

Tabla de Contenido

Índice de Tablas	viii
Índice de Ilustraciones	ix
Índice de Ecuaciones	xi
Acrónimos	xii
1 Introducción	1
1.1 Prólogo del Capítulo de la Introducción	1
1.2 Antecedentes	1
1.3 Motivación	2
1.4 Objetivos	4
1.4.1 Objetivo General	4
1.4.2 Objetivos Específicos	4
1.5 Hipótesis del Trabajo y Metodología	4
1.6 Estructura de la Tesis	5
1.7 Epílogo del Capítulo de la Introducción	5
2 Marco Teórico	6
2.1 Prólogo del Capítulo del Marco Teórico	6
2.2 Introducción a la Comunicación Digital	6
2.2.1 Objetivos del Diseño del Sistema de Comunicación	6
2.2.2 Codificación y Decodificación de Fuente	8
2.2.3 Codificación y Decodificación de Canales	9
2.2.4 Pasos en el Diseño de Codificación de Canal	9
2.2.5 Algunos Modelos de Canales	9
2.2.6 Enfoque de Diseño de Codificación de Canal	10
2.3 Fundamentos de la Codificación de Canal	11
2.4 Decisión Soft vs Decisión Hard	12
2.4.1 Discusión Bibliográfica de Decisión Soft vs Decisión Hard	13
2.5 Tipos de Codificación de Canal	14
2.6 Códigos de Bloque	15
2.6.1 Discusión Bibliográfica de los Códigos de Bloque	16
2.7 Códigos Convolutivos	16
2.7.1 Estructura del Codificador	16
2.7.2 Representaciones del Codificador	18
2.7.3 Representación Matricial o Polinómica	18

2.7.4	Diagrama de Estados	20
2.7.5	Diagrama de Caminos (Trellis o Enrejado)	21
2.7.6	Distancias de los Códigos Convolutivos	22
2.7.7	RSC vs NSC	23
2.7.8	Proceso de Decodificación (Algoritmo de Viterbi)	23
2.7.9	Discusión Bibliográfica de los Códigos Convolutivos	27
2.8	Turbo Códigos	27
2.8.1	Turbo Codificador	28
2.8.2	Discusión Bibliográfica de los Turbo Códigos	29
2.9	Características del Canal de Radio	30
2.9.1	Física de la Transmisión de Radio	31
2.9.2	Efectos de Señales Extrañas	35
2.9.3	Equipo de Transmisión y Recepción	36
2.10	Tecnología Habilitadora LTE	37
2.10.1	Acceso Múltiple por División de Frecuencia Ortogonal (OFDMA)	37
2.10.2	Acceso Múltiple por División de Frecuencia de Portadora Única (SC-FDMA)	39
2.10.3	Discusión Bibliográfica de las Tecnologías Habilitadoras LTE	43
2.11	Modelos de Detección	44
2.11.1	Test de Hipótesis	44
2.11.2	Errores del Test de Hipótesis	45
2.12	Epílogo del Capítulo del Marco Teórico	45
3	Metodología	46
3.1	Prólogo del Capítulo de la Metodología	46
3.2	Sistema de Comunicación Digital	46
3.3	Diseño de la Métrica de Distribución para las Portadoras del Sistema SC-FDMA	48
3.4	Implementación del Sistema SC-FDMA usando Trellis-Viterbi	54
3.4.1	Transmisor SC-FDMA	54
3.4.2	Canal de SC-FDMA	55
3.4.3	Receptor SC-FDMA	60
3.5	Codificación Convolutiva y Decodificación de Viterbi en el Sistema de SC-FDMA	61
3.5.1	Codificación de Trellis de Códigos Convolutivos	61
3.5.2	Estructura del Codificador, Diagrama de Estado y Trellis	63
3.5.3	Decodificación de Viterbi de Códigos Convolutivos	65
3.6	Cálculo del Tamaño de la Muestra para el Sistema SC-FDMA con y sin Trellis-Viterbi	70
3.7	Epílogo del Capítulo de la Metodología	72
4	Resultados y Discusión	73
4.1	Prólogo del Capítulo de Resultados y Discusión	73
4.2	Análisis de Mapeo de Portadoras SC-FDMA en el Canal AWGN	73
4.3	Discusión de Mapeo de Portadoras SC-FDMA en el Canal AWGN	79
4.4	Evaluación de la Distribución de Portadoras SC-FDMA con y sin Trellis-Viterbi bajo Diferentes Escenarios en el Canal	80

4.4.1	Comparación de SC-IFDMA con SC-LFDMA sin Trellis-Viterbi en un Canal con Desvanecimiento Selectivo en Frecuencia y Ganancia Selectiva de Frecuencia usando Ruido AWGN en 1 Portadora	80
4.4.2	Comparación de SC-IFDMA con SC-LFDMA sin Trellis-Viterbi en un Canal con Desvanecimiento Selectivo en Frecuencia usando Ruido AWGN en 1 Portadora	82
4.4.3	Comparación de SC-IFDMA con SC-LFDMA sin Trellis-Viterbi en un Canal con Desvanecimiento Selectivo en Frecuencia y Ganancia Selectiva de Frecuencia usando Ruido AWGN en 4 Portadoras	83
4.4.4	Comparación de SC-IFDMA con SC-LFDMA sin Trellis-Viterbi en un Canal con Desvanecimiento Selectivo en Frecuencia usando Ruido AWGN en 4 Portadora	85
4.4.5	Comparación de SC-IFDMA con SC-LFDMA con Trellis-Viterbi en un Canal con Desvanecimiento Selectivo en Frecuencia y Ganancia Selectiva de Frecuencia usando Ruido AWGN en 1 Portadora	86
4.4.6	Comparación de SC-IFDMA con SC-LFDMA con Trellis-Viterbi en un Canal con Desvanecimiento Selectivo en Frecuencia usando Ruido AWGN en 1 Portadora	88
4.4.7	Comparación de SC-IFDMA con SC-LFDMA con Trellis-Viterbi en un Canal con Desvanecimiento Selectivo en Frecuencia y Ganancia Selectiva de Frecuencia usando Ruido AWGN en 4 Portadoras	90
4.4.8	Comparación de SC-IFDMA con SC-LFDMA con Trellis-Viterbi en un Canal con Desvanecimiento Selectivo en Frecuencia usando Ruido AWGN en 4 Portadora	92
4.5	Discusión de la Distribución de Portadoras SC-FDMA con y sin Trellis-Viterbi bajo Diferentes Escenarios en el Canal	94
4.6	Epílogo del Capítulo de Resultados y Discusión	95
5	Conclusiones	96
5.1	Recomendaciones	97
5.2	Trabajos Futuros	97
	Bibliografía	98
	Anexos	102
A	Paper enviado y aceptado por el LATINCOM 2016	103
B	Análisis del rendimiento del sistema LTE	109
1	BER vs SNR de OFDMA y SC-FDMA en el canal AWGN	109
2	BER vs SNR de OFDMA y SC-FDMA en el canal de desvanecimiento de Rayleigh	110
C	Programa en Matlab del sistema SC-FDMA usando Trellis-Viterbi	111
D	Cálculo de métricas de rama y estados predecesores sobrevivientes para los instantes $t=3,4,5,6,7$	119
E	Programa en Matlab del análisis de rendimiento del mapeo de portadoras localizada y entrelazada en un canal con ruido AWGN	121
F	Programa en Matlab de la función de distribución empírica para el PAPR, energía de símbolo y E_b/N_0 en un canal con y sin ruido AWGN	128

G	Uso de R para la evaluación del test de hipótesis	135
1	Test de hipótesis que compara SC-IFDMA con SC-LFDMA sin trellis- viterbi en un canal con desvanecimiento selectivo en frecuencia y ga- nancia selectiva de frecuencia usando ruido AWGN en 1 portadora . .	135
2	Test de hipótesis que compara SC-IFDMA con SC-LFDMA sin trellis- viterbi en un canal con desvanecimiento selectivo en frecuencia usando ruido AWGN en 1 portadora	139
3	Test de hipótesis que compara SC-IFDMA con SC-LFDMA sin trellis- viterbi en un canal con desvanecimiento selectivo en frecuencia y ga- nancia selectiva de frecuencia usando ruido AWGN en 4 portadoras .	143
4	Test de hipótesis que compara SC-IFDMA con SC-LFDMA sin trellis- viterbi en un canal con desvanecimiento selectivo en frecuencia usando ruido AWGN en 4 portadoras	147
5	Test de hipótesis que compara SC-IFDMA con SC-LFDMA con trellis- viterbi en un canal con desvanecimiento selectivo en frecuencia y ga- nancia selectiva de frecuencia usando ruido AWGN en 1 portadora . .	151
6	Test de hipótesis que compara SC-IFDMA con SC-LFDMA con trellis- viterbi en un canal con desvanecimiento selectivo en frecuencia usando ruido AWGN en 1 portadora	155
7	Test de hipótesis que compara SC-IFDMA con SC-LFDMA con trellis- viterbi en un canal con desvanecimiento selectivo en frecuencia y ga- nancia selectiva de frecuencia usando ruido AWGN en 4 portadoras .	159
8	Test de hipótesis que compara SC-IFDMA con SC-LFDMA con trellis- viterbi en un canal con desvanecimiento selectivo en frecuencia usando ruido AWGN en 4 portadoras	163

Índice de Tablas

2.1	Deficiencias de transmisión en sistemas celulares	31
3.1	Parámetros de los tipos de mapeo de portadoras	50
3.2	Proceso de codificación	63
3.3	Tabla de estado del codificador convolucional (2,1,3)	64
3.4	Métrica de rama acumulada seleccionada	68
3.5	Estados predecesores sobrevivientes	68
3.6	Operación de rastreo de los estados predecesores sobrevivientes	68
3.7	Estados según la operación de rastreo	69
3.8	Transición de estado	69
3.9	Mensaje original	69
3.10	Tamaño de la muestra para SC-IFDMA y SC-LFDMA sin Trellis-Viterbi . .	71
3.11	Tamaño de la muestra para SC-IFDMA y SC-LFDMA con Trellis-Viterbi . .	72
4.1	Función de distribución empírica sin ruido para PAPR y energía de símbolo .	77
4.2	Función de distribución empírica para PAPR, energía de símbolo y E_b/N_0 con una densidad espectral de ruido de 13 dBm/Hz	78
4.3	Parámetros de simulación del sistema	79
4.4	Resultados del test de Student para la E_b/N_0 y P_b	81
4.5	Resultados del test de Student para la E_b/N_0 y P_b	82
4.6	Resultados del test de Student para la E_b/N_0 y P_b	84
4.7	Resultados del test de Student para la E_b/N_0 y P_b	85
4.8	Resultados del test de Student para el PAPR, E_b/N_0 y P_b	87
4.9	Resultados del test de Student para el PAPR, E_b/N_0 y P_b	89
4.10	Resultados del test de Student para el PAPR, E_b/N_0 y P_b	91
4.11	Resultados del test de Student para el PAPR, E_b/N_0 y P_b	93
4.12	Parámetros de simulación del sistema con y sin Trellis-Viterbi	94
6.1	Archivo SC-IFDMA_vs_SC-LFDMA.csv	135
6.2	Archivo SC-IFDMA_vs_SC-LFDMA.csv	139
6.3	Archivo SC-IFDMA_vs_SC-LFDMA.csv	143
6.4	Archivo SC-IFDMA_vs_SC-LFDMA.csv	147
6.5	Archivo SC-IFDMA_TR_VT_vs_SC-LFDMA_TR_VT.csv	151
6.6	Archivo SC-IFDMA_TR_VT_vs_SC-LFDMA_TR_VT.csv	155
6.7	Archivo SC-IFDMA_TR_VT_vs_SC-LFDMA_TR_VT.csv	159
6.8	Archivo SC-IFDMA_TR_VT_vs_SC-LFDMA_TR_VT.csv	163

Índice de Ilustraciones

1.1	Hipótesis original	3
1.2	Hipótesis encontrada	3
2.1	Diagrama de bloques de un sistema de comunicaciones	7
2.2	Representación del canal binario simétrico	10
2.3	Valores recibidos con decisión soft en un canal discreto sin memoria	13
2.4	Clasificación de los códigos correctores de errores	15
2.5	Ejemplo de codificador convolucional de memoria 2	17
2.6	Diagrama de estados del codificador de la Figura 2.5	20
2.7	Trellis del codificador de la Figura 2.5	21
2.8	Leyenda del codificador de la Figura 2.5	22
2.9	Esquema básico del codificador del Turbo Código	28
2.10	Potencia de la señal recibida en función de la distancia entre el transmisor y el receptor	32
2.11	El espectro Doppler clásico	33
2.12	Propagación por trayectos múltiples	34
2.13	Diagrama de bloques del transceptor OFDMA	38
2.14	Inserción de prefijo cíclico (CP)	39
2.15	Diagrama de bloques del transceptor SC-FDMA	40
2.16	Diagrama de bloques de los símbolos SC-FDMA expresados en el dominio de tiempo y frecuencia	40
3.1	Diagrama de bloques del sistema de comunicación SC-FDMA	47
3.2	Intersección entre el SNR y el PAPR	49
3.3	Tipos de mapeo de portadoras con variables S , N , sf , y y x	50
3.4	Representación de las variables x y y	51
3.5	Punto óptimo usando el método intercalado	53
3.6	Diagrama de bloques del transmisor SC-FDMA	54
3.7	Canal con ruido gaussiano blanco aditivo	56
3.8	portadoras en el canal AWGN	56
3.9	Canal con desvanecimiento selectivo en frecuencia usando ruido AWGN	57
3.10	Portadoras en el canal con desvanecimiento selectivo en frecuencia usando ruido AWGN	58
3.11	Canal con desvanecimiento selectivo en frecuencia y ganancia selectiva de frecuencia usando ruido AWGN	59
3.12	Portadoras en el canal con desvanecimiento selectivo en frecuencia y ganancia selectiva de frecuencia usando ruido AWGN	60
3.13	Diagrama de bloques del sistema receptor SC-FDMA	61

3.14	Estructura del codificador para (2,1,3)	63
3.15	Diagrama de estado para (2,1,3)	64
3.16	Diagrama de Trellis del ejemplo anterior	65
3.17	Algoritmo de Viterbi en t=0	66
3.18	Algoritmo de Viterbi en t=1	67
3.19	Algoritmo de Viterbi en t=2	67
4.1	Tasa de error binario vs E_b/N_0	74
4.2	Ganancia selectiva de frecuencia para SC-LFDMA y SC-IFDMA	75
4.3	Mapeo de portadoras para múltiples usuarios	76
4.4	Diversidad de frecuencias para SC-LFDMA y SC-IFDMA	77
6.1	BER vs SNR para OFDMA y SC-FDMA en el canal AWGN	109
6.2	BER vs SNR para OFDMA y SC-FDMA en el canal de desvanecimiento de Rayleigh	110
6.3	Algoritmo de Viterbi en t=4 y t=5	119
6.4	Algoritmo de Viterbi en t=6 y t=7	120

Índice de Ecuaciones

2.1	Ecuación de la entropía	12
2.2	Ecuación de la capacidad de canal	12
2.3	Ecuación de la relación señal a ruido	12
2.4	Ecuación matemática de códigos convolucionales	18
2.5	Ecuación de polinomios generadores	18
2.6	Ecuación de códigos convolucionales con matriz generadora	19
2.7	Ecuación de la matriz generadora	19
2.8	Ecuación de la matriz generadora con conexiones establecidas	19
2.9	Ecuación de la matriz generadora en forma polinómica	20
2.10	Ecuación de la distancia de los códigos convolucionales	22
2.11	Ecuación de la distancia libre de los códigos convolucionales	22
2.12	Ecuación para corregir una secuencia errónea de los códigos convolucionales	23
2.13	Ecuación matemática de la secuencia más probable del algoritmo de viterbi	24
2.14	Ecuación matemática del algoritmo de viterbi aplicando el teorema de Bayes	24
2.15	Ecuación matemática del algoritmo de viterbi considerando un proceso de Markov	24
2.16	Ecuación matemática del algoritmo de viterbi aplicando logaritmo natural	25
2.17	Ecuación para cada una de las métricas del algoritmo de viterbi	25
2.18	Ecuación de la métrica total del algoritmo de viterbi	25
2.19	Ecuación de la métrica acumulada del algoritmo de viterbi	25
2.20	Ecuación de la tasa total del turbo código	29
2.21	Ecuación matemática del espectro doppler	33
2.22	Ecuación de la potencia de ruido de densidad espectral	36
2.23	Ecuación de la potencia de ruido atmosférico en vatios	36
2.24	Ecuación de la potencia de ruido atmosférico en dBm	36
2.25	Ecuación del mapeo de portadoras localizadas de SC-FDMA	42
2.26	Ecuación de los símbolos del dominio del tiempo de SC-LFDMA	42
2.27	Ecuación del mapeo de portadoras intercaladas de SC-FDMA	42
2.28	Ecuación de los símbolos del dominio del tiempo de SC-IFDMA	43
2.29	Ecuación del mapeo de portadoras distribuidas de SC-FDMA	43
2.30	Ecuación de los test de hipótesis	45
3.1	Ecuación de magnitud de la diferencia	70
3.2	Ecuación de proporción de sujetos	70
3.3	Ecuación de la distribución normal	70
3.4	Ecuación del tamaño de la muestra	70