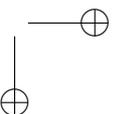
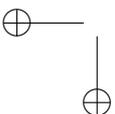
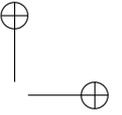


# Índice general

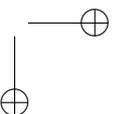
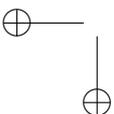
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Introducción . . . . .	2
1.2. Motivación y objetivos . . . . .	7
1.3. Metodología de trabajo . . . . .	11
1.4. Contribuciones . . . . .	17
1.5. Estructura de la tesis . . . . .	18
<b>2. Mobile ad hoc networks</b>	<b>21</b>
2.1. Antecedentes, definición y características . . . . .	22
2.2. Encaminamiento en redes ad hoc . . . . .	24
2.2.1. Clasificación de protocolos de encaminamiento . . . . .	24
2.2.2. Comparativa de protocolos de encaminamiento . . . . .	28
2.3. Ad hoc On-demand Distance Vector . . . . .	33
2.3.1. Introducción . . . . .	33
2.3.2. Mantenimiento de números de secuencia . . . . .	37



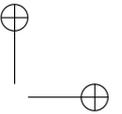
2.3.3. Entradas en la tabla de ruta y lista de precursores . . . . .	40
2.3.4. Generación de mensajes RREQ . . . . .	41
2.3.5. Diseminación de paquetes RREQ . . . . .	42
2.3.6. Reenvío de mensajes RREQ . . . . .	44
2.3.7. Generación de mensajes RREP . . . . .	45
2.3.8. Reenvío de mensajes RREP . . . . .	46
2.3.9. Mensajes HELLO . . . . .	47
2.3.10. Mantenimiento de la conectividad local . . . . .	48
2.3.11. Mensajes RERR. Expiración y eliminación de rutas . . . . .	48
2.3.12. Reparación local . . . . .	49
2.3.13. Parámetros de configuración . . . . .	50
2.4. Conclusiones . . . . .	52
<b>3. Herramientas de modelado y evaluación . . . . .</b>	<b>55</b>
3.1. Introducción . . . . .	56
3.2. Redes de Petri . . . . .	57
3.2.1. Introducción . . . . .	57
3.2.2. Definición formal de una red de Petri . . . . .	58
3.2.3. Elementos de una red de Petri . . . . .	59
3.2.4. Tipos de redes de Petri . . . . .	59
3.3. Redes de actividad estocástica . . . . .	65
3.3.1. Introducción . . . . .	65
3.3.2. Elementos de una red de actividad estocástica . . . . .	66
3.3.3. Algoritmos de cambio de marcado . . . . .	70
3.3.4. Medidas de rendimiento en UltraSan/Möbius . . . . .	74
3.3.5. Procesos estocásticos y la propiedad de Markov . . . . .	77



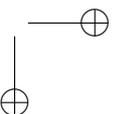
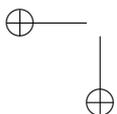
3.3.6. Métodos de resolución . . . . .	79
3.3.7. Fases del estudio de un sistema . . . . .	81
3.4. Conclusiones . . . . .	83
<b>4. Escenario . . . . .</b>	<b>85</b>
4.1. Entorno . . . . .	86
4.1.1. Área de trabajo . . . . .	89
4.1.2. Número de nodos . . . . .	95
4.1.3. Modelo de movimiento. Tasa de movilidad . . . . .	97
4.1.4. Tasa de búsqueda . . . . .	101
4.1.5. Tiempo de servicio y tiempo de simulación . . . . .	102
4.2. Servicios y calidad a ofrecer . . . . .	104
4.2.1. Servicios de alerta . . . . .	106
4.2.2. Servicios de media . . . . .	108
4.3. Conclusiones . . . . .	109
<b>5. Modelos formales . . . . .</b>	<b>113</b>
5.1. Introducción . . . . .	114
5.2. Metodología de modelado . . . . .	117
5.3. Modelos que determinan el establecimiento de la ruta . . . . .	123
5.3.1. Modelos unidimensionales . . . . .	123
5.3.2. Modelos bidimensionales . . . . .	128
5.4. Modelo que determina el establecimiento y mantenimiento . . . . .	131
5.4.1. Modelo atómico "Search" . . . . .	131
5.4.2. Modelo atómico "Position" . . . . .	132
5.4.3. Modelo atómico "Recover route" . . . . .	133



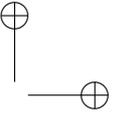
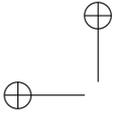
5.4.4. Modelo atómico "Time"	135
5.4.5. Modelo atómico "Time to recover route"	135
5.5. Mod. establecimiento, mantenim. y recuperación	136
5.5.1. Modelo atómico "Search AC"	137
5.5.2. Modelo atómico "Position"	150
5.5.3. Modelo atómico "If route change"	154
5.5.4. Modelo atómico "Route invalidation"	157
5.5.5. Modelo atómico "Alternative Route"	157
5.5.6. Modelo atómico "Delay recovery"	159
5.5.7. Modelo atómico "Time"	160
5.5.8. Modelo compuesto	162
5.6. Conclusiones	166
<b>6. Resultados de los modelos formales y evaluación</b>	<b>167</b>
6.1. Metodología de medidas	168
6.2. Resultados modelos que determinan el establecimiento	171
6.2.1. Modelos unidimensionales	171
6.2.2. Modelos bidimensionales	175
6.3. Resultados establecimiento y mantenimiento	191
6.3.1. Rutas establecidas, perdidas y recuperadas	192
6.3.2. Tiempo medio de vida útil de la ruta	195
6.4. Resultados establecimiento, mantenimiento y recuperación	198
6.4.1. Alcanzabilidad	198
6.4.2. Establecimiento y recuperación de rutas	206
6.4.3. Tiempo medio de vida útil de la ruta	216
6.5. Conclusiones	219



<b>7. Banco de pruebas</b>	<b>229</b>
7.1. Introducción . . . . .	230
7.2. Descripción del banco de pruebas . . . . .	234
7.2.1. Implementación del protocolo AODV utilizada . . . . .	234
7.2.2. Equipamiento y software . . . . .	236
7.3. Pruebas realizadas . . . . .	238
7.3.1. Influencia del número de saltos en la comunicación . . . . .	240
7.3.2. Rutas en topologías de un solo camino . . . . .	245
7.3.3. Rutas en topologías multi-camino . . . . .	254
7.3.4. Intermitencia de rutas . . . . .	256
7.3.5. Ruptura y recuperación por una ruta alternativa . . . . .	260
7.4. Modificaciones del protocolo AODV-UU . . . . .	266
7.5. Conclusiones . . . . .	274
<b>8. Conclusiones</b>	<b>279</b>
8.1. Revisión de los objetivos alcanzados . . . . .	280
8.2. Conclusiones . . . . .	284
8.3. Líneas de trabajo futuras . . . . .	288
<b>Apéndices</b>	<b>293</b>
<b>A. Abreviaturas y acrónimos</b>	<b>293</b>
<b>B. Notación, variables y parámetros más utilizados</b>	<b>297</b>

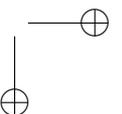
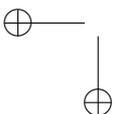


<b>C. Anexo</b>	<b>299</b>
C.1. Escenario: plano bidimensional, zona dividida en anillos. . . . .	300
C.2. Modelo de 4 nodos con la zona de trabajo dividida en anillos .	308
C.3. Cálculo de la ruta exacta en el modelo bidimensional . . . . .	310
<b>D. Publicaciones</b>	<b>313</b>
D.1. Relacionadas con la tesis . . . . .	313
D.1.1. Capítulo de libro . . . . .	313
D.1.2. Revista . . . . .	314
D.1.3. Congreso . . . . .	315
D.2. Otras publicaciones . . . . .	318
D.2.1. Congreso . . . . .	318
<b>E. Ámbito de la Tesis</b>	<b>319</b>
 <b>Bibliografía</b>	 <b>321</b>

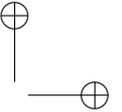


# Índice de figuras

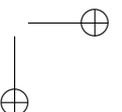
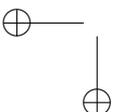
1.1. Esquema de una instalación de supervisión y control. . . . .	5
2.1. Clasificación de redes inalámbricas . . . . .	22
2.2. Ejemplo de funcionamiento del protocolo AODV . . . . .	35
2.3. Tabla de encaminamiento . . . . .	38
2.4. Formación de bucles . . . . .	38
2.5. Flag de RREP gratuito (G) no activado . . . . .	43
2.6. Flag de RREP gratuito (G) activado . . . . .	44
3.1. Elementos de una red de actividad estocástica en Möbius . . . . .	67
3.2. Equivalencia de una puerta de entrada simple. . . . .	69
3.3. Equivalencia de una puerta de salida simple. . . . .	69
3.4. Posibles conexiones de elementos con arcos . . . . .	70
3.5. Ejecución actividad temporizada en Möbius . . . . .	73
4.1. Área de trabajo unidimensional . . . . .	90



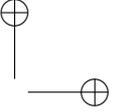
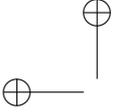
4.2. Zona de trabajo y nueva numeración de celdas . . . . .	92
4.3. Área de trabajo bidimensional . . . . .	93
4.4. Cálculo del área . . . . .	95
4.5. Imágenes en una instalación de supervisión y control . . . . .	107
4.6. Alertas producidas en una instalación de supervisión y control	108
5.1. Esquema de los modelos formales implementados . . . . .	118
5.2. Subred "Búsqueda AC" red con tres nodos. . . . .	124
5.3. Subred "Posición A" red con tres nodos. . . . .	125
5.4. Subred "Búsqueda A" red con tres nodos . . . . .	126
5.5. Subred "Búsqueda" red con tres nodos . . . . .	126
5.6. Subred "Búsqueda AC" red con cuatro nodos. . . . .	128
5.7. Subred "Posición A". Área de trabajo definitiva. . . . .	129
5.8. Subred "Búsqueda_AC". Área de trabajo definitiva. . . . .	130
5.9. Modelo atómico "Search" . . . . .	133
5.10. Modelo atómico "Position A" . . . . .	134
5.11. Modelo atómico "Recover route" . . . . .	134
5.12. Modelo atómico "Time" . . . . .	135
5.13. Modelo atómico "Time to recover route" . . . . .	136
5.14. Modelo atómico "Search AC" . . . . .	137
5.15. Modelo atómico "Position MT A" . . . . .	151
5.16. Modelo atómico "Position MT B" . . . . .	154
5.17. Modelo atómico "If route change" . . . . .	155
5.18. Modelo atómico "Route invalidation" . . . . .	158
5.19. Modelo atómico "Alternative route" . . . . .	158
5.20. Modelo atómico "Delay recovery" . . . . .	160



5.21. Modelo atómico "Time"	162
6.1. Esquema de las medidas realizadas	168
6.2. Punto de inflexión en comunicaciones multi-hop	173
6.3. Comunicaciones single-hop distintos tamaños de área	178
6.4. Comunicaciones multi-hop distintos tamaños de área	179
6.5. Comunicaciones multi-hop variando el número de nodos	180
6.6. Comunicaciones multi-hop según el número de saltos	182
6.7. Comunicaciones fallidas distintos tamaños de área	183
6.8. Comunicaciones fallidas variando el número de nodos	184
6.9. Comunicación single-hop o multi-hop con 3 nodos	185
6.10. Distintas posiciones iniciales de los nodos en el área.	188
6.11. Resultados variando las posiciones iniciales de los 3 nodos	189
6.12. Resultados variando las posiciones iniciales de los 6 nodos	191
6.13. Rutas encontradas, perdidas y recuperadas	193
6.14. Diagrama de tiempos. Tiempo de ruta ideal y real	196
6.15. Tiempo medio de vida útil de la ruta para una sesión de 180 s.	197
6.16. Porcentaje single-hop, multi-hop e inalcanzables.	200
6.17. Porcentaje single-hop, multi-hop e inalcanzables.	201
6.18. Porcentaje single-hop, multi-hop e inalcanzables. ER 1% y 70%	203
6.19. Rutas perdidas single-hop y multi-hop. ER 1% y 70%	204
6.20. Rutas establecidas, perdidas y recuperadas.	205
6.21. N° rutas encontradas/recuperadas. Tasa error 1%	207
6.22. N° rutas en cada intento de búsqueda. Tasa error 1%	209
6.23. Porcentaje de rutas en cada intento de búsqueda. Tasa error 1%	212
6.24. Porcentaje de rutas en cada intento de búsqueda. Rutas según n° de saltos	214

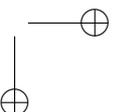
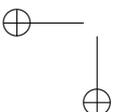


6.25. N° rutas variando tasa de error y velocidad. Tpo servicio 180 s	220
6.26. Tpo. medio ruta variando rango de transmisión. Tasa error 1 %.	221
7.1. Visibilidad entre los nodos y rango de cobertura radio . . . . .	239
7.2. Tasa de error experimental y línea de tendencia . . . . .	243
7.3. Tasa de error y throughput durante una transferencia FTP . . . . .	244
7.4. Incremento progresivo del TTL . . . . .	251
7.5. Red con dos posibles rutas desde el nodo origen al destino . . . . .	254
7.6. Selección de la ruta . . . . .	255
7.7. Topología para el cálculo del tiempo de generación de ruta . . . . .	256
7.8. Ruta original de dos saltos y alternativa de dos saltos . . . . .	261
7.9. Ruta original de dos saltos y alternativa de tres saltos . . . . .	264
7.10. Ruta original de dos saltos y alternativa de dos saltos . . . . .	264
7.11. Topología de test con dos posibles caminos . . . . .	268
7.12. Efecto de los cambios de ruta . . . . .	269
7.13. Efecto sobre el throughput . . . . .	270
7.14. Vídeo visualizado por el cliente . . . . .	273
7.15. Jitter instantáneo . . . . .	274
C.1. Zona de trabajo dividida en anillos . . . . .	301
C.2. Probabilidades de movimiento según el anillo . . . . .	302
C.3. Zona y ángulos de movimiento para traslación de ejes . . . . .	306
C.4. Subred "Posición A". Área de trabajo dividida en anillos. . . . .	309



# Índice de tablas

2.1. Invalidación de una ruta en la tabla de encaminamiento . . . . .	39
2.2. Parámetros de configuración del AODV . . . . .	51
3.1. Medidas de rendimiento en Möbius . . . . .	74
3.2. Medidas que se pueden obtener mediante métodos analíticos .	80
3.3. Medidas que se pueden obtener mediante la simulación . . . . .	80
4.1. Características y valores usados en el escenario unidimensional	110
4.2. Características y valores usados en el escenario bidimensional .	111
5.1. Timed Activity Start_search . . . . .	138
5.2. Instantaneous Activity Inst_Act_Direct . . . . .	141
5.3. Probabilidad dar por válida la ruta encontrada en intento actual	142
5.4. Output gate OG_D1 . . . . .	143
5.5. Instantaneous Activity Inst_Act_Ind_5h . . . . .	144
5.6. Output gate OG_5h2 . . . . .	145



5.7. Output gate OG_5h1 . . . . .	145
5.8. Output gate Route . . . . .	148
5.9. Timed Activity Send_RREQ . . . . .	150
5.10. Bucket attributes of Position MT A . . . . .	152
5.11. Timed Activity Stay in Cell Finalized . . . . .	153
5.12. State variables . . . . .	163
6.1. Posiciones iniciales de los nodos A, B, C, D, E y F . . . . .	190
6.2. Porcentaje de rutas perdidas y recuperadas . . . . .	195
6.3. Rutas encontradas y recuperadas tras el primer RREQ . . . . .	217
6.4. Rutas encontradas y recuperadas tras el primer reintento . . . . .	217
6.5. Rutas encontradas y recuperadas tras el segundo reintento . . . . .	218
6.6. Rutas encontradas y recuperadas tras el tercer reintento . . . . .	218
6.7. Percepción de la información por el usuario . . . . .	227
7.1. Latencia (ms) según el número de saltos . . . . .	242
7.2. Generación de rutas con 2 saltos . . . . .	246
7.3. Generación de rutas con 3 saltos . . . . .	247
7.4. Generación de rutas con 4 saltos . . . . .	248
7.5. Generación de rutas con 5 saltos . . . . .	253
7.6. Generación de rutas en topologías multicamino . . . . .	255
7.7. Recuperación de rutas. Ruta alternativa de 2 saltos . . . . .	262
7.8. Recuperación de rutas. Ruta alternativa de 3 saltos . . . . .	263
7.9. Recuperación de rutas. Ruta alternativa de 4 saltos . . . . .	265
C.1. Posibles rutas en una red con 6 nodos . . . . .	310