

## Contenido

1	Introducción y objetivos .....	9
1.1	Introducción.....	9
1.2	Objetivos .....	12
2	Estado del Arte .....	13
2.1	Sistema de Información C4ISR.....	13
2.1.1	Arquitecturas y frameworks de sistemas C4ISR .....	13
2.1.2	Clasificación de sistemas C4ISR .....	18
2.2	Arquitectura de comunicaciones para sistemas de información de mando y control .....	23
2.2.1	Características y consideraciones de diseño .....	24
2.2.2	Escenarios de uso .....	30
2.2.3	Arquitecturas Cross-layer .....	33
2.2.4	Redes cognitivas .....	35
3	Componentes tecnológicos de la arquitectura de comunicaciones para un C4IS.....	36
3.1	Sistemas de tiempo real. ....	36
3.2	Comunicaciones en entornos tácticos.....	38
3.2.1	Comunicaciones tácticas .....	38
3.2.2	Comunicaciones civiles .....	41
3.3	Modelos de QoS.....	59
3.3.1	QoS en redes WLAN .....	61
3.3.2	QoS en WIMAX .....	63
3.4	Enrutamiento en redes de datos inalámbricas para entornos tácticos.....	67
3.4.1	Retos de diseño.....	67
3.4.2	Clasificación de protocolos de enrutamiento.....	69
3.4.3	Enrutamiento multicast .....	72
3.5	Sistemas de gestión, operación y mantenimiento .....	75
3.5.1	Estado actual de la gestión de red.....	75
3.5.2	Estándares de gestión de red .....	76
3.5.3	Sistemas de gestión basados en web.....	78
3.5.4	Sistemas de gestión basados en XML.....	78
3.5.5	Gestión en redes inalámbricas .....	84
4	Diseño e implementación de una arquitectura de comunicaciones inalámbricas para sistemas C4ISR.....	89

4.1	Arquitectura de comunicaciones propuesta .....	89
4.1.1	Arquitectura de red .....	92
4.1.2	Arquitectura de software .....	95
4.1.3	Plano de gestión cross-layer .....	98
4.1.4	Esquemas de replicación de datos .....	102
4.2	Implementación de los módulos de comunicaciones inalámbricas.....	109
4.2.1	Caracterización del medio radio.....	109
4.2.2	Módulo HF .....	115
4.2.3	Módulo VHF.....	115
4.2.4	Módulo UHF .....	116
4.2.5	Módulo de comunicaciones satelitales.....	118
4.2.6	Módulo Wireless LAN 802.11 .....	119
4.2.7	Módulo MESH. ....	121
4.2.8	Módulo WiMAX 802.16d .....	122
5	Validación de la arquitectura de comunicaciones inalámbricas para sistemas C4ISR	128
5.1	Introducción a los escenarios de prueba.....	128
5.2	Escenario 1: Comunicaciones tácticas sobre múltiples tecnologías de transmisión	128
5.2.1	Descripción y evolución del escenario de pruebas .....	128
5.2.2	Conclusiones sobre la validación de la arquitectura en el escenario 1.....	148
5.3	Escenario 2: Comunicaciones civiles sobre WiFi, WiMAX y Mesh .....	148
5.3.1	Descripción y evolución del escenario de pruebas .....	148
5.3.2	Conclusiones sobre la validación de la arquitectura en el escenario 2.....	159
5.4	Escenario 3: Comunicaciones tácticas sobre WiMAX .....	160
5.4.1	Descripción del escenario de pruebas .....	160
5.4.2	Conclusiones sobre la validación de la arquitectura en el escenario 3.....	165
6	Conclusiones y trabajo futuro.....	166
6.1	Conclusiones .....	166
6.2	Trabajo futuro .....	168
7	Bibliografía.....	170

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Calidad del Mando y control .....	16
Figura 2. Dominios de NCW y su interrelación.....	17
Figura 3. Clasificación de sistemas C4IS .....	19
Figura 4. Arquitectura de comunicaciones de redes inalámbricas comerciales.....	24
Figura 5. Vista de las redes inalámbricas tácticas con islas jerárquicas de subredes.....	30
Figura 6. Bucle OODA completo.....	35
Figura 7. Capa de protocolos del estándar 802.11 .....	41
Figura 8. Capa de protocolos del estándar 802.11 .....	42
Figura 9. Arquitectura de red IEEE 802.11. ....	43
Figura 10. Ejemplo de implementación de arquitectura dependiente de red IEEE 802.11	46
Figura 11. Una variación de la arquitectura dependiente de red IEEE 802.11 .....	46
Figura 12. Modelo de red mesh propuesto por IEEE 802.11s .....	50
Figura 13. Capas de protocolo del estándar 802.16 BWA.....	52
Figura 14. Modelo de referencia de red WiMAX con componentes (MS/ASN/CSN), puntos de referencia (RI a R5) y actores (NAP/NSP/ASP).....	55
Figura 15. Modelo de referencia de ASN genérico.....	56
Figura 16. Perfiles ASN A, B y C. ....	57
Figura 17. Clasificación y mapeo de tráfico en IEEE 802.11. ....	62
Figura 18. Mecanismo de acceso EDCA.....	62
Figura 19. Arquitectura básica QoS WiMAX.....	65
Figura 20. Arquitectura QoS WiMAX extremo a extremo .....	66
Figura 21. Arquitectura de gestión de red generalizada basada en XML .....	79
Figura 22. Tres ejemplos de arquitecturas basadas en XML.....	80
Figura 23. Arquitectura general de un sistema de gestión de red basado en XML.....	81
Figura 24. Arquitectura del agente basado en XML .....	83
Figura 25. Arquitectura de gestión centralizada en redes WLAN.....	86
Figura 26. Esquema de la WMAN IF MIB definida en IEEE 802.16f .....	87
Figura 27. Modelo de referencia de administración de red como se define en 802.16f .....	87
Figura 28. Detalle de la definición de una capa cross-layer.....	90
Figura 29. Esquema general de la arquitectura cross-layer propuesta .....	91
Figura 30. Arquitectura General cross-layer implementada en Simacop.....	92
Figura 31. Arquitectura de red propuesta.....	93
Figura 32. Arquitectura software para caso de configuración desembarcada.....	96
Figura 33. Detalle del módulo gestor de aplicaciones de simacop. ....	99
Figura 34. Gestión de procesos a nivel operativo .....	99
Figura 35. Proceso de reescritura de código intra-nodo .....	100
Figura 36. Arquitectura de gestión de sensores.....	101
Figura 37. Módulo de gestión de redes de SIMACOP .....	102
Figura 38. Cluster o Dominios de comunicación por niveles jerárquicos en la operativa. ....	104
Figura 39. Flujos de comunicación entre nodos adyacentes jerárquicamente.....	105
Figura 40. Una nueva unidad se une a la operación .....	106
Figura 41. La unidad superior actualiza el ORBAT.....	106
Figura 42. Confirmación de cambios en el ORBAT .....	107

Figura 43. Redistribución del FDM y autoconfiguración intra-nodo.....	107
Figura 44. Cambio del medio de transmisión debido a un fallo .....	108
Figura 45. Cambio del medio de transmisión hacia unidades superiores.....	108
Figura 46. Cambio del medio de transmisión hacia unidades subordinadas .....	109
Figura 47. PR4G IPMUX 2 estaciones 10 bytes PDU .....	110
Figura 48. PR4G IPMUX 2 estaciones 50 bytes PDU.....	110
Figura 49. PR4G IPMUX 2 estaciones 100 bytes PDU.....	111
Figura 50. PR4G IPMUX 2 estaciones 500 bytes PDU.....	111
Figura 51. PR4G IPMUX N estaciones 10 bytes PDU .....	112
Figura 52. PR4G IPMUX N estaciones 50 bytes PDU .....	112
Figura 53. PR4G IPMUX N estaciones 100 bytes PDU .....	113
Figura 54. PR4G IPMUX N estaciones 500 bytes PDU .....	113
Figura 55. Ancho de banda experimentado (1 transmisión en la malla) .....	114
Figura 56. Ancho de banda experimentado (varias transmisiones en la malla).....	114
Figura 57. Colas de prioridad en la solución mallada.....	117
Figura 57. Topología de red Típica con red mallada en UHF .....	118
Figura 58. Implementación del módulo IEEE 802.11 sobre solución basada en SBC ....	120
Figura 59. Acces Point Rajant: BreadCrumb_JR.....	121
Figura 60. WimTAC: Componentes del sistema .....	122
Figura 61. WimTAC: Arquitectura de gestión .....	125
Figura 62. WimTAC: Interfaz de usuario .....	125
Figura 63. WimTAC: Vista de topología con varias SS registradas en BS.....	126
Figura 64. Topología de interconexión con distintos flujos de transmisión sobre red táctica WiMAX .....	127
Figura 65. Arquitectura de comunicaciones en Modo Autosincronizado.....	130
Figura 66. Arquitectura de comunicaciones en Modo Jerárquico. ....	130
Figura 67. Equipamiento de unidad individual.....	131
Figura 68. Vehículo de comunicaciones Rioja.....	131
Figura 69. Vídeo de alta calidad en los puestos de mando.....	132
Figura 70. Esquema de las pruebas llevadas a cabo en la UME .....	134
Figura 71. Aspecto del HQ de la UME, denominado JOC, con la aplicación SIMACOP en funcionamiento.....	134
Figura 72. Aplicación SIMACOP mostrando la posición y el vídeo en vivo .....	135
Figura 73. Aplicación SIMACOP junto con otras en el JOC.....	135
Figura 74. Sistema completo con cámara y radio Spearnet.....	136
Figura 75. Vehículo de comunicaciones Mérida con enlace satélite .....	136
Figura 76. Arquitectura general del proyecto MARIUS .....	137
Figura 77. Escenario de pruebas del proyecto MARIUS .....	138
Figura 78. Detalle del SBC en el equipamiento de los bomberos.....	139
Figura 79. Consolas de Puesto de mando una vez desembarcadas en la ubicación de campaña .....	139
Figura 80. Escenario de la demostración. En la misma se pueden ver los siguientes elementos: 1) helicóptero en zona de aterrizaje; 2) edificio donde se desembarcaron y ubicaron las consolas del puesto de mando de MARIUS; 3) zona donde se produjeron las explosiones principales; 4) Ubicación del vehículo VECA.....	139

Figura 81. Helicóptero con sistema MARIUS aerotransportado .....	140
Figura 82. UAV con cámara para la inspección de túneles.....	140
Figura 83. Exteriores vehículo VECA.....	140
Figura 84. Interior vehículo VECA .....	140
Figura 85. Esquema de mallas para la configuración completa de VHF.....	141
Figura 86. Esquema escenario de pruebas vía satélite .....	142
Figura 87. Arquitectura de comunicaciones con todos los medios de transmisión activos .....	143
Figura 88. Vehículos Anibal equipados con antenas VHF PR4gv3 .....	143
Figura 89. Aplicación SIMACOP proyectada en el centro de mando durante las pruebas de validación. ....	143
Figura 90. Vehículo de comunicaciones Mercurio con antena NVIS (Near Vertical Incident Skywave) para medios radio HF .....	144
Figura 91. Despliegue completo de Vehículos Anibal implicados.....	144
Figura 92. Sustitución del sistema de mando y control ‘de pared’ por uno CIS.....	145
Figura 93. Arquitectura Global de comunicaciones utilizada en las EPCIS.....	146
Figura 94. Esquema jerárquico de distribución de vídeo utilizado en las EPCIS .....	147
Figura 95. SIMACOP con vídeo integrado desde SIVA .....	147
Figura 96. SIMACOP con vídeo en primer plano y GIS sinóptico .....	147
Figura 97. Esquema de comunicaciones escenario desalojo centro histórico .....	150
Figura 98. Gestor de vídeos durante con imágenes desde distintas fuentes durante la evacuación del centro histórico.....	150
Figura 99. Esquema de comunicaciones del escenario rescate de heridos en fábrica ....	151
Figura 100. GESTOP en el puesto de mando retrasado, durante la misión de rescate con vídeo subjetivo desde uno de los bomberos.....	152
Figura 101. Gestor de vídeos durante el transcurso de la misión con imágenes desde distintas fuentes durante la evacuación de heridos .....	152
Figura 102. Puesto de mando retrasado durante la misión de rescate mientras miembros de DPAE monitorizan la operación.....	152
Figura 103. Puesto de mando retrasado con vídeo en diferido durante análisis posterior de la operación .....	152
Figura 104. Esquema de comunicaciones del escenario ataque NBQ .....	153
Figura 105. Vehículo de comunicaciones WiMAX, con CPE Airspan para enlace hacia el puesto de mando retrasado.....	154
Figura 106. Operario NBQ con equipamiento GESTOP dentro del traje de protección... ..	154
Figura 107. Captura de gestor de vídeos durante el transcurso de la misión desde el puesto de mando de primer nivel.....	154
Figura 108. Captura de GESTOP durante el transcurso de la misión desde el puesto de mando de primer nivel .....	154
Figura 109. Topología de red utilizada durante las pruebas .....	155
Figura 110. Ubicación inicial y recorrido realizado con las radios Mesh Breadcumb. ....	156
Figura 111. Ancho de banda medido.....	157
Figura 112. Latencia medida a gran escala .....	157
Figura 113. Jitter medido durante las pruebas .....	158
Figura 114. Jitter promedio medido durante las pruebas .....	159

Figura 115. Despliegue de red WiMAX utilizado durante las pruebas.....	160
Figura 116. Estación Base WiMAX .....	162
Figura 117. Detalle de CPE WiMAX en el SAMOC .....	162
Figura 118. Captura de FFT con el detalle del despliegue de las unidades AAA.....	164

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Diferencias entre redes inalámbricas tácticas y comerciales .....	29
Tabla 2. Estándares, banda, codificación y tasas de transmisión.....	42
Tabla 3. Métodos de seguridad en IEEE 802.11 .....	45
Tabla 4. Características y beneficios de las redes inalámbricas cognitivas .....	48
Tabla 5. Interfaces físicas definidas en el estándar IEEE 802.16.....	54
Tabla 6. Parámetros QoS obligatorios de los servicios de planificación definidos en WiMAX.....	64
Tabla 7. Opciones de petición/concesión para cada uno de los servicios de planificación definidos en WiMAX.....	65
Tabla 8. Estándares de gestión de red .....	77
Tabla 9. Estadísticas de retardo con 2 estaciones PR4G .....	111
Tabla 10. Estadísticas de retardo para N estaciones PR4G.....	113
Tabla 11. Parámetros de réplica para radio HF.....	115
Tabla 12. Parámetros de réplica para radio VHF .....	116
Tabla 13. Colas de prioridad en la solución desambarcada integrada en radios UHF de ITT .....	118
Tabla 14. Valores DSCP y CoS usados para la clasificación por QoS del tráfico generado. ....	120
Tabla 15. Valores de configuración de AC en el SBC. ....	121
Tabla 17. Validación QoE realizada por observadores militares .....	133
Tabla 18. Parámetros de QoS utilizados en la red WiMAX durante las pruebas .....	164
Tabla 19. Validación QoE realizada por el personal militar implicado en las pruebas ...	164