

# Tabla de Contenidos

<b>Resumen.</b>	<b>I</b>
<b>Dedicatorias.</b>	<b>II</b>
<b>Agradecimientos.</b>	<b>IV</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2. Metodología de Diseño de Sistemas de Procesamiento Digital de Señales.</b>	<b>4</b>
2.1. Metodología de Diseño de Sistemas de PDS. . . . .	4
2.1.1. Planteamiento del Problema. . . . .	5
2.1.2. Análisis del Problema. . . . .	5
2.1.3. Diseño de la Solución y Construcción del Prototipo. . . . .	5
2.1.4. Prueba y Refinamiento del Prototipo. . . . .	6
2.1.5. Operación. . . . .	6
<b>3. Arquitectura de las Redes de Comunicación Inalámbrica WiMAX.</b>	<b>7</b>
3.1. Antecedentes. . . . .	8
3.2. Características principales de WiMAX. . . . .	9
3.3. Características de los estándares. . . . .	11
3.4. Arquitectura de las Redes WiMAX. . . . .	11
3.5. La Capa Física de WiMAX. . . . .	13
3.6. OFDM. . . . .	15
<b>4. Multiplexado con División en Frecuencia Ortogonal (OFDM).</b>	<b>17</b>
4.1. Definición y Estructura de OFDM. . . . .	17
4.1.1. Modulación con Múltiples Portadoras. . . . .	18
4.1.2. Las bases de OFDM. . . . .	19
4.1.3. Espectro del Multiplexado con División en Frecuencia. . . . .	21
4.2. La Transformada de Fourier Rápida en OFDM. . . . .	23

<b>5. Adecuación e Implementación de los Algoritmos de la Transformada de Fourier Rápida.</b>	<b>25</b>
5.1. La Transformada de Fourier Rápida. . . . .	27
5.2. Radix-2. . . . .	27
5.2.1. Decimación en el tiempo (DIT). . . . .	27
5.2.2. Decimación en Frecuencia (DIF). . . . .	30
5.3. Radix-4. . . . .	32
5.3.1. DIT y DIF. . . . .	32
5.4. Complejidad Aritmética de los Algoritmos FFT en Tiempo Real. . . . .	37
5.5. Programación de los algoritmos FFT. . . . .	38
5.5.1. FFT Radix-2 DIT. . . . .	38
5.5.1.1. Programación. . . . .	38
5.5.1.2. Programa. . . . .	41
5.5.2. FFT Radix-2 DIF. . . . .	42
5.5.2.1. Programación. . . . .	42
5.5.2.2. Programa. . . . .	44
5.5.3. FFT Radix-4 DIT. . . . .	45
5.5.3.1. Programación. . . . .	45
5.5.3.2. Programa. . . . .	47
5.5.4. FFT Radix-4 DIF. . . . .	48
5.5.4.1. Programación. . . . .	48
5.5.4.2. Programa. . . . .	50
5.6. Prueba y Validación de los Algoritmos FFT. . . . .	51
<b>6. Evaluación y Comparación de los Algoritmos FFT.</b>	<b>55</b>
6.1. Evaluación del Desempeño de los Algoritmos. . . . .	55
6.1.1. Precisión de Cálculo. . . . .	55
6.1.2. Velocidad de Cálculo. . . . .	62
6.2. Análisis de Resultados. . . . .	66
6.3. Selección del Algoritmo. . . . .	67
<b>7. Conclusiones Generales y Futuros Trabajos.</b>	<b>69</b>
7.1. Conclusiones. . . . .	69
7.2. Futuros Trabajos. . . . .	70
<b>Apéndices.</b>	<b>71</b>
<b>A. Códigos programados para Matlab.</b>	<b>72</b>
A.1. Algoritmos de la FFT. . . . .	72
A.1.1. Radix-2 DIT. . . . .	72
A.1.2. Radix-2 DIF. . . . .	72
A.1.3. Radix-4 DIT. . . . .	73
A.1.4. Radix-4 DIF. . . . .	74

A.2. Algoritmos inversos de la FFT. . . . .	74
A.2.1. Radix-2 DIT inverso. . . . .	74
A.2.2. Radix-2 DIF inverso. . . . .	75
A.2.3. Radix-4 DIT inverso. . . . .	75
A.2.4. Radix-4 DIF inverso. . . . .	76
A.3. Pruebas a los algoritmos. . . . .	76
A.3.1. Comparación con FFT de Matlab. . . . .	76
A.3.2. Precisión del módulo. . . . .	78
A.3.3. Precisión del ángulo de fase. . . . .	80
A.3.4. Tiempo de cálculo en segundos. . . . .	82
A.3.5. Tiempo de cálculo en “mflops”. . . . .	83
<b>Glosario</b>	<b>84</b>
<b>Bibliografía.</b>	<b>86</b>

# Indice de tablas

4.1. Principales parámetros de OFDM para WiMAX. . . . .	21
5.1. Proceso del ordenamiento de una señal con 16 muestras por bit inverso. . .	30
5.2. Proceso del ordenamiento de una señal con 16 muestras por dígito inverso base 4. . . . .	35
5.3. Número de operaciones necesarias para el cálculo de la DFT y los diferentes algoritmos para ser implementadas en tiempo real. . . . .	37
5.4. Número de cálculos necesarios para la FFT en OFDM WiMAX . . . . .	37
5.5. Porcentaje de ahorro en el número de cálculos necesarios para la FFT en OFDM WiMAX . . . . .	38
5.6. Señales empleadas en la simulación. . . . .	51
6.1. Error promedio cuadrático de los algoritmos hacia adelante en el módulo. . .	57
6.2. Error promedio cuadrático de los algoritmos hacia atrás en el módulo. . . .	58
6.3. Varianza del error para los algoritmos hacia adelante en el módulo. . . . .	59
6.4. Varianza del error para los algoritmos en el módulo hacia atrás. . . . .	59
6.5. Error cuadrático promedio de los algoritmos hacia adelante en el ángulo de fase. . . . .	60
6.6. Error promedio cuadrático de los algoritmos hacia atrás en el ángulo de fase.	61
6.7. Varianza del error para los algoritmos hacia adelante en el ángulo de fase. .	62
6.8. Varianza del error para los algoritmos hacia atrás en el ángulo de fase. . . .	62
6.9. Tiempo de cálculo de los algoritmos en segundos. . . . .	64
6.10. Velocidad de cálculo para los algoritmos en “mflops”. . . . .	66

# Índice de figuras

3.1. Modelo de referencia de las redes WiMAX. . . . .	12
3.2. Diagrama de la Capa Física de WiMAX. . . . .	14
4.1. Diagrama de bloques de un sistema OFDM . . . . .	20
4.2. Espectro de la modulación FDM. . . . .	22
4.3. Espectro de la modulación OFDM. . . . .	22
5.1. Representación en círculo unitario del factor de fase. . . . .	26
5.2. Representación de la mariposa del algoritmo de la FFT Radix-2 DIT. . . . .	28
5.3. Gráfica de flujo del algoritmo FFT Radix-2 DIT para una señal con 16 muestras. . . . .	29
5.4. Representación de la mariposa del algoritmo FFT Radix-2 DIF. . . . .	31
5.5. Gráfica de flujo del algoritmo FFT Radix-2 DIF para una señal con 16 muestras. . . . .	31
5.6. Representación de la mariposa del algoritmo FFT Radix-4. (a) Forma com- pleta (b) Forma simplificada . . . . .	33
5.7. Gráfica de flujo del algoritmo FFT Radix-4 DIT. . . . .	34
5.8. Gráfica de flujo del algoritmo FFT Radix-4 DIF. . . . .	36
5.9. Diagrama de Flujo del Radix-2 DIT FFT. . . . .	40
5.10. Diagrama de Flujo del Radix-2 DIF FFT. . . . .	43
5.11. Diagrama de Flujo del Radix-4 DIT FFT. . . . .	46
5.12. Diagrama de Flujo del Radix-4 DIF FFT. . . . .	49
5.13. Representación en frecuencia de las señales. Comparación entre FFT de Matlab y FFT <b>Radix-2 DIT</b> programada. . . . .	52
5.14. Representación en frecuencia de las señales. Comparación entre FFT de Matlab y FFT <b>Radix-2 DIF</b> programada. . . . .	52
5.15. Representación en frecuencia de las señales. Comparación entre FFT de Matlab y FFT <b>Radix-4 DIT</b> programada. . . . .	53
5.16. Representación en frecuencia de las señales. Comparación entre FFT de Matlab y FFT <b>Radix-4 DIF</b> programada. . . . .	53

6.1. Señal de entrada de $N = 1024$ puntos. . . . .	56
6.2. Error promedio cuadrático hacia adelante en el módulo. . . . .	57
6.3. Error promedio cuadrático hacia atrás en el módulo. . . . .	58
6.4. Error promedio cuadrático hacia adelante del ángulo de fase. . . . .	60
6.5. Error promedio cuadrático hacia atrás del ángulo de fase. . . . .	61
6.6. Comparación del tiempo de cálculo en segundos para los algoritmos programados y la FFT de Matlab. . . . .	63
6.7. Comparación de la velocidad de cálculo en “mflop” para los algoritmos programados y la FFT de Matlab. . . . .	65
6.8. Comparación de la velocidad de cálculo en “mflops” para los algoritmos programados. . . . .	65