico de las emisiones supraarmónicas de los DERs en un sistema AMI basado en PRIME ha permitido identificar posibles afecciones sobre el sistema de comunicaciones. En concreto, se ha demostrado que tanto las emisiones primarias como las secundarias pueden afectar a las comunicaciones NB-PLC; y que además existen diferentes niveles de afección:

- Reducción de la cobertura de los nodos: la probabilidad de comunicarse con éxito con el nodo base puede verse reducida. Este escenario se ha detectado tanto para las emisiones primarias como para las emisiones secundarias;
- Reconfiguración de la topología de la subred: este escenario supone algún cambio en la red, por ejemplo, que un nodo promocione a *switch* o que un nodo cambie de *switch* al que se conectarse. Este escenario se ha detectado para las emisiones secundarias;
- Cancelación de las comunicaciones de un nodo: el nodo pierde la capacidad de comunicarse y se desconecta. No vuelve a recuperar sus funciones hasta que la fuente de supraarmónicos se apague. Se trata del peor de los escenarios y se ha identificado tanto para las emisiones primarias como para las emisiones secundarias.

La extrapolación de estos daños a una subred con más nodos o niveles de repetición puede poner en entricho las comunicaciones de la sección de la

red afectada por las emisiones e incluso, en el peor de los casos, cancelar las comunicaciones por completo.

Finalmente, la captura de señales PRIME durante las sesiones ha permitido comprobar su degradación en los casos en los que las comunicaciones se veían afectadas. Por lo tanto, se ha demostrado que el análisis de la afección en las comunicaciones no se basa únicamente en la amplitud de las emisiones, sino que existen otros factores del canal de propagación que influyen en el estudio, tales como impedancias y cargas conectadas.

Continuando con la segunda línea de trabajo, el análisis de la viabilidad de IP sobre PRIME, a continuación se describen las aportaciones en este sentido:

- **Validación de los resultados obtenidos en laboratorio del rendimiento de IP sobre PLC-PRIME en un entorno real**

Como paso previo a la validación de los resultados de laboratorio, se ha demostrado de forma empírica que existe canal adicional en PRIME para aplicaciones añadidas además de la teledida. Para ello, se ha cuantificado dicha capacidad adicional en tres escenarios representativos de un sistema AMI:

- Sólo tráfico de control: el canal disponible en este escenario alcanza el 97.3 %;
- Tráfico de medida, a su vez:
 - Tráfico instantáneo: el porcentaje de canal disponible es del 92.3 % para un escenario con 19 SMs, lo que supone un 5 % más de ocupación de canal respecto al escenario de sólo control.
 - Tráfico de perfiles temporales: el canal disponible descendió hasta el 83.4 %, es decir, la introducción de los perfiles horarios generó una ocupación adicional del 13.9 % y del 8.9 %, respectivamente.

Además, se ha medido la latencia para los tres tipos de tráfico, dos tipos de comunicaciones (entre BN y SN, y entre SNs) y diferentes niveles de repetición. Las mayores diferencias se agrupan por el tipo de comunicación:

- En la comunicación entre SNs, SNA-SNB, el cuello de botella se produce directamente en la comunicación sin repetición entre nodos, donde se producen diferencias de hasta 1.45 ms según el tipo de tráfico. A medida que se introducen niveles de repetición, las diferencias con el tráfico se diluyen y las latencias alcanzan valores medios máximos de hasta 2.8 ms.
- En la comunicación entre BN y SN, BN-SNB, la latencia aumenta progresivamente con el tipo de tráfico (la latencia es mayor con tráfico de perfiles) y con el nivel de repetición, de forma que en el tercer salto las latencias se equiparan, independientemente del tipo

de tráfico. Los mayores valores medios registraron valores de hasta 1.9 ms.

Tras esta caracterización previa, se desarrolló el sistema de medida que permitió validar de forma empírica los resultados de otro proyecto relacionado y obtenidos en laboratorio [Adaptation].

En concreto, se ha demostrado de forma práctica que, sin niveles de repetición y para una subred con 9 SNs, la tasa de bits en la implementación de IP sobre PRIME la comunicación entre el BN y un SN, y entre SNs alcanza los 4.88 kbps y 1.51 kbps, respectivamente. En presencia de tráfico de medida, el rango de valores va desde los 4.47 a los 2.39 kbps para la comunicación BN-SN, y desde los 1.55 kbps hasta los 1.26 kbps para la comunicación SN-SN.

- **Maximización del rendimiento de IP sobre PLC-PRIME**

Se ha demostrado que existen otros factores que afectan al rendimiento de IP sobre PRIME y además se pueden identificar diferentes niveles de afección según la variable considerada. En concreto, de mayor a menor afección se pueden enumerar como sigue:

- Paso por el BN: se ha demostrado que se trata de la mayor afección detectada, y ocurre en las comunicaciones entre SNs, ya que el tráfico ha de pasar necesariamente a través de él. Comparando una comunicación entre SNs sin repetición, SNA(0)-SNB(0), con una comunicación entre BN y SN sin repetición, BN-SNB(0), las diferencias alcanzan hasta 3.48 kbps en el peor de los casos.
- Niveles de repetición, su influencia depende del tipo de comunicación:
 - Si se trata de comunicación entre el BN y SN con sólo un salto intermedio, BN-SNB(1), la reducción de la tasa de bits es notable respecto a BN-SNB(0), alcanzando los 3 kbps de diferencia. Sin embargo, para niveles de repetición mayores, la disminución es progresiva con el nivel de repetición y en proporción menor que la existente entre nivel 0 y nivel 1 (como máximo 0.81 kbps).
 - Si la comunicación es entre nodos, la disminución de la tasa de bits con el nivel de repetición es proporcional desde el primer salto y a partir del segundo salto las reducciones de ancho de banda son mínimas.
- Tipo de tráfico existente en el canal: las medidas han demostrados que tiene especial relevancia en las comunicaciones BN-SNB(0), donde el tráfico de perfiles puede disminuir la tasa de bits en hasta 1.7 kbps. En cambio, el paso por el BN en las comunicaciones entre SNs y la introducción de niveles de repetición en general, diluyen las variaciones que producen los diferencias tipos de tráfico.

- Elección del protocolo (TCP frente a UDP): se ha comprobado que UDP presenta en general mayores resultados, de hasta 1.5 kbps, pero que se diluyen con los niveles de repetición. Sin embargo, en las medidas realizadas con UDP en comunicación entre BN y SN, con dos o más niveles de repetición, y entre SNs, sin importar nivel de repetición, hubo pérdidas de datagramas en todos los casos. Respecto al *jitter*, se ha comprobado que el nivel de repetición hace que su valor aumente notablemente, alcanzando prácticamente los 20 s en el peor de los casos, lo que supone 15 s más que el *jitter* obtenido en el mismo escenario sin repetición.
- Número de nodos en la subred: para los tamaños considerados de subred (entre 9 y 21 SNs), se ha demostrado que apenas existen variaciones en las tasas de bits obtenidas. En cualquier caso, las tasas de bits medidas para 21 SNs son mayores que las estimaciones obtenidas mediante simulaciones, recogidas en [Adaptation].
- Parámetros de configuración TCP: para una microrred de las características consideradas, se ha demostrado que la variación del tamaño de segmento y de la ventana en TCP no presentan mejoras destacables y, sobre todo, no siguen un patrón definido. Por lo tanto, para un escenario como el considerado se han tomado como válidas las configuraciones por defecto: tamaño de segmento de 1220 B y tamaño de ventana de 8 kB.

Las medidas ponen de manifiesto que resulta fundamental conocer la topología de la subred, así como la localización jerárquica de los nodos emisor y receptor dado que el factor más limitante es el tipo de comunicación y, tras él, los niveles de repetición.

- **Estudio de la viabilidad de IP sobre PLC-PRIME para la gestión de recursos energéticos distribuidos**

Considerando los requisitos de comunicaciones de las tareas más significativas de las SGs y con los resultados obtenidos de tasa de bits, se ha concluido que el despliegue AMI en una microrred, además de para medida, puede implementar aplicaciones adicionales. Se tratarían de aplicaciones menos rigurosas en cuanto a requisitos de latencia y tasa de bits, tales como conexiones/desconexiones y detección de fallos. Su requisito máximo en cuanto a tasas de bits sería de 4.5 kbps y 5.3 kbps en TCP y UDP, respectivamente

El hecho de que las medidas se hayan realizado con IP amplía el abanico de posibilidades que se pueden implementar, al tratarse de una tecnología flexible a la par que robusta.

Además, se han analizado las posibles mejoras que se podrían introducir tanto con el estándar que incorporan actualmente los equipos, PRIME v1.3.6, como con su nueva versión, PRIME v1.4. Las posibles mejoras estarían enfocadas a la operativa del nodo *switch*. De este análisis se extrae además que la

implementación por parte de los fabricantes hace que existe un margen de mejora.

El análisis detallado de la capacidad de canal de IP sobre PRIME no sólo ha demostrado la capacidad de PRIME para aplicaciones más allá de la medida sino que puede servir para futuras mejoras en el estándar.

6.2. Líneas futuras

En base a las dos líneas de trabajo seguidas y a los resultados obtenidos, se plantean las siguientes líneas futuras:

- Evaluación de forma empírica las mejoras introducidas en la nueva versión del estándar PRIME. Plantea a su vez dos enfoques:
 - Rendimiento frente a emisiones supraarmónicas: la nueva versión, v1.4, introduce mejoras principalmente enfocadas a aumentar la robustez del protocolo en situaciones adversas, como en presencia de ruido en el canal. Para ello, se incorporan dos nuevos modos de transmisiones, DBPSK robusto y DQPSK robusto.
 - Rendimiento en la implementación de IP sobre PRIME: la redefinición de la trama MAC, que en PRIME v1.4 permite diferentes tamaños, lo que puede presentar mejoras en el acceso al medio y por extensión mejorar la operativa de los nodos al funcionar como *switches*, identificados como el factor limitante en la tasas de bits obtenidas.
- Desarrollo de un modelo de canal que incluya variables del canal eléctrico tales como impedancias, efectos de propagación, etc. para el análisis de la influencia de las emisiones no deseadas en PLC.
- Extensión del estudio de las emisiones supraarmónicas hasta 500 kHz e incluir análisis en el dominio del tiempo.
- Evaluación de la influencia de los supraarmónicos en la tasa de bits de la implementación de IP sobre PRIME, en diferentes escenarios, para diferentes escenarios y configuración.
- Evaluar de forma empírica la viabilidad de IP sobre PRIME para la gestión de ciertos aspectos de la microrred. Algunas tareas sencillas de la microrred del CEDER-CIEMAT, como el encendido de las bombas hidráulicas, la operativa en remoto de los inversores FV y la monitorización de la impedancia, precisan de consignas con requisitos de tasa de bits que podrían llevarse a cabo con la capacidad adicional de PRIME.
- Evaluar la influencia de otras topologías en el rendimiento de IP sobre PRIME. Por ejemplo, comunicaciones entre SNs con niveles de repetición en ambos casos (cliente y servidor).

6.3. Difusión de resultados

A continuación se detallan las publicaciones en revistas internacionales así como las ponencias en congresos nacionales e internacionales surgidas del presente trabajo:

6.3.1. Publicaciones internacionales

- *“State of the Art and Trends Review of Smart Metering in Electricity Grids”*
 - Autores: Uribe-Pérez, N.; Hernández-Callejo, L.; de la Vega, D y Angulo, I.
 - Publicación: Applied Sciences, vol. 6, no 3, p. 68
 - Fecha: 2016
 - Factor de impacto: 1.726 (2015), Q2
 - Aportaciones: en esta publicación se hace una revisión de la situación actual de los despliegues AMI a nivel mundial, focalizando el estudio en las diferentes tecnologías empleadas. Esta aportación se recoge en el Capítulo 2.

- *“Study of Unwanted Emissions in the CENELEC-A Band Generated by Distributed Energy Resources and Their Influence over Narrow Band Power Line Communications”*
 - Autores: Uribe-Pérez, N.; Angulo, I., Hernández-Callejo, L.; Arzuaga, T.; de la Vega, D. y Arrinda, A.
 - Publicación: Energies, vol. 9, no 12, p. 1007
 - Fecha: 2016
 - Factor de impacto: 2.077 (2015), Q2
 - Aportaciones: en esta publicación se recogen las medidas empíricas de caracterización de los DERs en la microrred del CEDER-CIEMAT así como su influencia en PRIME. Esta aportación se recoge en el Capítulo 4.

En revisión:

- *“Characterization of non-intentional emissions from distributed energy resources in the 10-500 kHz range: a case study in Spain”*
 - Autores: Fernandez, I.; Uribe-Pérez, N.; Eizmendi, I.; Arzuaga, T Angulo, I., de la Vega, D. y Arrinda, A.
 - Publicación: Renewable and Sustainable Energy Reviews
 - Aportaciones: esta publicación recoge las medidas realizadas en los diferentes DERs de la microrred del CEDER-CIEMAT con el objetivo de caracterizar las emisiones hasta el rango de los 500 kHz, como extensión del trabajo presentado en este documento, recogido en las líneas futuras.

6.3.2. Congresos internacionales

- *"Smart management of a distributed generation microgrid through PLC PRIME technology"*
 - Autores: Uribe-Pérez, N.; Hernández, L.; Gómez, R.; Soria, S.; de la Vega, D.; Angulo, I.; Arzuaga, T. y Gutiérrez, L.
 - Congreso: International Symposium on Smart Electric Distribution Systems and Technologies (EDST)
 - Lugar y fecha: Viena, Austria. Septiembre de 2015
 - Participación: Ponencia
 - Publicación: Actas del congreso en IEEEExplore
 - Aportaciones: en este congreso se presentó la microrred del CEDER-CIEMAT, el despliegue AMI basado en PRIME y algunas de las principales aplicaciones abordadas con él. Esta aportación se recoge en el Capítulo 3.

- *"Gestión de una Microrred Inteligente. El rol de la comunicaciones"*
 - Autores: Uribe-Pérez, N.; Hernández, L.; de la Vega, D.; Angulo, I. y Arrinda, A.
 - Congreso: III Congreso Iberoamericano sobre Microrredes con Generación Distribuida de Renovables (MIGEDIR)
 - Lugar y fecha: Liberia, Costa Rica. Octubre de 2015
 - Participación: Ponencia
 - Publicación: Actas del congreso
 - Aportaciones: en este congreso se hizo una revisión del papel de las comunicaciones en el contexto eléctrico y se presentó la microrred del CEDER-CIEMAT y su despliegue AMI. Esta aportación se recoge en el Capítulo 2.

- *"Influence of Noise Generated by Distributed Energy Resources on Microgrids over Narrow Band Power Line Communications"*
 - Autores: Uribe-Pérez, N.; Angulo, I.; Hernández, L.; Fernández, I.; Arrinda, A. y de la Vega, D.
 - Congreso: International Symposium on Power Line Communications and its Applications (ISPLC)
 - Lugar y fecha: Bottrop, Alemania. Marzo de 2016
 - Participación: Recent results submission
 - Publicación: Actas del congreso
 - Aportaciones: en este congreso se presentaron los primeros resultados obtenidos sobre las emisiones de los DER y su influencia en PRIME. Esta aportación se recoge en el Capítulo 4.

- *"Microrredes, Comunicaciones y Ruido: Condenados a Entenderse"*
 - Autores: Uribe-Pérez, N.; Hernández, L.; Angulo, I. y de la Vega, D.
 - Congreso: IV Congreso Iberoamericano sobre Microrredes con Generación Distribuida de Renovables (MIGEDIR)

- Lugar y fecha: Concepción, Chile. Octubre de 2016
- Participación: Ponencia
- Publicación: Actas del congreso
- Aportaciones: en este congreso se hizo una revisión de las emisiones supraarmónicos y de su influencia en un contexto práctico como la microrred del CEDER-CIEMAT. Esta aportación se recoge en el Capítulo 4.
- *“TCP/IP Capabilities over NB-PLC for Smart Grid Applications: Field Validation”*
 - Autores: Uribe-Pérez, N.; Angulo, I.; de la Vega, D; Arrinda, A.; Arzuaga, T.; Marrón, M.; Martínez, S.; Sendín, A. y Urrutia, I.
 - Congreso: International Symposium on Power Line Communications and its Applications (ISPLC)
 - Lugar y fecha: Madrid, España. Abril de 2017
 - Participación: Ponencia
 - Publicación: Actas del congreso en IEEEExplore
 - Aportaciones: en este congreso se presentaron los primeros resultados obtenidos en campo sobre la capacidad de IP sobre PRIME, validando así resultados previos existentes realizados en laboratorio. Esta aportación se recoge en el Capítulo 5.
- *“Spectral Characterization of Non Intentional Emissions of a Hydropower System in the Frequency Band up to 500 kHz”*
 - Autores: Fernández, I.; Angulo, I.; Arrinda, A.; de la Vega, D.; Uribe-Pérez, N. y Arzuaga, T.
 - Congreso: International Symposium on Power Line Communications and its Applications (ISPLC)
 - Lugar y fecha: Madrid, España. Abril de 201.
 - Participación: Recent results submission
 - Publicación: Actas del congreso
 - Aportaciones: en este congreso se presentaron los obtenidos de la caracterización de las emisiones hasta 500 kHz del grupo hidráulico (bomba y turbina) de la microrred del CEDER-CIEMAT. Se trata de una extensión del trabajo presentado en este documento, recogido en las líneas futuras.

6.3.3. Congresos nacionales

- *“Sistema de comunicaciones para la gestión de una microrred mediante tecnologías PLC PRIME”*
 - Autores: Uribe-Pérez, N.; Hernandez-Callejo, L.; de la Vega, D; Angueira, P. y Arzuaga, T.
 - Congreso: II Congreso Smart Grids
 - Lugar y fecha: Madrid, España. Octubre de 2014
 - Participación: Ponencia
 - Publicación: Actas del congreso

- Aportaciones: en este congreso se presentó la microrred del CEDER-CIEMAT y el enfoque de gestión planteado con el despliegue AMI de la microrred. Esta aportación se recoge en el Capítulo 3.

6.3.4. Contribuciones a comités internacionales

- *“Estudio del ruido generado por recursos distribuidos sobre PLC”*
 - Autores: Uribe-Pérez, N.; Angulo, I. Hernández, L.; Arzuaga, T.; de la Vega, D. y Arrinda, A.
 - Congreso: Jornadas técnicas del Comité Nacional de CIGRÉ
 - Lugar y fecha: Madrid, España. Noviembre de 2016
 - Participación: Ponencia
 - Publicación: Actas del congreso
 - Aportaciones: en estas jornadas se presentaron los diferentes niveles de afección detectados sobre PLC debido a las emisiones supraarmónicas de DERs en un entorno real. Esta aportación se recoge en el Capítulo 4.

REFERENCIAS Y GLOSARIO

REFERENCIAS

- [1] S.Galli, A. Scaglione, and Z. Wang, "For the grid and through the grid: The role of power line communications in the smart grid." Proceedings of the IEEE 99, 6, 998-1027, 2011.
- [2] European Commission, "European Smart Grid Technology Platform—Vision and Strategy for European Electricity Networks of the Future," Disponible online: <http://www.smartgrids.eu/web/node/28/default.asp>, 2010.
- [3] Red Eléctrica de España. Disponible online: <http://www.ree.es/es/publicaciones/educacion/de-la-generacion-al-consumo>.
- [4] H. Farhangi, "The path of the smart grid," Power and Energy Magazine, IEEE, 8, 1, 18,28, 2010.
- [5] Navigant Research, Distributed Energy Resources Global Forecast. Executive Summary, 2016.
- [6] T. Ackermann, G. Andersson and L. Söder, "Distributed generation: a definition. Electric power systems research", 57(3), 195-204, 2001.
- [7] European Comission. "New Era for Electricity in Europe. Distributed Generation: Key Issues, Challenges and Proposed Solutions". Disponible online: <http://www.smartgrids.eu/documents/New-ERA-for-Electricity-in-Europe.pdf>
- [8] P. Barker, P. Philip and W. De Mello. "Determining the impact of distributed generation on power systems. I. Radial distribution systems." In Power Engineering Society Summer Meeting, 2000. IEEE, 3, 1645-1656. 2000.
- [9] C. Blumstein, L.S. Friedman and Richard Green. "The history of electricity restructuring in California." Journal of Industry, Competition and Trade, 2, 1, 9-38, 2002.
- [10] Smart Microgrid, Siemems. Disponible online: <http://w5.siemens.com/italy/web/pw/powermatrix/gestoriretedidistribuzione/smartgrid/pages/default.aspx>.
- [11] Microgrids. Disponible online: <https://cleantechnica.com/2015/10/14/the-future-of-energy-in-australia-may-be-renewable-micro-grids/>.
- [12] Navigant Research, Microgrids Global Forecast. Executive Summary, 2016.
- [13] A. Mahmood, M. Aamir, and M. Anis, Design and implementation of AMR smart grid system. In Electric Power Conference, 2008. EPEC 2008. IEEE Canada, 1-6, 2008.
- [14] L. Li, L. Xiaoguang, Jian, H., and H. Ketai, "Design of new architecture of AMR system in Smart Grid. In Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 2011 6th IEEE Conference on, 2025-2029, 2011.
- [15] P. Oksa, M. Soini, L. Sydanheimo, L., and M. Kivikoski, "Considerations of using power line communication in the AMR system. In Power Line Communications and Its Applications", 2006 IEEE International Symposium on, 208-211, 2006.

- [16] Global Smart Grid Federation. Global Interoperability. Disponible online: <http://www.globalsmartgridfederation.org/2013/11/04/global-interoperability-update/>.
- [17] M. Trautmann, S. Jeschke, S. Grigo, M. Malek, H. Hirsch, T. Pletzer, C. Hartmann, N. van Lier and S. Ponzela, "EMI Examination of the Low-Voltage Grid in the Frequency Range from 9 kHz to 2 MHz Focusing on Noise Level, Impedance, Attenuation and the Impact on PLC Data Transmission", Proc. of the 2016 International Symposium on Electromagnetic Compatibility - EMC Europe, Wroclaw, Poland, September, 2016.
- [18] A. Moreno-Munoz, A. Gil-de-Castro, E. Romero-Cavadal, S. Rönnberg and M. Bollen, "Supraharmonics (2 to 150 kHz) and multi-level converters," 2015 IEEE 5th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG), 37-41, 2015.
- [19] US Energy of Department. AMI and Customer System Deployment in the Smart Grid. Disponible online: https://energy.gov/sites/prod/files/2016/12/f34/AMI%20Summary%20Report_09-26-16.pdf
- [20] P.P. Parikh, M.G. Kanabar and T.S. Sidhu, "Opportunities and challenges of wireless communication technologies for smart grid applications," Power and Energy Society General Meeting, 2010 IEEE, 1,7, 25-29 July 2010.
- [21] China Southern Power Grid Project. Disponible online: http://eng.csg.cn/Science_Innovation/Smart_Grid/.
- [22] Smart Grid Smart City Project. Disponible online: <http://www.environment.gov.au/energy/programs/smartgridsmartcity>.
- [23] Essential Energy Project. Disponible online: <https://www.aer.gov.au/networks-pipelines/determinations-access-arrangements/essential-energy-determination-2014-19>.
- [24] S. Rogai, "Keynote I. Telegestore Project Progresses And Results," 2007 IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications, Pisa, 2007, 1-1.
- [25] B. Botte, V. Cannatelli, and S. Rogai. "The Telegestore project in ENEL's metering system." In Electricity Distribution, 2005. CIRED 2005. 18th International Conference and Exhibition on, 1-4. IET, 2005.
- [26] PRICE, Smart Grid Project in Henares region. Project Overview. Disponible online: [http://www.smartgrids.eu/documents/ntp-rtp/3.%20FutuRed%20webinar%20-%20PRICE%20project%20\(GNF+IBD\)_v2.pdf](http://www.smartgrids.eu/documents/ntp-rtp/3.%20FutuRed%20webinar%20-%20PRICE%20project%20(GNF+IBD)_v2.pdf)
- [27] Technologies used in PRICE Project. Disponible online: <http://www.gasnaturalfenosa.com/en/activities/innovation/projects/1297281180340/price.html>.
- [28] Eandis and Infrac Project. Disponible online: <http://www.tdworld.com/smart-energy-consumer/belgium-based-eandis-and-infrac-award-amm-system-contract-roll-out-61000-meter>
- [29] Eandis System Operator cvba. Disponible online: https://www.eandis.be/sites/eandis/files/documents/investor_presentation.pdf.

- [30] UK smart meter programme: preparing for evaluation. Disponible online: <http://www.decc.gov.uk/assets/decc/11/tackling-climate-change/smart-meters/5699-aecom-uk-smart-meter-programme-research-preparing.pdf>.
- [31] Linky Project. Disponible online: <https://www.metering.com/features/smart-meters-101-frances-linky-electricity-meters/>
- [32] G3 in Linky Project. Disponible online: https://wiki.eclipse.org/images/f/f9/Eclipse_IOT_Day_ERDF.pdf
- [33] M. Bjornfors, "Energy demand research project overview," IET Smart Metering - Making It Happen, London, 1-12., 2009.
- [34] UK smart meter programme: preparing for evaluation. Disponible online: <http://www.decc.gov.uk/assets/decc/11/tackling-climate-change/smart-meters/5699-aecom-uk-smart-meter-programme-research-preparing.pdf>.
- [35] National Smart Metering Programme. Programme Update and Initial Phase 2 Deliverables. Disponible online: <http://www.cer.ie/docs/000023/cer12213.pdf>.
- [36] National Smart Metering Programme Project. Comission for Energy Regulation. Disponible online: <https://www.cer.ie/docs/001021/CER15052%20Phase%203%20Overview%20.pdf>.
- [37] CMP AMI Project. Disponible online: https://www.smartgrid.gov/project/central_maine_power_company_cmp_advanced_metering_infrastructure_project.html.
- [38] Victorian Smart Meter Rollout. Disponible online: <http://www.smartmeters.vic.gov.au/about-smart-meters/end-of-rollout>.
- [39] D. Bian, M. Kuzlu, M. Pipattanasomporn and S. Rahman. "Analysis of communication schemes for Advanced Metering Infrastructure (AMI)." In PES General Meeting| Conference & Exposition, 2014 IEEE, 1-5, 2014.
- [40] Q. Zhang, S. Gang and P. Li, "Smart City Grid: The Start to Develop Smart Grid." E-Product E-Service and E-Entertainment (ICEEE), 2010 International Conference on. IEEE, 2010.
- [41] Boulder to be first "Smart Grid City" Disponible online: <http://www.powermag.com/boulder-to-be-first-smart-grid-city/>
- [42] Euridis project. Disponible online: <https://www.metering.com/the-euridis-protocol-an-open-solution-for-amr-using-various-media/>
- [43] Euridis Associations. Disponible online: <http://www.euridis.org/faq.php>.
- [44] Austin Project. Final Technology Performance Report February 2015. Disponible online: https://www.smartgrid.gov/files/Pecan-Street-SGDP-FTR_Feb_2015.pdf.
- [45] Benchmarking Smart Metering Deployment in the EU-27 with a Focus on Electricity. European Commission, 2014. Disponible online: <http://ec.europa.eu/energy/en/topics/markets-and-consumers/smart-grids-and-meters>.

- [46] L. Alejandro, C. Blair, L. Bloodgood, M. Khan, and P. Schneider, "Global Market for Smart Electricity Meters: Government Policies Driving Strong Growth". Working Paper. US International Trade Commission, 2014. Disponible online: https://www.usitc.gov/publications/332/id-037smart_meters_final.pdf.
- [47] Global Smart Grid Federation, "US smart meter deployments to hit 70 million in 2016, 90 million in 2020". Disponible online: <http://www.globalsmartgridfederation.org/2016/12/09/us-smart-meter-deployments-to-hit-70-million-in-2016-90-million-in-2020/>.
- [48] Monitoring Report Smart Meter Deployment and TOU Pricing. 2011. Disponible online: http://www.ontarioenergyboard.ca/OEB/_Documents/SMdeployment/Monthly_Monitoring_Report_June2011.pdf
- [49] N. Strother and B. Lockhart, "Smart Meters. Smart Electric Meters, Advanced Metering Infrastructure, and Meter Communications: Global Market Analysis and Forecasts"; Navigant Research: Boulder, CO, USA, 2014.
- [50] Navigant Research, "Global AMI Tracker 4Q16. Smart Meter Projects: Project Tracking, Regional Analysis, and Market Shares", 2016.
- [51] China Tests a Small Smart Electric Grid. MIT Technology Review. 2013. Disponible online: <http://www.technologyreview.com/news/510171/china-tests-a-small-smart-electric-grid/>
- [52] The Global Smart Grid Federation Report. 2012. Disponible online: https://www.smartgrid.gov/files/Global_Smart_Grid_Federation_Report.pdf.
- [53] Goswami. Smart Metering: Energizing India. 2012. Disponible online: <http://www.dqindia.com/smartmetering-energizing-india/>
- [54] Circutor. Sistemas PLC. <http://circutor.com/es/documentacion-es/articulos/3875-compact-dc-el-nuevo-concentrador-plc-prime-de-circutor..>
- [55] Y. Melike, V. C. Gungor, G. Tuna, M. Rangoussi and E. Fadel. "Power line communication technologies for smart grid applications: A review of advances and challenges." *Computer Networks* 70: 366-383, 2014.
- [56] "Power Line Communications: Theory and Applications for Narrowband and Broadband Communications over Power Lines." Wiley, 2010.
- [57] R. Tongia, "Can broadband over powerline carrier plc compete? A techno-economic analysis" Elsevier, 2004.
- [58] PLC Industry. Disponible online: <http://hamid.meghdadi.info/projects/ensil2007.php>.
- [59] J.T. Tengdin, "Distribution Line Carrier Communications - An Historical Perspective," *Power Delivery*, IEEE Transactions on , 2, 2, 321,329, April 1987
- [60] M. Schwartz, "History of Communications – Carrier-wave telephony over power lines: Early history". *IEEE Commun. Mag.*, vol 47, no.1, pp 14-18, 2009.
- [61] J. Álvarez Valle, V. García González, and D. González Fernandez, "Transmisión de Datos por la Red Eléctrica" Disponible online: <http://www.victorgarcia.org/files/PLC-v2.0RC.pdf>

- [62] A. Agudelo Ramírez and P. Bernal Gallo, “Simulación Comparativa de Sistemas de Comunicaciones PLC en Baja Tensión” MsC. Pereira, 2010.
- [63] P. Sutterling and W. Downey, “A Power Line Communication Tutorial – Challenges and Technologies” Disponible online: <http://www.viste.com/LON/tools/PowerLine/pwrlinetutorial.pdf>
- [64] W. Zhu, X. Zhu, E. Lim and Y. Huang, “State-of-Art Power Line Communications Channel Modelling”, *Procedia Computer Science*, Volume 17, 563-570, 2013.
- [65] A. M. Tonello, F. Versolatto, B. Bejar, S. Zazo, “A Fitting Algorithm for Random Modeling the PLC Channel”, *IEEE Transactions on Power Delivery* 27 (3)1477–1484, 2012.
- [66] M. Zimmermann and K. Dostert, "A multipath model for the powerline channel," in *IEEE Transactions on Communications*, 50, 4, 553-559, 2002.
- [67] H. Meng, S. Chen, Y. Guan, C. Law, P. So, E. Gunawan, T. Lie, “Modeling of Transfer Characteristics for the Broadband Power Line Communication Channel”, *IEEE Transactions on Power Delivery* 19 (3)1057–1064, 2004.
- [68] E. G. Bakhom, “S-Parameters Model for Data Communications Over 3-Phase Transmission Lines”, *IEEE Transactions on Smart Grid* 2 (4) 615–623, 2011.
- [69] M. Götz, M. Rapp and K. Dostert, “Power Line Channel Characteristics and their Effect on Communication System Design” *IEEE Communications Magazine*, 2004.
- [70] B. Baraboi “Narrowband Powerline Communication Applications and Challenges”. Ariane Controls Inc. Disponible online: https://elearning.renesas.com/file.php/1/CoursePDFs/DevCon_2012/Connectivity/2C05B_Baraboi_NarrowbandPowerlineCommunicationApplicationsandChallenges.pdf
- [71] Distribution automation using distribution line carrier systems - Part 4: Data communication protocols - Section 32: Data link layer - Logical link control (LLC). International Electrotechnical Commission (IEC), 1996.
- [72] IEEE Std 1901.2a-2015, IEEE Standard for Low-Frequency (less than 500 kHz) Narrowband Power Line Communications for Smart Grid Applications.
- [73] Z. Collin, “Narrowband PLC and the power line medium”. *EE Times*. Disponible online: <http://www.embedded.com/print/4236198>.
- [74] A. De Lima Fernandes and P. Dave, “Power Line Communication in Energy Markets” Cypress Semiconductor Corp. Disponible online: <http://www.cypress.com/?docID=31441>.
- [75] K. C. Budka, J G. Deshpande and M. Thottan, “Communication Networks for Smart Grids. Making Smart Grid Real”. Springer 2014.
- [76] A. Sendín, I. Peña and P. Angueira. “Strategies for Power Line Communications Smart Metering Network Deployment”, *Energies*, 7(4), 2377-2420, 2014.
- [77] N. Pavlidou, A.j. Han Vinck, J. Yazdani and B. Honary “Power Line Communications: State of the Art and Future Trends” *IEEE Communications Magazine*, 2003.

- [78] “Communication Technologies, Networks, and Strategies” Cap.11 - Communication Technologies, Networks and Strategies for Practical Smart Grid Deployments, 2012.
- [79] IEEE Std 1901-2010, IEEE Standard for Broadband over Power Line Networks: Medium Access Control and Physical Layer Specifications.
- [80] CENELEC Standards. Disponible online: <http://www.icnirp.org/cms/upload/presentations/Joint/ChadwickP.pdf>.
- [81] Narrowband Powerline Communication--Applications and Challenges—Part I. Disponible online: <http://www.edn.com/Home/PrintView?contentItemId=4408140>.
- [82] J. Gao, Y. Xiao, J. Liu, W. Liang and C. Chen, “A survey of communication/networking in Smart Grids”. *Future Generation Computer Systems*, 28(2), 391-404, 2012.
- [83] A. Sendin and I. Berganza, “Power line communication is ready for the smart grid today” *Engerati*, 2016. Disponible online: <https://www.engerati.com/article/power-line-communication-ready-smart-grid-today>.
- [84] K. M. Dostert, “Telecommunications over the Power Distribution Grid - Possibilities and Limitations”, *IIR-Powerline* 6, 97, 1997.
- [85] H. Li, Z. Bi, D. Liu, J. Li and P. Stoica, “Channel order and RMS delay spread estimation for AC power line communications”, *Digital Signal Processing: A Review Journal*, 13(2), 284–300, 2003.
- [86] SGCG/M490/B_Smart Grid Reports. Set of Standards, v.3.0, 2014. Disponible online: http://www.energynetworks.org/assets/files/electricity/engineering/Standards/SGCG%20Reports%20071014/SGCG_WGStandard_Sec0075_INF_ReportforComments.pdf.
- [87] S. Dominiak, L. Andersson, M. Maurer, A. Sendin and I. Berganza, “Challenges of Broadband PLC for Medium Voltage Smart Grid Applications” In *Proceedings of the 6th WorkShop on Power Line Communications*, Rome, Italy, 20-21, 2012.
- [88] S. J. Holmes and D. Campbell, “Communicating with domestic electricity meters”. *Proceedings of the International Conference on Metering Apparatus and Tariffs for Electricity Supply*, Manchester, UK, Apr. 3–5, 129–33, 1990.
- [89] IEC 60495. Single sideband power-line carrier terminals.
- [90] IEC 62488. Power line communication systems for power utility applications - Part 1: Planning of analogue and digital power line carrier systems operating over EHV/HV/MV electricity grids.
- [91] IEC 61334. Distribution automation using distribution line carrier systems - Part 1: General considerations - Section 1: Distribution automation system architecture.
- [92] TWACS Tecnology. Disponible online: <http://www.aclara.com/products-and-services/communications-networks/twacs-plc/>.

- [93] LonWorks Protocol Overviw. Disponibe online: <http://www.rtaautomation.com/technologies/lonworks/>.
- [94] D. Tudose, A. Voinescu, M. Petrăreanu, A. Bucur, D. Loghin, A. Bostan and N. Țăpuș, "Home automation design using 6LoWPAN wireless sensor networks." Distributed Computing in Sensor Systems and Workshops (DCOSS), 2011 International Conference on. IEEE, 2011.
- [95] A. Papaioannou and F. Pavlidou. "Evaluation of power line communication equipment in home networks." IEEE Systems Journal 3, no. 3 (2009): 288-294, 2009.
- [96] HomePlug AV. White Paper. Disponibe online: http://www.homeplug.org/media/filer_public/b8/68/b86828d9-7e8a-486f-aa82-179e6e95cab5/hpav-white-paper_050818.pdf
- [97] HomePlug Green PHY. White Paper. Disponibe online: http://www.homeplug.org/media/filer_public/92/3f/923f0eb3-3d17-4b10-ac75-03c3c2855879/homeplug_green_phy_whitepaper_121003.pdf.
- [98] HomePlug Command&Control. White Paper. Disponibe online: www.yitran.com/common/filesbinarywrite.aspx?id=647
- [99] V. Oksman and S. Galli. "G. hn: The new ITU-T home networking standard." IEEE Communications Magazine 47.10, 2009.
- [100] V. Oksman and J. Zhang. "G. HNEM: the new ITU-T standard on narrowband PLC technology." IEEE Communications Magazine 49.12. 2011.
- [101] K. Razazian, M. Umari, A. Kamalizad, V. Loginov and M. Navid. "G3-PLC specification for powerline communication: Overview, system simulation and field trial results." In Power Line Communications and Its Applications (ISPLC), 2010 IEEE International Symposium on, 313-318, 2010.
- [102] Powerline Intelligent Metering Evolution (PRIME) Alliance. Advance Meter Reading & Smart Grid Standard. Disponibe online: <http://www.prime-alliance.org/>
- [103] O. V. Adekunle, "An Overview of Broadband communication over Power Lines.", EIE's 2nd International Conference on Computing, Energy, Networking, Robotics and Telecommunications, 2012.
- [104] B. Varadarajan, I. H. Kim, A. Dabak, D. Rieken and G. Gregg, "Empirical Measurements of the Low-Frequency Power Line Communications Channel in Rural North America," International Symposium on Power Line Communications and Its Applications, IEEE ISPLC, 463-467, 3-6, 2011.
- [105] E. Biglieri, "Coding and modulation for a horrible channel," in IEEE Communications Magazine, 41, 5, 92-98, 2003.
- [106] M. Zimmermann and K. Dostert, "Analysis and modeling of impulsive noise in broad-band powerline communications," in IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 44, 1, 249-258, 2002.
- [107] B. L. Evans, "Design of Interference-Aware Communication Systems", Cockrell School of Engineering. Disponibe online: users.ece.utexas.edu/~bevans/projects/plc/talks/vansInterferenceAwareMar2011.pptx

- [108] "ZIV Prime Manager". Manual de Instrucciones. ZIV Metering Solutions, S.L., 2011.
- [109] L. Hernández, "MIREC-CON: un caso de estudio"; Curso Microrredes con Generación Distribuida de Renovables de la Red Microrredes con Generación Distribuida Renovable (MIGEDIR) del Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED), 2015.
- [110] A. Bosqued, S. Palero, C. San Juan, S. R. Enríquez, J. A. Ferrer, J. Martí J, J. Heras, J.D. Guzmán and M.J. Jiménez, "Arfrisol, bioclimatic Architecture and Solar Cooling Project". In Conference on Passive and Low Energy Architecture (PLEA), Geneva, Switzerland, 6-8, 2006.
- [111] B. S. I. Staff, "Signalling on Low-voltage Electrical Installations in the Frequency Range 3 KHz to 148.5 KHz. Immunity Requirements for Mains Communications Equipment and Systems Operating in the Range of Frequencies 3 KHz to 95 KHz and Intended for Use by Electricity Suppliers and Distributors." *BS/Standards*, 2003.
- [112] A. Sendin, R. Guerrero and P. Angueira, "Signal Injection Strategies for Smart Metering Network Deployment in Multitransformer Secondary Substations," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, 26, 4, 2855-2861, 2011.
- [113] 4CCT: Concentrador de Centro de Transformación para sistema AMR". Manual de Instrucciones. ZIV Metering Solutions, S.L., 2010.
- [114] 5CTM. Contador monofásico de energía activa y reactiva con discriminación horaria y telegestión". Manual de Instrucciones. ZIV Metering Solutions, S.L., 2010.
- [115] 5CDT-E1F. Contador trifásico de energía activa y reactiva con discriminación horaria y telegestión". Manual de Instrucciones. ZIV Metering Solutions, S.L., 2010.
- [116] Inversores FV Ingeteam Ingecon SUN. Disponible online: <http://www.ingeteam.com/portals/0/productos/documentos/16d9c8c7-cfed-4d9e-ba55-b0ca238dd7c0.pdf>
- [117] Cargador Xtender. Disponible online: http://www.studer-innotec.com/media/document/0/manual_usuario_gama_xtender_es.pdf
- [118] Turbina hidráulica Pelton. Disponible online: <http://www.cmchydro.es/ingenieria-centrales-hidroelectricas.php>
- [119] Generador asíncrono IPS tipo ASL315.
- [120] Condensadores Circutor Optim. Disponible online: <http://circutor.es/es/documentacion-es/articulos/1499-condensadores-heavy-duty-de-circutor>
- [121] Motor-bomba SIHI series AKH 6100. Disponible online: <http://www.sterlingsihi.com/cms/en/England/home/products-services/liquid-pumps/side-channel-pumps/in-bare-shaft-design/series-akh.html>
- [122] Jos Arrilaga, "Power system harmonics", Wiley, 2000.

- [123] S.K Rönnerberg, M. Bollen, H. Amaris, G.W.Chang, I. Gu, I., L., Kocewiak, J.Meyer, J., M. Olofsson, P.F., Ribeiro, and J. Desmet, "On waveform distortion in the frequency range of 2kHz–150kHz—Review and research challenges". *Electric Power Systems Research*, 150, 1-10, 2017
- [124] J. Knockaert, "High Frequency Power Quality", CE-ABLE Seminar, Ghent University, 2016.
- [125] IEC 61000-4-19, *Electromagnetic Compatibility (EMC) – Testing and measurement techniques – Test for immunity to conducted, differential mode disturbances and signalling in the frequency range 2 kHz to 150 kHz at AC power ports*, 2014.
- [126] CENELEC SC 205A Study Report Ed. 3, "Electromagnetic Interference between Electrical Equipment / Systems in the Frequency Range below 150 kHz", SC 205A/Sec0400/R, October 2015.
- [127] P. Kotsampopoulos. A. Rigas, J. Kirchhof, G. Messinis, A. Dimeas, N. Hatzigiorgiou, V. Rogakos and K. Andreadis, "EMC issues in the interaction between smart meters and power electronic interfaces," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, 99,.1-1, 2016.
- [128] A. Moreno-Muñoz, A. Gil de Castro, S. Rönnerberg, M. Bollen and E. Romero-Cadaval, "Ongoing work in CIGRE working groups on supraharmonics from power-electronic converters", in *CIGRE 23rd Intern. Conf. on Electricity Distribution*, 2015.
- [129] S. Rönnerberg and M. H. J. Bollen "Measurements of primary and secondary emission in the supraharmonic frequency range 2 – 150 kHz", in *CIGRE 23rd Intern. Conf. on Electricity Distribution*, 2015.
- [130] E. O. A. Larsson, M. H. J. Bollen, M. G. Wahlberg, C. M. Lundmark and S. K. Rönnerberg, "Measurements of High-Frequency (2–150 kHz) Distortion in Low-Voltage Networks," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, 25, 3, 1749-1757, 2010.
- [131] M.H.J. Bollen, S. Rönnerberg and F. Zavoda, "CIGRE/CIGRE C4.24 – Power quality in the future grid – first introduction", in *Great Lakes Symposium on Smart Grids*, 2014.
- [132] S. Rönnerberg, M. Bollen and A. Gil-de-Castro, "Harmonic Distortion from Energy-Efficient Equipment and Production in the Low-Voltage Network", *Research Report*, Luleå University of Technology, 2014.
- [133] S. Rönnerberg, "Emission and Interaction from Domestic Installations in the Low Voltage Electricity Network up to 150 kHz", *PhD thesis*, Luleå University of Technology, 2013.
- [134] S. Rönnerberg and M.H.J. Bollen, "Emission from four types of LED lamps for frequencies up to 150 kHz", *Int Conf on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*, 2012.
- [135] S. Rönnerberg, M. Bollen and A. Larsson, "Grid impact from PV-installations in northern Scandinavia", in *22nd CIGRE Int. Conf. Electricity Distribution*, 2013.
- [136] S. Rönnerberg, "Power line communication and customer equipment," *Licentiate Thesis*, Luleå University of Technology, 2011.

- [137] A. Nejadpak, A. Sarikhani and O. A. Mohammed, "Analysis of Radiated EMI and Noise Propagation in Three-Phase Inverter System Operating Under Different Switching Patterns", IEEE, 2013.
- [138] S. Rönnerberg, M. Bollen, and A. Larsson, "Emission from small scale PV-installations on the low voltage grid." *Renewable Energy and Power Quality Journal (RE&PQJ)*, 2014.
- [139] J. Meyer, M. Bollen, H. Amaris, A.M. Blanco, A. G. de Castro, J. Desmet, and K. Yang, "Future work on harmonics-some expert opinions Part II-supraharmonics, standards and measurements", in *16th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*, 909-913, 2014.
- [140] E. Lindberg, A. Anette and A. Urban, "Power Quality Analysis of a 110 MW wind farm in a 130 kV switchyard." *Elforsk Report*, 2012.
- [141] S. Schottke, J. Meyer, P. Schegner and S. Bachmann, "Emission in the frequency range of 2 kHz to 150 kHz caused by electrical vehicle charging", *International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC Europe)*, Gothenburg, 2014.
- [142] S.M. Bashi, "Effects of High Power Electronics Converters on PLC Signals," *Journal of Applied Sciences*, 1888-1891, 2006.
- [143] M. Pikkarainen, S. Vehmasvaara, B.A. Siddiqui, P. Pakonen and P. Verho, "Interference of touch dimmer lamps due to PLC and other high frequency signals," *Electric Power Quality and Supply Reliability Conference (PQ)*, 1-6, 2012.
- [144] S. Panchadcharam, G. A. Taylor, I. Pisica and M. R. Irving, "Modeling and analysis of noise in power line communication for smart metering," *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 1-8, 2012.
- [145] S. Rönnerberg, M. H. J. Bollen and M. Wahlberg, "Interaction between Narrowband Power-Line Communication and End-User Equipment," *Power Delivery, IEEE Transactions On*, 26, 2034-2039, 2011.
- [146] M. Bollen, M. Olofsson, A. Larsson, S. Rönnerberg and M. Lundmark, "Standards for supraharmonics (2 to 150 kHz)," in *IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine*, 3, 1, 114-119, 2014.
- [147] E.O.A. Larsson and M. H. J. Bollen, "Emission and immunity of equipment in the frequency range 2 to 150 kHz," *2009 IEEE Bucharest PowerTech*, Bucharest, pp. 1-5, 2009.
- [148] G. F. Bartak and A. Abart, "EMI of Emissions in the Frequency Range 2 kHz 150 kHz", *22nd International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED)*, 1271, Stockholm, 2013.
- [149] IEC. Technical Information - Electromagnetic Compatibility (EMC) Disponible online: http://www.amvelectronica.com/notas/estandares_emc.pdf
- [150] 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.

- [151] 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).
- [152] S. Subhani, V. Cuk and J. F. G. Cobben. "A literature survey on power quality disturbances in the frequency range of 2-150 kHz." International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'17), 2017.
- [153] CLC/TR 50579:2012, Electricity metering equipment (AC) – Severity levels, immunity requirements and test methods for conducted disturbances in the frequency range 2 kHz - 150 kHz, 2012.
- [154] IEEE Project P1250, "Guide for Identifying and Improving Power Quality in Power Systems". Disponible online: <https://standards.ieee.org/develop/project/1250.html>
- [155] IEEE EMC Society, "On the Aim and Scope of TC 7 – document for the TC 7 Inaugural Annual Meeting 2012". Agenda Report, August 2012.
- [156] IEC SC 77A, "Standardization in the field of electromagnetic compatibility with regard to low frequency phenomena". Disponible online: http://www.iec.ch/dyn/www/f?p=103:30:13301128246910:::FSP_ORG_ID,FSP_LANG_ID:1384,25.
- [157] ZIV Communications, "Descripción TABT-2. Acoplador de Señales de Alta Frecuencia en Redes de Baja Tensión". Versión 2, Abril 2015.
- [158] M. Klatt, J. Meyer, P. Schegner, A. Koch, J. Myrzik, C. Körner, T. Darda and G. Eberl, "Emission Levels above 2 kHz . Laboratory Results and Survey Measurements in Public Low Voltage Grids", in CIGRE 22rd Intern. Conf. on Electricity Distribution, 2013.
- [159] X. Fang, S. Misra, G. Xue and D. Yang, "Smart grid—The new and improved power grid: A survey". IEEE Commun. Surv. Tutor. 2012, 14, 944–980.
- [160] L.T. Berger, A. Schwager and J.J. Escudero-Garzás, "Power Line Communications for Smart Grid Applications," Journal of Electrical and Computer Engineering, 2013.
- [161] V.C. Gungor and F.C. Lambert, "A survey on communication networks for electric system automation". Comput. Netw. 50, 877–897, 2006.
- [162] C. Nunn, P.M. Moore, and P.N. Williams, "Remote meter reading and control using high-performance PLC communications over the low voltage and medium voltage distribution networks," Seventh International Conference on Metering Apparatus and Tariffs for Electricity Supply, pp. 304 – 308, 1992.
- [163] A. Hosemann, "PLC Applications in Low Voltage Distribution Networks," ISPLC 1997, Essen, Germany, Apr. pp. 134 – 139, 1997.
- [164] T. A. Papadopoulos, C. G. Kaloudas, A. I. Chrysochos and G. K. Papagiannis, "Application of Narrowband Power-Line Communication in Medium-Voltage Smart Distribution Grids". IEEE Trans. Power Deliv, 28, 981–988., 2013.
- [165] D. Della Giustina, P. Ferrari, A. Flammini, S. Rinaldi and E. Sisinni, "Automation of Distribution Grids with IEC 61850: A First Approach Using Broadband Power Line Communication". IEEE Trans. Instrum. Meas., 62, 2372–2383, 2013.

- [166] H. Kuang, B. Wang and X. He, "Application of AMR Based on Powerline Communication in Outage Management System," 2010 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, Chengdu, 1-4, 2010.
- [167] I. S. Baxevasos and D. P. Labridis, "Implementing multiagent systems technology for power distribution network control and protection management," IEEE Trans. Power Del., 22, 1, 433–443, 2007.
- [168] S. Ramseier, M. Arzberger and A. Hauser, "MV and LV powerline communications: New proposed IEC standards," in Proc. IEEE Transmission Distrib. Conf., 1, 235–239, 1999.
- [169] A. Cataliotti, D. Di Cara, R. Fiorelli and G. Tine, "Power-line communication in medium-voltage system: Simulation model and onfield experimental tests," IEEE Trans. Power Del., 27, 1, 62–69, 2012.
- [170] B.S. Park, D.H. Hyun and S.K. Cho, "Implementation of AMR system using power line communication," IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002: Asia Pacific, 1, 18 – 21, 2002.
- [171] D4.1 & D4.2 Guidelines for standards implementation, v1.0, GRID4EU—Innovation for Energy Networks. GRID4EU project, October 2012.
- [172] Smart Distribution System Operation for Maximizing the Integration of Renewable Generation—SUSTAINABLE Project Description. Disponible online: <http://www.sustainableproject.eu/>.
- [173] Deliverable (D) No: 6.1, Identification of the scenarios and distributed intelligence solutions. Distributed Intelligence for Cost-Effective and Reliable Distribution Network Operation, DISCERN project, June 2014.
- [174] White Paper: Smart City Malaga—A Model of Sustainable Energy Management for Cities of the Future, Dirección General de Distribución de Endesa. Disponible online: http://www.endesa.com/EN/SALADEPRENSA/CENTRODOCUMENTAL/Publicaciones/Smartcity-Malaga_ENG.pdf.
- [175] A. Michiorri, G. Robin, K. Georges, C. Lebossé, and S. Albou. "A local energy management system for solar integration and improved security of supply: The Nice Grid project." In Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Europe), 2012 3rd IEEE PES International Conference and Exhibition on, 1-6, 2012.
- [176] A. Sendin, I. Urrutia, M. Garai, T. Arzuaga and N. Uribe-Pérez, "Narrowband PLC for LV Smart Grid Services, beyond Smart Metering", in 18th IEEE International Symposium on Power Line Communications and its Applications", 2014.
- [177] B. Adebisi, A. Treytl, A. Haidine, A., Portnoy, A., R.U Shan, D. Lund, H. Pille and B. Honary, "IP-centric high rate narrowband PLC for smart grid applications," in IEEE Communications Magazine, 49, 12, 46-54, 2011.
- [178] F. Baker, D. Meyer. "Internet Protocols for the SmarGrid," IETF, draft-baker-ietf-core- 15, Apr. 2011.
- [179] "UPGRID Project – Innovative Distribution Grid Uses Cases and Functions". Derivable v03, April 2016. Disponible online: http://upgrid.eu/#publications_tab|1.

- [180] A. Sendin, T. Arzuaga, I. Urrutia, I. Berganza, A. Fernandez, L. Marron, A. Llano and A. Arzuaga, "Adaptation of Powerline Communications-Based Smart Metering Deployments to the Requirements of Smart Grids", *Energies*, 8, 13481–13507, 2015.
- [181] The TCP Maximum Segment Size and Related Topics. Disponible online: <https://tools.ietf.org/html/rfc879#section-1>.
- [182] The TCP Window Size. Disponible online: <https://tools.ietf.org/html/rfc793>.
- [183] IPERF Tool. JPERF, Graphical Frontend for IPERF – Network Performance measurement graphical tool (Version jperf-2.0.2). Disponible online: <https://github.com/AgilData/jperf>
- [184] A. Sendin, I. Berganza, A. Arzuaga, A. Pulkkinen and I. H. Kim, "Performance results from 100,000+ PRIME smart meters deployment in Spain," 2012 IEEE Third International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm), Tainan, 145-150, 2012.
- [185] M. Kuzlu, M. Pipattanasomporn and S. Rahman, "Communication network requirements for major smart grid applications in HAN, NAN and WAN" in *Computer Networks* 67, 74–88, 2014.
- [186] Q. Ho, Y. Gao, G. Rajalingham and T. Le-Ngoc. "Wireless communications networks for the smart grid", Springer, 2014.
- [187] U.S. Department of Energy (DOE), Communications Requirements of Smart Grid Technologies, 2010. Disponible online: <https://energy.gov/gc/downloads/communications-requirements-smart-grid-technologies>.
- [188] K. Moslehi, A. B. R. Kumar, D. Shurtleff, M. Laufenberg, A. Bose and P. Hirsch, "Framework for a Self-Healing Power Grid," IEEE on Power Engineering Society Gen-eral Meeting, 3, 12-16, 3027, 2005.
- [189] J. Hu, Y. Li, T. Yong, J. Cao, J. Yu and W. Mao, "Distributed Cooperative Regulation for Multiagent Systems and Its Applications to Power Systems: A Survey," *Sci. World J.*, 1–12, 2014.
- [190] M. Yazdanian and A. Mehrizi-Sani, "Distributed control techniques in microgrids," *IEEE Trans. Smart Grid*, 5, 6, 2901–2909, 2014.
- [191] S. Rahimi, M. Marinelli, and F. Silvestro, "Evaluation of requirements for Volt/Var control and optimization function in distribution management systems," 2012 IEEE Int. Energy Conf. Exhib. ENERGYCON 2012, 331–336, 2012.
- [192] A. Haidine, B. Adebisi, A. Treytl, H. Pille, B. Honary and A. Portnoy, "High-speed narrowband PLC in Smart Grid landscape — State-of-the-art," 2011 IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications, Udine, 468-473, 2011.
- [193] J. M. Domingo, "Improvements in the plc systems for smart grids environments." PhD diss., Universidad Pontificia Comillas, 2013.
- [194] E. Alonso, J. M. Matanza, C. Rodriguez-Morcillo and S. Alexandres, "A switch promotion algorithm for improving PRIME PLC network latency. In Power Line Communications and its Applications (ISPLC), 18th IEEE International Symposium on, 278-283, 2014.

- [195] J. A. Corchado, E. Manero, J. A. Cortés, A. Sanz and L. Díez, "Application-layer performance analysis of PRIME in Smart Metering networks," 2016 IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm), Sydney, NSW, 332-337, 2016.

GLOSARIO

| | |
|-------|--------------------------------------------|
| AMI | Advanced Metering Infrastructures |
| AMR | Automatic Meter Reading |
| ASK | Amplitude Shift Keying |
| BB | Broad Band |
| BN | Base Node |
| BFSK | Binary Frequency Shift Keying |
| BPSK | Binary Phase Shift Keying |
| CC | Control Centre |
| CT | Centro de Transformación |
| DBPSK | Differential Binary Phase Shift Keying |
| DLC | Distribution Line Carrier/Communication |
| DC | Data Concentrator |
| DSL | Digital Subscriber Line |
| DSSS | Direct Sequence Spread Spectrum |
| EMC | Electro Magnetic Compatibility |
| FHSS | Frequency Hopping Spread Spectrum |
| FSK | Frequency Shift Keying |
| FV | Fotovoltaica |
| HV | High Voltage |
| IP | Internet Protocol |
| LV | Low Voltage |
| MAC | Medium Access Control |
| MV | Medium Voltage |
| NB | Narrow Band |
| OFDM | Orthogonal Frequency Division Multiplexing |
| PCSS | Parallel Combinatory Spread Spectrum |
| PPM | Pulse-position Modulation |

| | |
|---------|------------------------------------------------------------|
| PLC | Power Line Communications |
| PON | Passive Optical Network |
| PRIME | PoweRline Intelligent Metering Evolution |
| RCS | Ripple Carrier Signaling |
| RPC | Residential Power Circuit |
| SCADA | Supervisory Control and Distribution Automation |
| SM | Smart Meter |
| SN | Service Node |
| SFSK | Space-Frequency Shift Keying |
| SSCM | Spread Spectrum Carrier Modulation |
| TCP | Transmission Control Protocol |
| TWACS | Two-Way Automatic Communication systems |
| UDP | User Data Protocol |
| UPV/EHU | Universidad del País Vasco / Euskal Herriko Unibertsitatea |