

Resumen del proyecto fin de carrera

Estudio de algoritmos de procesamiento de señal
aplicados a la transmisión sobre la red eléctrica

Realizado por: Rafael Ángel García Garaluz

Dirigido por: Luis Díez del Río

Fecha de lectura: 4 de febrero de 2004

Parte I

Temática general del proyecto

1. Resumen general

Este proyecto aborda la mejora de la calidad en sistemas de transmisión basados en la red eléctrica, particularizado al ámbito del interior de edificios. Esta mejora se ha obtenido mediante el estudio del canal eléctrico y el desarrollo de algoritmos adaptativos que compensen el efecto de dicho canal en la señal recibida. Como resultado del estudio, se propone un algoritmo completo que se puede utilizar en el receptor. Para comprobar el funcionamiento, se han realizado una serie de simulaciones sobre canales reales para corroborar los resultados de los análisis teóricos.

Éste es, por tanto, un proyecto en el que se estudia, desarrolla y mejora la tecnología de comunicación a través de la red eléctrica, un sistema de banda ancha que cada vez se está utilizando más como red de comunicaciones. Además, los resultados obtenidos son inmediatamente aplicables a sistemas reales, ya que deduce un algoritmo completo del que se conocen todos sus parámetros. Hay que tener en cuenta que con éste algoritmo propuesto se mejoran substancialmente las prestaciones de este tipo de sistemas, sobre todo si se compara con lo que típicamente se está utilizando en la actualidad.

2. Introducción y justificación

Uno de los mayores problemas para la interconexión tradicional entre máquinas es el coste de la instalación del medio físico, sobre todo si se realiza sobre una construcción ya existente. Para evitarlo, actualmente se están desarrollando dos soluciones diferentes: el uso del enlace

radio, por una parte, y el uso de la red eléctrica como medio físico (*Power-Line Communications*, PLC) por otra. Igual que los sistemas inalámbricos, la utilización de la red eléctrica como soporte, no necesita introducir nuevo cableado, ya que el tendido eléctrico está suficientemente extendido y ramificado. La principal ventaja sobre éstos consiste en que no hace falta ubicar una banda en el espectro radioeléctrico, bastante saturado en la actualidad, ya que se utiliza un medio guiado en lugar del interfaz aire.

Las aplicaciones de los sistemas basados en PLC son dos principalmente: como parte de acceso a redes de telecomunicaciones de área extensa¹ en substitución al bucle de abonado u otro sistema, o como medio de físico de conexión para una red de área local dentro de un edificio. Esta última aplicación, que es la que se ha estudiado en este proyecto, es muy interesante, ya que aplicable directamente en el campo de la domótica, tan en auge en los últimos tiempos

Lo primero que hay que tener en cuenta cuando se está trabajando con la red eléctrica, es que las líneas no se concibieron para la comunicación de datos, sino para el reparto de energía eléctrica, a la que realmente no le afecta la forma de la respuesta en frecuencia. La principal característica de la red eléctrica es la ramificación y la desadaptación en general de todas las impedancias conectadas (de los diferentes aparatos conectados). Esto provoca que sea muy complicada la comunicación a través de este medio por dos razones diferentes.

- Las atenuación del canal es extremadamente elevada, incluso para distancias cortas.
- Aparece un gran número de reflexiones en la señal transmitida, lo que provoca la aparición de zonas de la respuesta en frecuencia donde prácticamente no se obtiene señal a la salida.

Este último hecho aconseja utilizar la técnica de modulación OFDM/DMT,² ya que al dividir el canal en subbandas, se obtiene un mayor rendimiento que con las técnicas de modulación tradicionales en este tipo de canales.

Por otra parte, el mayor inconveniente de la línea de red eléctrica es que, tanto la respuesta en frecuencia, como el nivel de ruido, son variantes con el tiempo, lo que hace que sea complicado diseñar un receptor adecuado para compensar el efecto del canal. A pesar de que no existen modelos estandarizados del canal eléctrico, según los estudios existentes existen dos tipos de variación temporal: a corto y a largo plazo ([1] y [2]).

Este proyecto se ha centrado en el estudio de las variaciones temporales a corto plazo y de métodos para compensar su efecto en todo lo posible.

Por tanto, la línea eléctrica se debe ver como un medio de transmisión con características nada apropiadas para la transmisión de información. Sin embargo, las ventajas que proporciona su uso con este fin, hace justificable el desarrollo de técnicas de transmisión-recepción apropiadas.

¹Especialmente para la conexión a Internet

²*Orthogonal Frequency-Division Multiplexing* y *Discrete multitone*, respectivamente.

3. Objetivos

Partiendo del esquema de transmisión DMT, el principal objetivo del proyecto consiste en estudiar y desarrollar los diferentes algoritmos que se pueden aplicar para la mejora de la calidad de la señal recibida, mediante el tratamiento de las variaciones temporales de los parámetros del canal. Además, también se considera objetivo la evaluación de las prestaciones de los algoritmos desarrollados, realizando un estudio comparativo entre ellos.

Dentro de este objetivo principal, el proyecto se ha centrado en el estudio y utilización de un algoritmo adaptativo para el seguimiento de la atenuación del canal, que es el problema principal que aparecen en los canales eléctricos. Además, también se realiza un estudio de las variaciones de gran amplitud, de tal forma que se puedan compensar sus efectos en el caso de que sea necesario.

Como complemento al estudio teórico, se han realizado gran número de simulaciones de los algoritmos sobre diferentes canales, tanto generados artificialmente para un primer estudio teórico, como para canales eléctricos reales. De esta forma se ha podido comprobar si las expresiones deducidas teóricamente se corresponden con el comportamiento real del sistema.

4. Descripción del estudio realizado

El estudio realizado se puede resumir en los siguientes apartados, que coinciden con los capítulos de la memoria:

1. Estudio básico de la transmisión sobre la red eléctrica y del modelado del canal, para poder extraer los parámetros necesarios a partir de medidas en canales reales.
2. Planteamiento de un modelo teórico del sistema sobre el que realizar el estudio.
3. Estudio teórico del seguimiento de las variaciones lentas del canal.
 - a) Estudio preliminar de algoritmos adaptativos genéricos, aplicados a la igualación de canales variantes.
 - b) Implementación y obtención detallada de las prestaciones del mejor algoritmo genérico (el LMS).
 - c) Estudio y diseño de modificaciones aplicables a este algoritmo para la mejora de la calidad en la recepción.
4. Estudio de la compensación de las transiciones abruptas en la atenuación del canal
 - a) Tratamiento de las transiciones abruptas.
 - b) Planteamiento de un posible algoritmo de detección de éstas.
5. Evaluación de prestaciones sobre canales reales y complejidad de las diferentes posibilidades elegidas. Comparación con los resultados teóricos
6. Obtención de conclusiones y planteamiento de las líneas futuras

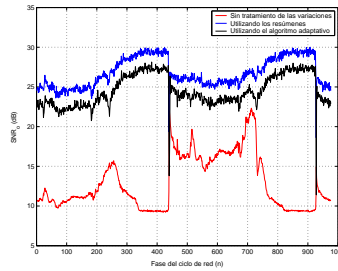


Figura 1: Comparación entre la relación señal a ruido a la salida, para un receptor simple, uno que utiliza los resúmenes (promediado de la señal) y uno que utiliza el algoritmo adaptativo.

5. Realización, resultados y conclusiones

Tal como se ha comentado anteriormente, este proyecto se ha centrado en el tratamiento de la variación temporal a corto plazo de los canales de línea eléctrica. A pesar de que sobre ésta apenas hay documentación, se ha podido observar que es una variación cíclica cuyo período coincide exactamente con el período de la energía eléctrica (50 Hz).

En los sistemas PLC actuales, se suele utilizar un simple promediado temporal, obteniendo el valor medio de la respuesta del canal (para cada portadora), de forma que se pueda compensar en el receptor, sin tener en cuenta que ésta varía con los 50Hz de la red. Sin embargo, aunque este método puede ser suficiente para un sistema con baja velocidad de transmisión, se puede mejorar substancialmente la relación señal a ruido a la salida (y, por tanto, disminuir la tasa de error), si se utiliza algún método que contemple la fuerte variación temporal que presenta la respuesta del canal.

La solución inmediata a esta variación consiste en realizar un promediado a través de varios ciclos, para estimar el valor de esta atenuación para cada fase del ciclo de red. Esta solución, aunque ofrece resultados casi óptimos, es inviable debido a dos razones. En primer lugar, la cantidad de memoria necesaria para almacenar la atenuación de las 976 fases de las 512 portadoras, es demasiado elevada para que sea económicamente rentable. En segundo lugar, y más importante, es que el tiempo de entrenamiento necesario (puede ser más de 1 segundo) es demasiado elevado como para poder ser afrontado.

En este proyecto, sin embargo, se propone la utilización de un algoritmo adaptativo, que ofrece peores prestaciones que el promediado, pero con menor coste, sobre todo en tiempo de entrenamiento (con el algoritmo propuesto, el entrenamiento dura únicamente un ciclo de red, 20 ms, pero puede ser incluso menor).

Una comparación de los tres métodos anteriormente expuestos (no hacer nada, método con promediado y método propuesto (algoritmo adaptativo) se puede ver en la figura 1.

Para decidir el tipo de algoritmo a utilizar, se ha estudiado un poco más la evolución temporal que presenta el canal, y considerando cada portadora por separado, se deduce que ésta se puede separar en dos tipos de variación que se superponen. Por un lado existe una variación relativamente lenta, pero continua, durante todo el ciclo de red; por otro, aparecen unos cambios grandes en magnitud y de corta duración. Por tanto, al combinar ambos fenómenos, se

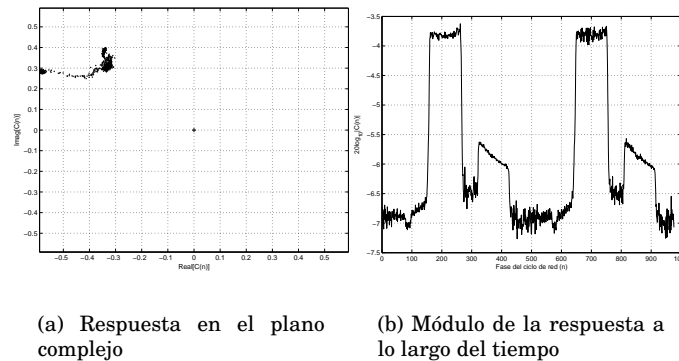


Figura 2: Respuesta del canal para la portadora 96 de una de las capturas

puede modelar la variación de la respuesta del canal como intervalos de tiempo con variación lenta y continua, separados por zonas de corta duración y gran variación (ver figura 2).

Esta separación en dos clases de variación de la atenuación se ha realizado principalmente porque de ese modo se puede separar el problema en dos problemas más sencillos: uno de seguimiento de variaciones lentas y otro de detección y tratamiento de las transiciones abruptas. De esta forma, el algoritmo a utilizar en una implementación real será una combinación de los algoritmos desarrollados para cada fenómeno por separado.

En cuanto al ruido, no se ha realizado un estudio explícito del comportamiento de éste, ya que no afecta al tipo de procesado a utilizar. Simplemente se utiliza como un parámetro más (incluido normalmente en la relación señal a ruido a la entrada) que afecta a las prestaciones finales del sistema, a los parámetros de detección de transiciones, etc, pero no a la decisión del algoritmo a utilizar.

Para el tratamiento de la variación lenta y continua, lo más apropiado es utilizar un algoritmo de seguimiento adaptativo. Tras realizar un estudio preliminar de las diferentes posibilidades, se ha optado por utilizar el algoritmo LMS, ya que da unas buenas prestaciones, no es muy complejo computacionalmente, es muy sencillo de estudiar y está muy bien documentado. Tras la elección, se ha realizado un estudio semi-empírico mucho más profundo de este algoritmo.

Como resultado de este estudio, se han obtenido expresiones cerradas de las prestaciones que puede ofrecer dicho algoritmo en función de varios parámetros de entrada. Gracias a estas expresiones, se ha podido realizar un proceso de optimización de los parámetros de dicho algoritmo para ajustarlo todo lo posible para aprovechar las características concretas del canal y de la modulación utilizada.

Finalmente se estudió la posibilidad de, basándose en el algoritmo LMS, desarrollar un algoritmo algo más complejo y con mejores prestaciones. La conclusión fue que sólo es necesario aplicar una normalización de la constante de adaptación respecto a la potencia de la señal de entrada, para conseguir unas prestaciones más que aceptables (de unos 2 dB de pérdida respecto al óptimo en el peor de los casos). El valor de la potencia de entrada se puede obtener

simplemente mediante un promediado de la potencia instantánea de las últimas muestras a la entrada.

En cuanto a las transiciones abruptas en la respuesta del canal, su efecto es doble. En primer lugar, provocan el error en la detección de símbolo, lo que provoca el malfuncionamiento del algoritmo a partir de ese instante. En segundo lugar, provocan que aparezcan transitorios lentos en la adaptación, con lo que en principio existen zonas donde la relación señal a ruido es muy baja. Sin embargo, el tratamiento de este problema es cualitativamente mucho más sencillo que el seguimiento de las variaciones lentas. En primer lugar se realiza una fase de entrenamiento donde se detectan las fases del ciclo de red donde aparecen estas transiciones y se almacena la atenuación que tiene el canal al final de éstas. Debido a la sincronización del canal con el ciclo de red, se sabe que en la misma fase de los ciclos posteriores va a aparecer la misma transición.

Durante el funcionamiento normal (tras el entrenamiento), el sistema espera a que llegue el símbolo de comienzo de alguna transición, instante en el que se tomarán las medidas adecuadas para protegerse frente a fallos en la decisión de símbolo.³ Cuando se llegue al final de la transición, el transmisor volverá a utilizar la constelación completa y el receptor modificará su coeficiente, para hacerlo igual al que se tiene almacenado, que es bastante exacto. Respecto a este algoritmo básico sólo son necesarios ciertos refinamientos en cuanto a la mejora de los coeficientes almacenados a lo largo del tiempo.

Según esto, el problema estaría resuelto de una forma muy sencilla. Sin embargo hay un detalle importante: es necesario establecer la diferencia entre transición abrupta y variación lenta. Tras un breve estudio teórico aproximado de la situación, se ha deducido un método basado en la estimación de ciertos parámetros para evaluar la variación de la atenuación, y de un umbral que depende principalmente de la potencia de error que aparece en el sistema.

A continuación se ha realizado un análisis del comportamiento de canales completos, observando que las posiciones donde ocurren las transiciones son idénticas para todas las portadoras. Este fenómeno se puede utilizar para mejorar la calidad de la detección de estas transiciones, si se considera detectada una transición cuando aparezca en cierto número de portadoras simultáneamente. De esta forma se pueden eliminar gran cantidad de posibles transiciones espúreas provocadas por los ruidos impulsivos que aparecen en estos canales.

Este método no pretende ser infalible, sino un complemento al tratamiento de las variaciones lentas que mejore, en la medida de lo posible, el funcionamiento global del sistema. De todas formas, hay que tener en cuenta que con el algoritmo de tratamiento y detección de las transiciones abruptas propuesto, el sistema se comporta, al menos, igual que si no se utilizase y, en la inmensa mayoría de las ocasiones, mucho mejor, ya que se reducen los transitorios al mínimo y se utiliza la información de la posición de las transiciones para tratarlas de forma especial.

Finalmente, tras el estudio teórico/empírico, se han unido los algoritmos resultantes para el tratamiento de ambos fenómenos en uno sólo y se ha probado éste en capturas procedentes de canales reales (lo que equivale a probarlo sobre canales reales directamente).

³Ya sea reduciendo la velocidad de transmisión mediante un cambio de constelación, ya sea dejando de transmitir información útil.

En primer lugar, tras abordar la problemática de una implementación *real* (donde un número de parámetros utilizados durante el estudio teórico son totalmente desconocidos), se le han añadido al algoritmo la estimación de estos parámetros desconocidos, principalmente la potencia de la señal recibida.

A continuación, se han presentado los resultados para ciertas capturas/portadoras que tienen un comportamiento interesante o ilustrativo del funcionamiento. Aparte de las portadoras donde el algoritmo se comporta tal como se esperaba (la inmensa mayoría), existen algunas de ellas para las que ocurren fenómenos no esperados. Tras una breve profundización en el tema se han observado ciertos *errores* en la realización de la captura o su resumen (ya sea por error en el transmisor o el receptor, o la aparición de un ruido no modelado), que tal vez sería necesario estudiar más profundamente.

Para las capturas que funcionan según se esperaba, se ha realizado una especie de resumen de las prestaciones. Éste ha consistido en obtener la función densidad de probabilidad de las pérdidas instantáneas respecto al valor límite de relación señal a ruido (el de la solución de Wiener). Este estudio arroja un resultado razonable: el máximo de probabilidad se encuentra para pérdidas cercanas a las del sistema invariante: 1,6 dB, lo que parece ser un resultado bastante correcto. Sin embargo, al obtener el valor medio de pérdidas, da como resultado que el algoritmo ofrece exactamente las prestaciones del ideal, lo que es imposible teóricamente. La razón de este resultado parece estar en las portadoras para las que se observan las *anomalías* de comportamiento, ya que aparecen en mayor o menor medida para gran cantidad de capturas. Mientras no se conozca la verdadera naturaleza de estas anomalías, hay que tomar los resultados numéricos (no así los cualitativos, que son claramente correctos), con bastante cautela.

Por otra parte, si se cotejan los resultados obtenidos con los valores teóricos, se puede determinar que en general (por lo menos para los canales estudiados, ver apartado ??) las variaciones del canal son suficientemente lentas para considerar que el error predominante es el proveniente del ruido (si no tenemos en cuenta las zonas de las transiciones abruptas). Este hecho hace que si se eligiera un valor menor de la constante de adaptación normalizado, tal vez las pérdidas sean menores. Sin embargo, como las prestaciones obtenidas utilizando la constante de adaptación elegida son suficientemente adecuadas (los aproximadamente 1,6 decibelios de pérdidas son aceptables), es preferible seguir utilizando dicha constante de adaptación para que la respuesta frente a las transiciones no detectadas y frente a posibles canales con velocidad de variación mucho más alta, sea suficientemente rápida.

Por tanto, en este proyecto se ha obtenido un algoritmo adaptativo para los canales basados en la red eléctrica que es relativamente simple y que ofrece una buena calidad de señal a la salida. Gracias a éste se consigue mejorar la calidad de recepción de los sistemas actuales hasta llegar prácticamente al máximo teórico, sin demasiado gasto computacional, de tiempo de entrenamiento o de memoria.

Parte II

Composición de la memoria

La memoria, al igual que el proyecto, se divide en tres partes principales, cada una de las cuales se compone de dos capítulos.

En la primera parte, *CONOCIMIENTOS PREVIOS*, se realiza un estudio básico de las comunicaciones basadas en la red eléctrica. La función de ésta es de introducción y contextualización del resto de la memoria, además de definir un modelo en el que se incluyen todas las señales y variables que se van a utilizar a continuación.

La segunda parte, *ANÁLISIS TEÓRICO DE LOS ALGORITMOS*, constituye el grueso del proyecto. En ésta se pretende realizar un estudio teórico de las características de los diferentes algoritmos que se pueden aplicar a la mejora de la recepción en el entorno de las comunicaciones a través de la red eléctrica. Cada uno de los capítulos que la componen se ocupan de resolver las diferentes problemáticas que presentan estos tipos de canales.

La tercera parte, *VALIDACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS Y CONCLUSIONES FINALES*, tiene como fin la corroboración de todos los resultados que se han deducido de forma teórica a lo largo del proyecto, mediante la aplicación a situaciones reales, siendo los resultados muy satisfactorios. Ésta última parte también incluye un último capítulo de conclusiones y líneas futuras.

Finalmente, aparecen cuatro apéndices, en los que aparece todo aquello que, aun siendo parte importante del trabajo realizado, se optó por no incluir en el cuerpo de la memoria para mejorar su lectura.

6. Resumen detallado de los diferentes capítulos

A continuación, se describe con más detalle el contenido de cada uno de los capítulos de los que consta la memoria.

6.1. CAPÍTULO 1: Estudio preliminar de los sistemas PLC

Tras una breve pequeña reseña histórica sobre los sistemas PLC, se pasa a realizar la descripción del sistema sobre el que se ha realizado el estudio: la comunicación a través de la red eléctrica en el interior de edificios.

En primer lugar se presentan las características del medio y el esquema de transmisión y modulación que se utiliza habitualmente en este tipo de sistemas. Es un sistema variante periódicamente en el tiempo y con profundos desvanecimientos tanto en frecuencia como en tiempo. Sobre éste se utiliza un método de transmisión multiportadora del tipo OFDM. Este método de transmisión condiciona notablemente el estudio a realizar, ya que convierte un problema de banda ancha, como son las comunicaciones PLC (con hasta 30 MHz de ancho

de banda), en una serie de sistemas en paralelo, cada uno de banda estrecha. Este hecho se aprovecha notablemente el diseño del receptor.

A continuación, se comentan las características de los canales PLC interiores, que consiste básicamente en la aparición de la periodicidad del ciclo de red en la respuesta del canal y en la potencia de ruido. Tras la observación de las respuestas de diferentes canales, se llega a la conclusión de que éstas se pueden separar en dos zonas claramente diferenciadas, cada una de las cuales requerirá un análisis completamente diferenciado:

- Zonas de variación lenta de la respuesta del canal, cuya duración es considerable en comparación con la duración del ciclo de red.
- Zonas de variación muy rápida, pero de duración muy pequeña en comparación con el ciclo de red.

Además, se establecen las tres formas de modelado de canales que se han utilizado en el proyecto: generados artificialmente, basados en capturas y basados en resúmenes de capturas.

En la última sección de este capítulo se encuentra una descripción más detallada de la problemática concreta que se pretende resolver con la realización del proyecto fin de carrera.

6.2. CAPÍTULO 2: Modelo utilizado para el estudio teórico

El segundo capítulo contiene básicamente definiciones de diferentes elementos que se utilizarán a lo largo de todo el proyecto. Estas definiciones van desde nomenclatura para las variables, señales y expresiones básicas más utilizadas hasta el establecimiento del límite alcanzable en las prestaciones (que corresponde con la solución de Wiener-Hopf).

Cabe destacar la definición detallada de los tres tipos de señales transmitidas que se van a utilizar: señales con función densidad de probabilidad (fddp) gaussiana, con fddp uniforme y señales de módulo (potencia) constante.

6.3. CAPÍTULO 3: Seguimiento de las variaciones lentas del canal

Éste es el capítulo más largo en la memoria y el que más tiempo llevó realizar. Es un estudio en el que se realiza un estudio teórico de diferentes algoritmos que se pueden aplicar al seguimiento de las variaciones del canal eléctrico. A lo largo de éste se deducen una serie de expresiones de medida de calidad que permiten un diseño adecuado para un sistema real de recepción.

En primer lugar, se realiza un estudio preliminar de tres algoritmos muy utilizados en receptores digitales: algoritmo *Least Mean Squares* (LMS), algoritmo *Recursive Least Squares* (RLS) y algoritmo de signo. Este estudio ha consistido en la comparación de diferentes parámetros de calidad de los algoritmos, tanto para el caso estacionario como variante, junto con un estudio de la complejidad. Aunque se ha basado en bibliografía (especialmente [3, 4, 5]), todas las expresiones se han particularizado para el canal eléctrico. Como resultado de la comparación, se escoge el algoritmo LMS, básicamente por cuatro razones:

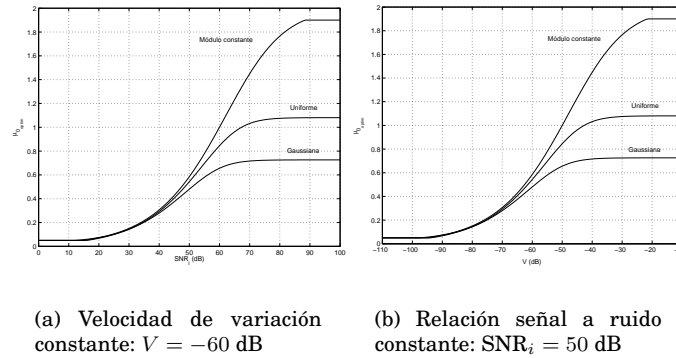


Figura 3: μ_0 óptima en función de SNR_i y V , manteniendo el otro parámetro fijo.

1. Es un algoritmo muy sencillo, muy documentado y utilizado, y con expresiones sencillas de manejar.
2. Tiene la misma capacidad de seguimiento del canal que el algoritmo RLS y es mucho menos complejo que éste.
3. Tiene mejores prestaciones que el algoritmo de signo.
4. La mayor complejidad frente al algoritmo de signo es despreciable frente a la complejidad del resto de operaciones del receptor.

Una vez se decide que el algoritmo a utilizar va a ser el LMS, se lleva a cabo sobre éste un estudio muy profundo, que no se ha podido encontrar en la bibliografía disponible. Gracias a las características del canal, se ha podido realizar el estudio semi-empírico en el que se obtiene una expresión cerrada de las prestaciones en función de los diferentes parámetros que definen tanto al algoritmo como al sistema: relación señal a ruido a la entrada (SNR_i), velocidad de variación del canal (V), modulación de la señal de entrada y la constante de adaptación del algoritmo (μ).

A continuación, se procede con el diseño de la constante de adaptación del algoritmo, para conseguir las mejores prestaciones posibles (ver ejemplos en la figura 3). Aunque se obtiene una expresión del valor óptimo, ésta no sería aplicable a un sistema real, ya que algunos de los parámetros son desconocido y difíciles de estimar con la suficiente fiabilidad. Por tanto, el problema de elección de un valor de constante de adaptación consiste en alcanzar un compromiso entre error causado por el ruido del sistema y error causado por la variación de éste, ya que el comportamiento frente a la variación de la constante de adaptación es contradictorio. Tras considerar la posibilidad de un algoritmo de ganancia adaptativa, se opta por utilizar el LMS de ganancia normalizada fija, cuyo valor depende únicamente del tipo de modulación de la señal transmitida.

Finalmente, para corroborar el estudio teórico, se prueba el algoritmo propuesto sobre *canales reales simplificados*, que consisten en filtrado de canales reales, con el objeto de eliminar la transiciones abruptas, que se tratan por separado en el capítulo siguiente. Gracias a este estudio, se puede comprobar que los parámetros seleccionados para el algoritmo, hacen que

éste tenga unas prestaciones muy cercanas al óptimo, sin que la complejidad sea demasiado elevada.

6.4. CAPÍTULO 4: Detección y tratamiento de las transiciones abruptas

Como un capítulo aparte, se aborda el problema del tratamiento de las transiciones abruptas que aparecen en la respuesta del canal de forma periódica. Este problema no es de seguimiento, sino de detección. La razón principal es que la variación es tan amplia y abrupta que si se utilizase simplemente el algoritmo adaptativo, es muy complicado que éste siga funcionando tras la aparición de ésta.

Se propone como solución, el establecer una secuencia de entrenamiento de un ciclo de red, tras la cual se conoce la posición y la magnitud de las diferentes transiciones abruptas que aparecen. Debido a que la respuesta del canal es periódica, se puede almacenar estos valores en una memoria, para utilizarlos durante el funcionamiento normal del algoritmo para compensar estas variaciones.

Se plantea entonces el problema de detección de una transición abrupta, incluyendo un criterio de definición de ésta como tal. Para conseguirlo, se define un método de medida de la variación de canal y, a continuación, se establecen unos umbrales de decisión. Éstos, basados en la velocidad de recuperación del algoritmo LMS, dependen básicamente de la relación señal a ruido que exista en el sistema para cada instante.

Para aumentar la fiabilidad de la detección, se aprovecha la correlación entre las diferentes portadoras OFDM, para de este modo, realizar una detección conjunta y así mitigar en todo lo posible el efecto del ruido y de la incertidumbre del momento exacto de la transición.

Finalmente, se prueba el algoritmo de detección y compensación de transiciones abruptas sobre capturas de canales reales a los que se les introduce diferente cantidad de ruido. De estas simulaciones se obtienen figuras del tipo *probabilidad de detección de transición* o *error en el instante de detección*, que ofrecen resultados bastante satisfactorios.

6.5. CAPÍTULO 5: Validación de los resultados obtenidos y conclusiones finales

En este capítulo se realizan pruebas del algoritmo diseñado sobre capturas de canales reales, para comprobar si todo lo desarrollado teóricamente es realizable en la práctica, por una parte, y si los valores de prestaciones obtenidos corresponden con la realidad, por otra.

En primer lugar se define una forma práctica de obtención de algunos parámetros del algoritmo (básicamente la potencia de la señal recibida, para la que se utiliza un promediado FIR sin solapamiento de ventana). Tras esto, se presenta el algoritmo completo, con la descripción detallada de los valores de todos sus parámetros, de tal forma que es directamente aplicable a un sistema real.

A continuación, se presentan algunos resultados particulares que se consideran los más característicos e ilustrativos del funcionamiento del sistema. En dichos casos, se muestra tanto

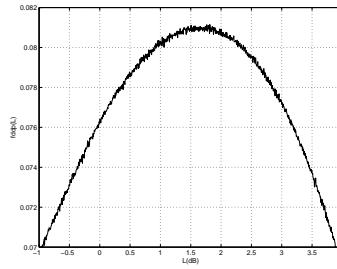


Figura 4: Función densidad de probabilidad de las pérdidas en decibelios.

el funcionamiento normal del algoritmo, que se corresponde totalmente con los resultados teóricos, como los pocos casos particulares en los que el algoritmo no se comporta tal como se esperaba.

Finalmente, se definen las pérdidas como la relación entre la relación señal a ruido obtenida con el algoritmo propuesto, respecto a la obtenida en el caso de la solución óptima de Wiener-Hopf. La función densidad de probabilidad de las pérdidas se ha tomado como parámetro global de la medida de la calidad (ver figura 4).

Como resultado final, se obtiene que el valor medio de las pérdidas en relación señal a ruido respecto a la solución óptima del sistema es de apenas 1,65 dB. Este resultado es bastante bueno, sobre todo si se tiene en cuenta que la solución óptima no se puede implementar de forma práctica, mientras que el algoritmo tiene una expresión cerrada y totalmente implementable.

6.6. CAPÍTULO 6: Conclusiones del proyecto

El último capítulo comienza con las conclusiones obtenidas de la realización del proyecto fin de carrera y finaliza con la enumeración de posibles líneas de investigación sobre las que se podría continuar el estudio de este tema en el futuro.

6.7. APÉNDICE A: Obtención de expresiones

En el primer apéndice se incluyen los desarrollos matemáticos detallados de todas aquellas expresiones que se han deducido y que no aparecen en ninguna de las fuentes bibliográficas consultadas. No se han incluido en el cuerpo principal de la memoria para facilitar su lectura, pero no podían ser obviadas debido a la gran aportación que estos desarrollos han realizado al proyecto.

6.8. APÉNDICE B: Posibles mejoras del algoritmo LMS

En este apartado se han incluido dos posibles mejoras del algoritmo LMS, que mejoran sus características a cambio de un incremento en la complejidad de éste. Las mejoras estudiadas han sido el *Algoritmo LMS con ganancia adaptativa*, definido en [3], y el *algoritmo LMS paralelo*, desarrollado en el transcurso del proyecto.

Tras un estudio bastante detallado de ambos algoritmos, se deduce que aunque realmente son mejores que algoritmo LMS básico, el beneficio que aportan no es suficiente como para justificar una mayor complejidad de implementación, junto con la necesidad de realizar un estudio mucho más extenso

6.9. APÉNDICE C: Características de los canales estudiados

En la primera parte de este apéndice, se realiza un estudio detallado de las características de los canales PLC a partir de una gran cantidad de capturas. Básicamente se ha realizado un estudio de valores típicos de relación señal a ruido y de velocidad de variación de la respuesta del canal, junto con la relación que existe entre ambos.

Finalmente, aparecen gráficas que representan las características del canal para diferentes portadoras, que han sido utilizadas a lo largo de la memoria para los ejemplos concretos.

6.10. APÉNDICE D: Algoritmos referenciados

En el último apéndice se incluyen la definición de algunos de algoritmos que se han utilizado y/o desarrollado a lo largo del proyecto. Aunque no se han incluido en el cuerpo principal de la memoria para mejorar su lectura, tienen gran importancia, sobre todo aquellos que han sido creados en este proyecto.

Referencias

- [1] H. Philipps, "Performance Measurements of Powerline Channels at High Frequencies," in *Proceedings of the International Symposium on Power-Line Communications and its applications (ISPLC'98)*, (Tokio, Japón), pp. 229–237, 1998.
- [2] F. J. Cañete, J. A. Cortés, L. Díez, and J. T. Entrambasaguas, "Broadband modelling of indoor power-line channels," *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 48, pp. 175–183, Feb. 2002.
- [3] S. Haykin, *Adaptive Filter Theory*. Prentice Hall Information and System Sciences Series, Upper Saddle River, New Jersey 07458: Prentice Hall, 3 ed., 1996.
- [4] B. Widrow and S. D. Stearns, *Adaptive Signal Processing*. Prentice-Hall Signal Processing Series, New Jersey: Prentice-Hall, 1 ed., 1985.
- [5] N. R. Yousef and A. H. Sayed, "A Unified Approach to the Steady-State and Tracking Analyses of Adaptive Filters," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 49, pp. 314–324, Feb. 2001.