

---

Estudio y simulación a través de Matlab del efecto de la no linealidad  
en sistemas OFDM

## Índice

|                                                           |           |
|-----------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Capítulo 1: Introducción .....</b>                     | <b>6</b>  |
| 1.1 Motivación del proyecto .....                         | 6         |
| 1.2 Objetivo y estructura del proyecto .....              | 9         |
| <b>Capítulo 2: Introducción a los sistemas OFDM .....</b> | <b>12</b> |
| 2.1 Introducción .....                                    | 12        |
| 2.2 Historia OFDM .....                                   | 13        |
| 2.3 Necesidad de OFDM .....                               | 15        |
| 2.4 Conceptos importantes .....                           | 19        |
| 2.4.1 Diferencia Mapeador-Modulador .....                 | 19        |
| 2.4.2 Caracterización de un canal wireless .....          | 21        |
| 2.4.3 Concepto canal fading .....                         | 23        |
| 2.4.4 Concepto de multiportadora .....                    | 24        |
| 2.4.5 Diferencia concepto FDM y OFDM .....                | 26        |
| 2.5 Definición OFDM .....                                 | 27        |
| 2.6 Modelo general de sistema OFDM .....                  | 30        |
| 2.6.1 Modelo en tiempo continuo .....                     | 33        |
| 2.6.2 Modelo en tiempo discreto .....                     | 40        |
| 2.6.3 Imperfecciones respecto al modelo ideal .....       | 43        |
| 2.7 Propiedades y características de OFDM .....           | 44        |
| 2.7.1 Importancia de la ortogonalidad .....               | 45        |

---

|                                                                 |           |
|-----------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.7.2 Efecto del desvanecimiento.....                           | 46        |
| 2.7.3 Retraso expandido y uso del prefijo cíclico .....         | 49        |
| 2.7.4 Número óptimo de portadoras y del intervalo de guarda.... | 54        |
| 2.7.5 Espectro de una señal OFDM .....                          | 55        |
| 2.7.6 PAPR (Peak to Average Power Ratio).....                   | 57        |
| 2.7.7 Parámetros de una señal real de OFDM.....                 | 58        |
| 2.8 Problemas OFDM.....                                         | 58        |
| 2.8.1 Sincronización de símbolo .....                           | 59        |
| 2.8.1.1 Estimadores de tiempo.....                              | 60        |
| 2.8.2 Ruido de fase de portadora.....                           | 62        |
| 2.8.3 Sincronización de la frecuencia de muestreo.....          | 62        |
| 2.8.4 Sincronización frecuencia de subportadora .....           | 63        |
| 2.8.4.1 Estimadores de frecuencia .....                         | 64        |
| 2.8.5 Problema de la amplitud.....                              | 65        |
| 2.8.6 Potencia fuera de banda .....                             | 66        |
| 2.8.7 Problema del multitrayecto .....                          | 67        |
| 2.9 Aplicaciones OFDM.....                                      | 69        |
| <b>Capítulo 3: Estudio no linealidad en sistema OFDM .....</b>  | <b>71</b> |
| 3.1 Introducción.....                                           | 71        |
| 3.2 Estudio general de las no linealidades.....                 | 73        |
| 3.2.1 Modelado del canal con y sin memoria .....                | 73        |
| 3.2.1.1 Representación en banda base .....                      | 75        |
| 3.2.1.2 El caso cuasi-sin memoria .....                         | 77        |
| 3.2.1.3 El caso sin memoria.....                                | 78        |
| 3.2.1.4 Algunos casos especiales.....                           | 79        |
| 3.2.1.4.1 Sistemas de Kernel Diagonal .....                     | 79        |
| 3.2.1.4.2 Sistema de Hammerstein.....                           | 80        |
| 3.2.1.4.3 Sistema de Kernel Separable.....                      | 81        |

---

---

|                                                                   |            |
|-------------------------------------------------------------------|------------|
| 3.2.1.4.4 Sistema Wiener .....                                    | 81         |
| 3.2.1.5 Conclusión .....                                          | 82         |
| 3.2.2 Modelos de Saleh para sistemas No Lineales .....            | 83         |
| 3.2.2.1 Modelo Amplitud-Fase.....                                 | 83         |
| 3.2.2.2 Modelo de Cuadratura .....                                | 84         |
| 3.2.2.3 Modelo en cuadratura dependiente de la frecuencia ....    | 86         |
| 3.2.3 Efecto de las no linealidades de un PA .....                | 88         |
| 3.2.3.1 Distorsión de la constelación (warping) .....             | 89         |
| 3.2.3.2 Regeneración del espectro (spectral regrowth) .....       | 89         |
| 3.2.3.3 Reducción de la eficiencia de la batería .....            | 92         |
| 3.2.4 Efecto de memoria .....                                     | 92         |
| 3.2.4.1 Medidas de dos tonos.....                                 | 95         |
| 3.2.5 Input Back-Off y Output Back-Off.....                       | 97         |
| 3.3 No linealidad en OFDM .....                                   | 98         |
| 3.3.1 Formulación del problema .....                              | 99         |
| 3.3.2 Caracterización de la variable de decisión.....             | 101        |
| 3.3.3 Evaluación de la probabilidad de error .....                | 108        |
| <b>Capítulo 4: Simulaciones en Matlab.....</b>                    | <b>110</b> |
| 4.1 Introducción.....                                             | 110        |
| 4.2 Características de las simulaciones .....                     | 111        |
| 4.3 Simulación OFDM lineal.....                                   | 112        |
| 4.4 Simulación OFDM no lineal.....                                | 119        |
| 4.5 Conclusiones de la simulación .....                           | 140        |
| <b>Capítulo 5: Conclusiones y líneas futuras de trabajo .....</b> | <b>142</b> |
| 5.1 Introducción.....                                             | 142        |
| 5.2 Conclusiones.....                                             | 142        |
| 5.3 Líneas futuras de trabajo.....                                | 143        |

---

|                               |            |
|-------------------------------|------------|
| <b>Anexo I: Códigos .....</b> | <b>144</b> |
| <b>Bibliografía.....</b>      | <b>150</b> |