

UNIVERSIDAD DEL BÍO BÍO



UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO

ASEGURAMIENTO DE ENLACES
INALÁMBRICOS DE DATOS EN
UNA COLONIA DE ROBOTS
MÓVILES AUTÓNOMOS

Autor:

Jonathan Matias Palma Olate

Banca Examinadora:

Ph.D. Cristian Durán Faúndez.

MSc. Franco Hernández Campos.

MSc. John Correa Toloza

*Seminario de Titulación para optar al Título de
Ingeniero de Ejecución Electrónica.*

16 Enero 2014.

*“Dedicado para mi novia
Vanessa Nathalie Guzmán Vega.”*

Índice general

Contents	II
List of Figures	v
List of Tables	IX
1. Introducción	1
1.1. Contenido	3
1.2. Objetivos	4
1.2.1. Objetivos específicos	4
2. Estado del Arte	5
2.1. Redes de Sensores Inalámbricos	5
2.2. Inteligencia Colectiva	6
2.3. Agente Robótico, Robótica de Enjambre	7
2.4. Red de Sensores y Actuadores.	9
2.5. Localización, Posicionamiento y Exploración Mediante WNAS's.	10
3. Marco Teórico	12
3.1. Comunicaciones no Cableadas	12
3.1.1. Pérdida por Propagación	13
3.1.2. Cálculo de Enlace.	13
3.2. IEEE 802.15.4, Zigbee.	14
3.3. Calidad de Enlace	15
3.3.1. LQI	15
3.3.2. RSSI	15
3.3.3. Packet Loss	16
3.3.4. Calidad de Enlace en IEEE 802.15.4, Consideraciones	16
3.4. Tethering	17
3.4.1. Tipo de Enlace	17
3.5. Auto Organización de Sistemas	18
3.6. Modelos de Estimación de Distancia o Proximidad en WSN's	19
3.6.1. Modelos de Intensidad de Potencia recibida en WSN	20
3.7. Inteligencia Artificial, Aprendizaje por Refuerzo	21
3.7.1. Aprendizaje Por refuerzo, Algoritmo Q	22
3.7.2. Formalismo Estándar	22
4. Caso de Estudio	24

4.1. Problemática	24
4.2. Alcances	27
4.3. Segmentación del Problema	28
4.3.1. Comportamiento General	28
4.3.2. Comportamiento Individual	29
4.3.3. Parámetro de Eficiencia: Densidad de Despliegue	29
4.4. Problemática a Abordar: Comportamiento Individual Router Robótico . .	30
4.5. Dispositivos Empleados, Descripción del Entorno y Consideraciones . . .	31
5. Análisis y Propuesta de Solución, para la estrategia de navegación de un Router Robótico.	33
5.1. Posición Óptima	34
5.2. Indicadores para Navegación	35
5.2.1. Indicadores de orientación	36
5.3. Comportamiento del RSSI	39
5.3.1. Indicadores de orientación de los recorridos experimentales	40
5.3.2. Conclusiones del Análisis de los Indicadores	43
5.4. Propuesta de un controlador basado en una Heurística Simple.	44
5.4.1. Heurística Simple.	44
5.4.2. Desempeño de la Heurística Simple	46
5.4.3. Análisis del Desempeño de la Heurística Simple	49
5.5. Análisis de los Indicadores de Orientación para un Modelo de RSSI con Perturbaciones.	50
5.5.1. Discretización del área de cobertura según el RSSI.	52
5.5.2. Posición Óptima en Modelo con Perturbaciones.	53
5.5.3. Indicadores de Tendencia y Orientación en un Modelo con perturbaciones.	53
5.6. Controlador basado en una Heurística Simple en Modelo con Perturbaciones	56
5.6.1. Desempeño de la Heurística Simple en Modelo con Perturbaciones	56
5.6.2. Conclusiones de las Simulaciones.	59
6. Desarrollo de Algoritmos de Control para un Router Robótico	61
6.1. Modelo Aprendizaje de Refuerzo para Router Robótico	62
6.1.1. Controlador Q-Learning	63
6.2. Desempeño del Controlador Q-Learning	65
6.2.1. Modelo con Exploración Inicial	66
6.2.2. Desempeño del Controlador Q-Learning con Exploración Inicial . .	69
6.3. Modelo de Controlador Q-Learning de Estado único Binario	73
6.3.1. Formulación de Q-Learning Estado único Binario	73
6.3.2. Desempeño del Controlador Q-Learning de Estado Único Binario .	74
6.4. Desempeño de la Estrategia Q-Learning de Estado Único Binario, para un Despliegue Dinámico de Nodos.	79
6.4.1. Vínculos Prioritarios.	79
6.4.2. Validación de la Estrategia Q-Learning de Estado Único Binario.	79
6.4.3. Análisis y Conclusión Final para el Algoritmo de Estado Único Binario.	84

7. Desarrollo de Algoritmo de Mínimos Movimientos.	85
7.1. Incorporación de Estados y Acciones.	85
7.1.1. Objetivo Minimizar el Vínculo Cercano.	87
7.2. Falsos Positivos.	88
7.3. Diseño de Controlador de Mínimos Movimientos.	91
7.3.1. Estructura del Controlador de Mínimos Movimientos.	92
7.4. Desempeño del Controlador de Mínimos Movimientos.	95
7.4.1. Desempeño General del Algoritmo.	95
7.4.2. Análisis de los resultados.	99
8. Aseguramiento de Enlaces Inalámbricos de datos mediante Router Robóticos.	101
8.1. Formulación del Modelo de Exploración.	101
8.2. Parámetros de simulación del Controlador de Mínimos Movimientos en un modelo de exploración	104
8.3. Desempeño del Router Robótico para un desplazamiento del explorador paralelo a los ejes.	105
8.3.1. Simulaciones para explorador de movimientos paralelos	106
8.4. Desempeño del Router Robótico para un desplazamiento diagonales curvados	109
8.4.1. Simulaciones para explorador diagonal cruzada	111
8.5. Conclusiones Análisis de resultados del algoritmo de mínimos movimientos en modelo de exploración	113
8.6. Conclusiones Generales	117
9. Conclusiones	118
 Bibliografía	 121

Índice de figuras

2.1. Red de Sensores Inalámbricos	6
2.2. Animales Sociables	7
2.3. Aproximación de Animales Mediante Robots	8
2.4. Esquema de Agente Robótico	8
2.5. Red de Sensores y Actuadores Inalámbricos	9
3.1. Diagrama, Sistema de Comunicación	13
3.2. Modelo OSI y Zigbee mas 802.15.4	14
3.3. Tipo de enlaces	18
3.4. Modelos Log-distance y Lognormal Shadowing	21
3.5. Modelo Aprendizaje por Refuerzo	23
4.1. Modelo de solución de conectividad mediante Router Estático.	25
4.2. Modelo de solución de conectividad mediante Router Móvil	25
4.3. Almost finished prototype, including Xbee wireless module.	27
4.4. Modelo Final de Estudio.	28
4.5. Modelo de general	31
5.1. Red Compuesta por dos unidades estáticas GW y una unidad móvil GG	34
5.2. Proyecciones de RSSI de unidades GW	35
5.3. Diferencia de RSSI Dif_n	36
5.4. Módulo de la diferencia de RSSI Dif_a	37
5.5. Diferencia digital Dif_d	38
5.6. Suma de RSSI Sum_n	39
5.7. Recorridos experimentales	40
5.8. RSSI de de los vínculos para Recorridos experimentales que no pasan por PO : $M_1(a)$, $M_2(b)$, $M_3(c)$ y $M_4(d)$	41
5.9. Suma de RSSI para de Recorridos experimentales que no pasan por PO: $M_1(a)$, $M_2(b)$, $M_3(c)$ y $M_4(d)$	41
5.10. Módulo de la diferencia de RSSI para Recorridos experimentales que no pasan por PO: $M_1(a)$, $M_2(b)$, $M_3(c)$ y $M_4(d)$	42
5.11. Resultados para Recorridos experimentales Ma ; $RSSI_{VI}$ y $RSSI_{VS}$ (a), Dif_a (b), Dif_b (c) y Sum_n (d).	42
5.12. Indicadores de orientación para Recorridos experimentales M_b y M_c ; Dif_a de $M_b(a)$, Sum_n de $M_b(b)$, Dif_a de M_c (c), Sum_n de M_c (d). Modelo de estudio II	43
5.13. Modelo de simulación I. Modelo de estudio III.	45
5.14. Resultado de Simulación 1: (a) Posición de GW_I GW_S y GG , (b), RSSI de Vínculos, (c) Dif_a y (d) Sum_n	47

5.15. Resultado de la Simulación 2; (a) Posición de GW_I GW_S y GG , (b), RSSI de Vínculos, (c) Dif_a y (d) Sum_n	48
5.16. Resultado de la Simulación 3: (a) Posición de GW_I GW_S y GG , (b), RSSI de Vínculos, (c) Dif_a y (d) Sum_n	49
5.17. Modelos de intensidad de potencia recibida en función de la distancia: (a) Modelo sin perturbaciones y (b) Modelo con perturbaciones.	50
5.18. Relación RSSI-Distancia Log-TJP	51
5.19. Proyecciones de RSSI de las unidades GW	53
5.20. Indicador de orientación Sum_n . Modelo con perturbaciones	54
5.21. Indicador de orientación Dif_a . Modelo con perturbaciones	54
5.22. Indicador de orientación Sum_n , modelo con el doble de separación de las unidades GW . Modelo con perturbaciones	55
5.23. Indicador de orientación Dif_a , modelo con el doble de separación de las unidades GW . Modelo con perturbaciones.	56
5.24. Resultado de Simulación 4: Posición de GW_I GW_S y GG	57
5.25. Resultado de Simulación 4: (a) Dif_a y (b) Sum_n	58
5.26. Resultado de Simulación 5: Posición de GW_I GW_S y GG	59
5.27. Resultado de Simulación 5 : (a) Dif_a y (b) Sum_n	59
6.1. Acciones, Movimientos posibles.	64
6.2. Simulación 6, Movimiento Inicial A_1 : (a) Posición de Nodos, (b) Indicadores de Tendencia, (c) Pendiente de Indicadores, (d) Recompensa $R_{(s \times a)}$, (e) Estado (S), (f) Valor Calculado $Q_{s \times a}$	66
6.3. Simulación 7, Movimiento Inicial A_2 : (a) Posición de Nodos, (b) Indicadores de Tendencia, (c) Pendiente de Indicadores, (d) Recompensa $R_{(S \times A)}$, (e) Estado (S), (f) Valor $Q_{s \times a}$	67
6.4. Simulación 8 Movimiento Inicial A_3 : (a) Posición de Nodos, (b) Indicadores de Tendencia, (c) Pendiente de Indicadores, (d) Recompensa $R_{(S \times A)}$, (e) Estado (S), (f) Valor $Q_{s \times a}$	67
6.5. Simulación 9 Movimiento Inicial A_4 : (a) Posición de Nodos, (b) Indicadores de Tendencia, (c) Pendiente de Indicadores, (d) Recompensa $R_{(S \times A)}$, (e) Estado (S), (f) Valor $Q_{s \times a}$	68
6.6. Resultados de un proceso de exploración: (a) Posición de Nodos, (b) Indicadores de Tendencia, (c) Pendiente de Indicadores, (d) Recompensa $R_{(s \times a)}$, (e) Estado (S), (f) Valor Calculado $Q_{s \times a}$	68
6.7. Simulación 10, Movimiento A_1 y Entrenamiento: (a) Posición de Nodos, (b) Indicadores de Tendencia, (c) Pendiente de Indicadores, (d) Recompensa $R_{(s \times a)}$, (e) Estado (S), (f) Valor Calculado $Q_{s \times a}$	69
6.8. Simulación 11, Movimiento A_2 y Entrenamiento: (a) Posición de Nodos, (b) Indicadores de Tendencia, (c) Pendiente de Indicadores, (d) Recompensa $R_{(s \times a)}$, (e) Estado (S), (f) Valor Calculado $Q_{s \times a}$	70
6.9. Simulación 12, Movimiento A_3 y Entrenamiento: (a) Posición de Nodos, (b) Indicadores de Tendencia, (c) Pendiente de Indicadores, (d) Recompensa $R_{(s \times a)}$, (e) Estado (S), (f) Valor Calculado $Q_{s \times a}$	71
6.10. Simulación 13, Movimiento A_1 y Entrenamiento: (a) Posición de Nodos, (b) Indicadores de Tendencia, (c) Pendiente de Indicadores, (d) Recompensa $R_{(s \times a)}$, (e) Estado (S), (f) Valor Calculado $Q_{s \times a}$	71

6.11. Simulación 14 : (a) Posición de Nodos,(b) Indicadores de Tendencia, (c) Pendiente de Indicadores,(d) Recompensa $R_{(s \times a)}$, (e) Estado (S), (f) Valor Calculado $Q_{s \times a}$, (g) Distancia al Punto Óptimo (h) RSSI Superior e Inferior.	75
6.12. Simulación 15: (a) Posición de Nodos,(b) Indicadores de Tendencia, (c) Pendiente de Indicadores,(d) Recompensa $R_{(s \times a)}$, (e) Estado (S), (f) Valor Calculado $Q_{s \times a}$, (g) Distancia al Punto Óptimo, (g) RSSI de vínculos prioritarios.	76
6.13. Simulación 16: (a) Posición de Nodos,(b) Indicadores de Tendencia, (c) Pendiente de Indicadores,(d) Recompensa $R_{(s \times a)}$, (e) Estado (S), (f) Valor Calculado $Q_{s \times a}$, (g) Distancia al Punto Óptimo, (g) RSSI de vínculos prioritarios.	77
6.14. Distancia Al Punto Óptimo de 10 Simulaciones, para parámetros de Figura 6.13	78
6.15. Simulación 17: (a) Posición de Nodos,(b) distancia al Punto óptimo	80
6.16. Simulación 17, RSSI de Vínculos Prioritarios: (a) GG_1 , (b) GG_2 (c) GG_3 .	81
6.17. Simulación 18: (a) Posición de Nodos,(b) Distancia al Punto Óptimo	82
6.18. Simulación 17, RSSI de Vínculos Prioritarios: (a) GG_1 , (b) GG_2 (c) GG_3 .	82
6.19. Simulación 19: (a) Posición de Nodos,(b) distancia al Punto óptimo	83
6.20. Simulación 19, RSSI de Vínculos Prioritarios: (a) GG_1 , (b) GG_2 (c) GG_3 .	84
7.1. Acciones Ampliadas.	86
7.2. Plataforma de simulación Para ciclos de Acción-Retroceso, modelo de un agente móvil dos unidades estáticas.	88
7.3. Plataforma de simulación para ciclos de Acción-Retroceso, modelo de tres agentes móviles y dos unidades estáticas.	89
7.4. Simulación 23 desplazamiento de los Nodos en función de los Pasos. . . .	96
7.5. Simulación 23 Módulo de la Diferencia y RSSI de vínculos prioritarios para cada Agente Móvil:(a) Dif_a de la unidad GG_1 , (b) RSSI capturado de la unidad GG_1 , (c) Dif_a de la unidad GG_1 (d) RSSI capturado GG_3 .(a) RSSI capturado GG_1 , (e) Dif_a de la unidad GG_3 (c) RSSI capturado GG_2 ,(d) RSSI capturado GG_3	96
7.6. Simulación 23 Distancia al Punto Óptimo: (a) Instantáneo (b) Ideal. . . .	97
7.7. Simulación 20 unidad GG_1 : (a) Posición de Nodos,(b) Indicadores de Tendencia, (c) Pendiente de Indicadores,(d) Recompensa $R_{(s \times a)}$, (e) Estado (S), (f) Valor Calculado $Q_{s \times a}$, (g) Distancia al Punto Óptimo instantáneo e ideal (h) RSSI Superior e Inferior.	97
7.8. Simulación 20 unidad GG_2 : (a) Posición de Nodos,(b) Indicadores de Tendencia, (c) Pendiente de Indicadores,(d) Recompensa $R_{(s \times a)}$, (e) Estado (S), (f) Valor Calculado $Q_{s \times a}$, (g) Distancia al Punto Óptimo instantáneo e ideal (h) RSSI Superior e Inferior.	98
7.9. Simulación 20 unidad GG_3 : (a) Posición de Nodos,(b) Indicadores de Tendencia, (c) Pendiente de Indicadores,(d) Recompensa $R_{(s \times a)}$, (e) Estado (S), (f) Valor Calculado $Q_{s \times a}$, (g) Distancia al Punto Óptimo instantáneo e ideal (h) RSSI Superior e Inferior.	98
8.1. Modelo de aseguramiento de enlaces mediante Robot Autónomos; Topología de red, Vínculos prioritarios y orden de despliegue.	102

8.2. Desplazamiento recto de la unidad TG ; (a) componente en abscisa y (b) componente en ordenada.	105
8.3. Simulación 21 desplazamiento de los Nodos en función de las las Pasos.	108
8.4. Simulación 21 Módulo de la Diferencia y RSSI de vínculos prioritarios para cada Agente Móvil:(a) Dif_a de la unidad GG_1 , (b) RSSI capturado de la unidad GG_1 , (c) Dif_a de la unidad GG_1 (d) RSSI capturado GG_3 .(a) RSSI capturado GG_1 , (e) Dif_a de la unidad GG_3 (c) RSSI capturado GG_2 ,(d) RSSI capturado GG_3	108
8.5. Simulación 22 desplazamiento de los Nodos en función de las las Pasos	109
8.6. Simulación 22 Módulo de la Diferencia y RSSI de vínculos prioritarios para cada Agente Móvil:(a) Dif_a de la unidad GG_1 , (b) RSSI capturado de la unidad GG_1 , (c) Dif_a de la unidad GG_1 (d) RSSI capturado GG_3 .(a) RSSI capturado GG_1 , (e) Dif_a de la unidad GG_3 (c) RSSI capturado GG_2 ,(d) RSSI capturado GG_3	109
8.7. Simulación 23 desplazamiento de los Nodos en función de las las Pasos.	110
8.8. Simulación 23 Módulo de la Diferencia y RSSI de vínculos prioritarios para cada Agente Móvil:(a) Dif_a de la unidad GG_1 , (b) RSSI capturado de la unidad GG_1 , (c) Dif_a de la unidad GG_1 (d) RSSI capturado GG_3 .(a) RSSI capturado GG_1 , (e) Dif_a de la unidad GG_3 (c) RSSI capturado GG_2 ,(d) RSSI capturado GG_3	110
8.9. Desplazamiento Zigzag de la unidad TG ; (a) componente en abscisa y (b) componente en ordenada.	111
8.10. Simulación 24 desplazamiento de los Nodos en función de las las Pasos.	114
8.11. Simulación 24 Módulo de la Diferencia y RSSI de vínculos prioritarios para cada Agente Móvil:(a) Dif_a de la unidad GG_1 , (b) RSSI capturado de la unidad GG_1 , (c) Dif_a de la unidad GG_1 (d) RSSI capturado GG_3 .(a) RSSI capturado GG_1 , (e) Dif_a de la unidad GG_3 (c) RSSI capturado GG_2 ,(d) RSSI capturado GG_3	114
8.12. Simulación 25 desplazamiento de los Nodos en función de las las Pasos.	115
8.13. Simulación 25 Módulo de la Diferencia y RSSI de vínculos prioritarios para cada Agente Móvil:(a) Dif_a de la unidad GG_1 , (b) RSSI capturado de la unidad GG_1 , (c) Dif_a de la unidad GG_1 (d) RSSI capturado GG_3 .(a) RSSI capturado GG_1 , (e) Dif_a de la unidad GG_3 (c) RSSI capturado GG_2 ,(d) RSSI capturado GG_3	115
8.14. Simulación 26 desplazamiento de los Nodos en función de las Pasos.	116
8.15. Simulación 26 Módulo de la Diferencia y RSSI de vínculos prioritarios para cada Agente Móvil:(a) Dif_a de la unidad GG_1 , (b) RSSI capturado de la unidad GG_1 , (c) Dif_a de la unidad GG_1 (d) RSSI capturado GG_3 .(a) RSSI capturado GG_1 , (e) Dif_a de la unidad GG_3 (c) RSSI capturado GG_2 ,(d) RSSI capturado GG_3	116

Índice de Cuadros

5.1. Parámetros para ejecución de la simulación 1.	47
5.2. Parámetros para ejecución de la simulación 2.	48
5.3. Parámetros para ejecución de la simulación 3.	48
5.4. Discretización del área de cobertura.	52
5.5. Parámetros para ejecución de simulación 4.	57
5.6. Parámetros para ejecución de simulación 5.	58
6.1. Estados, Controlador Q-Learning.	65
6.2. Parámetros para ejecución de simulaciones 6, 7, 8 y 9	66
6.3. Parámetros para ejecución de simulaciones 10, 11, 12 y 13	70
6.4. Estados, Modelo de Estado Único Binario	74
6.5. Parámetros para ejecución de simulación 14.	75
6.6. Parámetros para ejecución de simulación 15.	76
6.7. Parámetros para ejecución de simulación 16.	77
6.8. Parámetros para ejecución de simulación 17.	80
6.9. Parámetros para ejecución de simulación 18.	81
6.10. Parámetros para ejecución de simulación 19.	83
7.1. Resultado para 10 Ciclos Acción-Retroceder, para figura 7.2	89
7.2. Resultado para 100 Ciclos Acción-Retroceder, para figura 7.2	89
7.3. Resultado para 10 Ciclos Acción-Retroceder, para figura 7.3	90
7.4. Resultado para 100 Ciclos Acción-Retroceder, para figura 7.3	90
7.5. Estados, Modelo cumplimiento de tres Objetivos: MIN_{Dif} , MIN_{vc} y MAX_{vl}	92
7.6. Recompensa, de estado SS	93
7.7. Parámetros para ejecución de simulaciones 20.	95
8.1. Parámetros para ejecución de simulaciones 21.	106
8.2. Parámetros para ejecución de simulaciones 22.	107
8.3. Parámetros para ejecución de simulaciones 23.	107
8.4. Parámetros para ejecución de simulaciones 24.	112
8.5. Parámetros para ejecución de simulaciones 25.	112
8.6. Parámetros para ejecución de simulaciones 26.	113

Capítulo 1

Introducción

Un tema pujante en la última década son las redes inalámbricas, que en la actualidad se presentan de forma omnisciente en la vida cotidiana, ofreciendo ventajas tales como flexibilidad de conexión, bajo costo y facilidad de despliegue frente a las redes cableadas. Una red inalámbrica es formada por nodos, dispositivos capaces de realizar una o todas de las siguientes tareas; transmitir, recepcionar o enrutar paquetes de datos. A continuación se catalogarán según sea la cualidad de movilidad, generando tres tipos de redes inalámbricas. 1) Estáticas, ejemplos son las redes de sensores inalámbricas desplegadas en la agricultura donde son posicionando los nodos en lugares estratégicos, encargándose de la recopilación de información relevantes en los cultivos. 2) Redes móviles, útiles cuando los fenómenos a estudiar son esporádicos y/o no fijos como tormentas o huracanes, donde es posible teóricamente introducir nodos sensores que intercambien información, desplazándose en medio de los mismos fenómenos. 3) El tercer tipo de red es híbrido de ambas. Se nombrará como redes mixtas las cuales poseen unidades estáticas y móviles, caso puntual es las comunicaciones 3G de telefonía móvil donde se puede apreciar dichas características, siendo la parte estática las antenas y los nodos móviles los teléfonos, trabajando en conjunto.

Para asegurar conectividad de un usuario móvil, Onur Tekdas and Volkan Isler 2008, exponen la problemática donde la utilización de un enfoque de despliegue de router estáticos no son viables o eficientes, ya que el conjunto de nodos empleados para proporcionar conectividad se forma sólo por un pequeño subconjunto de todas las unidades desplegadas, es decir, que de el número total de nodos sólo unos pocos son parte activa del link de comunicación. Además de problemas de mantención y costo.

Por contra parte como expone Nguyen Y Pezeshkian 2005, el talón de Aquiles de cualquier operación táctica terrestre de campo es la rápida degradación de la calidad de la comunicación al penetrar en el interior de edificios, túneles o cuevas.

En el presente trabajo se analizó el problema de aseguramiento de enlace para una unidad autónoma (exploradora), mediante robots móviles autónomos (Router Robótico). El problema de aseguramiento de enlaces, también llamado anclaje de red o en inglés Tethering, es segmentado en tres problemáticas específicas, en relación a la aplicación de exploración mediante robots móviles autónomos. De las tres problemáticas se trabajó en extenso en el problema de desarrollar un algoritmo de control para un Router Robótico, unidad que sirve de pasarela de datos entre dos terminales. El Router Robótico se diseña en base a relaciones algebraicas de RSSI para orientarse. En una red compuesta por terminales estáticos, robots móviles de comportamiento independiente y unidades Router Robóticos. En una topología de red de enlace simple donde cada nodo posee dos vínculos prioritarios.

Alcances

Un Router Robótico es un nodo móvil, dependiendo del hardware presentará restricciones en los parámetros de comunicación y en sus características cinemáticas. El presente trabajo se basa en la simulación de algoritmos de control de Router Robóticos para la navegación. Nodos móviles que brindarán servicio de Tethering (anclaje de red) entre una unidad Gateways estática y una unidad Targets de comportamiento independiente.

El sistema de interés estudiado constará de: una única estación Gateways (base) de carácter estática, una unidad Targets robots de exploración transmitiendo información, resultante de la interacción con el entorno de uno o varios sensores que posean, y tres unidades Router Robótico (Gangway). Las unidades Router Robótico son las encargadas de asegurar la transmisión desde los exploradores hacia la base. Estos dispositivos no podrán realizar funciones correspondientes a las Gateware o Targets. Los exploradores son robot de comportamiento independiente, unidades de exploración que se gobiernan mediante la retro-alimentación de información suministrada por los sensores. Por este motivo la activación, posicionamiento y la dinámica de los nodos Gangway, están determinados por parámetros de calidad de enlaces predefinidos en pos de asegurar la transmisión de datos hacia o desde la estación Gateware o base. Este estudio se enfatizará en el diseño de una estrategia de control para una una unidad Router Robótico.

Método de Orientación y Navegación

El indicador utilizado refuerzo del medio, está dado por el indicador de fuerza de la señal de recepción o RSSI por sus siglas en inglés. Para aplicaciones reales no requieren hardware adicional, puesto que es un parámetro definido por el estándar IEEE, además

de otras tecnologías. El enfoque que se utiliza, es usar directamente el valor de RSSI sin tener que emplear correlaciones de RSSI-DISTANCIA o pérdida de paquete, tomando como refuerzo del medio ambiente los valores RSSI para obtener nociones de proximidad de los demás dispositivos. El mecanismo mediante los cuales los Router Robótico determinarán su trayectoria empleando estrategias de control basadas en aprendizaje por refuerzo.

1.1. Contenido

Este trabajo se divide en nueve capítulos en los cuales se expusieron los fundamentos teóricos y el desarrollo de algoritmos de control para un Router Robótico, para el problema de aseguramiento de enlaces inalámbricos de datos mediante una colonia de robots móviles autónomos.

El primer capítulo Estado del Arte expone un compendium de definiciones de las diferentes áreas temáticas que son parte de la solución para el caso de estudio, explicando brevemente los desarrollos en las áreas temáticas de; Redes de Sensores Inalámbricos, Inteligencia Colectiva, Agentes Robóticos, Robótica de Enjambre, Red de Sensores y Actuadores, Localización, Posicionamiento y Exploración Mediante WNAS's.

El segundo capítulo establece el Marco Teórico del trabajo en función de lo expuesto en el Estado del Arte. El capítulo cuatro expone y segmenta la problemática, describiendo y especificando la parte del problema a tratar e incluye los requerimientos para el desarrollo de la estrategia de control.

El capítulo cinco analiza el comportamiento del indicador de intensidad de señal recibida RSSI en detalle, en busca de obtener indicadores de orientación que permitan orientar la navegación del Router Robótico. Una vez designados los indicadores, son evaluados sus comportamientos en un modelo de RSSI con perturbaciones.

El capítulo seis desarrolla un estrategia de control basada en aprendizaje por refuerzo que utiliza como medio de bonificación el cumplimiento de objetivos basados en los indicadores de orientación.

En el capítulo siete se desarrolló la estrategia de control final en función de lo analizado en los capítulos anteriores y se evalúa evaluado su desempeño en detalle.

El capítulo ocho evalúa la estrategia diseñada en el capítulo anterior en un modelo donde la unidad objetivo es un robot de comportamiento independiente, donde tres Router Robóticos le brindan el servicio de anclaje de red.

El capítulo nueve expone las conclusiones y consideraciones finales del trabajo.

1.2. Objetivos

EL objetivo principal de este seminario de título es el estudio y simulación de algoritmos para desempeñar labores de anclaje de red (Tethering) en un sistema compuesto por: Unidades estáticas, Unidades de comportamiento aleatorio y agentes móviles autónomos (Router Robóticos), utilizando únicamente como métrica para juzgar la calidad de enlace y como método de orientación, el parámetro estándar de la familia de Normas IEEE 802, RSSI (Indicador de Fuerza de Señal Recibida).

1.2.1. Objetivos específicos

1. -Estudiar el Estado del Arte de los sistemas de aseguramiento de calidad de enlace mediante robot móviles.
2. -Desarrollar una herramienta de simulación que entregue, para un conjunto de nodos con posiciones determinadas, valores de RSSI aproximados a los obtenidos en un escenario de estudio real.
3. - Desarrollar, simular y analizar estrategias para el control de los robots basadas en modelos formales presentes en el Estado del Arte para problemas de Tethering.

Capítulo 2

Estado del Arte

Para cumplir la labor de mantener un vínculo de comunicación mediante robots móviles autónomos para un robot explorador de comportamiento independiente en un modelo de exploración mediante robots, se deben abordar diferentes dificultades: jerarquías, hardware, protocolos de comunicación y parámetros de rendimiento, entre otros. Cada problemática es posible de desarrollar mediante diferentes técnicas para brindar servicios Tethering mediante una estructura de auto organización de sus miembros. Para brindar el servicio de Tethering fueron utilizadas diferentes tecnologías que se complementan para desarrollar un sistema que cumpla con los objetivos planteados.

A continuación se exponen las distintas técnicas y estado del arte, entregando un esquema completo de las diferentes aristas para la elección de una solución al problema de *Aseguramiento de enlaces inalámbricos de datos de una colonia de Robots Móviles autónomos*.

2.1. Redes de Sensores Inalámbricos

Hoy en día el término Redes de Sensores inalámbricos, es un tema común para ingenieros y científicos, debido a sus cualidades que han abierto una gran posibilidad de aplicaciones, debiéndose encontrar en la actualidad un buen número de definiciones. Se tomará una entregada por National Instruments [17] ; Una red de sensores inalámbricos (WSN) es una red inalámbrica que consiste en dispositivos distribuidos espaciados autónomos utilizando sensores para monitorear condiciones físicas o ambientales. Un sistema WSN incorpora una unidad Gateway que provee conectividad a una red superior y nodos distribuidos (Figura 2.1). Gracias a las facilidades de despliegue, esta tecnología ya se encuentra en los siguientes campos: Monitoreo ambiental de aire, agua y suelo [26],

Monitoreo estructural para edificios y puentes [20], Monitoreo industrial de máquinas, Monitoreo de procesos [25], y seguimiento de activos [19], entre otros.

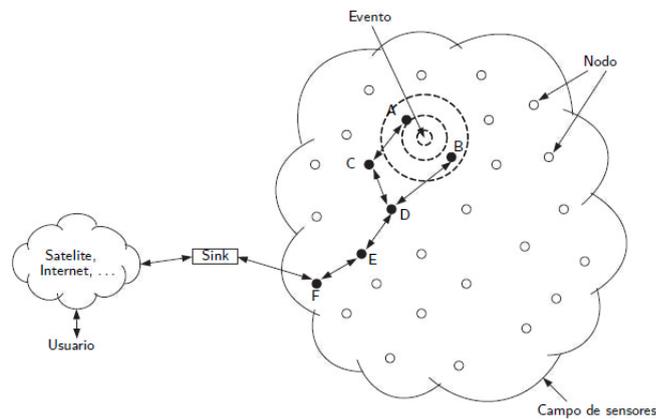


FIGURA 2.1: Red de Sensores Inalámbricos

Los trabajos en este campo de estudio se concentran en diversas áreas específicas como; desarrollo de diseño embebido, optimización energética, mejoras en capa física, antena, modulación, codificación, topologías de red y densidad de despliegue, enrutamiento de datos y otras más como, localización de unidades mediante técnicas inalámbricas. Muchos esfuerzos se realizan en pos de obtener unidades cada vez más pequeñas, baratas, inteligentes y autónomas, pensando en que con un pequeño dispositivo de energía se mantenga operativo por día, meses y hasta años. Estas unidades compactas y robustas han sido de gran ayuda en aplicaciones industriales [23] [47] [27] encontrando fabricantes que entregan soluciones a un gran conjunto de problemas mediante soluciones en WSN y además para aplicaciones o investigación académica, entre otras, incluyendo aplicaciones industriales, por su bajo costo y pequeño tamaño es el protocolo IEEE 802.15.4 Zigbee [4].

2.2. Inteligencia Colectiva

El ejemplo más comúnmente utilizado para ilustrar esta situación que ocurre en la naturaleza, son los insectos como las hormigas que viven en colonias (enjambres). También se puede encontrar cardúmenes de peces, bandadas de pájaros y mamíferos, los cuales trabajan en conjunto para realizar alguna tarea o mejorar los resultados, que sólo un individuo aislado obtendría. Esta interacción social consigue fines como: protección ante depredadores (cardúmen de peces), aumento de la eficiencia de caza (mamíferos felinos), de locomoción (grupos de pájaros en migración), entre otras. En la Figura 2.2

se puede apreciar ejemplos de especies animales que trabajan en conjunto.



FIGURA 2.2: Animales Sociables

Un modelo bastante empleado, es el de optimización mediante colonias de hormigas, (Ant Colony Optimization Algorithm) [3], utilizado en distintas áreas de las ciencias e ingeniería [56] [11] [24]. Al observar un enjambre real de hormigas surgen las siguientes preguntas; ¿Quién las organiza?, ¿Porque actúan de tal forma?, ¿Cómo estas hormigas pueden resolver el problema como encontrar el camino más corto a su objetivo?, siendo que son animales que funcionan en base a su instinto. Por qué esta particular forma de resolución de problemas, es parte de la inteligencia artificial actual [46] .

Los modelos de computación evolutiva en la actualidad están siendo aplicados en las áreas de control automático, procesamiento de señales e imágenes, y robótica. Para los lectores menos familiarizados en este tema, es recomendable consultar el trabajo "Swarm intelligence: problem-solving societies (a review)" [31] donde se expone en profundidad una taxonomía de la computación evolutiva y la diferencia entre la inteligencia de enjambres y otros algoritmos evolutivos, además ejemplos y situaciones de aplicaciones.

2.3. Agente Robótico, Robótica de Enjambre

Se plantea el siguiente escenario Si los robots individuales ya pueden llevar a cabo acciones específicas [51]. ¿Qué pasaría si se desarrollan en conjuntos coordinados de robots?. Este nuevo esquema de múltiples individuos es el resultado de la coordinación de sistemas basados en agentes, y se tiene como meta el estudio de los mismos tanto a nivel físico, como de su comportamiento individual y grupal. La Figura 2.3 ilustra un contraste con respecto a la figura 2.2 mostrando robots en reemplazo de animales.

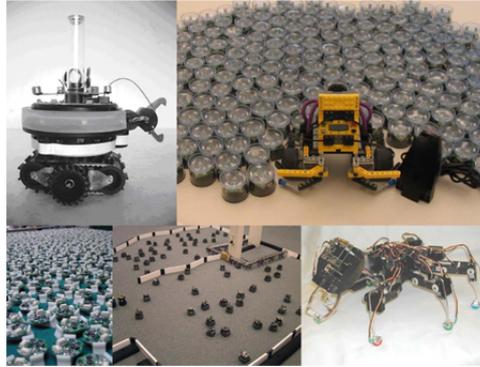


FIGURA 2.3: Aproximación de Animales Mediante Robots

Un sistema basado en agentes, es un modelo computacional comprendido por un conjunto de entidades autónomas de toma de decisión llamadas agentes, los cuales realizan acciones en el medio interactuando en el entorno y con sus pares [53]. Cada agente evalúa su situación y toma decisiones sobre la base de un conjunto de reglas, realizando interacciones en su entorno y a sus pares en pos de estudiar los efectos que el agente produce en el conjunto del sistema. En la Figura 2.4 se observa un modelo simple de un agente [14] contemplando parte del hardware y software y en el centro la parte de aprendizaje.

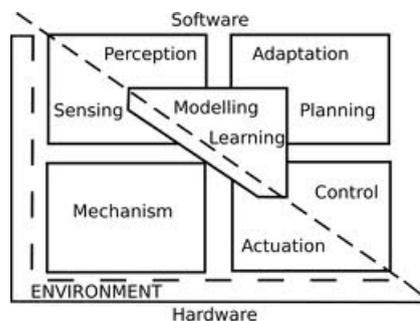


FIGURA 2.4: Esquema de Agente Robótico

Un agente robótico a diferencia de un agente de software biológicos o de las demás entidades señaladas como agentes, se caracteriza por que su dominio es el medio físico real [22]. Por lo cual el agente robótico debe poseer sensores que le permitan recopilar información del medio ambiente, procesarlo en una base de conocimiento o reglas de control para poder interpretar la información que a adquirido, y actuadores que modifiquen alguna característica del entorno en respuesta a los datos censados y reglas de control. Dichos agentes pueden ser estáticos o móviles siendo de interés los móviles para aplicaciones de multi-agentes.

2.4. Red de Sensores y Actuadores.

Una Red de Sensores Inalámbricos (WSN) posibilita la transmisión de información sin la necesidad de medios guiados, permitiendo un despliegue dinámico, pero en muchas aplicaciones es de interés no sólo poder sentir (realizar monitoreo), sino poder actuar sobre el ambiente, esto por medio de los mismos nodos que posean algún tipo de actuador. Esto conlleva a: un mayor costo económico, tamaño y consumo energético, que va en desmedro de los principios de las WSNs, pero son costos necesarios si se requiere realizar acciones de control. Esta tecnología se puede identificar como Wireless Sensor and Actor Networks (WSAN) [2] [28] [29] (en español Redes de Sensores y actuadores inalámbricos) que se refiere a un conjunto de nodos compuestos por sensores y actuadores unidos por medios inalámbricos, para llevar a cabo la detección distribuída y el accionamiento de elementos. La arquitectura física de la WSAN se expone en la Figura 2.5. En este tipo de red los sensores recogen información de el mundo físico mientras que los actuadores realizan acciones apropiadas sobre el medio ambiente, lo que permite a distancia la interacción automática con el sistema.

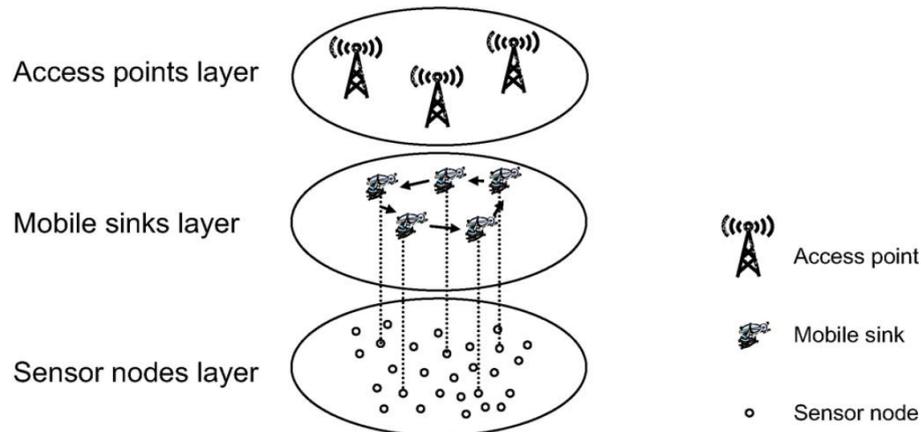


FIGURA 2.5: Red de Sensores y Actuadores Inalámbricos

Por contra parte, la robótica de enjambre es posible gracias a unidades autónomas que interactúan con el medio. En situaciones en que estos agentes requieran compartir información entre ellos, pero no tengan la posibilidad de interacción física o que esta no sea posible o deseada, una opción para este caso es poder equipar a estos agentes con módulos WSN, proporcionando la posibilidad de comunicación inalámbrica. La tecnología WSNs es deseable en aplicaciones de micro y nano robótica dado su tamaño y rendimiento energético; en esta situación se obtendría una unidad más robusta. Tal robot puede interactuar con el medio ambiente físico por medio de varios motores y mecanismos

(actuadores), sin embargo, desde una perspectiva de red, el robots constituye una única entidad. Esta entidad está caracterizada por ser una WSN nodo inalámbrico, sensor y actuador. De este modo, esta descripción de agente abarca una gama de dispositivos heterogéneos como: robots, vehículos aéreos no tripulados, y actuadores inalámbricos industriales conectados en red; rociadores de agua, cámaras móviles, brazos robóticos, etc. Un caso particular de interés es un robot con ruedas lo que le permite modificar su posición espacial, lo que puede modificar la topología de red existente. Este tema es muy importante ya que una unidad autónoma básica puede ser utilizada como Router Robótico [50] [32] [55].

2.5. Localización, Posicionamiento y Exploración Mediante WNAS's.

En una Red WSN o WSN sería deseable o necesario saber alguna noción de posición y velocidad en referencia a las demás unidades o a puntos estáticos, como para coordinar movimientos de robots [34]. Esta información puede ser obtenida con la utilización de hardware adicionales como; receptores GPS, sensores de sonido, sensores de proximidad, entre otras técnicas expuestas en [37]. Existe un enfoque para obtener la posición mediante técnicas inalámbricas utilizando parámetros entregados por los nodos. Se distinguen dos formas:[1] el primero por el modelo de propagación de ondas electro-magnéticas como trilateración y el segundo método un enfoque de proximidad o cercanía utilizando heurísticas. El medio de solución está ligado al hardware que se tenga disponible o que se requiera incorporar, al costo y sobre todo la exactitud de la información requerida para esta aplicación. La posibilidad de poseer información de la posición de las unidades móviles es de utilidad para configuraciones de ruteo y seguimiento de objetivos. Asumiendo que los nodos más cercanos presentan una mejor calidad de enlace, saber la proximidad de las unidades con las que se puede establecer comunicación es de utilidad al elegir una ruta para la transmisión de paquete. La información de la proximidad es fundamental al realizar seguimiento de un activo mediante técnicas inalámbricas, ejemplos de esto son los modelos que determinan la posición y velocidad de unidades inalámbricas en correas transportadoras mediante el RSSI escuchado de ellas [21] [Faúndez and Carrasco]. Si una red posee como miembro a una unidad WSN y es posible calcular la distancia entre unidades, la unidad WSN al cambiar de posición puede modificar la topología de red de forma de asegurar un link o darle redundancia [48]. Se puede encontrar trabajos donde se simula dar una posición a los nodos de forma autónoma y dar un enlace redundante, otras donde una unidad autónoma posiciona

nodos estáticos [35], además estructuras donde todos los nodos no principales se reorganizan para mantener los objetivos con conexión a estaciones que brindan paso a una red superior [41].

Capítulo 3

Marco Teórico

3.1. Comunicaciones no Cableadas

Las comunicaciones no cableadas son enlaces de radio frecuencia, ondas electromagnéticas transmitidas de un terminal por medio de la polarización de un elemento pasivo (*Antena*), que radian distintas longitudes de ondas del espectro electromagnético. Dichas ondas electromagnéticas radiadas en un canal son captadas por un sistema receptor el cual codifica las variaciones de fase y/o amplitud transformándolas en información útil. Este es el proceso fundamental de las telecomunicaciones, como se transmite información desde dos puntos sin cables. El sistema receptor y transmisor presentan restricciones dependientes del hardware utilizado las cuales limitarán el área de cobertura del sistema y la cantidad de información por unidad de tiempo, que es el principal parámetro para determinar la distancia máxima de transmisión. Parámetros fundamentales a mencionar son la potencia de transmisión y la sensibilidad del receptor. La potencia de transmisión (energía por unidad de tiempo) que el sistema es capaz de radiar o difundir por el canal. Referente al receptor está la sensibilidad; umbral de potencia mínima que el sistema es capaz de percibir transformándola en información útil. La información (mensaje) es enviada por un canal (medio físico de propagación) no ideal, pues presenta atenuación en función de la distancia que separa los elementos que pretenden establecer un vínculo por el canal. Para poder brindar conexión y transmitir un mensaje es primordial tener presente tres factores ya mencionados: potencia de transmisión, sensibilidad del receptor y atenuación del canal. La Figura 3.1 expone un modelo básico de comunicaciones; Emisor, Canal y Receptor.

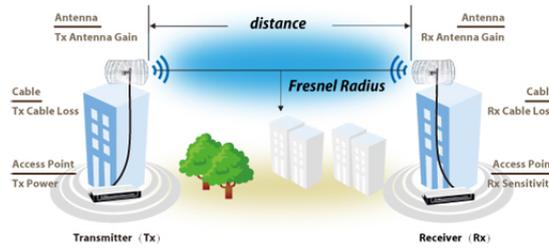


FIGURA 3.1: Diagrama, Sistema de Comunicación

3.1.1. Pérdida por Propagación

Como en la Figura 3.1, donde el transmisor y receptor se encuentran en vista directa, el mensaje transmitido en forma de ondas electromagnéticas por el canal presenta atenuación que se rige por La Ley Cuadrática Inversa [52], repercutiendo en la magnitud de potencia de la señal capturada por el receptor, teniendo la propiedad de ser inversamente proporcional a la distancia del punto donde fue originado. La cantidad de potencia que es capturada por el receptor es considerablemente menor que la transmitida. Si se idealiza la radiación mediante un modelo de antena isotrópica ideal, donde su área de radiación es esférica, a medida que se aleja del centro de emanación las ondas se alejan cada vez más unas de las otras, consecuentemente el número de ondas por unidad de área disminuye [52], las ondas son portadoras de energía. Al disminuir ésta en función del tiempo, la potencia es mermada de igual forma.

3.1.2. Cálculo de Enlace.

En el desarrollo, cálculo de un enlace de radio frecuencia, a los diseñadores se les presentan variadas consideraciones en la elección del hardware óptimo, minimizando costos y cumpliendo los requerimientos de robustez y fiabilidad del enlace. En la elección de los componentes del sistema deben ser contemplados factores tal como: a) Desde la perspectiva del comportamiento de las ondas electromagnéticas: absorción, refracción, reflexión [39]. b) Parámetros del hardware como: Frecuencia de transmisión, potencia, sensibilidad, por mencionar algunas. c) Además de contemplar tipo de ruido que afecta al sistema; electrónico (interno del sistema), ambiental, identificación y formas de cuantificarlo, posible ver a fondo en [39]. El entorno geográfico donde se desempeñará, toma importancia si el vínculo presenta vista directa o las ondas llegan por reflexión generando un modelo de propagación de dos rayos en vez de un modelo de vista directa que contemple un sólo rayo incidente. En el cálculo de vínculos es posible utilizar la Ecuación 3.1, la cual, cuantifica la Atenuación de *Espacio Libre* para un link de comunicación mediante radio frecuencia. En condiciones ideales de espacio libre, la potencia emitida

por una antena transmisora P_T y recepcionada P_R , unidad en *Watt*, cuya diferencia representa la atenuación del canal, que es dependiente de la distancia d y longitud de onda λ , medidos en metros. Para mejorar el rendimiento sin la necesidad de aumentar la potencia o la sensibilidad, es posible incluir elementos pasivos con ganancias, Antenas donde G_R y G_T pueden ser una ganancia homogénea o direccional.

$$\frac{P_R}{P_T} = G_R G_T \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \tag{3.1}$$

3.2. IEEE 802.15.4, Zigbee.

El estándar IEEE 802.15.4 es una norma de comunicación estructurada en capas del modelo OSI (OSI Open System Interconnection) que abarca las capas uno (física) y dos (control de acceso al medio). Su objetivo es permitir la conexión entre dispositivos sin importar las capas superiores que estos implementen. Fue creado por el IEEE (Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos), entidad que genera estándares para distintas tecnologías, entre las de interés, las normas que rigen comunicaciones inalámbricas en las bandas de frecuencia ISM (Industrial, Scientific and Medical), en español, frecuencias para uso Industrial, Científico y Médico. El estándar IEEE 802.15.4 es parte del programa IEEE 802.15: wireless personal área networks (PANs) [16] y a su vez forma parte del programa IEEE 802: local and metropolitan area network standars, todos esfuerzos por tener plataformas de desarrollo comunes que permitan la conexión de dispositivos de diferentes fabricantes bajo el alero de la *IEEE* standars association [15].



FIGURA 3.2: Modelo OSI y Zegbee mas 802.15.4

ZigBee alianza estándar de comunicación ZigBee norma que define las capas de comunicación de nivel 3 (red) y parte superior en el modelo OSI, Figura 3.2. Su principal objetivo es la creación de una topología de red (jerarquía) para permitir que un número elevado de dispositivos puedan trabajar simultáneamente, comunicarse entre ellos y establecer funciones adicionales como: direccionamientos de datos, fiabilidad de información, detección de errores , seguridad, servicios de autenticación, cifrado, asociación y de los servicios de aplicación de capas superiores. ZigBee alianza [5] fué creado por un conjunto de empresas como agrupación, para entregar una amplia gama de productos para

usos domésticos y/o industriales, estándares diseñados para permitir que los fabricantes de productos entreguen soluciones pensadas ,aplicaciones que requieren comunicaciones seguras con baja tasa de envío de datos y maximización de la vida útil de sus baterías. En la Figura 3.2 se contrasta el modelo OSI y Protocolo Zigbee en capas inferiores mas IEEE 802.15.4 en la superiores.

3.3. Calidad de Enlace

En un escenario donde los nodos son desplegados de forma aleatoria y cada nodo es capaz de escuchar y ser escuchado por uno o más miembros de la red. Si se desease transmitir una información desde un terminal a otro y no es posible hacerlo de forma directa. La forma de alcanzar a un nodo con el cual no se presenta una comunicación directa es la creación de una ruta mediante la retransmisión de información. Para realizar un encaminamiento de él o de los paquetes de datos, se debe evaluar de alguna forma cual es mejor camino para alcanzar a una terminal. La pregunta es ¿Cómo seleccionar la ruta mediante saltos entre los dispositivos?. Para dicha elección se utilizan en mecanismos IEEE 802.15.4 las siguientes métricas.

3.3.1. LQI

El parámetro LQI Link Quality Indicator, en español indicador de calidad de vínculo, es una métrica que estima el costo de recuperar un paquete de datos mediante la facilidad de la señal para ser demodulada. Valor calculado por la magnitud de error entre las constelaciones (espacio de señal) ideales y la señal recibida después de la palabra de sincronización [18]. El LQI es utilizado como medida relativa a la calidad del enlace, no indica intensidad de la señal recibida. Su valor depende del formato de modulación digital. Para una modulación FSK o GFSK, el LQI es una métrica obtenida por el error de cada bit en función de la frecuencia recuperada (demodulada) versus la ideal, contemplando: frecuencia del canal, desviación y frecuencia media (offset) contra el valor ideal esperado.

3.3.2. RSSI

Es una Métrica que indica la fuerza con que es escuchada una señal de radio frecuencia en telecomunicaciones. Se caracteriza por RSSI (received signal strength indicator), en español "Índice de Intensidad de Señal Recibida". Unidad de potencia *watt* en decibelios *dB* referenciados a $1mW$ para medir niveles de potencia recibida

de un dispositivo en las redes inalámbricas. En una métrica estándar para sistemas de comunicación como la familia de normas IEEE 802, GPS y telefonía móvil, donde el valor es parte de la trama de recepción. El RSSI es además una métrica inmediata que corresponde a un valor de potencia para una transmisión puntual de un paquete de datos.

3.3.3. Packet Loss

La métrica Packet loss, en español pérdida de paquete, es un escalar adimensional que representa la cantidad de paquetes entregados correctamente en relación al flujo total de datos transmitidos. La pérdida de paquetes se distingue como uno de los principales errores en comunicaciones digitales. Packet Loss es calculado por la división de números de paquetes totales dividiendo al número de paquetes perdidos. Se puede identificar como una métrica de rendimiento que tan efectivo es el enlace. No es un valor inmediato, por el contrario, es necesario transmitir un flujo de información para poder cuantificarlo.

3.3.4. Calidad de Enlace en IEEE 802.15.4, Consideraciones

Los parámetros descritos están presentes en IEEE 802.15.4, tomando como base los módulos en Xbee [10]. La métrica de LQI es utilizada para generar tablas de ruteo en DigiMesh Networking Protocol [9], corresponde a una palabra digital pudiendo ser identificada como una byte de la trama.

La métrica RSSI es un valor en dB de potencia referida a miliWatt si los valores son menores a $1mW$. Como es común, son valores negativos. Para el estándar IEEE 802.15.4 corresponde a un byte. La interpretación del valor real signo debe ser considerada, puesto que los valores prácticos son negativos. Los valores de LQI y RSSI pueden tener correlación, pero es posible tener un buen valor de LQI y mal valor RSSI y viceversa.

La pérdida de paquete, (Packet Loss) en IEEE 802.15.4, es mayor que por medios cableados al utilizar el espacio como canal. En una comunicación inalámbrica resulta natural pensar que a medida que el receptor se aleja de la fuente, la tasa de pérdida es mayor, pero esta métrica a diferencia de LQI y RSSI que son calculados instantáneamente en cada trama, su porcentaje de pérdida de paquete es calculado para una masa de datos. Factores a considerar en 802.15.4 son largo de trama, tasa de transmisión, control de acceso al medio (colisiones), entre otras a señalar.

3.4. Tethering

Tethering o anclaje a red, proceso por el cual un dispositivo móvil con capacidad de comunicación inalámbrica, redirecciona la información actuando como router (pasarela) para ofrecer conectividad a una red superior o a otros dispositivos cualquiera que estos sean. Al estudiar la estructura de un servicio de Tethering, pensando en la utilización de Robots Móviles, se encuentra mediante WNS dos tipos de formas de implementar anclaje de red: una mediante robots heterogéneos [Pezeshkian et al.] y la otra por medio de robots homogéneos [30]. Las dos clasificaciones realizan una distinción en las capacidades de los miembros de la red, si estas son iguales o desiguales. Al enfatizar en los modelos donde los miembros de la red a nivel de hardware poseen características idénticas. Los nodos en un red homogénea son jerarquizados a niveles lógicos, según la función que realicen encontramos en la literatura tres tipos básicos de nodos [54] [49] [42].

A continuación se presentan las distinciones de grupos lógicos o de función.

- **Gateways:** Unidades que proporcionan conectividad a una red superior o son unidades de almacenamiento de datos, dispositivos finales donde decanta la información de la red.
- **Targets:** Dispositivos a los cuales se desea mantener conectados a una o varios Gateways. Generalmente se describen como personas o robots exploradores de comportamiento estocástico.
- **Routers Móvil:** Descrito generalmente por el nombre del dispositivo empleado para mantener conectividad entre los distintos Gateways y Targets.

Comúnmente se hace alusión al nombre de la tecnología, modelo del robot para denominar el nodo móvil. En adelante se nombrarán a los nodos móviles como *Gangway*, al ser una pasarela de datos. Dependiendo de la topología y requerimientos de la red, pueden existir distintas jerarquías, en esencial se debe encaminar un paquete de datos desde un terminal distante hacia otro mediante múltiples saltos.

3.4.1. Tipo de Enlace

La teoría de redes inalámbricas expone dos tipos de solución al vincular un punto de enlace: simples y múltiples, cada una presenta características que la diferencian. Los enlaces múltiple poseen mínimo dos formas de alcanzar un terminal, permitiendo que ante el fallo de uno, el mensaje sea transmitido por otro camino, condición deseable al explorar lugares confinados. Los enlaces simples carecen de estas ventajas de seguridad, pero requieren una menor cantidad de dispositivos, minimizando y simplificando el diseño reduciendo costos al implementarlos. En la Figura 3.3 se expone un esquema

correspondiente al trabajo. [8]. En la figura se observan dos casos posibles donde debido a obstáculos naturales o grandes distancias, no es posible mantener un enlace de datos con los nodos dado su área de cobertura, siendo necesario encaminar los paquetes de datos mediante nodos intermedios. Del mismo modo, se puede observar distintos tipos de solución de enlaces únicos o enlaces dobles.

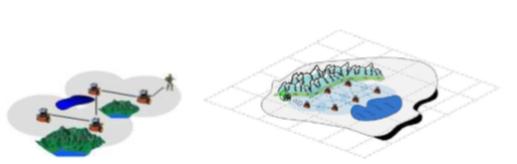


FIGURA 3.3: Tipo de enlaces

3.5. Auto Organización de Sistemas

Para un gran conjunto de aplicaciones el control centralizado es la solución factible, económica y de baja complejidad técnica. De igual manera se puede encontrar aplicaciones inspiradas en entidades biológicas, donde sus miembros, generalmente homogéneos, se estructuran sin una unidad monitora.

La solución, forma de abordar las problemáticas pensando en labores de Tethering, está ligada al tipo de estructura pensante que se quiera dar al sistema. La primera opción es contar con una unidad líder que según las lecturas, active, vincule y dirija a los individuos, siendo una forma eficiente pero que conlleva la lógica preocupación de que sólo una unidad sea la pensante en el sistema. La segunda es que cada individuo con la información que posea según alguna base de conocimiento, realice una acción y una auto organización Self-organization, pensando en la limitación del poder de computar de los robots. Haciendo la analogía de robots a hormigas en una colonia, cabe la pregunta y respuesta. It is all but impossible to conceive how any one colony member can oversee more than a minute fraction of the construction work or envision in its entirety the plan of such a finished product. Some of these nests require many worker lifetimes to complete and each new addition must somehow be brought into a proper relationship with the previous parts ". La tarea de aseguramiento de enlace si es llevada a cabo por una colonia de robots, es poco realista pensar que una unidad que incorpora una hipotética red de 100 nodos adquiera toda la información y genere un modelo y encuentre su labor en base al modelo actual de red. En el caso de las hormigas recién incorporadas a la colonia, ellas automáticamente realizan un trabajo sin tener mucha o nula información de la situación de sus antecesores, pero realizan una acción adecuada. El comportamiento general ideal para la problemática presente, es de auto-organización

pensada en agentes biológicos. El extracto anterior es de Self-organization in Biological Systems [7].

3.6. Modelos de Estimación de Distancia o Proximidad en WSN's

Para una variada gama de aplicaciones, es preciso tener nociones de la ubicación espacial de un objetivo para realizar seguimiento o una acción de control en medio o sobre el mismo. En [37] se presenta una taxonomía detallada de los diferentes modelos o los más empleados para tener una ubicación o noción de un objetivo. Para tener una aproximación de la posición del objetivo, es preciso caracterizar el concepto de localización. Localización es el proceso por el cual se estima la posición de un elemento (dispositivo y/o individuo) dentro de un entorno determinado mediante cualquier técnica [Rao et al.]. Es posible encontrar propiedades según el tipo de aplicación o exactitud de la información. Se pueden distinguir dos tipos de cualidades en la localización: posicionamiento físico o posicionamiento simbólico, entrega de posición en coordenadas absolutas o relativas. En la elección del método y/o técnicas es posible distinguir dos grupos según "no-over": El Primer grupo, basados en distancias (range-based) y segundo grupo, basados en proximidad (proximity-based) o libres de distancias (range-free)[38].

- **Range Base:** (Basado en Rango). Familia de modelos sustentados únicamente en modelos de propagación de radiofrecuencia, calculando una distancia puntual, en relación a la medida actual de potencia o en función de la medida actual con correlación de mediciones pasadas. Ejemplos de estos modelos son la trilateración.
- **Range Free, Libre de Rango:** Familia de modelos que utilizan un conocimiento aproximado, apoyándose en el uso de técnicas de huella digital (mapeo), generando conjuntos de pertenencia; (lejos, cerca).

Es posible encontrar distinciones en relación al marco de referencia utilizado, hablando de coordenadas absolutas y relativas y de uso de hardware externo como GPS. Utilizando como primicia localizar dispositivo WNS, se generalizan dos grupos; modelos dependientes de hardware externo (adicional al transceptor inalámbrico y unidad de computo) y modelos que emplean alguna cualidad de los mismos nodos para poder localizar a sus pares. Esta distinción permite contemplar que, al utilizar un modelo que no dependa de hardware externo, se tendrán unidades más económicas, pequeñas y con menor consumo energético.

3.6.1. Modelos de Intensidad de Potencia recibida en WSN

Poder modelar un vínculo de radio frecuencia y generar ecuaciones que determinen la magnitud y propiedades de una señal a una determinada distancia, especialmente si es preciso simular el sistema de estudio o predecirlo según los valores pasados, el cálculo de la propagación en base al entorno terrestre de ondas electromagnéticas, presenta grandes complejidades por la gran cantidad de factores a considerar y las diferentes características geográficas que ligán los parámetros a contemplar. La Ecuación 3.1 permite calcular la atenuación del canal. Es posible cuantificar la pérdida por trayectoria mediante la Ecuación 3.2 y 3.3 [44]. Ecuación de *Friis De EspacioLibre*. Las ecuaciones 3.2 y 3.3 incluyen, a diferencia de 3.1, d_0 , una distancia de referencia que es posible elegir. La Ecuación 3.3 es más compacta e incluye un valor medido o calculado de potencia para la distancia de referencia $P_R(d_0)$.

$$P_R(d) = \frac{P_T G_R G_T \lambda^2}{(4\lambda)^2 d_o^2 L} \left(\frac{d_0}{d}\right)^2 \quad (3.2)$$

$$P_R(d) = P_R(d_0) \left(\frac{d_0}{d}\right)^2 \quad (3.3)$$

Para una WSN es preciso obtener una apropiación del RSSI en función de la distancia. Las ecuaciones anteriores están pensadas para casos ideales, escenarios que pueden tener una gran atenuación generando funciones que carezcan de la característica de ser monotónica. Mediante la Ecuación 3.4 (Modelo Log-distance Path Loss), es posible modelar la potencia recibida, siendo un modelo más generalizado, contemplando el contraste γ , exponente de pérdida por trayectoria, valor que permite variar la tasa de decaimiento al aumentarlo. La no idealización del canal es por factores como obstáculos y/o rebotes de la señal. La Ecuación 3.5 es el modelo Log-distance en decibeles, útil por ser la unidad en los módulos basados en IEEE 802.15.4. La Ecuación 3.6 Modelo Lognormal Shadowing de este modelo incluye una variable aleatoria de ruido con distribución gaussiana de media 0 y varianza σ . Estos modelos formales sirven de base para generar las primeras aproximaciones del RSSI que caracteriza una distancia o una distancia que caracteriza un RSSI.

$$P_{rcvd}(d) = P_{rcvd}(d) \left(\frac{d_0}{d}\right)^\gamma \quad (3.4)$$

$$PL(d) [dB] = PL(d) [dB] + 10 \cdot \gamma \cdot \log_{10} \left(\frac{d_0}{d}\right) \quad (3.5)$$

$$PL(d) [dB] = PL(d_0) [dB] + 10 \cdot \gamma \cdot \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) + X_\sigma [dB] \quad (3.6)$$

La Figura 3.4 de color rojo el modelo Lognormal Shadowing y de color azul Log-distase. Para un γ de 1.23, distancia de referencia d_0 un metros, $P_R(d)$ de $-52dB$ y una varianza σ de 2.

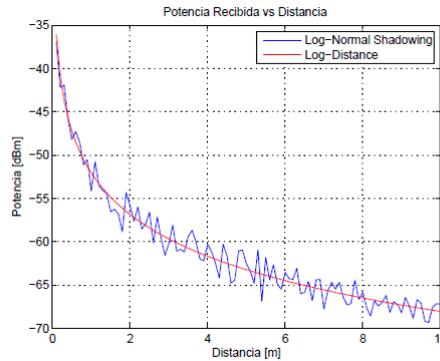


FIGURA 3.4: Modelos Log-distance y Lognormal Shadowing

3.7. Inteligencia Artificial, Aprendizaje por Refuerzo

Dentro de la ramas de la Inteligencia Artificial podemos distinguir el área o rama de Machine Learning, Aprendizaje de Máquinas que desarrollan algoritmos que permiten a las máquinas tomar decisiones sin tener una programación explícita, pudiendo reaccionar a un evento del cual no fue programado, permitiendo a un agente tener la habilidad de aprender a resolver problemas sin ser programados explícitamente. Las técnicas de Machine Learning se clasifican en tres tipos [45]: aprendizaje supervisado, aprendizaje no supervisado y aprendizaje por refuerzos. Es posible encontrar otras denominaciones, pero en esencia son modelos que toman diferentes partes de los nombrados como: aprendizaje semi supervisado, que es un híbrido entre aprendizaje supervisado y no supervisado.

Cada modelo es planteado para resolver problemas de toma de decisión de un agente cualquiera sea el tipo, según la información que recopile en los datos de entrada, es una acción teniendo como hipótesis que la acción será beneficiosa para el agente. Los tres modelos básicos se distinguen por conocimiento previo del ambiente donde actuará el agente. Para el aprendizaje supervisado, es preciso realizar una minoría de datos, deduciendo comportamientos en base a los datos de entrenamiento. El aprendizaje no supervisado opera mediante un modelo que es ajustado dependiendo de las observaciones, diverge del aprendizaje supervisado al no contemplar una base de conocimiento

del entorno de entrenamiento. Aprendizaje por refuerzo, como su nombre lo describe funciona por la retroalimentación refuerzo del medio, el agente realiza una acción en su entorno, dicha acción es evaluada asignándole una recompensa o refuerzo. El agente tiene como objetivo maximizar los refuerzos futuros, por lo cual efectuará acciones que maximicen las recompensas futuras. Es posible estudiar las diferentes técnicas además de complementarlas con otros campos como inferencia bayesiana y modelos probabilísticos.

3.7.1. Aprendizaje Por refuerzo, Algoritmo Q

Un modelo transversal de aprendizaje con el cual se puede enseñar a los animales influyendo al homínido, es mediante refuerzos. Es posible condicionar un comportamiento mediante estímulos premiando una acción deseada y castigando una incorrecta. No es posible razonar con un animal, una rata de laboratorio, que se alimente de un sólo tipo de alimento si se le ofrecen dos tipos al mismo tiempo (queso y trigo), la pregunta es ¿ Como condicionar el comportamiento de la rata a alimentarse solo con trigo?. Esto puede ser llevado a cabo mediante la aplicación de estímulos, cada vez que la rata se alimente, cada vez que la rata escoja trigo se le repondrá el alimento, en cambio cuando intente comer queso se le administrará corriente eléctrica que la rata pueda percibir como desagradable. La rata tiene como objetivo alimentarse, por lo cual elegirá después de un tiempo la opción que maximiza su objetivo, eligiendo el trigo que se le repondrá en vez del queso.

Si es posible condicionar mediante refuerzo a animales, un camino obvio sería generar algoritmos de control mediante técnicas de aprendizaje por refuerzo para agentes robóticos.

3.7.2. Formalismo Estándar

Un problema de Aprendizaje por refuerzo se puede representar por Figura 3.5. Consta en que un Agente, sea de tipo hardware o software, que esta inmerso en un *Entorno*, sea capaz de realizar alguna Acción que genere un cambio de *Estado S*. Dicho cambio de estado puede ser evaluado y asignado una *Recompensa*. Podemos generalizar en una matriz de estados acción $S \times A$ además la recompensa es cuantificada en función del estado actual y acción realizada $R(s, a)$. El método de elección de la acción $\pi(s)$, política para maximizar la recompensa, es realizar la acción que pertenezca a $S \times A_p$, dado A_p todas las posibles acciones, eligiendo la acción que pertenece a $S \times A_p$ cuyo valor asociado de recompensa sea mayor, dando S' estado futuro esperado mediante el

mencionado agente, puede deambular por diferentes pares $S \times A$ procurando realizar acciones beneficiosas.

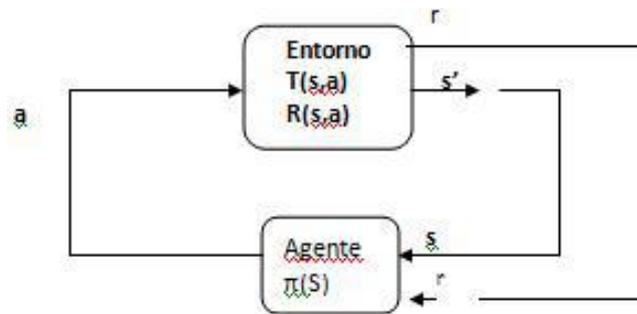


FIGURA 3.5: Modelo Aprendizaje por Refuerzo

Capítulo 4

Caso de Estudio

En los últimos años gracias a la miniaturización de los sistemas digitales y la fuerte penetración de tecnologías inalámbricas, se han abierto nuevos escenarios de estudio, algunos distantes de sus fundamentos electrónicos como la dependencia que presenta la sociedad a la conectividad de redes de internet y/o temas más cercanos al Hardware, como la gestión inteligente de energía o direccionamiento y enrutamiento de paquetes de datos. Un tema pujante en la última década son las redes inalámbricas, que en la actualidad se presentan de forma omnisciente en la vida cotidiana ofreciendo ventajas tales como; flexibilidad de conexión frente a las redes cableadas. Estas terminologías entran en juego en aplicaciones donde factores geográficos, confort del usuario o económicos, impiden la utilización de redes cableadas, implicando las virtudes y premuras inherente a la utilización del espacio libre como canal. Ante la necesidad de estar vinculados en tiempo real transfiriendo información en una gran gama de escenarios, es preciso estudiar y diseñar formas de asegurar el flujo de datos en los nuevos escenarios en las que las redes inalámbricas se desempeñarán.

4.1. Problemática

Trabajando con medios inalámbricos una condición fundamental es que la comunicación sólo puede efectuarse si se encuentran los dispositivos dentro de su área de cobertura. Si se desea establecer una conexión entre dos dispositivos inalámbricos, básicamente se pueden encontrar los siguientes escenarios: el primero es contar con una comunicación directa (ambos nodos pertenecen área de cobertura del otro). El segundo caso cuando la distancia entre el emisor y el receptor supera el rango de cobertura, se pueden utilizar nodos intermedios que realicen enrutamientos de los paquetes de datos.

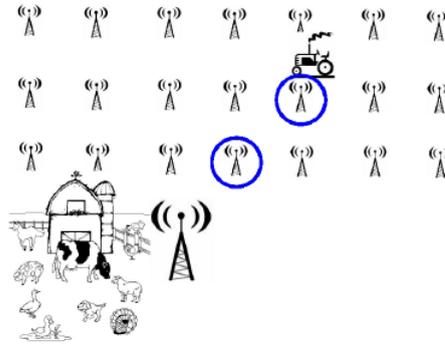


FIGURA 4.1: Modelo de solución de conectividad mediante Router Estático.

En este escenario donde un usuario requiere comunicación continua con un terminal Tekdas, Onur and Yang [50] exponen que en una granja o almacén considerando escenarios de trabajo fijos, la solución es la conectividad mediante un despliegue de router estáticos, si bien es factible y utilizada comúnmente, tiene una viabilidad mermada, que en cualquier momento el conjunto de nodos necesarios para proporcionar conectividad está formado sólo por un pequeño subconjunto de todos los nodos desplegados. Esto se puede apreciar en la Figura 4.1, donde de todos los nodos desplegados, sólo los encerrados en círculos azules entregan servicio, mientras los demás no realizan acciones importante en el enlace establecido. El enfoque de una red estática puede presentar costos elevados, problemas de mantenimiento, además del problema de robustez. Si la red posee nodos que son los únicos que pueden dar servicio de pasarela a un sub conjunto de la red para mantener una línea de comunicación, de fallar dichos nodos y no poder ser remplazados dejaría aislado a parte de la red.



FIGURA 4.2: Modelo de solución de conectividad mediante Router Móvil

Lo que Tekdas, Onur and Yang exponen entregar conectividad mediante router móviles en la Figura 4.2, que disminuye drásticamente la cantidad de nodos comparado

a la Figura 4.1. Teniendo como primicia la eficiencia energética y costos, la opción más atractiva es la utilización de Router Robóticos que disminuye el número de unidades y permite una organización dinámica de la red. La implementanción de Router Robótico conllevando una complejidad técnica y hardware mayor que la soluciones tradicionales, mediante terminales estáticos que enfatizan en una baja complejidad técnica y simplicidad de hardware, pero en situaciones donde el área de trabajo cambie y/o no sea posible tener infraestructura desplegada con anterioridad, la utilización de Router Robóticos es una forma obvia de abordar el problema.

Si es preciso seguir un activo cualquiera sea el tipo (asegurar su conexión a una red superior) en entornos desconocidos y no en zonas de trabajo determinísticas como lo planteado anteriormente, por lo contrario, realizar labores de Tethering en escenarios como: edificios, bosques, cuevas, estructuras colapsadas etc. En entornos donde se tendría poca o nula información de las características de la zona de trabajo, contextualizando mantener la conectividad entre unidades exploradores de adquisición de datos y un punto de recopilación de información y enlace a redes superiores(Gateway). Para realizar tal propósito Hoa G. Nguyen and Pezeshkian [35] exponen que un factor importante a considerar, el talón de Aquiles de cualquier operación táctica terrestre de campo, es la rápida degradación de la calidad de la comunicación al penetrar en el interior de edificios, túneles o cuevas. Para este problema ellos sugieren que una solución robusta es contar con un despliegue de unidades móviles, generando un conboy de robots que de redundancia de enlace a la unidad de interés. La característica de robustez en una enlace es deseable en casos donde la información es de vital importancia como: Operaciones militares terrestres, rescates, exploración y búsqueda. Todos estos escenarios caracterizados por no poder contar con una infraestructura anterior y requerir un despliegue dinámico de unidades.

La problemática a abordar en este trabajo es la confección de algoritmos de comportamiento para un sistema donde el enlace de datos es posible gracias a la utilización de nodos intermedios que proveen enrutamiento (Router Robótico), considerando además que su comportamiento no es aleatorio, a lo menos uno de las unidades finales(Target o Gateway) son robots autónomos móviles de comportamiento aleatorio. Con lo mencionado se puede inferir dos problemáticas: La primera es que el sistema es una red inalámbrica móvil, lo que conlleva inconvenientes de pérdida de conexión o calidad de enlace debido a que la posición de los robots es dinámica. La segunda problemática se relaciona con el anclaje de red, proceso por el cual un dispositivo inalámbrico móvil actúa como pasarela para ofrecer conectividad de datos a otros dispositivos (Tethering), mediante nodos inalámbricos móviles equipados con algoritmos de control y tomando

como parámetros de calidad de señal valores entregados por los dispositivos transceptores. Se pretende dar un servicio de exploración o aseguramiento de terreno donde uno o varios robots exploradores parten de un punto fijo o base a explorar una zona aledaña. Un ejemplo particular es en circunstancias donde se requiere explorar zonas de riesgo para las personas como estructuras colapsadas, que debido a la irregularidad del terreno impiden una conexión simple, entran en juego la utilización de robots que actúan como Router Móviles asegurando la estabilidad del enlace entre la base y él o los robots exploradores.

4.2. Alcances

Al desarrollar algoritmos de aseguramiento de enlace de comunicación inalámbrica mediante una colonia de robots, se presentan variadas restricciones que dependen del medio físico y Hardware que se desea implementar.

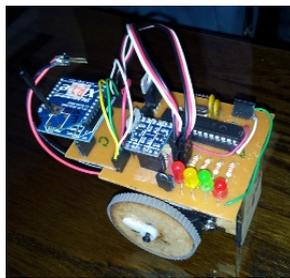


FIGURA 4.3: Almost finished prototype, including Xbee wireless module.

El presente trabajo es parte de Proyecto de localización FIDIE 422010: "Diseño y construcción de una colonia de micro-robots para la implementación de algoritmos de inteligencia de enjambre" [12]. Por lo cual los parámetros: cinemáticas y especificaciones de hardware, protocolo de comunicación etc, están en referencia al trabajo anterior Diseño y construcción de una colonia de mini-robots para la implementación de algoritmos de inteligencia de enjambre . El hardware utilizado correspondiente a la Figuras 4.3. Las especificaciones técnicas detalladas se pueden encontrar en el documento de tesis [6]. Los modelos matemáticos para simulaciones de parámetros de módulos Digi XBee también hacen referencia a trabajos realizados en la misma casa de estudio.

4.3. Segmentación del Problema

En la problemática de brindar Aseguramiento de Conexión a un Dispositivo Mediante el Despliegue Dinámico de Robots Enrutadores, se plantea la siguiente segmentación del problema en función del análisis bibliográfico y las consideraciones propuestas para el modelo de estudio. Se identifican tres sub-problemas: Comportamiento General o colectivo, Comportamiento Individual (mantención de vínculos) y Parámetros de Eficiencia (densidad de nodos, número de nodos en función de la distancia).

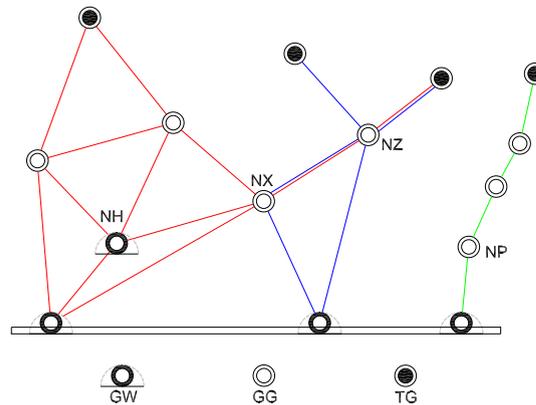


FIGURA 4.4: Modelo Final de Estudio.

4.3.1. Comportamiento General

Por comportamiento general se entiende la inteligencia que planifica el funcionamiento del conjunto total de elementos que conforman el sistema (colonia de robots). Comprende los algoritmos que permiten realizar tareas como: activación y desactivación de enlaces, determinación de vínculos prioritarios, estrategias de eficiencia energética, interconexión entre diferentes link de comunicaciones y otros. Todo esto en función de mantener una topología deseada.

La Figura 4.4 ilustra dos posibles escenarios que la Inteligencia Colectiva debería administrar. Un primer escenario es un link de comunicación simple presentando una unidad Target y Gateways, conectados mediante dos Gangeway, red de vínculos verde. Un segundo escenario expuesto por la red identificada por sus vínculos de color rojo, cada nodo posee más de un vínculo de comunicación. Una tercera posibilidad es que la red tenga dos unidades objetivos Targets, ejemplo caracterizado por la red de vínculos azules. Es posible identificar en las redes expuesta: Nodos vinculados a dos exploradores GG_{nz} , Nodos que dan servicio de pasarela a dos redes GG_{nx} , Nodos críticos que de perder conectividad inhabilita a la red GG_{np} y Nodos enrutadores pero de carácter estáticos

GG_{nh} . La figura 4.4 expone tres topologías de red puntuales, además se pueden presentar variadas iterconexiones entre los terminales generando nuevos escenarios, esto se debe a que las unidades son móviles. El Comportamiento General son los mecanismos de control, algoritmos que gobiernen las acciones del sistema. Dicha inteligencia debe ser capaz de administrar y solucionar temas como: concurrencia, designación de vínculos, Tablas de ruteo, Identificación de unidades redundantes innecesarias y activación de unidades adicionales. Los problemas mencionados, entre otros, son los que se deberán afrontar al diseñar una estrategia de Comportamiento General.

4.3.2. Comportamiento Individual

El Comportamiento Individual se entiende como las estrategias de control que gobernarán las acciones del Agente Robótico Autónomo una vez establecidos los vínculos, para mantener la calidad de enlace de él o los links de comunicación entre sus pares. El Comportamiento General trabaja con toda la red, por el contrario el Comportamiento Individual sólo planifica sus acciones en función del sub-conjunto que se establece por la vecindad próxima del Nodo Móvil, vínculo superior y vínculo inferior. En literatura se habla de esta función como Router Robótico; un Agente Robótico Autónomo que realiza cambios de posición para mantener el o los enlaces entre las unidades Target o objetivos y Gateway.

El Agente Robótico Autónomo debe reaccionar a los cambios provocados por los Target en la red: humanos, animales o robots móviles. El entorno de trabajo para el Router Robótico puede ser acotado (edificios, pasillos) o entornos abiertos (campos, bosques, ciénagas) con o sin obstáculos [35]. De suma importancia es el tipo de estrategia a utilizar para designar los vínculos de cada nodos, en referencia a la cantidad de enlaces que el agente Router Robótico tendrá que administrar.

4.3.3. Parámetro de Eficiencia: Densidad de Despliegue

Densidad de despliegue se entiende como el número de unidades necesarias para asegurar el enlace en una determinada área. La determinación de el número de terminales en función de distancia está ligado al estudio de los procesos estocásticos presentes en un enlace de radio frecuencia como: Atenuación, Pérdida de paquetes, Colisiones, Tiempo de espera (retardo), Congestion, parámetros que merman la eficiencia del sistema condicionando la cantidad y calidad de la información que se puede transmitir por unidad de tiempo.

Una vez establecidos los requerimientos de tasa de transmisión, es preciso responder la pregunta ¿Cuántos nodos son necesarios para cubrir una distancia determinada?. Dicho número depende de los factores pre-establecidos como: Asegurar que la probabilidad de entregar un paquete correcto, porcentaje de acierto, transmisión con tres saltos sea igual o superior a 0,45, 0,20 o 0,70 dependiendo de los requerimientos del sistema. Asegurar una buena calidad de enlace y baja tasa de pérdida de paquete mejora la eficiencia de energía y/o gastos computacionales al evitar la retransmisión de paquetes.

4.4. Problemática a Abordar: Comportamiento Individual Router Robótico

Para que un modelo de aseguramiento de enlace mediante una colonia de robot móviles que presentan diferentes problemáticas a tratar para dar una solución completa. Los esfuerzos en el presente trabajo de título se centrarán en generar un modelo de Router Robótico. Este trabajo no contemplará las problemáticas: Comportamiento General y Densidad de Despliegue, el número de unidades óptimas por distancia, la vinculación dinámica de las unidades, administración de los link de comunicación entre otros.

Los link serán designados arbitrariamente enfatizando en el diseño de algoritmos de control que permitan a un Agente Autónomo (Router Robótico) ser capaz de modificar su ubicación espacial. Sus desplazamientos tienen la finalidad de dirigirse a una zona donde pueda cumplir sus funciones de enrutador de mejor forma. La Figura 4.5 representa un modelo a estudiar; una unidad Gangway estática señalada como Base , una unidad Target señalada como Explorador y tres Unidades Ganegay Robotic Router. Todas unidades homogéneas y están vinculadas mediante enlaces simple. El modelo de prueba final contempla tres unidades Gangway de manera de representar las diferentes posibilidades de interacciones en un sistema. Las interacciones a estudiar son en referencia al carácter de las unidades que estén vinculadas al Robotic Router, teniendo las siguientes posibilidades de vinculación expuestas en la Figura 4.5. ellas son tres: La primera GG_1 vinculado a una unidad estática y a un Router Robótico. La segunda es GG_2 vinculado a dos Router Robóticos. Y por último la tercera es GG_3 vinculado a una unidad de comportamiento aleatorio (explorador) y a un Router Robótico. Es posible tener un nodo robótico vinculado a una unidad Base y un Explorador. Caso no atractivo porque hace referencia a una red compuesta por tres unidades solamente(Base-Nodo Móvil-Explorador).

La forma de concebir la red por los Gangway es inspirada en la estrategia de Topología de Rasimo de Prashant P. Reddy and Manuela M. Veloso [41] donde cada nodo

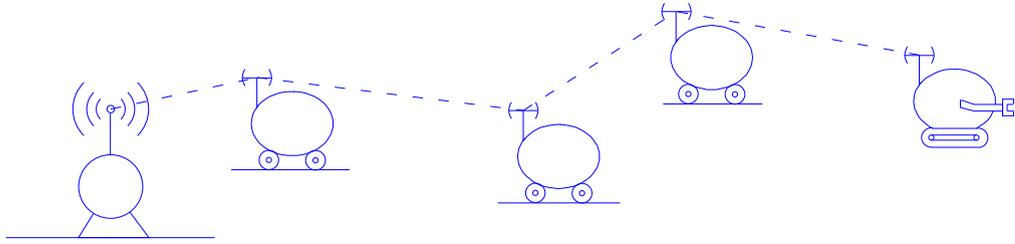


FIGURA 4.5: Modelo de general

tendrá dos vínculos llamados: vínculo superior y vínculo inferior (vínculos prioritarios). Las acciones que realice el Gangway (GG_n) están determinadas por las características que presenten sus vínculos superior e inferior. Sus acciones no son realizadas para mejorar la topología general de la red, solamente actúan en referencia a sus vínculos prioritarios. El nodo podría ser capaz de escuchar y ser escuchado por todas las unidades de la red y adquirir un panorama general de la red, pero para la toma de acciones de control tal información no la contemplará. En la Figura 4.5 para el nodo GG_2 están marcados los vínculos, siendo el vínculo superior V_s establecido con GG_3 y el inferior V_i . El modelo de topología de Racimo unido a una estrategia de control de aprendizaje por refuerzo Q-earning demuestra que es efectivo para problemas de Tethering particular en trabajo [41].

4.5. Dispositivos Empleados, Descripción del Entorno y Consideraciones

Lineamientos para una futura implementación y estudio en sistemas reales de interacción redes inalámbricas móviles, para mantener conectividad, por lo cual se describen los parámetros requeridos contemplados en los experimentos.

* Lineamientos del sistema (conceptual).

- Bajo nivel de complejidad del hardware.
- Facilidad de extrapolación de algoritmos a ambientes con obstáculos.
- Utilización de sistemas estándar de comunicación bandas ISM.
- Eficiencia energética.

A continuación se exponen exigencias planteadas al comienzo del trabajo.

*** Requerimientos Planteados para el sistema.**

- Trabajo en bandas ISM de 1 o 2.4 GHz canal único para el sistema
- Utilización de robots móviles homogéneos.
- Parámetro único para orientación y cuantificación del error utilización RSSI.
- Trabajo en espacio reducido.
- Implementar diferentes tipos de controladores para posicionamiento del error.
- Implementar y Contrastar controladores Heurísticas y de Aprendizaje.

Capítulo 5

Análisis y Propuesta de Solución, para la estrategia de navegación de un Router Robótico.

En este capítulo se analizarán los parámetros para el diseño de las estrategias de control para una unidad enrutadora autónoma Router Robótico. Lo primero fue seleccionar la métrica para cuantificar la calidad de un vínculo de radio frecuencia para un modelo basado en una colonia de micro robots con Módulos Digi XBee [6]. Para dicha labor se pueden contemplar las métricas de Paquet Loss, LQI y RSSI.

Es preciso analizar cada una de las métricas presentando las característica que motivan la decisión de usar una de ellas para juzgar calidad de enlace. La primera métrica, Paquet Loss, aplicada para evaluar la calidad de enlace en una red móvil (específicamente de este caso de estudio), no es recomendable, esto debido a que el PLR no corresponde a un valor inmediato. La pérdida de paquete es una métrica calculada en relación a un flujo de datos transmitidos por unidad de tiempo, no caracteriza una transmisión puntual e incorpora información de eventos pasados. En una red móvil de gran dinamismo (variaciones de posición), la utilización de Paquet Loss puede entregar información errónea al contemplar información de posiciones pasadas.

La segunda métrica LQI (indicador de calidad link de comunicación) es más adecuada para cuantificar la calidad en un vínculo de radio frecuencia. El valor de LQI representa una transmisión puntual, característica que la hace favorable para una red móvil. Los modelos LQI-Distancia no contemplan parámetros de los dispositivos transceptores como potencia de transmisión y sensibilidad del receptor entre otros. Pensado en el desarrollo de una herramienta informática, es deseable poder modelar las métricas

a utilizar en función de la distancia contemplando los parámetros de los dispositivos reales.

La tercera métrica RSSI corresponde a una métrica instantánea de potencia de la señal, de la cual se encuentran variados modelos en la literatura. Los modelos que relacionan el RSSI y la distancia incorporan parámetros de los dispositivos. El RSSI no mide calidad de enlace. Este es utilizado buscando una relación con la que en principio, a mayor valor de RSSI mejor será el enlace de datos y viceversa. Este razonamiento se encuentra presente en diversos trabajos. [43] y [57], donde al igual que en el presente trabajo, la métrica para orientar los Agentes Móviles Autónomos es el RSSI.

Los valores de LQI y RSSI presentan correlaciones expuestas en el trabajo [33], donde el método de filtrado de una señal contempla los parámetros de ambos valores. En este trabajo cuando los valores de RSSI no son concluyentes, es utilizado el LQI para procesar de mejor forma la señal. Las métricas LQI, RSSI y la pérdida de paquete son mermados al aumentar la distancia, relación lógica que a mayor distancia de la fuente emisora la calidad de enlace disminuye, causando pérdidas de paquetes y retransmisiones.

5.1. Posición Óptima

Es preciso caracterizar la coordenada ideal o Punto Óptimo (PO), donde el Router Robótico deberá dirigirse. Para el modelo de red presentado en este trabajo, donde cada miembro posee el mismo hardware que comparten; área de cobertura, tasa de trasmisión, tipo de antena, entre otros factores, el PO planteado a continuación es válido para cada miembro de la red.

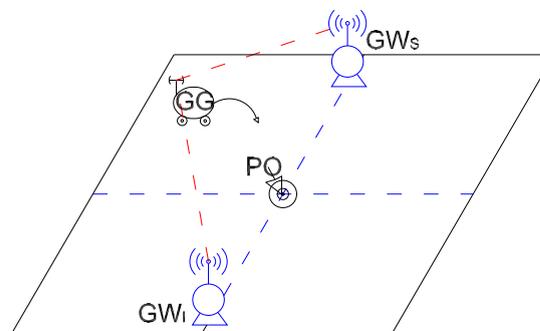


FIGURA 5.1: Red Compuesta por dos unidades estáticas GW y una unidad móvil GG .

El Punto Óptimo para el modelo de red planteado, que es una red homogénea y de enlace simple se define como el punto medio formado por la recta entre los vínculos prioritarios, inferior y superior. El PO corresponde a una coordenada donde los valores

de RSSI de ambos vínculos son iguales y máximos; es la coordenada ideal al asumir que a mayor valor de RSSI mejor es la calidad de enlace. Al posicionar al Router Robótico en PO, este puede llevar a cabo de forma óptima (o de la mejor forma posible) su tarea de enrutar paquetes de datos.

La Figura 5.1 expone una red formada por tres terminales siendo ellos; un Router Robótico (GG) vinculado a dos nodos estáticos (GW_S , vínculo superior, y GW_I , vínculo inferior). Se identifica el PO en la recta segmentada de color azul entre los terminales estáticos.

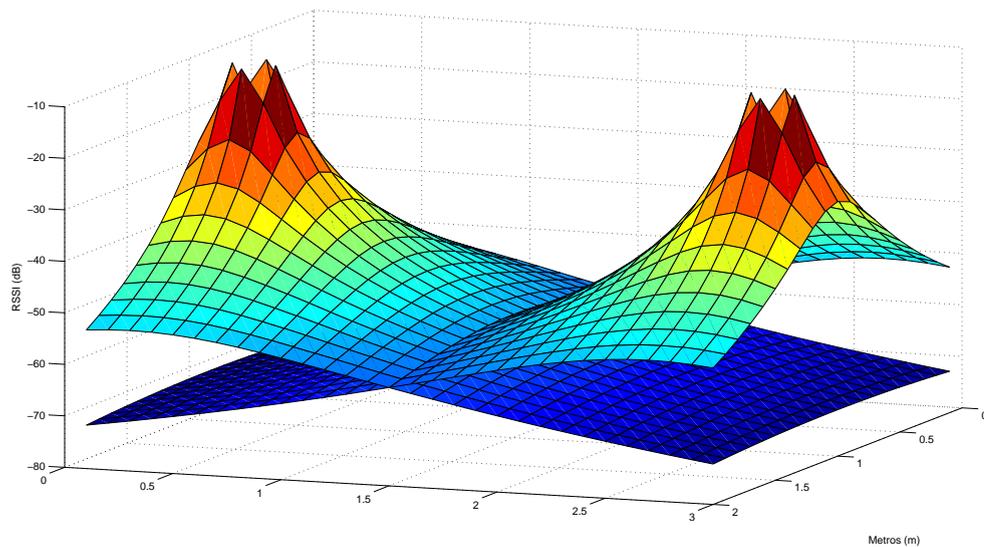


FIGURA 5.2: Proyecciones de RSSI de unidades GW

5.2. Indicadores para Navegación

La tarea de posicionar Router Robótico en PO es fácil de entender. Teniendo como único parámetro de orientación el RSSI extraído de las tramas recepcionadas (simulado en este trabajo), es preciso enriquecer la información para una mayor precisión en las acciones. Las preguntas a responder son: ¿Cómo será posible juzgar si el lugar actual es mejor o peor en referencia a las ubicaciones pasadas? y ¿En que dirección el Router Robótico se debe desplazar para mejorar la calidad de enlace actual?.

La primera información obtenida corresponde de las proyecciones de RSSI expuestas en la Figura 5.2. La figura expresa el RSSI en función de la distancia, capturada por la unidad GG si recorriera toda el área tomando muestras (Figura 5.1), los valores máximos de la Figura 5.2 corresponden a las unidades GW_S y GW_I .

5.2.1. Indicadores de orientación

Los valores de RSSI capturados, por si solos, no entregan información detallada de la posición actual. Además, los valores que representan a PO poseen las características de ser máximos e iguales, pero el valor de RSSI es desconocido. Se desarrollaron relaciones algebraicas de los valores RSSI para obtener los indicadores de orientación, mediante la relación entre ellos y sus valores pasados. La función de los indicadores de orientación es guiar al Router Robótico en la navegación hacia la cercanías de PO. Los indicadores de orientación que se desarrollaron y analizaron son los siguientes: Diferencia de RSSI, Dif_n , Módulo de la diferencia de RSSI, Dif_a , Diferencia digital de RSSI, Dif_d , y Suma de RSSI, Sum_n . Se exponen y analizan a continuación.

Diferencia De valores de RSSI, Dif_n , Dif_a Dif_b

El Punto Óptimo es caracterizado por tener diferencia nula (valores iguales). La Figura 5.3 representa la diferencia de potencias RSSI de los vínculos prioritarios calculado mediante la Ecuación 5.1, donde los valores máximos y mínimos representan las unidades GW , todo lo anterior en función de la Figura 5.2. En la Figura 5.3 no es posible apreciar de manera clara la o las coordenadas que presentan diferencia nula.

$$Dif_n = RSSI_{VS} - RSSI_{VI} \quad (5.1)$$

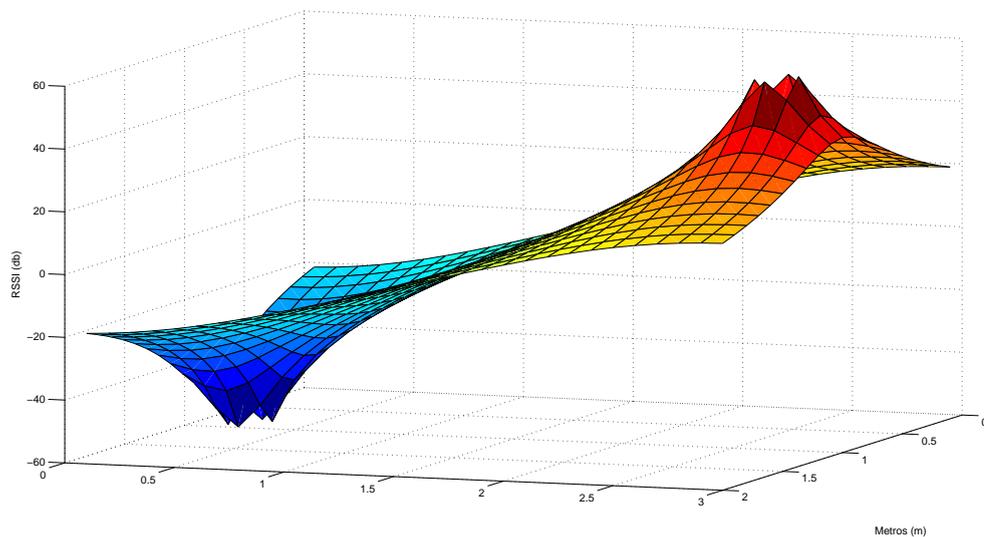


FIGURA 5.3: Diferencia de RSSI Dif_n

Con el fin de generar una mejor visualización de las coordenadas que presentan diferencia nula, se diseña el indicador Módulo de la diferencia Dif_a . Este indicador de orientación es calculado mediante la Ecuación 5.2, que presenta sólo valores positivos expuesta en la Figura 5.4. Los valores máximos de la figura representan las unidades GW .

Es posible apreciar que las coordenadas de diferencia nula forman una recta. En la coordenada 1.5 metros en el eje de abscisa (punto medio entre los terminales GW), es infinita en el eje de ordenada. El Punto Óptimo pertenece a la recta de diferencia nula. La recta de diferencia nula es una recta perpendicular al tramo formada por las unidades GW , siendo su centro el PO, apreciable en la Figura 5.1.

$$Dif_a = |RSSI_{VS} - RSSI_{VI}| \quad (5.2)$$

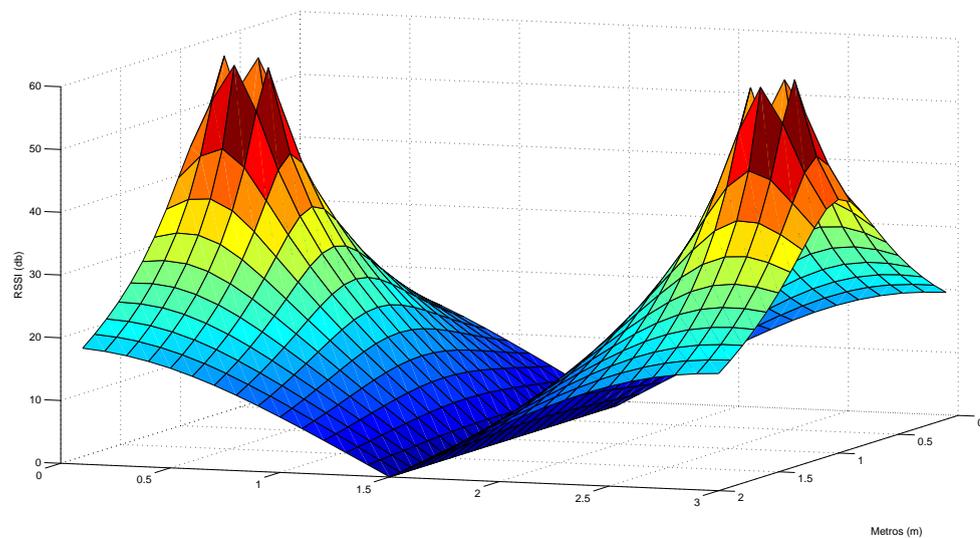
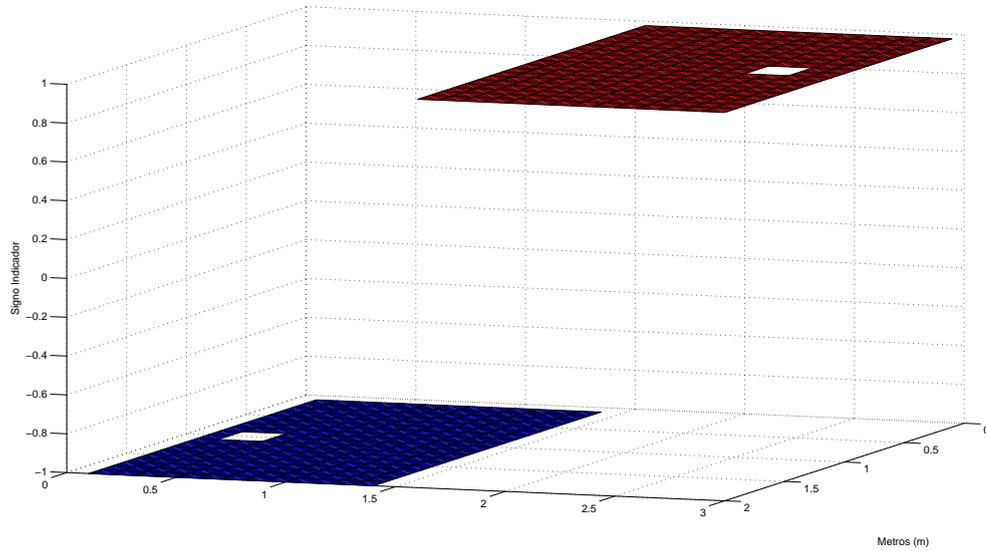


FIGURA 5.4: Módulo de la diferencia de RSSI Dif_a

Una información útil para orientar a la unidad Router Robótico, es identificar cual nodo se encuentra más cercano. Esto puede ser deducido mediante la Ecuación 5.3, que entrega valores discretos; -1 si se encuentra más cercano del vínculo inferior y $+1$ si se encuentre más cercano del vínculo superior. La Figura 5.5 expone la gráfica de la Ecuación 5.3, en esta figura los cuadrados en blanco corresponden a las unidades GW . La gráfica presenta una discontinuidad en la recta de diferencia nula (en 1.5 metros en la abscisa).

$$Dif_d = \frac{Dif_n}{Dif_a} \quad (5.3)$$

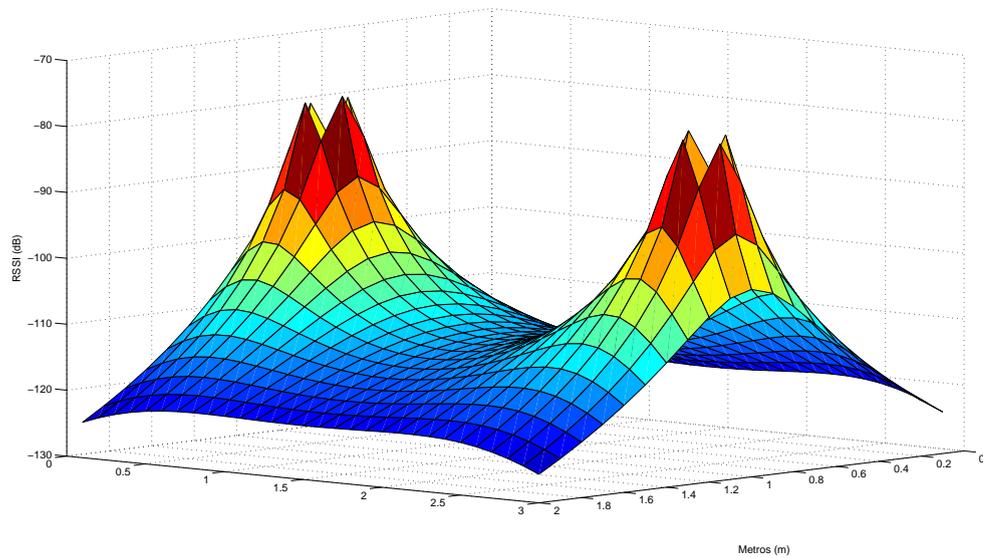
FIGURA 5.5: Diferencia digital Dif_d .

Suma de Valores de RSSI

Como se dijo, el PO es un punto en la recta de diferencia nula. Los indicadores de orientación, Dif_n , Dif_a y Dif_d entregan información útil para desplazarse a la cercanía de la recta de diferencia nula. Una vez estando en ella, los indicadores basados en la diferencia son incapaces de discernir si su ubicación en la recta es mejor o peor en función a la posición pasada.

$$Sum_n = RSSI_{VS} + RSSI_{VI} \quad (5.4)$$

El indicador de orientación Suma de RSSI Sum_n calculado mediante Ecuación 5.4 y expuesto en la Figura 5.6, en la que los valores máximos representan las unidades GW . El Punto Óptimo en relación a los indicadores Dif_a y Sum_n puede ser descrito como una coordenada que pertenece a la recta de diferencia nula y además, que la suma de RSSI es máxima. La Figura 5.6 en relación a PO es un punto de inflexión, pudiendo ser descrito como un máximo relativo en función de la recta de diferencia nula y un mínimo relativo en función de la recta formada entre los terminales GW .

FIGURA 5.6: Suma de RSSI Sum_n

5.3. Comportamiento del RSSI

Los valores de RSSI, son procesados obteniendo los cuatro indicadores. El paso a seguir es detectar el comportamiento de los indicadores que determinan una buena acción, para diseñar una estrategia de control que permita trasladar el GG desde cualquier coordenada a PO .

Para identificar el comportamiento de los indicadores ante diferentes desplazamientos, fue desarrollado el siguiente experimento. Para una red de tres unidades (Figura 5.1) se proponen siete recorridos: cuatro de ellos no incluyen a PO en su trayectoria, y tres de ellos pasan por PO . En la Figura 5.8 se expone un esquema detallado de los recorridos de este experimento, indicando con una X el comienzo y con la punta de flecha el término. Los movimientos M_a , M_b y M_c pasan por PO y, además, son simétricos a él.

Los movimientos M_1 , M_2 , M_3 y M_4 no pasan por PO . Los recorridos M_2 y M_3 cruzan la recta formada por los terminales GW siendo esta coordenada la más cercana a PO . Los recorridos M_1 y M_4 cruzan la recta de diferencia nula siendo esta coordenada la más cercana a PO . Las Rectas son representadas en la Figura 5.8 mediante; eje X recta de diferencia nula y eje Y recta formada por los terminales GW . Los desplazamientos indicados en la Figura 5.8 buscan encontrar las relaciones de RSSI que aproximen a PO . Para este propósito en cada recorrido son capturadas 20 muestras de RSSI, obteniendo los indicadores de orientación para ser analizados.

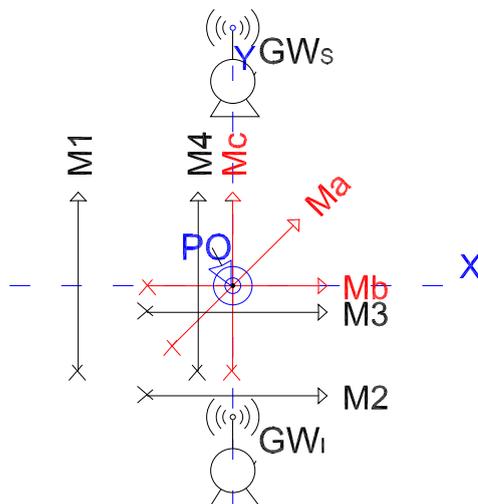


FIGURA 5.7: Recorridos experimentales

5.3.1. Indicadores de orientación de los recorridos experimentales

Para los recorridos experimentales se presenta la información más relevante, precisa y útil para diseñar estrategias de control para las unidades GG .

Para aquellos los movimientos que no pasan por PO los valores de RSSI e indicadores de orientación que corresponden a la coordenada más próxima a PO se aprecian en las gráficas al realizar un metro de captura de valores.

La Figura 5.8 expone los RSSI de los vínculos capturados en los recorridos que no pasan por PO. La Figura se divide en cuatro gráficas que exponen los RSSI de los vínculos prioritarios para los recorridos; Figura 5.8 (a) recorrido M_1 (a), Figura 5.8 (b) recorrido M_2 , Figura 5.8 recorrido M_3 y Figura 5.8 recorrido M_4 .

La Figura 5.9 expone la suma RSSI Sum_n , capturados en los recorridos que no pasan por PO. La Figura se divide en cuatro gráficas que exponen el indicador de orientación Sum_n de los recorridos; Figura 5.9 (a) recorrido M_1 (a), Figura 5.9 (b) recorrido M_2 , Figura 5.9 recorrido M_3 y Figura 5.9 recorrido M_4 .

La Figura 5.10 expone el módulo de la diferencia de RSSI Dif_a , capturados en los recorridos que no pasan por PO. La Figura se divide en cuatro gráficas que exponen el indicador de orientación Dif_a de los recorridos; Figura 5.10 (a) recorrido M_1 , Figura 5.10 (b) recorrido M_2 , Figura 5.10 recorrido M_3 y Figura 5.10 recorrido M_4 .

La Figura 5.11 expone de manera individual los parámetros obtenidos por el recorrido M_a . La Figura 5.11 expone cuatro gráficas: Figura 5.11 (a) RSSI de los vínculos Prioritarios $RSSI_{VI}$ y $RSSI_{VS}$, Figura 5.11 (b) módulo de la diferencia de RSSI Dif_a ,

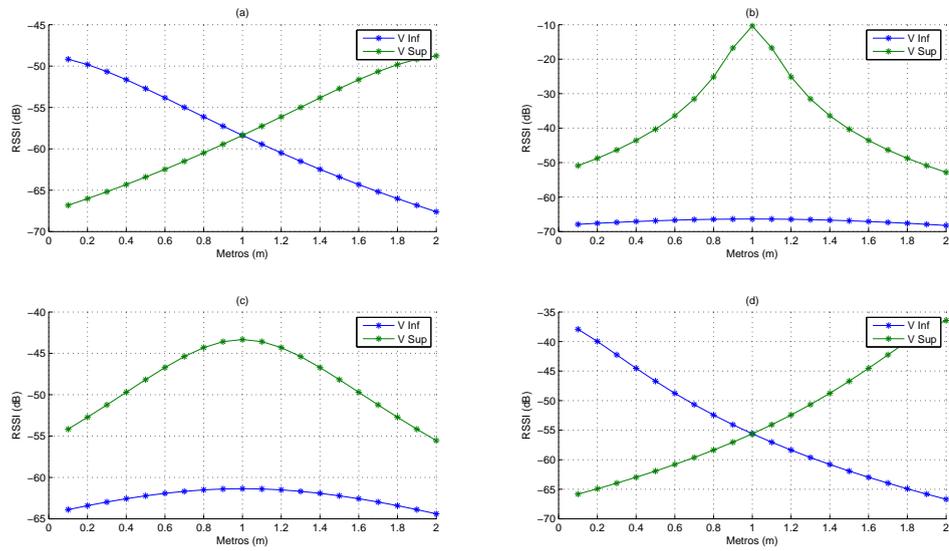


FIGURA 5.8: RSSI de de los vínculos para Recorridos experimentales que no pasan por PO : M_1 (a), M_2 (b), M_3 (c) y M_4 (d).

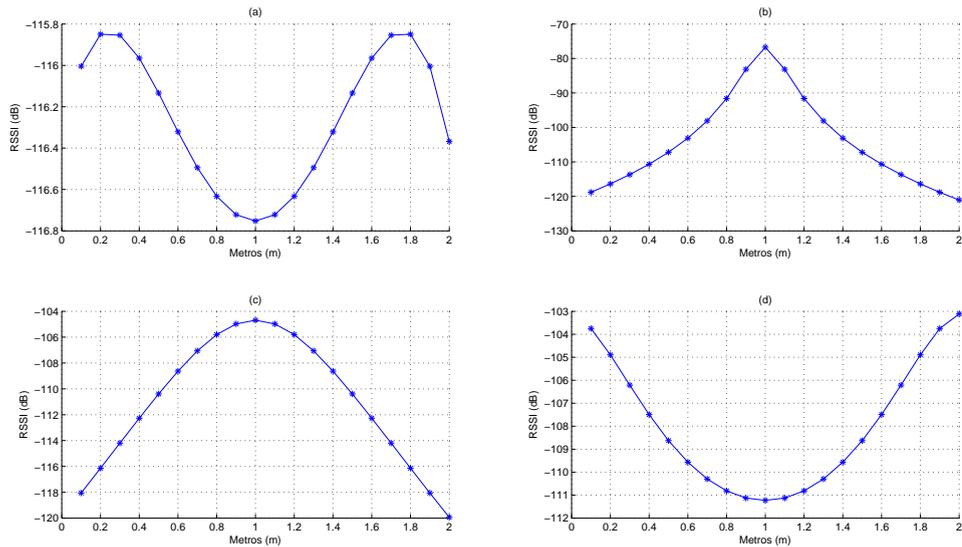


FIGURA 5.9: Suma de RSSI para de Recorridos experimentales que no pasan por PO: M_1 (a), M_2 (b), M_3 (c) y M_4 (d).

Figura 5.11 (c) diferencia digital Dif_b y Figura 5.11 (d) suma de RSSI Sum_n . Para la Figura 5.11 la distancia en la cual el desplazamiento M_a alcanza a PO es de 1.35 metros.

La Figura 5.12 expone los indicadores de orientación suma y módulo de la diferencia de RSSI, siendo estos los más relevantes para los recorridos M_b y M_c . La Figura 5.12 se divide en cuatro gráficas, dos por cada desplazamiento, las cuales son; Figura 5.12 (a)

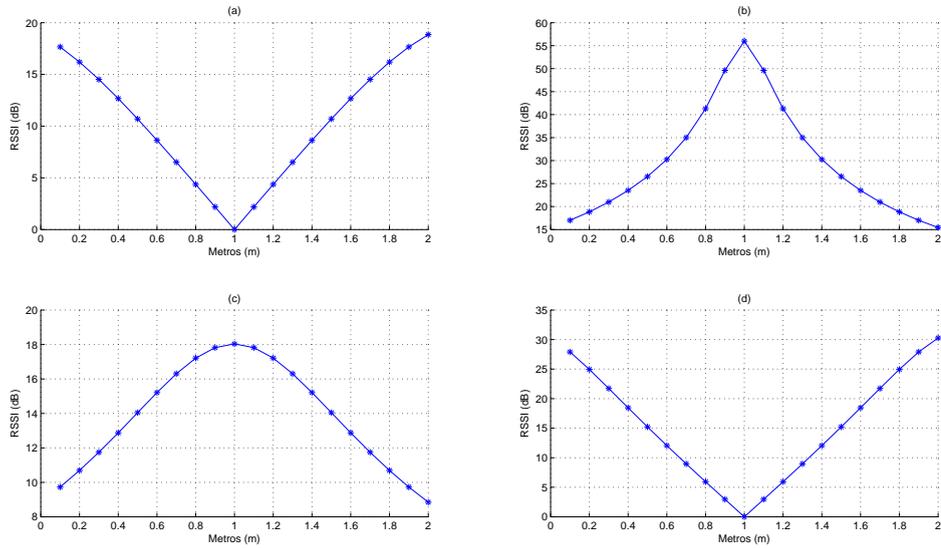


FIGURA 5.10: Módulo de la diferencia de RSSI para Recorridos experimentales que no pasan por PO: M_1 (a), M_2 (b), M_3 (c) y M_4 (d)

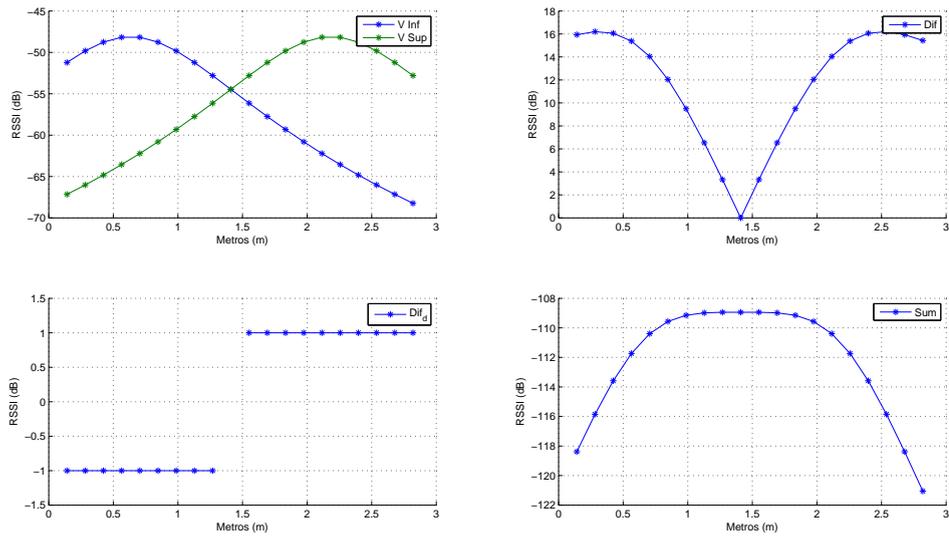


FIGURA 5.11: Resultados para Recorridos experimentales M_a ; $RSSI_{VI}$ y $RSSI_{VS}$ (a), Dif_a (b), Dif_b (c) y Sum_n (d).

suma de RSSI Sum_n para recorrido M_b , Figura 5.12 (b) diferencia de RSSI Dif_a para recorrido M_b , Figura 5.10 (c) suma de RSSI Sum_n para recorrido M_c y Figura 5.12 (d) diferencia de RSSI Dif_a para recorrido M_c .

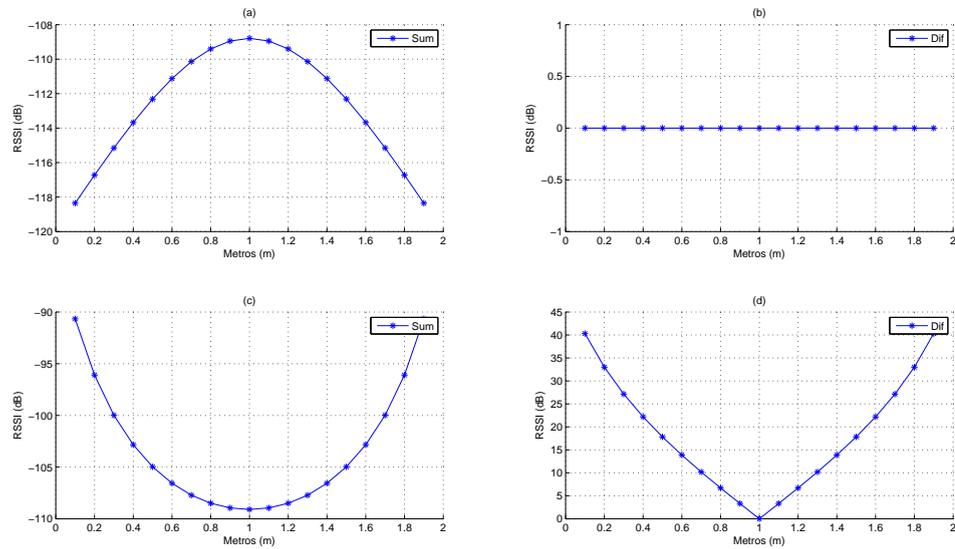


FIGURA 5.12: Indicadores de orientación para Recorridos experimentales M_b y M_c ; $Difa$ de M_b (a), Sum_n de M_b (b), $Difa$ de M_c (c), Sum_n de M_c (d).Modelo de estudio II

5.3.2. Conclusiones del Análisis de los Indicadores

Se realizaron los siguientes análisis: El primero de los análisis corresponde al realizado a los indicadores de orientación Sum_n y $Difa$ para los recorridos M_1 , M_2 , M_3 y M_4 , expuestos en las Figuras 5.9 y 5.10. Este análisis de las gráficas es en función de un metro, que corresponde a la coordenada más cercana a PO. Para Sum_n y $Difa$ los movimientos M_1 , M_2 , M_3 y M_4 presentan un mínimo relativo o un máximo relativo en función a un metro. Para los recorridos M_1 y M_4 la Sum_n (5.9 (a) y (d)) y $Difa$ Figuras 5.10 (a) y (d) representan un mínimo relativo. Para los recorridos M_2 y M_3 la Sum_n (Figuras 5.9 (b) y (c)) y $Difa$ (Figuras 5.10 (b) y (c)) representan un máximo relativo. De lo expuesto anteriormente no es posible concluir una tendencia clara de cómo acercarse a PO, ya que los movimientos M_1 y M_4 se acercan a PO minimizando los indicadores Sum_n y $Difa$, en cambio los recorridos M_2 y M_3 se acercan a PO maximizando los dos valores.

Los movimientos M_b y M_c son desplazamientos en la recta de diferencia nula (M_b) y en la recta formada por los terminales GW (M_c). Analizando las Figuras que representan la suma de RSSI en las rectas de interés (Figura 5.12 (a) Sum_n de M_b y Figura 5.12 (c) Sum_n de M_c), la suma de RSSI es un máximo en la recta de diferencia nula y un mínimo en la recta de unidades GW . El Punto Óptimo para el indicador de orientación Sum_n corresponde a un punto de inflexión en la Figura 5.6.

El recorrido analizado M_a corresponde a un movimiento ideal, porque se dirige de manera recta hacia PO, igualando los valores de los vínculos prioritarios (RSSI). El recorrido minimiza el módulo de la diferencia Dif_a y maximiza la suma Sum_n al acercarse a PO. El indicador de orientación Dif_d cambia de valor al alcanzar PO, indicando que pasa a estar más cerca del vínculo opuesto. El recorrido M_a a diferencia de los demás, no es un movimiento paralelo al marco de referencia, lo que lo convierte en un desplazamiento general, debido a que desplazamientos paralelos a los ejes de referencia no resulta fáciles de conseguir en sistemas reales y mucho menos en un despliegue dinámico. Utilizando a M_a como movimiento ejemplo se concluye en primera instancia que el Router Robótico debe maximizar Sum_n y minimizar Dif_a en sus desplazamientos para converger en las cercanías de PO.

5.4. Propuesta de un controlador basado en una Heurística Simple.

Para validar las observaciones sobre las tendencias de los indicadores de orientación que logren converger a un Router Robótico en las cercanías de PO, se propone una estrategia de control basada en una heurística simple que busque cumplir las observaciones concluidas anteriormente. La heurística debe ordenar la realización de acciones que maximicen Sum_n y minimicen Dif_a .

5.4.1. Heurística Simple.

La Heurística simple busca en primera instancia minimizar Dif_a y luego proceder a maximizar Sum_n . El Router Robótico puede realizar cuatro acciones (A_1 , A_2 , A_3 y A_4) expuesto en la Figura 5.13. La unidad GG tiene como base de conocimiento que el movimiento A_1 lo acerca al vínculo superior y el movimiento A_2 lo acerca al vínculo inferior. La unidad GG , en primera instancia, realiza desplazamientos de forma vertical, acciones A_1 o A_2 para posicionarse en la recta de diferencia nula. La acción a realizar es escogida en función del valor de Dif_b que indica que el vínculo se encuentra más cercano o lejano. Encontrar la recta de diferencia nula puede ser complejo por la exactitud requerida, por lo que se designa un valor arbitrario llamado "umbral", que permite ampliar de una recta a una zona en el plano el lugar a converger (Figura 5.13), mediante las acciones A_1 o A_2 .

Una vez que el indicador de orientación Dif_a es menor al valor umbral, la unidad GG cambia las acciones a realizar de A_1 ó A_2 a A_3 ó A_4 . Las acciones A_3 ó A_4 corresponden a desplazamientos horizontales al marco de referencia. Los desplazamientos

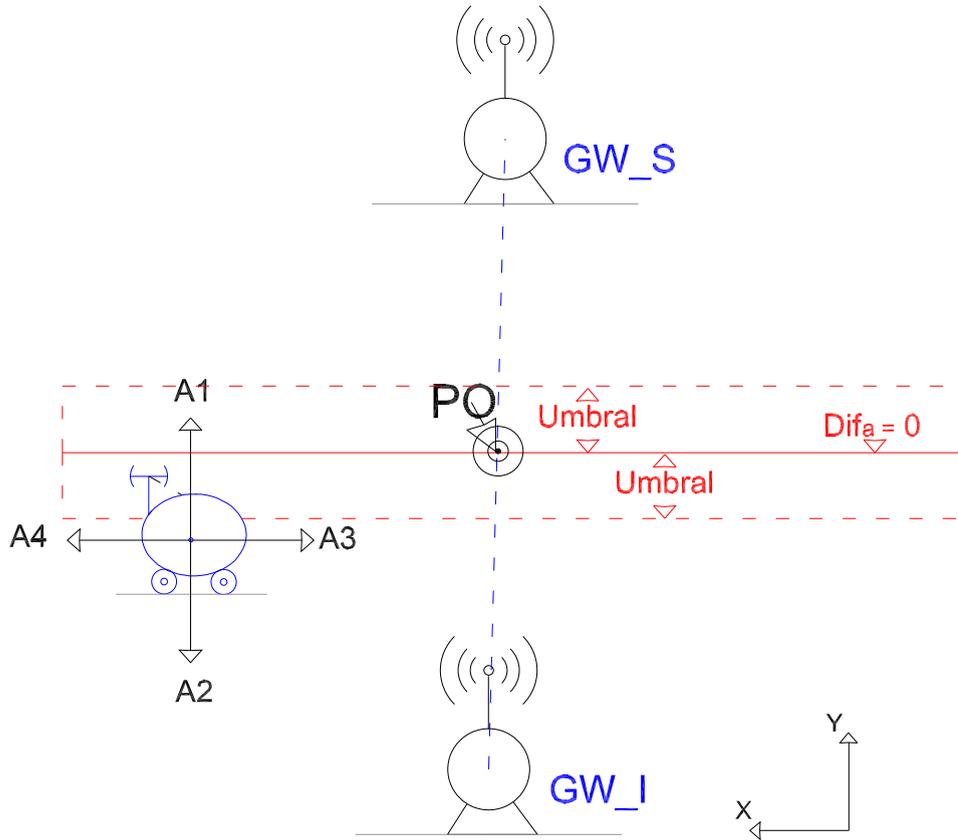


FIGURA 5.13: Modelo de simulación I. Modelo de estudio III.

horizontales tienen como objetivo maximizar el indicador de orientación Sum_n , acciones que esperan provocar la convergencia de la unidad GG en las cercanías de PO .

El planteamiento anterior es conceptualizado en la Heurística Simple de navegación expuesta en detalle en el Algoritmo 1. El Algoritmo 1 basa su funcionamiento en la comparación de valores actuales y de su pasado cercano (iteración anterior).

Parámetros de simulación

Para evaluar la Heurística simple, es preciso definir los siguientes parámetros: a) Número de iteraciones Nk , es el número de ejecuciones del Algoritmo 1. b) Vector de posición inicial V_{pi} , que representa las coordenadas iniciales de las unidades, de dimensiones 1×6 definido en la Expresión 5.5. c) Umbral, valor positivo que representa la tolerancia para acotar el área de diferencia nula, y d) Magnitud del desplazamiento de una acción $\Delta Paso$, medida en metros.

$$V_{pi} = | GW_I(px), GW_I(py), GG(px), GG(py), GW_S(px), GW_S(py) | \quad (5.5)$$

Algorithm 1 Heurística Simple de navegacion

 Inicializar valores, $K = 0$ y $Um = 0,5$
INICIO DEL ALGORITMO DE CONTROL→ **Captura de $RSSI_{(K)}$** **Calculo de:** Dif_A , Sum_n , Dif_A y Dif_A **if** $Dif_A > Um$ **then** **if** $Dif_d < 0$ **then** **return** Acción= A_1 **else** **return** Acción= A_2 **end if****else** **if** $K = 0$ **then** **return** Acción= A_4 **else** **if** $Sum_n(K) < Sum_n(K - 1)$ **then** **if** $A_n(K - 1) = A_3$ **then** **return** Acción= A_4 **else** **return** Acción= A_3 **end if** **end if** **end if****end if****FIN DEL ALGORITMO DE CONTROL**← **REALIZAR ACCIÓN**

Los valores de RSSI son obtenidos mediante el modelo Log-Distance Path Loss 3.5. Los coeficientes a utilizar en el modelo fueron: coeficiente de pérdida por trayectoria $\gamma = 1,75$, y potencia referida a un metro $PL(d) [dB] = -56(dB)$.

5.4.2. Desempeño de la Heurística Simple

La forma de evaluar la Heurística simple es mediante tres simulaciones en referencia a la Figura 5.7 en una red de tres unidades. Cada simulación del algoritmo 1 está representada en un cuadro y en una figura. El cuadro expone los parámetros utilizados en cada simulación. La figura representa los resultados de cada simulación. Cada figura se divide en cuatro gráficas: (a) desplazamiento del Nodo GG y posición de los nodos GW , siendo los primeros desplazamientos GG graficados de color azul. Luego varía la tonalidad de verde a amarillo representando los movimientos intermedios de la simulación. Los últimos movimientos realizados corresponden a una tonalidad roja que se intensifica hasta el término de la simulación. (b) RSSI de vínculos prioritarios, (c) módulo de la diferencia Dif_a y (d) Suma de RSSI Sum_n .

CUADRO 5.1: Parámetros para ejecución de la simulación 1.

Parámetros	Valores
Nk	: 45.
V_{pi}	: [0 3 1,2 2 3 3].
$\Delta Paso$: 0.1(m).
Modelo de RSSI	: Log-Distance Path Loss.
Umbral	: 1 dB.
Acciones	: $A_1 A_2 A_3$ y A_3 .

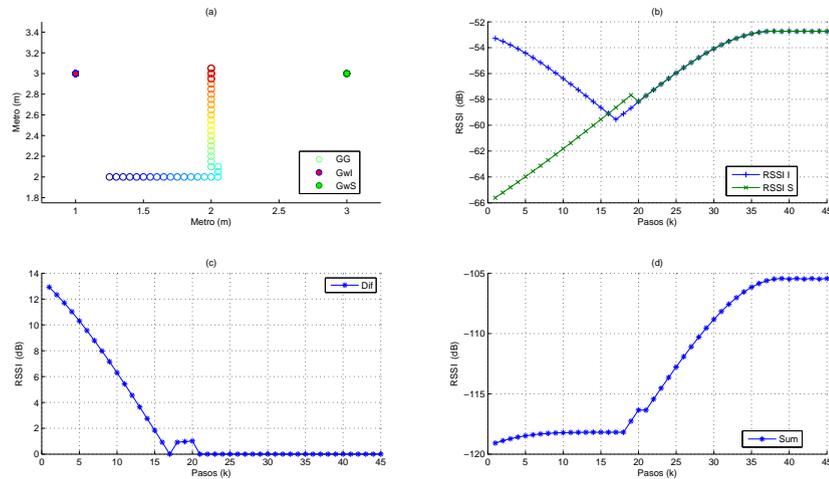


FIGURA 5.14: Resultado de Simulación 1: (a) Posición de GW_I , GW_S y GG , (b), RSSI de Vínculos, (c) Dif_a y (d) Sum_n .

La simulación 1 logra converger a la unidad GG en las cercanías del Punto Óptimo. La Figura 5.14 (a) representa el desplazamiento de la unidad GG en la simulación, donde se ejecutan en primera instancia acciones que aproximan a la unidad GG al vínculo superior, minimizando Dif_a . Posteriormente al alcanzar la zona de tolerancia apreciable en la Figura 5.14 (c) iteración 16, se procede a maximizar Sum_n , apreciable en la Figura 5.14 (d), donde después de 20 iteraciones los valores Sum_n comienzan a crecer hasta acentuarse en las cercanías de -106 dB. El Algoritmo 1 logra igualar los valores de RSSI en la simulación (Figura 5.14 (b)).

La simulación 2, del mismo modo que la anterior, logra converger a la unidad GG en las cercanías del Punto Óptimo. La Figura 5.15 (a) representa el desplazamiento de la unidad GG en la simulación, donde se ejecutan en primera instancia acciones que aproximan a la unidad GG al vínculo inferior, minimizando Dif_a . Posteriormente, al alcanzar la zona de tolerancia apreciable en la Figura 5.15 (c) iteración 34, hay un número mayor de iteraciones que la simulación 1. Se procede entonces a maximizar Sum_n apreciable en Figura 5.15 (d), donde una vez alcanzado la zona de tolerancia los

CUADRO 5.2: Parámetros para ejecución de la simulación 2.

Parámetros	Valores
Nk	: 50.
V_{pi}	: [0 3 3,7 3,6 4 3].
$\Delta Paso$: 0.1(m).
Modelo de RSSI	: Log-Distance Path Loss.
Umbral	: 1 dB.
Acciones	: $A_1 A_2 A_3$ y A_3 .

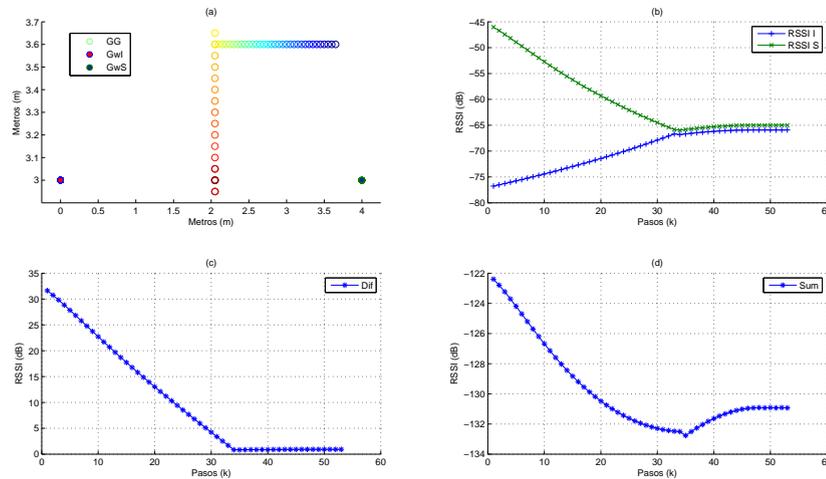


FIGURA 5.15: Resultado de la Simulación 2; (a) Posición de GW_I , GW_S y GG , (b), RSSI de Vínculos, (c) Dif_a y (d) Sum_n .

valores Sum_n comienzan a crecer paulatinamente hasta acentuarse en las cercanías de -131 dB. El Algoritmo 1 logra igualar los valores de RSSI en la simulación (Figura 5.14 (b)).

CUADRO 5.3: Parámetros para ejecución de la simulación 3.

Parámetros	Valores
Nk	: 50.
V_{pi}	: [0 3 1,8 3,6 4 3].
$\Delta Paso$: 0.1(m).
Modelo de RSSI	: Log-Distance Path Loss.
Umbral	: 1 dB.
Acciones	: $A_1 A_2 A_3$ y A_3 .

La simulación 3 logra converger a la unidad GG en las cercanías del Punto Óptimo. La Figura 5.16 (a) representa el desplazamiento de la unidad GG en la simulación, donde realizando cuatro acciones y logra llegar a la zona de tolerancia, apreciable en la Figura 5.16 (c). Posteriormente realiza acciones para maximizar Sum_n en busca de PO,

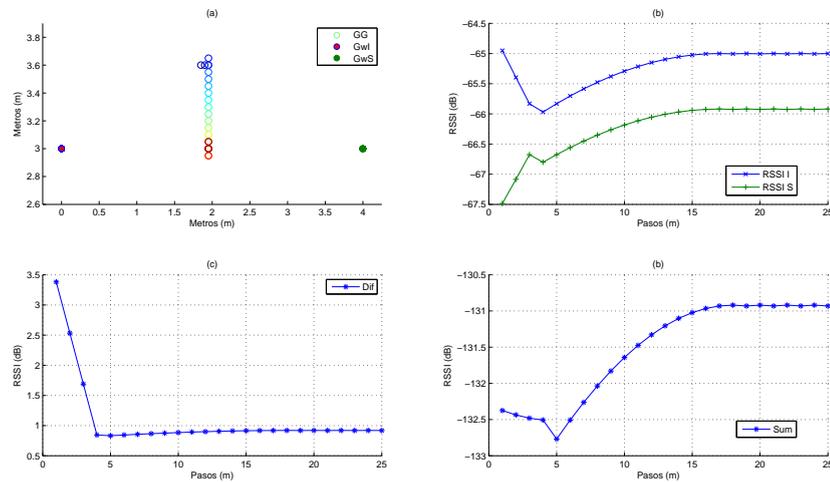


FIGURA 5.16: Resultado de la Simulación 3: (a) Posición de GW_I , GW_S y GG , (b), RSSI de Vínculos, (c) Dif_a y (d) Sum_n .

apreciable en la Figura 5.16 (d). En este caso, el Algoritmo 1 no logra igualar los valores de RSSI en la simulación expuesto la Figura 5.16 (b).

5.4.3. Análisis del Desempeño de la Heurística Simple

La estrategia de control Algoritmo 1 demuestra ser eficaz para aproximar GG a PO, expuesto en las simulaciones 1, 2 y 3. La Heurística Simple está diseñada para minimizar la diferencia y maximizar la suma en zona de tolerancia. La Heurística Simple cumple el objetivo para el cual fue diseñada para las simulaciones apreciables en las gráficas de Dif_a y Sum_n de cada simulación. El Punto Óptimo es descrito como una coordenada donde los RSSI son iguales y máximos. El algoritmo no logra igualar los valores de RSSI la Figura 5.16 (b) es claro ejemplo de esta situación, debido a la zona de tolerancia. Los RSSI no son igualados pero su diferencia no es mayor que el valor umbral.

Esta Heurística Simple (Algoritmo 1) obtiene resultados favorables al lograr posicionar al Router Robótico en una coordenada de menor separación de PO que la coordenada inicial. La principal debilidad del Algoritmo es que debe poseer una base de conocimiento explícito acerca de las acciones que son favorables para aproximarse a un determinado vínculo.

5.5. Análisis de los Indicadores de Orientación para un Modelo de RSSI con Perturbaciones.

Los análisis anteriores fueron realizados en un modelo RSSI-Distancia el que no contempla perturbaciones, utilizando el modelo Log-Distance Path Loss el cual es un modelo ideal sin presencia de ruido. Pensando en aplicaciones reales con presencia de perturbaciones, es necesario evaluar el comportamiento de los indicadores de orientación cuando las mediciones están afectadas por ruido. Un modelo que contempla ruido es el modelo Log-normal Shadowing, que incluye perturbaciones mediante una variable aleatoria gaussiana (Variable aleatoria que no presenta correlaciones con otros parámetros).

La Figura 5.17 expone dos gráficas que representan las proyecciones de RSSI de un nodo. La Figura 5.17 (a) representa el modelo con el cual se analizaron los indicadores de orientación. La Figura 5.17 (b) representa las mismas mediciones anteriores pero incluyendo perturbaciones.

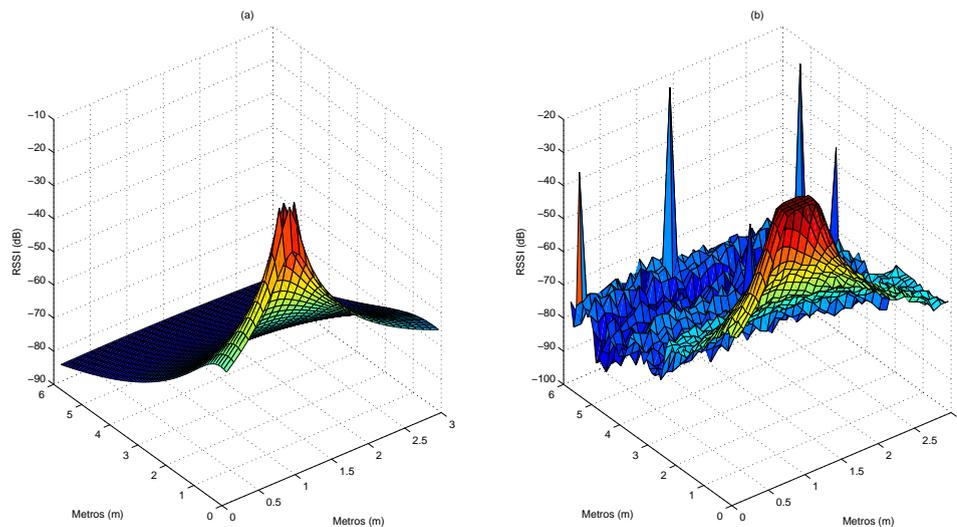


FIGURA 5.17: Modelos de intensidad de potencia recibida en función de la distancia: (a) Modelo sin perturbaciones y (b) Modelo con perturbaciones.

Al trabajar en sistemas reales de WSN's y realizar estudios de la relación entre RSSI y la distancia, se observa que la magnitud y frecuencia de perturbaciones aumenta con la distancia. Además, los valores de RSSI en sistemas reales son valores discretos (enteros). Los parámetros que caracterizan a los dispositivos de comunicación, no son contemplados en algunos modelos de RSSI-Distancia. Un parámetro no contemplado es el rango dinámico, que es el intervalo de potencia donde el sistema de comunicación es

capaz de reconstruir el mensaje (potencia máxima de entrada y sensibilidad en la unidad receptora).

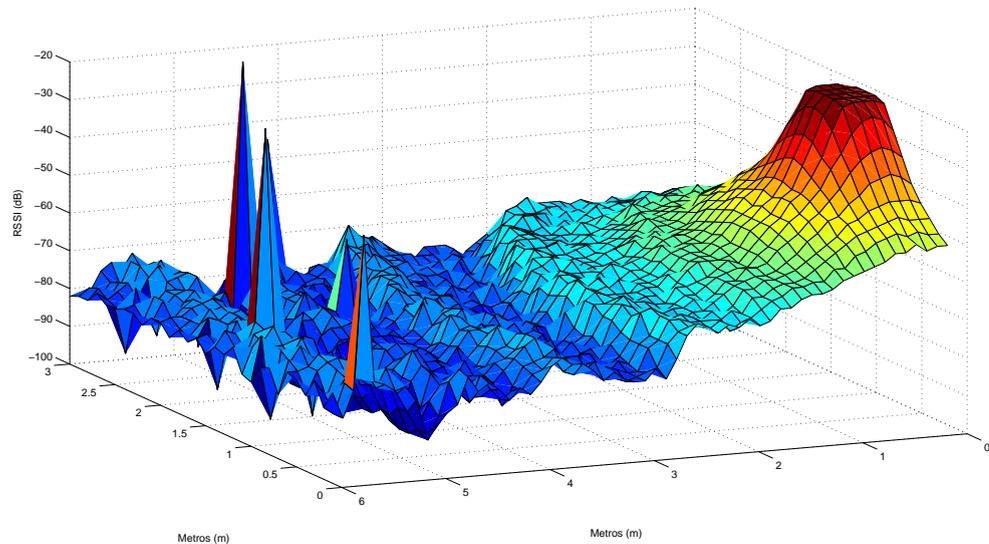


FIGURA 5.18: Relación RSSI-Distancia Log-TJP

Para obtener simulaciones más cercanas a los valores reales, se desarrolló un algoritmo para simular el RSSI en función de la distancia de un entorno específico de trabajo. El algoritmo es llamado Log-TJP, es un modelo que incluye perturbaciones dependiente de la distancia y que considera parámetros de los módulos de comunicación. La relación RSSI-Distancia Log-TJP es apreciable en la Figura 5.18. La relación RSSI-Distancia Log-TJP es obtenida mediante los coeficientes Log-Distance Path Loss de el entorno de trabajo. Los coeficientes son obtenidos mediante mínimos cuadrados de una gran cantidad de muestras de RSSI para distancias conocidas.

El modelo Log-TJP incorpora dos funciones que representan las perturbaciones, ruido aditivo; La primera función representa el error entre la media de los valores de RSSI capturados y el valor obtenido por el modelo Log-Distance Path Loss de una distancia específica. La segunda función, es una variable aleatoria gaussiana cuya desviación estándar (σ) depende de la distancia. La desviación estándar de la variable aleatoria gaussiana corresponde al σ calculado de las muestras para distancias conocidas. Ambos modelos de perturbaciones son representados por funciones continuas en la distancia.

En sistemas de comunicaciones los fenómenos de desvanecimiento o saturación de señal, pueden significar la pérdida de un paquete de datos. En el modelo Log-TJP se incluye ruido multiplicativo representando el fenómeno de desvanecimiento y saturación, obteniendo un modelo más realista. Este tipo particular de ruido multiplicativo es posible de simular designando valores extremos (mínimos y máximos) de RSSI. La incidencia

del ruido multiplicativo en el modelo Log-TJP es representado mediante la probabilidad de pérdida de paquete, la cual aumenta con la distancia.

El modelo Log-TJP entrega valores discretos, debido a que en sistemas reales, el RSSI es parte de la trama de recepción representando un Byte. Este modelo RSSI-Distancia entrega valores decimales.

El modelo fue elaborado según las muestras obtenidas en el laboratorio de electrónica básica, edificio Gantes de la Universidad del Bío Bío, durante el año 2012. Los métodos de obtención del modelo pueden ser revisado con detalle en el Anexo [1], donde se exponen las técnicas matemáticas y algoritmos para obtener los coeficientes y generar las funciones.

5.5.1. Discretización del área de cobertura según el RSSI.

La Figura 5.18 expone las proyecciones de RSSI de un nodo (GW) donde el valor máximo representa la unidad GW . Es posible observar la presencia de deformaciones en relación a las figuras obtenidas mediante el modelo Log-Distance Path Loss. Además, se observan valores picos en la zona lejana a la unidad GW .

La misma figura es segmentada en cuatro intervalos de RSSI, a cada intervalo se le asigna una cualidad que representa la calidad de la señal correspondiente a un valor de RSSI particular. Los intervalos de RSSI, zonas de calidad, se exponen en el Cuadro 5.4. La primera Zona (I): indica calidad de señal Buena, presenta un comportamiento monótono (donde incrementos en la distancia generan disminuciones en el RSSI). La segunda Zona (II) indica calidad de señal Aceptable, presenta un comportamiento no monótono, máximos y mínimos relativos en el intervalo. La tercera Zona (III) indica calidad de señal Mala, las perturbaciones se presentan con mayor intensidad. La cuarta Zona (IV) indica calidad de señal Inservible, área donde no es posible recuperar los paquetes de datos, debido a que el RSSI es menor a la sensibilidad del receptor.

CUADRO 5.4: Discretización del área de cobertura.

Discretización Cobertura		
Zona	Calidad	RSSI(dB)
I	Buena	> -65
II	Aceptable	$-66, -75$
III	Mala	$-76, -90$
IV	Inservible	< -91

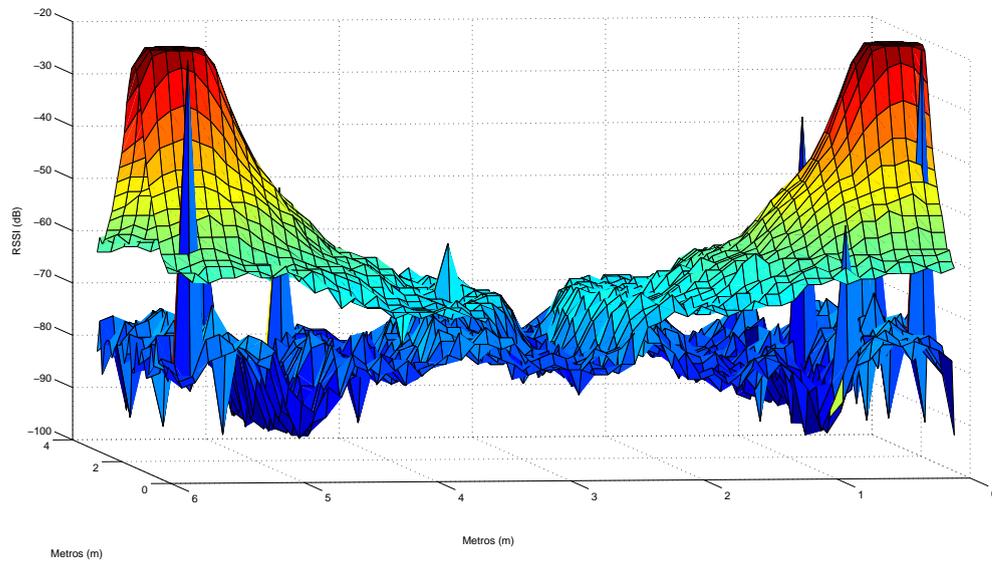


FIGURA 5.19: Proyecciones de RSSI de las unidades GW .

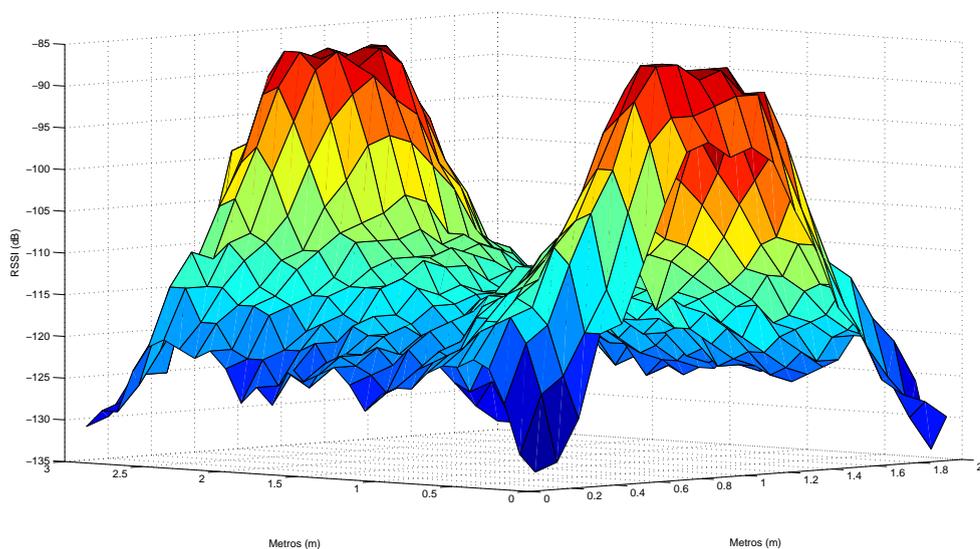
5.5.2. Posición Óptima en Modelo con Perturbaciones.

El Punto Óptimo es claramente visualizado utilizando un modelo sin perturbaciones siendo una coordenada única. La Figura 5.19 expone las proyecciones de RSSI en función del modelo de red compuesta por dos unidades estáticas GW y una unidad móvil GG , lo anterior expuesto en la Figura 5.1. PO corresponde a una coordenada donde los RSSI son iguales y máximos. Utilizando el modelo Log-TJP es posible que un conjunto de coordenadas o área, cumpla las condiciones que describen a PO, debido a las deformaciones en las gráficas provocadas por los procesos estocásticos que caracterizan a las perturbaciones.

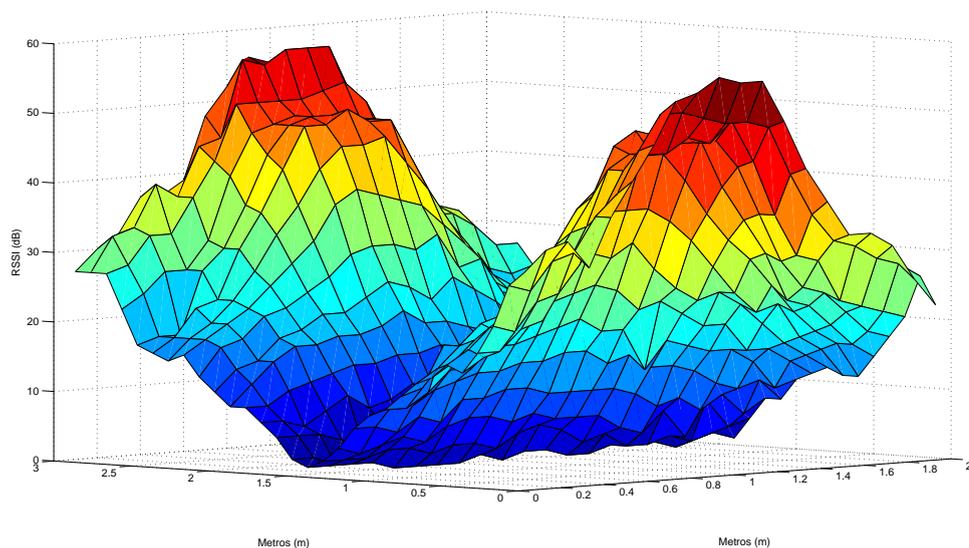
5.5.3. Indicadores de Tendencia y Orientación en un Modelo con perturbaciones.

Para el modelo con perturbaciones se realizó el mismo análisis expuesto anteriormente, obteniendo los indicadores de orientación utilizando el modelo Log-TJP. Los indicadores de orientación Dif_n y Dif_d no serán analizados, puesto que Dif_a representa la misma información de manera más clara que Dif_n y Dif_d indiferente a las perturbaciones sólo presenta dos valores.

Aplicando las Ecuaciones 5.2 y 5.4 a la Figura 5.19, se obtienen las Figuras 5.20, suma de RSSI, y la Figura 5.21, módulo de la diferencia de RSSI. Para ambas figuras los valores máximos representan las unidades GW en función de la red (Figura 5.1).

FIGURA 5.20: Indicador de orientación Sum_n . Modelo con perturbaciones

La Figura 5.20, que expone el indicador de orientación Sum_n con presencia de ruido, es similar en su forma a la Figura 5.6, que expone el mismo indicador pero en modelo sin ruido. La Figura 5.21, que expone el indicador de orientación Dif_a con presencia de ruido, es similar en su forma a la Figura 5.5, que expone el mismo indicador pero en modelo sin ruido. La semejanza se debe a que la separación entre los terminales GW es menor a 3 metros, de esta forma las unidades con respecto de las otras se encuentran en la Zona I de calidad de enlace.

FIGURA 5.21: Indicador de orientación Dif_a . Modelo con perturbaciones

Al modelo experimental utilizado en la Sección Comportamiento RSSI, se aumenta la separación de las unidades GW al doble. Al doblar la distancia entre los terminales GW , los valores de RSSI capturados pertenecerán a las Zonas I, II y III.

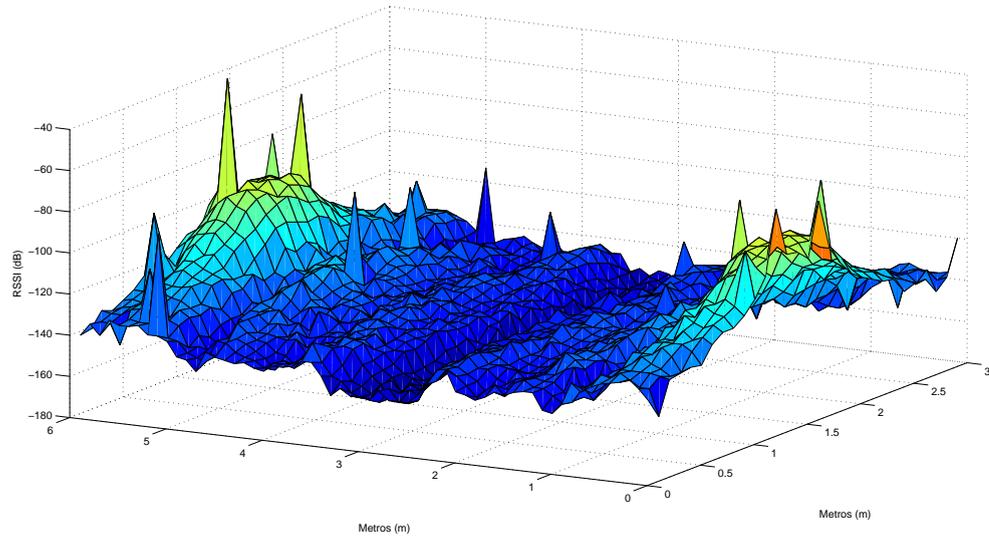


FIGURA 5.22: Indicador de orientación Sum_n , modelo con el doble de separación de las unidades GW . Modelo con perturbaciones

Aplicando las Ecuaciones 5.2 y 5.4 al modelo con el doble de separación entre terminales GW , se obtienen la Figura 5.22, suma de RSSI, y la Figura 5.23, módulo de la diferencia de RSSI. Para ambas figuras las áreas donde se encuentran los valores máximos representan las unidades GW .

La Figura 5.22 que expone el indicador de orientación Sum_n , muestra una deformación con respecto a la Figur 5.20. La Figura 5.23 que expone el indicador de orientación Dif_a presentøuna deformación con respecto a la Figura 5.21, además, difícilmente es apreciada la ubicación de la recta de diferencia nula.

La deformación de los indicadores de orientación Sum_n y Dif_a es debida a la presencia de ruido que es mayor en las Zonas II y III. Al utilizar el modelo Log-TJP se concluye que entre mayor distancia que separe a los vínculos prioritarios, se experimentará mayor deformación de los indicadores de orientación.

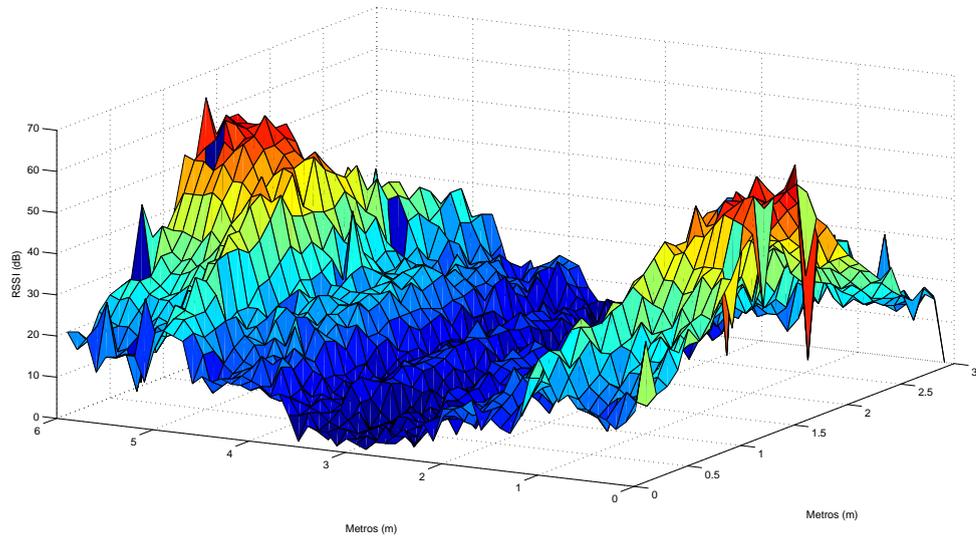


FIGURA 5.23: Indicador de orientación Dif_a , modelo con el doble de separación de las unidades GW . Modelo con perturbaciones.

5.6. Controlador basado en una Heurística Simple en Modelo con Perturbaciones

Para validar las observaciones sobre las tendencias de los indicadores de orientación que logren converger a un Router Robótico en las cercanías de PO, en un modelo con presencia de perturbaciones, se ejecutó la estrategia de control basada en una heurística simple descrita por el Algoritmo 1, que busca converger en las cercanías de PO. Realizando acciones para minimizar Dif_a y maximizan Sum_n .

5.6.1. Desempeño de la Heurística Simple en Modelo con Perturbaciones

La forma de evaluar la Heurística Simple en un modelo con presencia de perturbaciones y recorrido limitado a valores enteros (modelo Log-TJP), se realizó mediante dos simulaciones en referencia a la Figura 5.7, en una red de tres unidades para las simulaciones 4 y 5. Los resultados de cada simulación son representativos del comportamiento que presenta la estrategia de control ante cualquier V_{pi} .

Cada simulación de la estrategia de control esta representada en un cuadro y en dos figuras. El cuadro expone los parámetros de cada simulación. La primera figura representa los desplazamiento del Nodo GG y posición de los nodos GW , siendo los primeros desplazamientos GG graficados de color azul. Luego varia la tonalidad de verde

a amarillo representando los movimientos intermedios de la simulación. Los últimos movimientos realizados corresponden a una tonalidad roja que se intensifica hasta el término de la simulación. La segunda figura se divide en dos; (a) módulo de la diferencia, Dif_a , y (b) Suma de RSSI, Sum_n .

CUADRO 5.5: Parámetros para ejecución de simulación 4.

Parámetros	Valores
Nk	: 50.
V_{pi}	: [0 3 1,2 2 3 3].
$\Delta Paso$: 0.1(m).
Modelo de RSSI	: Log-Distance Path Loss.
Umbral	: 1 dB.
Acciones	: $A_1 A_2 A_3$ y A_3 .

Las simulaciones 4 y 5 son ejemplos representativos de más de 100 simulaciones efectuadas. Estas simulaciones son claros ejemplos de los problemas causados por la deformación de la superficie que representan los indicadores de orientación.

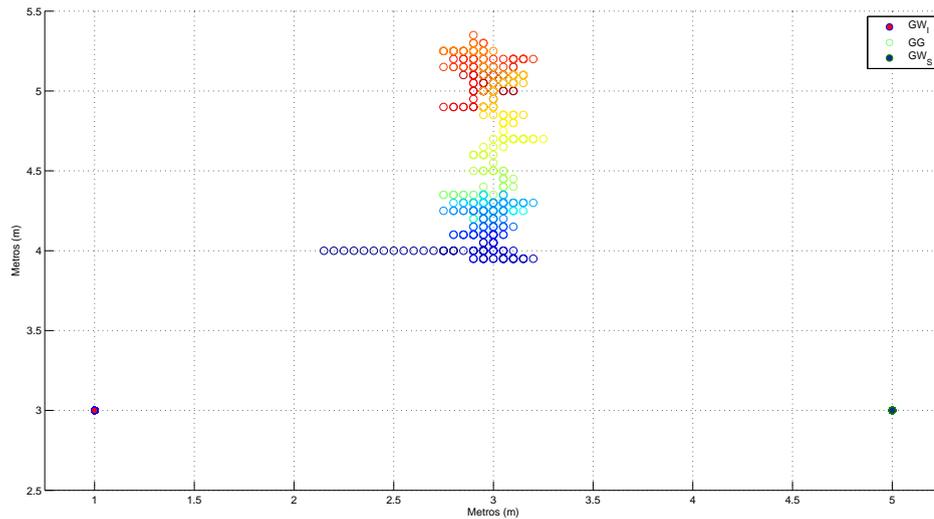


FIGURA 5.24: Resultado de Simulación 4: Posición de GW_I GW_S y GG .

Las simulaciones 4 y 5 parten desde la misma coordenada, observable en el parámetros de simulación V_{pi} , Cuadros 5.5 y 5.6. Los primeros desplazamientos de GG son efectuados para minimizar Dif_a , realizados hasta que el parámetro Dif_a sea menor a 1dB (umbral). Una vez posicionada en la zona de tolerancia GG busca desplazamientos que maximicen Sum_n .

La simulación 4 no logra converger a la unidad GG en las cercanías de PO. La divergencia del Router Robótico es apreciado en la Figura 5.24, donde las primeras

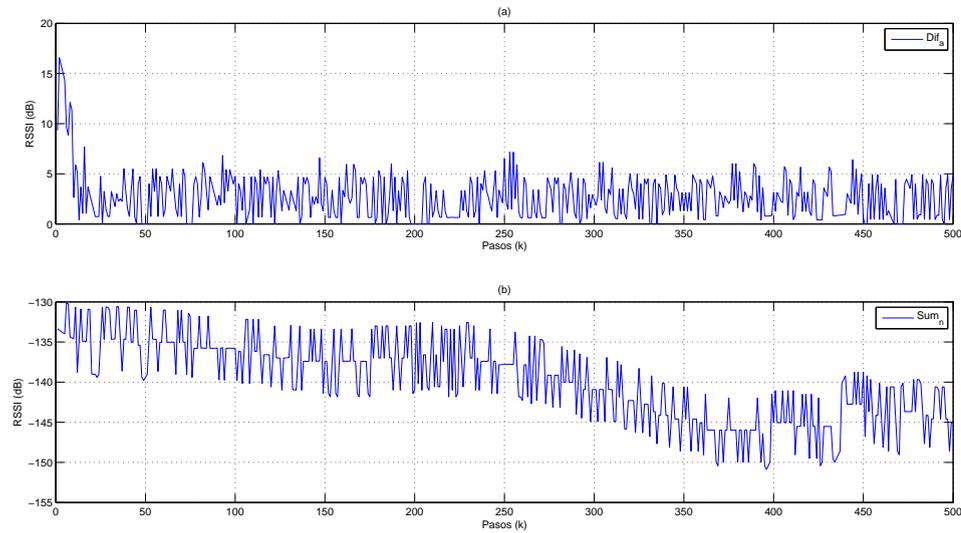


FIGURA 5.25: Resultado de Simulación 4: (a) Dif_a y (b) Sum_n .

posiciones (Figura 5.24, GG color azul) presentan una distancia menor hacia PO que las posiciones finales (Figura 5.24, GG color rojo). La unidad GG logra converger en la zona de tolerancia minimizando Dif_a después de ejecutar 12 iteraciones aproximadamente, expuesto en la Figura 5.25 (a). La unidad GG no logra converger desplazándose en dirección contraria de PO minimizando Sum_n , expuesto Figura 5.25 (b).

CUADRO 5.6: Parámetros para ejecución de simulación 5.

Parámetros	Valores
Nk	: 50.
V_{pi}	: [1 3 2,2 4 5 3].
$\Delta Paso$: 0.1(m).
Modelo de RSSI	: Log-Distance Path Loss.
Umbral	: 1 dB.
Acciones	: A_1 A_2 A_3 y A_3 .

La simulación 5 no logra converger a la unidad GG en las cercanías de PO, pero en primera instancia logra acercarse a PO. La divergencia del Router Robótico es apreciada en la Figura 5.26, donde se muestra que el GG se desplaza en dirección opuesta a PO. La unidad GG logra converger en la zona de tolerancia minimizando Dif_a después de ejecutar 20 iteraciones aproximadamente (Figura 5.27 (a)). La unidad GG no converge en PO, la gráfica de Sum_n (Figura 5.25 (b)) es maximizada y luego decrece, minimizando Sum_n .

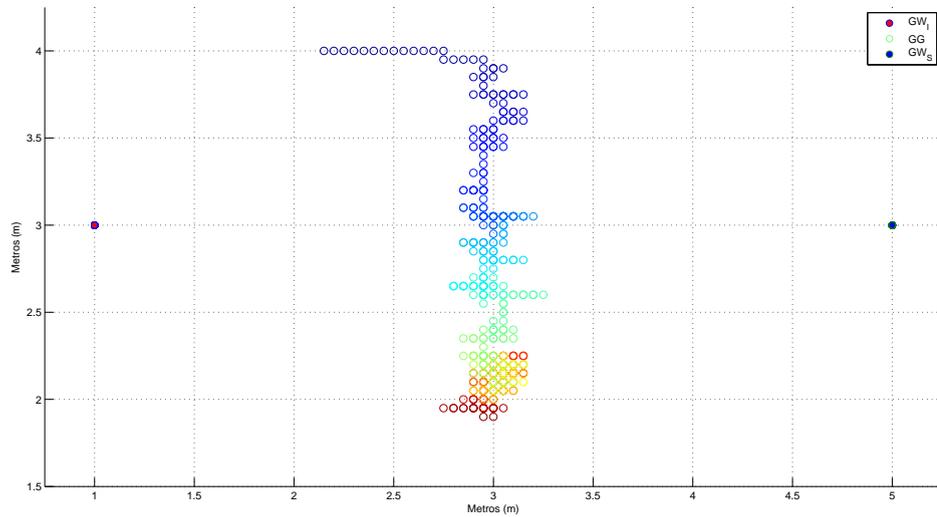


FIGURA 5.26: Resultado de Simulación 5: Posición de GW_I , GW_S y GG .

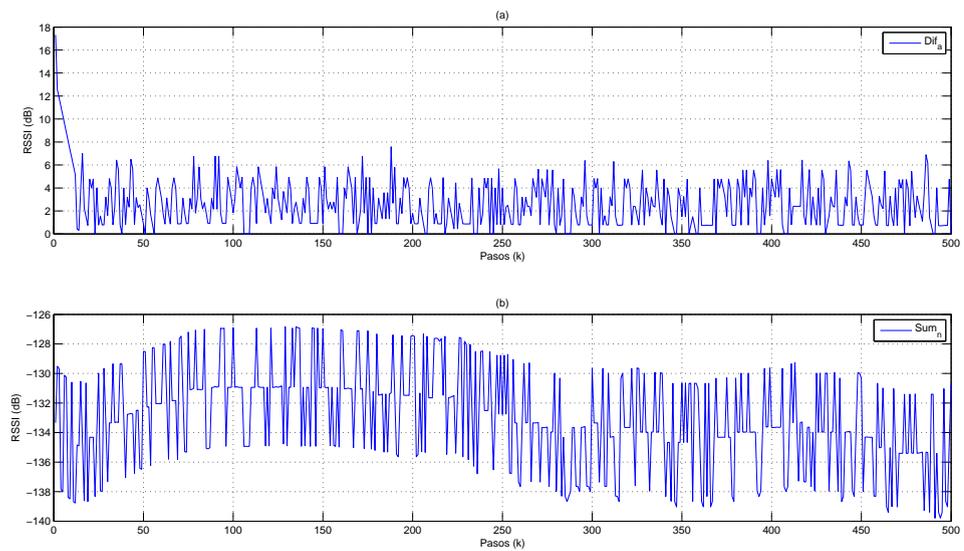


FIGURA 5.27: Resultado de Simulación 5 : (a) Dif_n y (b) Sum_n .

5.6.2. Conclusiones de las Simulaciones.

El Algoritmo 1, utilizando la relación RSSI-distancia Log-Distance Path Loss, logra converger a la GG cerca del Punto Óptimo, pero al utilizar la RSSI-distancia Log-TJP no logra la convergencia. La heurística simple logra posicionar al Router Robótico en la cercanías de la recta con diferencia nula (zona de tolerancia), en un modelo que incluye perturbaciones. El indicador encargado de aproximar a GG a la zona de tolerancia es

la diferencia digital Dif_d (Algoritmo 1), la cual es un valor discreto binario, lo que lo hace menos sensible a las perturbaciones.

El Router Robótico es incapaz de maximizar el indicador de orientación suma de RSSI una vez que se encuentra en la zona de tolerancia. La incapacidad de converger en PO al realizar movimientos horizontales en busca de maximizar Sum_n se puede explicar debido a que las acciones son determinadas en relación a los valores de Sum_n y de su pasado próximo. El algoritmo de control, al realizar la diferencia de valores de suma de RSSI ($Sum_n(k)$) y pasado ($Sum_n(k - 1)$) por causa de las perturbaciones, juzgadas erróneamente las acciones. Al no poder discernir cuáles son las acciones, aumentan los valores de Sum_n , no siendo posible converger en PO.

Capítulo 6

Desarrollo de Algoritmos de Control para un Router Robótico

El Algoritmo 1 requiere una base explícita de conocimiento. En aplicaciones donde ocurra un despliegue dinámico de unidades, no es factible tener un conocimiento de los movimientos que acerquen los Router Móviles a sus respectivos PO, por la aleatoriedad de las posiciones iniciales.

En un modelo de despliegue dinámico es preciso diseñar una estrategia de control para los Router Robóticos, que no presenten conocimiento previo que cumplan el objetivo de desplazarse a las cercanías del PO. Uno de los posibles modelos de controladores a utilizar en un Router Robótico son los modelos de Aprendizaje de Máquinas, estrategias de control factibles debido a que un Router Robótico debe converger en una coordenada donde los valores de RSSI sean máximos e iguales. El valor exacto de RSSI que caracteriza al PO es desconocido y depende de cada caso particular (distribución de unidades). La factibilidad de la utilización de estrategias de Aprendizaje de Máquinas es que ellas no requieren un modelo matemático preciso que calcule el error de los valores actuales en función del valor deseado, debido a que el valor deseado de RSSI es desconocido.

Las estrategias de Aprendizaje de Máquinas se clasifican basicamente en tres tipos: Aprendizaje Supervisado, Aprendizaje no Supervisado y Aprendizaje por refuerzo. Cada una de las estrategias entregan una estructura fácil de comprender y modificar: son Heurísticas parte de la literatura de Inteligencia Artificial y Control Automático.

El Aprendizaje por Refuerzo(AR), es una Heurística fundamentada en la toma de acciones de control según los refuerzos capturados en el entorno, con el fin de maximizar las recompensas acumuladas futuras. Un Algoritmo Aprendizaje por Refuerzo incorpora: Estados, Acciones, Política de bonificaciones y penalizaciones (Recompensas). En el caso

de estudio de Router Robótico las estructuras que conforman los modelos AR son de fácil asimilación y es posible relacionar los parámetros de las siguientes formas: las Acciones, los desplazamientos del Router Robótico, los Estados, relaciones algebraicas de intensidad de potencia recibida (RSSI) de sus vínculos prioritarios y la Recompensa. Esta última puede ser relacionada mediante la asignación de valores dependiente de los indicadores de Orientación.

6.1. Modelo Aprendizaje de Refuerzo para Router Robótico

Un Router Robótico (Gangeway *GG*) es un Agente Robótico Autónomo que varía su posición para brindar un mejor servicio de pasarela de datos. Para evaluar las estrategias de control es preciso diseñar y establecer una estructura de simulación. A continuación se formalizarán algunos parámetros expuestos en las simulaciones anteriores y otros parámetros nuevos que son parte de la plataforma informática programada en Ma Tlab. La plataforma de simulación diseñada para este trabajo esta compuesta por cuatro módulos independientes que a continuación se describen.

- **Módulo de Actualización:** Módulo que captura los RSSI y calcula los indicadores de tendencia para los vínculos prioritarios de cada unidad.
- **Módulo de Control:** Módulo que incorpora la estrategia de control, según el valor de los indicadores y registros internos del módulo de control. Designa la acción a realizar.
- **Módulo de Acción:** Módulo encargado de realizar el desplazamiento designado por el módulo de control. Durante la simulación del desplazamiento el módulo de acción se encarga de la toma de muestras para realizar el filtrado de la señal de RSSI, entregando al término de la ejecución de la acción, un valor RSSI ideal y un RSSI filtrado.
- **Módulo de Registro:** Módulo encargado de almacenar una trama de datos para cada Router Robótico en una matriz, donde cada fila representa una iteración (Paso).

Para efectuar una simulación se utilizarán parámetros establecidos mediante los análisis anteriores, los que se indican a continuación:

- **Iteración k :** Corresponde al número de iteraciones. Se define como iteración a un ciclo de ejecución de los cuatro módulos del simulador en orden: Actualización, Control, Acción y Registro.
- **Número de Pasos Nk :** Número de iteraciones realizadas en una simulación.

- **Paso $Paso_k$** : Desplazamiento realizado en una iteración.
- **Magnitud del paso $\Delta Paso$** : Magnitud de desplazamiento en un Paso.
- **Muestra por Paso $M \times P$** : Números muestras de RSSI tomadas en un $Paso_k$ para filtrar la señal.
- **Vector de posiciones iniciales V_{pi}** : Son las ubicaciones iniciales de las unidades de la red y corresponden a coordenadas cartesianas almacenadas en un vector de dimensiones $1 \times (N \cdot 2)$, siendo N número total de unidades del sistema.

6.1.1. Controlador Q-Learning

La estructura de un modelo de Aprendizaje por Refuerzo(AR) fue expuesta dentro del marco teórico. Una técnica de AR es el algoritmo Q-Learning Algoritmo 2, modelo que requiere definir cuatro parámetros: Acciones, Estados, Política de Recompensa y parámetros de aprendizaje. En el diseño de un Router Robótico los parámetros a designar en un algoritmo Q-Learning deben ser diseñados en función de Maximizar Sum_n y Minimizar Dif_a .

Algorithm 2 Q-Learning

INICIALIZAR $Q(s, a)$

REPETIR(Por cada episodio)

Inicializar S Repetir (por cada paso de episodio) Elegir a para s usando la política derivada de Q Realizar acción a , observar r, s'

$$Q(s, a) \leftarrow (1 - \alpha)Q(s, a) + \alpha[r(s, a) + \lambda \max_{A \in A_s} Q(s', A')]$$

$S \leftarrow S'$

Hasta que s llegue a la meta

Hasta el ultimo episodio

Acciones

Las acciones realizadas por el Router Robótico Autónomo, modificarán los valores de RSSI escuchados de los vínculos prioritarios al cambiar de ubicación al nodo. Los desplazamientos expuestos en la Figura 6.1, son desplazamientos rectos de magnitud $\Delta Paso$. Las acciones son: A_1, A_2, A_3 , y A_4 perpendiculares marco de referencia relativo del centro de masa de GG .

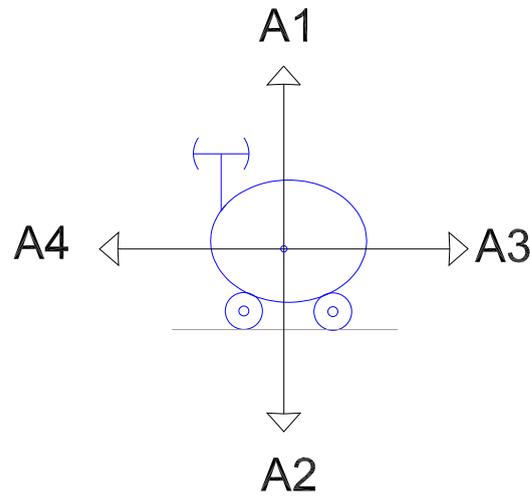


FIGURA 6.1: Acciones, Movimientos posibles.

Estados

El algoritmo Q-Learning está diseñado para espacios discretos. Se plantean estados en función de indicadores de orientación para el desarrollo de un Router Robótico que son valores continuos capturados de la salida del filtro.

Se plantean los siguientes Objetivos discretos y binarios en función de los análisis del capítulo anterior: El primer objetivo es maximizar la suma de los valores de RSSI de los vínculos prioritarios MAX_{Sum} , calculado mediante Ecuación 6.1. El segundo objetivo es minimizar el módulo de la diferencia de RSSI de los vínculos prioritarios Min_{Dif} , calculado según la Ecuación 6.2.

$$MAX_{Sum} = \begin{cases} 1 & \text{SI } Sum_n(k) - Sum_n(k-1) > 0 \\ 0 & \text{SI } Sum_n(k) - Sum_n(k-1) < 0 \end{cases} \quad (6.1)$$

$$Min_{Dif} = \begin{cases} 1 & \text{SI } Dif_a(k) - Dif_a(k-1) < 0 \\ 0 & \text{SI } Dif_a(k) - Dif_a(k-1) > 0 \end{cases} \quad (6.2)$$

Los dos objetivos binario, forman cuatro Estados (S). El Cuadro 6.1 representa los estados en función de los objetivos. El valor 1 significa objetivo cumplido.

Índices de Aprendizaje

En el Algoritmo Q-Learning se presentan los factores multiplicativos que dan ponderación a los valores de recompensa y los valores almacenados (aprendizaje). Estos

CUADRO 6.1: Estados, Controlador Q-Learning.

Estados	MIN_{Dif}	MAX_{Sum}
S_1	0	0
S_2	0	1
S_3	1	0
S_4	1	1

factores son: Rapidez de aprendizaje α , que define que tan sensible reaccionará el agente a las recompensas obtenidas y el factor de descuento que pondera las recompensas, la constante γ que es el .

Recompensa

La recompensa es un valor numérico que depende del par ordenado Estado-Acción ($S \times A$). Las acciones deben ser en pos de maximizar las recompensas futuras. Se debe maximizar la suma y minimizar la diferencia de RSSI. Una ecuación de recompensa simple es la expuesta en la Ecuación 6.3, que describe cómo calcular $R_{(S \times A)}$, la recompensa en función Estado-Acción. Los valores T_0 y T_1 son escogidos en función de la importancia que se quiera dar al cumplimiento de un objetivo.

$$R_{(S \times A)} = (T_0 \cdot MIN_{Dif}) + (T_1 \cdot MAX_{sum}) \quad (6.3)$$

6.2. Desempeño del Controlador Q-Learning

Los análisis anteriores de los indicadores de orientación que deberían lograr dirigir al Router Robótico a una coordenada cercana al PO se formalizan en una ecuación de recompensa 6.3. Se evaluó la estrategia de control Q-Learning con los Estados y Acciones planteando y utilizando valores T_0 y T_1 iguales. A continuación se exponen los parámetros para efectuar las simulaciones 6, 7, 8 y 9 en el cuadro 6.3.

En las simulaciones 6, 7, 8 y 9, se cuenta con una red de tres terminales: dos unidades GW (una superior y otra inferior) y una unidad Móvil GG (modelo en Figura 5.1). En Q-Learning por lo menos el primer movimiento debe ser aleatorio, para poder posicionar al Router Robótico en un par Estado-Acción ($S \times A$). Para evaluar si el primer movimiento condiciona el resultado final, se designa para cada simulación el primer movimiento de forma arbitraria. El orden de los movimientos iniciales es: A_1 es la simulación 6, A_2 es la simulación 7, A_3 es la simulación 8 y A_4 es la simulación 9.

CUADRO 6.2: Parámetros para ejecución de simulaciones 6, 7, 8 y 9

Parámetros	Valores
Nk	: 100.
V_{pi}	: $[0 \ 0 \ 2 \ 2 \ 6 \ 0]$.
V_{pi}	: 0.1(m).
Modelo de RSSI	: Log-TJP.
$M \times p$: 20.
Estados	: Cuadro 6.1.
Acciones	: $A_1 \ A_2 \ A_3$ y A_3 .
Recompensa	: Ecuación 6.3, $T_0 = 5$ y $T_1 = 5$.
Indice de aprendizaje	: $\gamma = 0,5$ y $\alpha = 0,5$.
Matriz Q inicial	: $Q_{(S \times A)} = 0$.

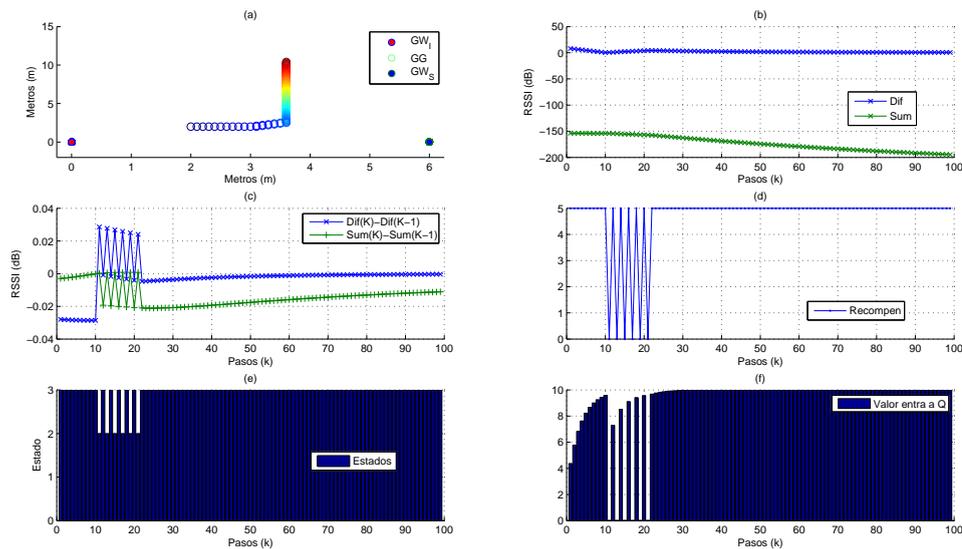


FIGURA 6.2: Simulación 6, Movimiento Inicial A_1 : (a) Posición de Nodos, (b) Indicadores de Tendencia, (c) Pendiente de Indicadores, (d) Recompensa $R_{(s \times a)}$, (e) Estado (S), (f) Valor Calculado $Q_{s \times a}$.

El comportamiento de los Router Robóticos es divergir, desplazando a la unidad GG a la Zona IV, lugar de calidad de señal inservible para ambos vínculos, sin importar el movimiento inicial. En las simulaciones fueron efectuadas más de 100 pruebas modificando los valores: T_0 , T_1 , γ y α , la modificación de parámetros no afectó los resultados, siendo todos ellos la divergencia de la unidad Móvil.

6.2.1. Modelo con Exploración Inicial

La estrategia Q-Learning entrega una plataforma de gran flexibilidad. Es posible la modificación de los índices de aprendizaje y además, plantea la posibilidad de realizar una

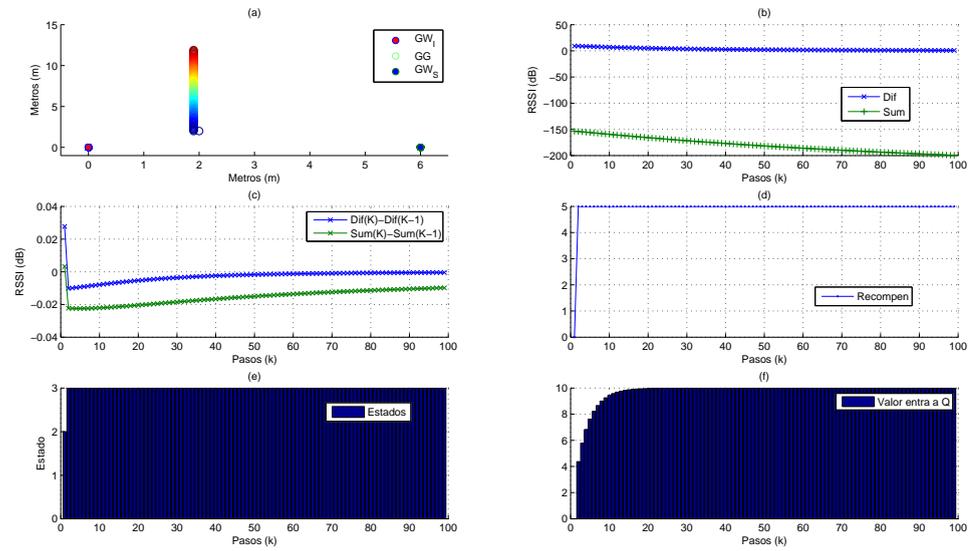


FIGURA 6.3: Simulación 7, Movimiento Inicial A_2 : (a) Posición de Nodos, (b) Indicadores de Tendencia, (c) Pendiente de Indicadores, (d) Recompensa $R_{(S \times A)}$, (e) Estado (S), (f) Valor $Q_{s \times a}$.

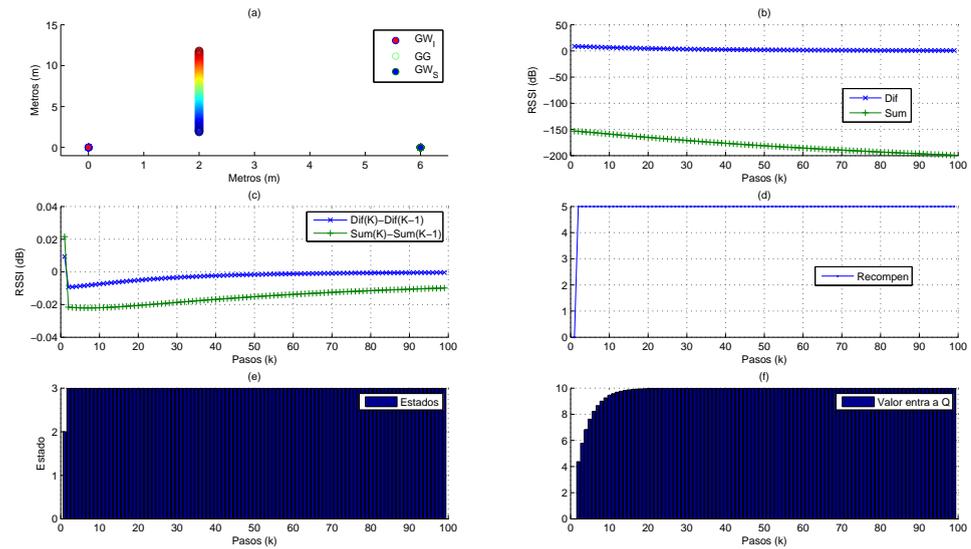


FIGURA 6.4: Simulación 8 Movimiento Inicial A_3 : (a) Posición de Nodos, (b) Indicadores de Tendencia, (c) Pendiente de Indicadores, (d) Recompensa $R_{(S \times A)}$, (e) Estado (S), (f) Valor $Q_{s \times a}$.

exploración. La exploración consiste en realizar movimientos obteniendo pares Estado-Acción ($S \times A$) y su respectiva recompensa, obteniendo una base de conocimiento.

La estrategia de exploración efectuada consiste en realizar movimientos aleatorios deambulando por la matriz de aprendizaje $Q_{s \times a}$ y modificando su contenido mediante

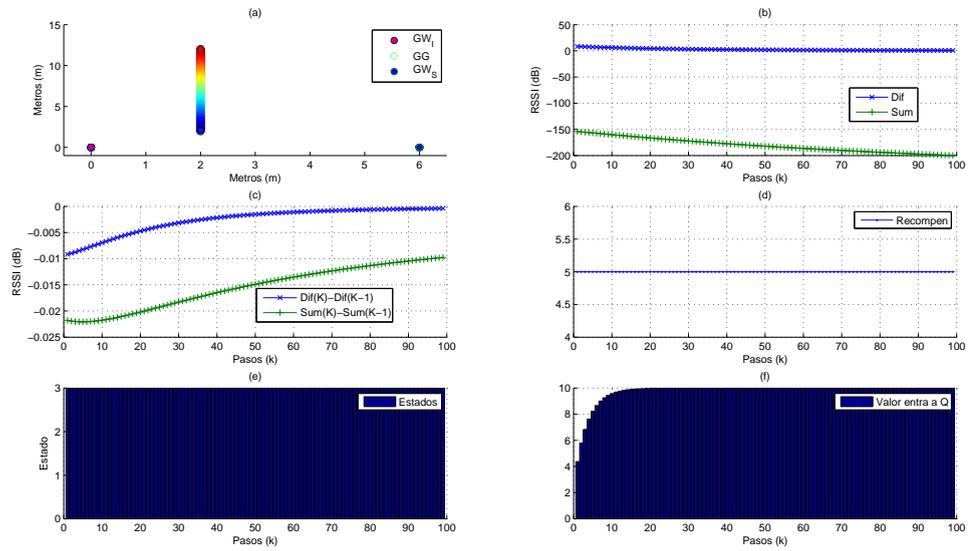


FIGURA 6.5: Simulación 9 Movimiento Inicial A_4 : (a) Posición de Nodos,(b)Indicadores de Tendencia, (c) Pendiente de Indicadores,(d) Recompensa $R_{(S \times A)}$, (e) Estado (S), (f) Valor $Q_{s \times a}$.

las recompensas obtenidas de la evaluación de Estado-Acción, generando una base de conocimiento.

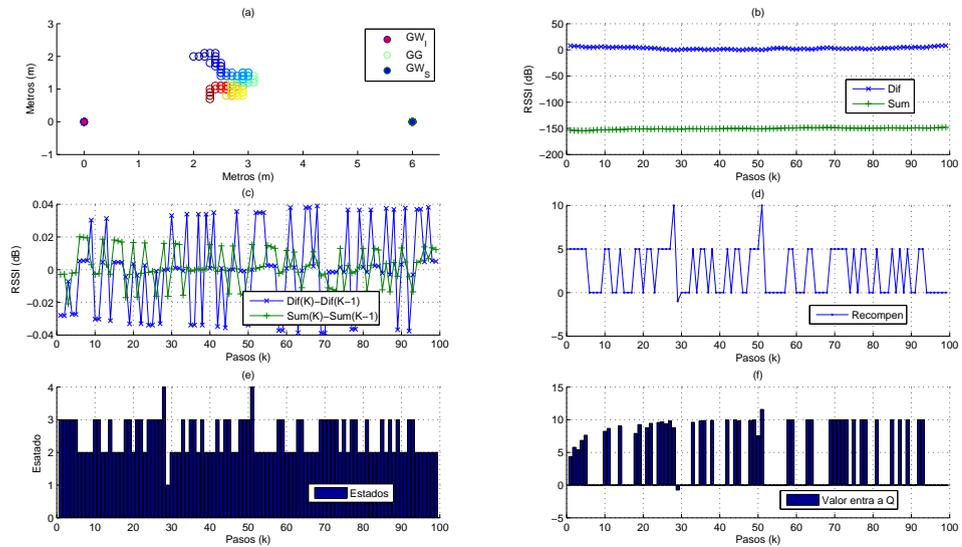


FIGURA 6.6: Resultados de un proceso de exploración: (a) Posición de Nodos,(b) Indicadores de Tendencia, (c) Pendiente de Indicadores,(d) Recompensa $R_{(s \times a)}$, (e) Estado (S), (f) Valor Calculado $Q_{s \times a}$.

Es importante que en el proceso de exploración el Router Robótico deambule por todos los Estados (S). De esta forma se tendrá información completa. La Figura 6.6

representa los valores de un proceso de exploración que consta de 100 Pasos. La cantidad de Pasos debe ser suficiente para permitir al Router Robótico deambular por todos los estados. En la figura 6.6 (e) se aprecia que el Router Robótico recorrió a lo menos una vez los cuatro estados.

6.2.2. Desempeño del Controlador Q-Learning con Exploración Inicial

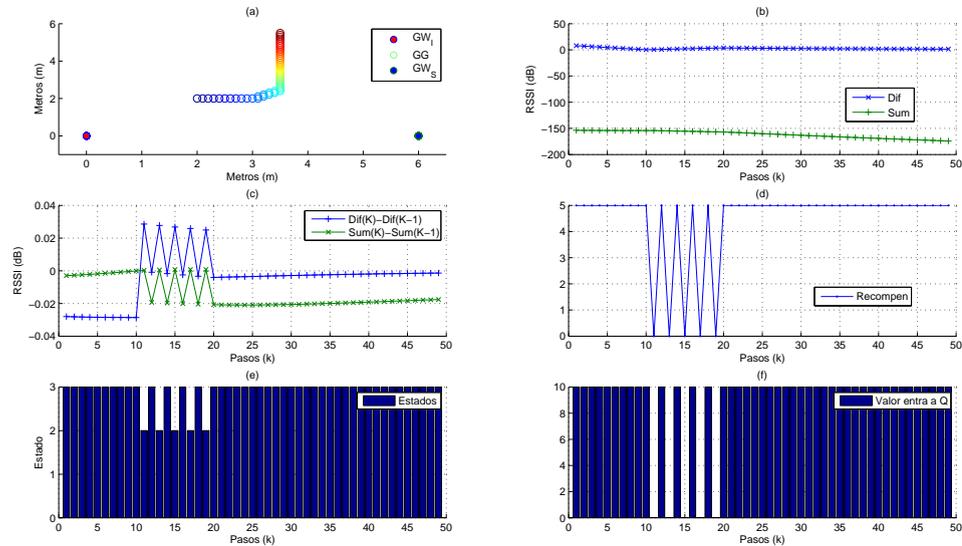


FIGURA 6.7: Simulación 10, Movimiento A_1 y Entrenamiento: (a) Posición de Nodos, (b) Indicadores de Tendencia, (c) Pendiente de Indicadores, (d) Recompensa $R_{(s \times a)}$, (e) Estado (S), (f) Valor Calculado $Q_{s \times a}$.

La estrategia de control Q-Learning planteada anteriormente, no logra converger el Router Robótico en las cercanías del PO. Con el propósito de obtener mejores resultados se desarrollará una estrategia que consiste primeramente en realizar una exploración de 100 desplazamientos obteniendo una matriz inicial para el algoritmo Q-Learning no nula. Luego aplicar el Algoritmo 2 con los Estados y Acciones Anteriores. El algoritmo es evaluado de la misma forma que el anterior, realizando cuatro simulaciones con el mismo V_{pi} . El orden de los movimientos iniciales es: A_1 la simulación 10, A_2 simulación 11, A_3 simulación 12 y A_4 simulación 13.

El comportamiento del controlador al incorporar una etapa de exploración inicial produce la divergencia a la unidad GG .

CUADRO 6.3: Parámetros para ejecución de simulaciones 10, 11, 12 y 13

Parámetros	Valores
Nk	: 100.
V_{pi}	: $[0 \ 0 \ 2 \ 2 \ 6 \ 0]$.
V_{pi}	: 0.1(m).
Modelo de RSSI	: Log-TJP.
$M \times p$: 20.
Estados	: Cuadro 6.1.
Acciones	: $A_1 \ A_2 \ A_3$ y A_3 .
Recompensa	: Ecuación 6.3, $T_0 = 5$ y $T_1 = 5$.
Indice de aprendizaje	: $\gamma = 0,5$ y $\alpha = 0,5$.
Matriz Q inicial	: $Q_{(S \times A)} \neq 0$, exploración.

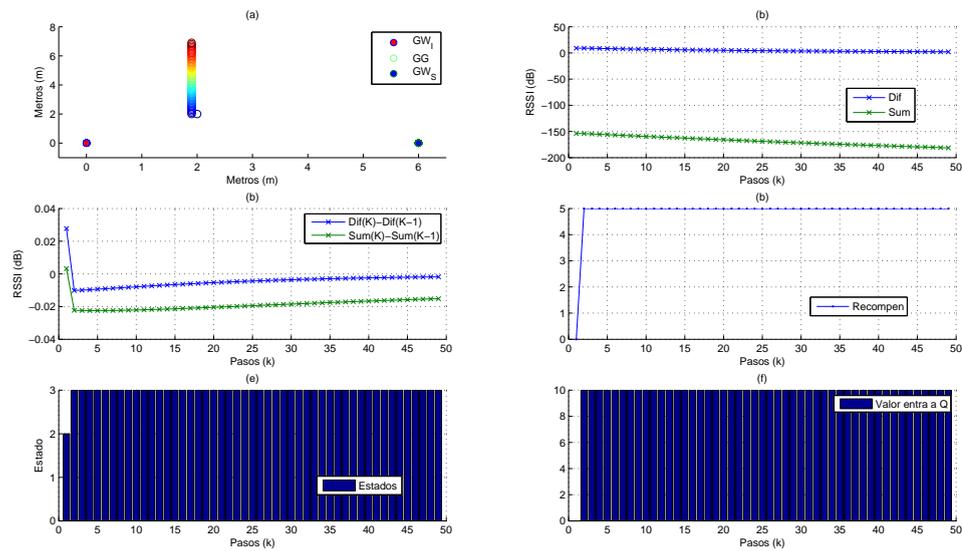


FIGURA 6.8: Simulación 11, Movimiento A_2 y Entrenamiento: (a) Posición de Nodos,(b) Indicadores de Tendencia, (c) Pendiente de Indicadores,(d) Recompensa $R_{(s \times a)}$, (e) Estado (S), (f) Valor Calculado $Q_{s \times a}$.

Evaluación del Desempeño del Controlador Q-Learning

El controlador basado en el algoritmo Q-Learning con o sin aprendizaje, no cumple el objetivo de ubicar al Router Robótico en las cercanías del Punto Óptimo. En el capítulo anterior se observan trayectorias que acercan a GG a su objetivo (PO), se caracterizan por que maximizan la suma y minimizan la diferencia de los valores de RSSI. El modelo de bonificación del cumplimiento de los objetivos MIN_{Dif} y MAX_{Sum} , no logra posicionar a GG en las cercanías de PO ni en una coordenada fija, por el contrario, GG se desplaza sin un objetivo claro.

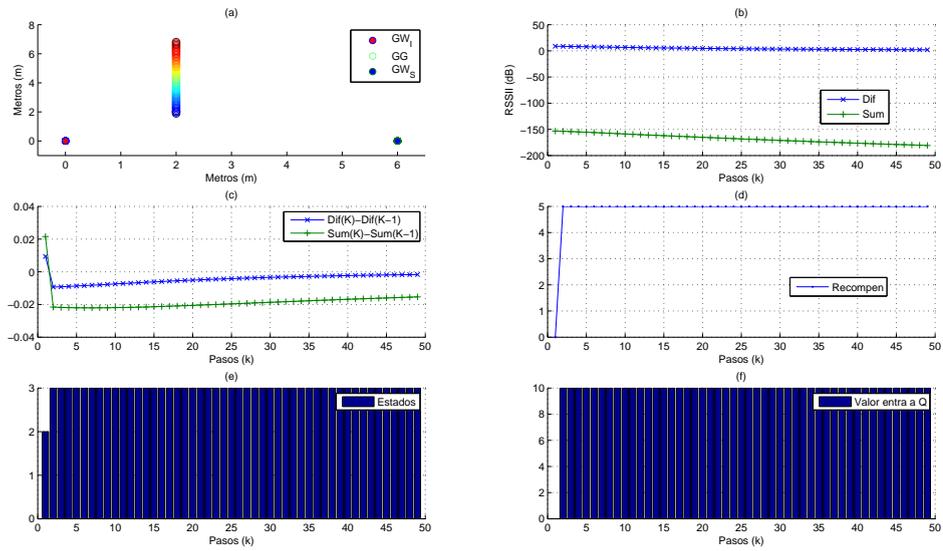


FIGURA 6.9: Simulación 12, Movimiento A_3 y Entrenamiento: (a) Posición de Nodos, (b) Indicadores de Tendencia, (c) Pendiente de Indicadores, (d) Recompensa $R_{(s \times a)}$, (e) Estado (S), (f) Valor Calculado $Q_{s \times a}$.

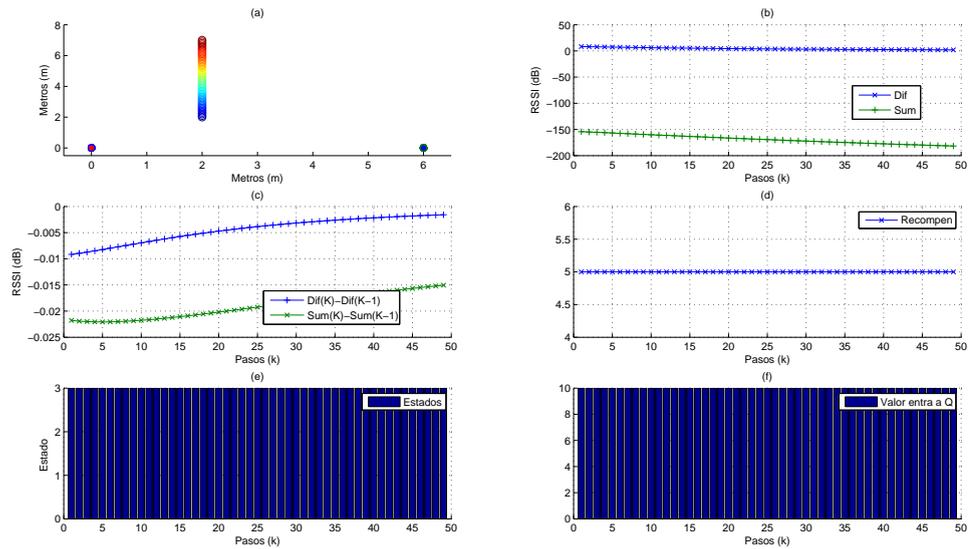


FIGURA 6.10: Simulación 13, Movimiento A_1 y Entrenamiento: (a) Posición de Nodos, (b) Indicadores de Tendencia, (c) Pendiente de Indicadores, (d) Recompensa $R_{(s \times a)}$, (e) Estado (S), (f) Valor Calculado $Q_{s \times a}$.

La explicación al resultado negativo de la estrategia de control, puede encontrarse en dos análisis. El primer análisis se hace en referencia al proceso de exploración, el cual será satisfactorio si el GG logra deambular por los cuatro estados. En la Figura 6.6 (e) se observa que dos Estados son los menos visitados. Corresponden al cumplimiento S_4 y

no cumplimiento S_1 de los objetivos, por lo contrario los Estados donde se cumple sólo un objetivo S_2 y S_3 se logran la mayoría de Pasos.

El segundo análisis que explica la divergencia de GG para el modelo de control planteado, es posible de explicar mediante un análisis anterior referente a los indicadores de orientación del movimiento M_c expuestos en la Figura 5.12. El movimiento M_c es un desplazamiento paralelo a la recta formada por los dos terminales estáticos GW . Los indicadores de orientación correspondientes a M_c ; Dif_a (Figura 5.12 (c)) y Sum_n (Figura 5.12 (d)) donde PO se localiza en el punto medio (un metro).

Si se aplica la ecuación 6.3 de bonificación al comienzo del movimiento M_c , se cumple el objetivo de MIN_{Dif} , obteniendo una recompensa hasta que llegue a PO . Al pasar por PO Dif_a aumenta, dejando de cumplir el objetivo MIN_{Dif} , perdiendo la recompensa. Una vez alcanzado el Punto Óptimo el agente en cada desplazamiento se aleja del él. Cada movimiento erróneo es bonificado por el aumento Sum_n (Figura 5.12 (b)), que cumple el objetivo MAX_{Sum} .

La incapacidad del modelo planteado para posicionar al Router Robótico en las cercanías del Punto Óptimo, provocan que movimientos erróneos sean bonificados perdiendo el sentido de orientación.

6.3. Modelo de Controlador Q-Learning de Estado único Binario

Al plantear una estrategia de control con dos objetivos, MAX_{Sum} y $MinDif$ generando cuatro estados se presentó el siguiente problema: movimientos erróneos eran bonificados, entregando Recompensa a movimientos que alejaban al Router Robótico del Punto Óptimo. A continuación se plantea la estrategia de Estado único Binario apuntando sólo a un objetivo a cumplir. El propósito de esta estrategia es corregir la entrega de recompensas a movimientos incorrectos.

6.3.1. Formulación de Q-Learning Estado único Binario

Para utilizar la estructura del algoritmo Q-Learning, es preciso formular Estados, Acciones y Políticas de bonificación (Recompensa). El objetivo a cumplir se plantea en función a un solo vínculo prioritario, en el cual el Router Robótico debe maximizar el valor de RSSI del vínculo prioritario más lejano. A continuación se plantea algoritmo para maximizar el vínculo lejano.

Estados

El objetivo a cumplir del Router Robótico es maximizar el vínculo lejano. Mediante los valores de RSSI es posible identificar que nodo se encuentra cercano o lejano. Esto puede ser cuantificado por el valor de diferencia digital Dif_d , que indica cual vínculo se encuentra más lejano.

El objetivo planteado se identificará con el acrónimo MAX_{vl} . Se debe maximizar el vínculo lejano, el que puede ser el superior MAX_{VS} o el inferior MAX_{VI} , dependiendo de la ubicación del Router Robótico. La Expresión 6.4 asigna un 1 si fue el maximizado el vínculo superior y la Expresión 6.5 asigna un 1 si fue maximizado el vínculo inferior.

$$MAX_{VS} = \begin{cases} 1 & \text{SI } RSSI_{VS}(k) - RSSI_{VS}(k-1) > 0 \\ 0 & \text{SI } RSSI_{VS}(k) - RSSI_{VS}(k-1) < 0 \end{cases} \quad (6.4)$$

$$MAX_{VI} = \begin{cases} 1 & \text{SI } RSSI_{VI}(k) - RSSI_{VI}(k-1) > 0 \\ 0 & \text{SI } RSSI_{VI}(k) - RSSI_{VI}(k-1) < 0 \end{cases} \quad (6.5)$$

El cumplimiento del objetivo MAX_{vl} genera dos estados, cumplimiento y no cumplimiento. Los posibles estados son: Sb_1 Cumplimiento del objetivo Maximizar el vínculo

lejano y Sb_2 no cumplimiento del objetivo. El objetivo depende de las tres variables; MAX_{VS} , MAX_{VI} y Dif_d indicadas en el cuadro 6.4 que determina los estados.

CUADRO 6.4: Estados, Modelo de Estado Único Binario

<i>Recompensa</i>	MAX_{VS}	MAX_{VI}	Dif_d
Sb_2	0	0	-1
Sb_2	0	1	-1
Sb_1	1	0	-1
Sb_1	1	1	-1
Sb_2	0	0	1
Sb_1	0	1	1
Sb_2	1	0	1
Sb_1	1	1	1

Recompensa

La asignación de recompensa penaliza las acciones erróneas con un valor negativo y premia las acciones que llevan a un estado favorable. Al asignar Recompensas negativas a las acciones incorrectas, se promueve la elección de acciones nuevas y, al contrario, una recompensa positiva a una Acción promueve volver a realizar la misma. Los valores de recompensa se presentan a continuación.

- $Sb_1=5$.
- $Sb_2=-5$.

6.3.2. Desempeño del Controlador Q-Learning de Estado Único Binario

La validación de la estrategia de control Q-Learning mediante el planteamiento de Estado único Binario fue realizada mediante tres simulaciones que ilustran el rendimiento general. Las Figuras 6.11, 6.12 y 6.13, representan las simulaciones. Para cada simulación se exponen una figura dividida en ocho gráficos: (a) Posición de los nodos y desplazamiento del Router Robótico, (b) Indicadores de Tendencia, módulo de la diferencia y Suma de valores de RSSI, (c) Diferencia entre los valores de los indicadores actuales y pasados, (d) Recompensa $R_{(s \times a)}$, (e) Estado (S), (f) Valor Calculado $Q_{s \times a}$, (g) Distancia al Punto Óptimo y (h) RSSI capturado de vínculos. En cada simulación son expuestos los parámetros con los cuales estos fueron ejecutadas. Esto es expuesto en las tablas 6.5, 6.6, y 6.7.

CUADRO 6.5: Parámetros para ejecución de simulación 14.

Nk	: 50.
V_{pi}	: $[0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 6 \ 0]$.
$\Delta Paso$: 0.1(m).
Modelo de RSSI	: Log-TJP.
$M \times P$: 20.
Estados	: Sb_1 y Sb_1 .
Acciones	: $A_1 \ A_2 \ A_3$ y A_3 .
Recompensa	: $Sb_1 = 5$ y $Sb_2 = -5$.
Indice de aprendizaje	: $\gamma = 0,5$ y $\alpha = 0,5$.
Matriz Q inicial	: $Q_{(S \times A)} = 0$.

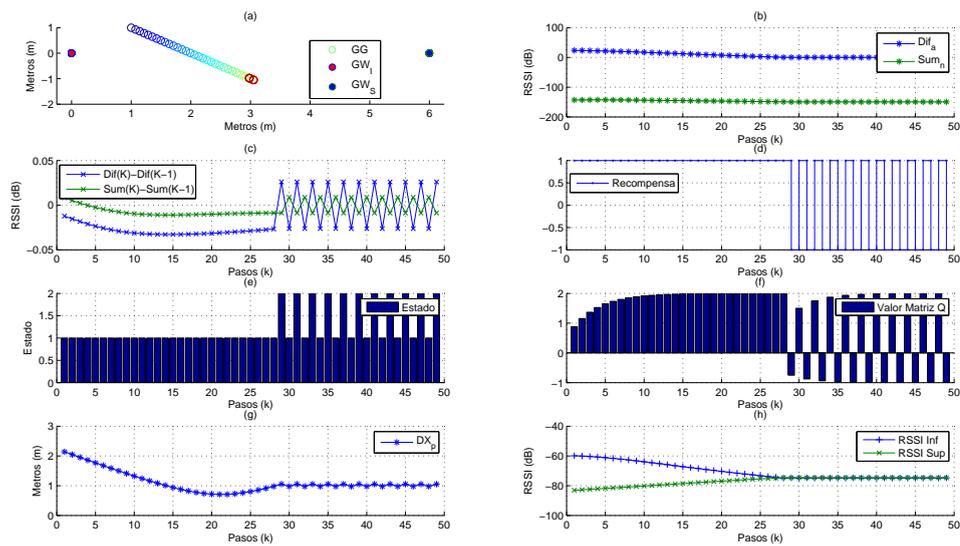


FIGURA 6.11: Simulación 14 : (a) Posición de Nodos,(b) Indicadores de Tendencia, (c) Pendiente de Indicadores,(d) Recompensa $R_{(s \times a)}$, (e) Estado (S), (f) Valor Calculado $Q_{s \times a}$, (g) Distancia al Punto Óptimo (h) RSSI Superior e Inferior.

La simulación 14 logra converger a GG en la cercanía de una coordenada (3,-1) apreciable en la Figura 6.11 (a). Además la distancia a PO se mantiene constante en un metro (Figura 6.11 (g)) y los valores de RSSI se igualan (Figura 6.11 (h)).

En el primer movimiento logra el objetivo y se repite, manteniendo a GG en el estado Sb_1 hasta el Paso 27 y se observa en la Figura 6.11 (e). El Router Robótico no permanece estático, si no que presenta oscilaciones de magnitud un $\Delta Paso$, producidas por las transiciones entre S_1b y S_2 , posible de observar en las Figura 6.11 (c), (d), (e) y (f). Las transiciones de estados en torno a la coordenada 3,-1 indican que es una ubicación en donde se cumple integralmente los objetivos, cada Acción que aleja a GG de ella genera una corrección que la acerca.

CUADRO 6.6: Parámetros para ejecución de simulación 15.

Parámetros	Valores
Nk	: 50.
V_{pi}	: $\begin{bmatrix} 0 & 0 & 5 & -1 & 6 & 0 \end{bmatrix}$.
$\Delta Paso$: 0.1(m).
Modelo de RSSI	: Log-TJP.
$M \times P$: 20.
Estados	: Sb_1 y Sb_1 .
Acciones	: A_1 A_2 A_3 y A_3 .
Recompensa	: $Sb_1 = 5$ y $Sb_2 = -5$.
Indice de aprendizaje	: $\gamma = 0,5$ y $\alpha = 0,5$.
Matriz Q inicial	: $Q_{(S \times A)} = 0$.

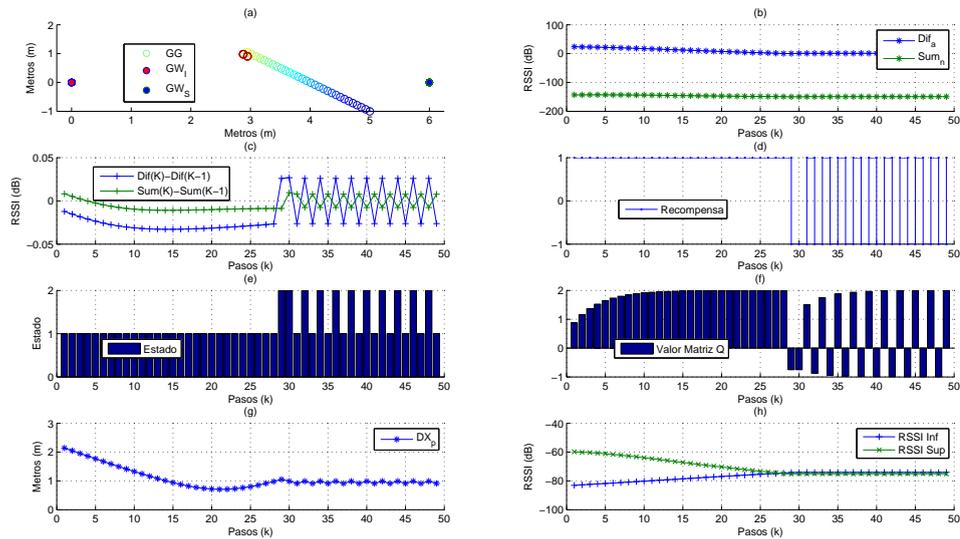


FIGURA 6.12: Simulación 15: (a) Posición de Nodos, (b) Indicadores de Tendencia, (c) Pendiente de Indicadores, (d) Recompensa $R_{(s \times a)}$, (e) Estado (S), (f) Valor Calculado $Q_{s \times a}$, (g) Distancia al Punto Óptimo, (g) RSSI de vínculos prioritarios.

La simulación 15 presenta el mismo comportamiento que la simulación 14, logrando converger a GG en las cercanías de la coordenada 3,1.

En la simulación 16 a diferencia de las simulaciones anteriores, ubica a GG fuera de la circunferencia con centro en el Punto Óptimo y de radio igual a la distancia entre las unidades GW y el PO. La distancia a PO de GG es mayor a la separación de PO y las unidades GW .

Esta situación presenta mayor complejidad debido al aumento de la distancia, provocando mayor presencia de ruido y una menor tendencia de los indicadores de orientación.

CUADRO 6.7: Parámetros para ejecución de simulación 16.

Parámetros	Valores
Nk	: 100.
V_{pi}	: $[0 \ 0 \ -1 \ 0 \ 6 \ 5]$.
$\Delta Paso$: 0.1(m).
Modelo de RSSI	: Log-TJP.
$M \times p$: 20.
Estados	: Sb_1 y Sb_1 .
Acciones	: $A_1 \ A_2 \ A_3$ y A_3 .
Recompensa	: $Sb_1 = 5$ y $Sb_2 = -5$.
Indice de aprendizaje	: $\gamma = 0,5$ y $\alpha = 0,5$.
Matriz Q inicial	: $Q_{(S \times A)} = 0$.

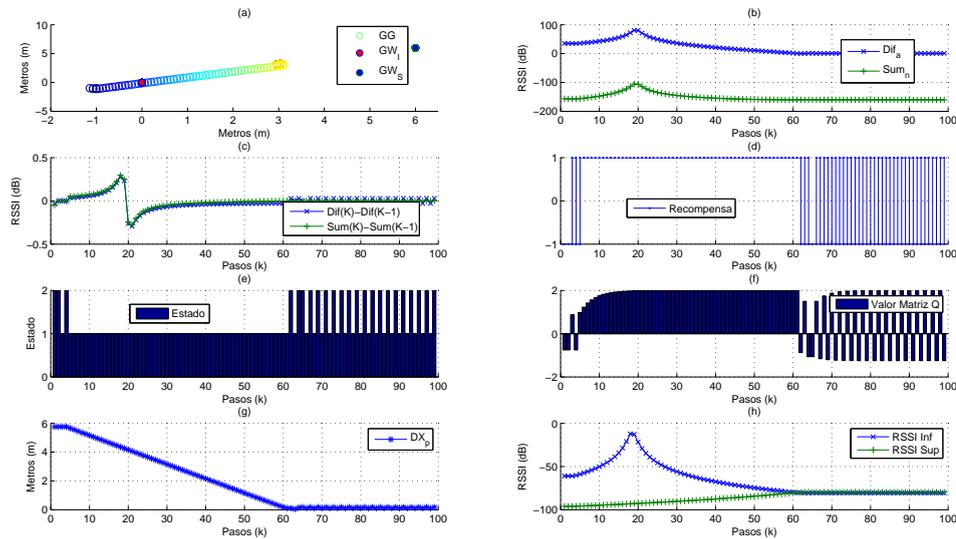


FIGURA 6.13: Simulación 16: (a) Posición de Nodos,(b) Indicadores de Tendencia, (c) Pendiente de Indicadores,(d) Recompensa $R_{(s \times a)}$, (e) Estado (S), (f) Valor Calculado $Q_{s \times a}$, (g) Distancia al Punto Óptimo, (g) RSSI de vínculos prioritarios.

El Router Robótico en las primeras Acciones deambula entre los estado Sb_1 y Sb_2 (Figura 6.13 (e)), hasta que logra orientarse para desplazarse hasta las cercanías de PO, manteniendo la distancia a PO constante (Figura 6.13 (g)) y los valores de RSSI se igualan (Figura 6.13 (h)). .

La Figura 6.14 representa la distancia al PO ejecutando la Simulación 16 diez veces. Se observa que las diez ejecuciones logran posicionar a GG en cercanías de PO. Las variaciones de la distancia a PO de las diferentes ejecuciones del algoritmo se deben, a que los primeros movimientos son designados de forma aleatoria, generando variaciones en la trayectorias.

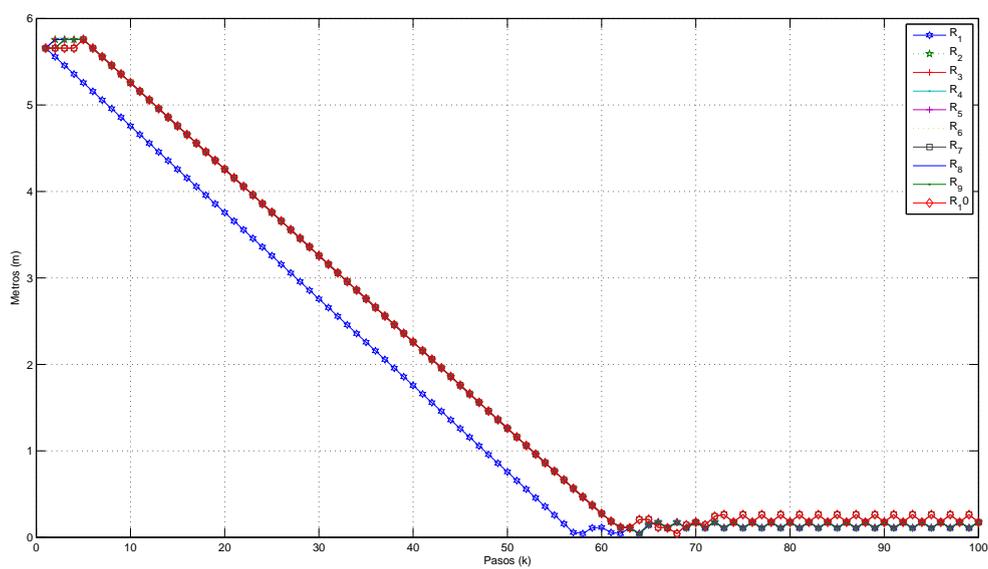


FIGURA 6.14: Distancia Al Punto Óptimo de 10 Simulaciones, para parámetros de Figura 6.13

6.4. Desempeño de la Estrategia Q-Learning de Estado Único Binario, para un Despliegue Dinámico de Nodos.

El algoritmo Q-Learning de Estado Único Binario cumple el objetivo de posicionar a GG en las cercanías de PO para una red de tres unidades (dos estáticas y una móvil). Es necesario evaluar el desempeño del controlador para una red con más de una unidad GG para determinar su viabilidad en aplicaciones de anclaje de red mediante robots móviles. La red donde se ejecutó la estrategia de control la forman dos unidades GW y tres unidades GG . Los resultados del algoritmo son expuestos en tres figuras: la primera expone el desplazamiento de los nodos, la segunda la distancia hacia PO de cada unidad GG y la tercera, los valores de RSSI de los vínculos prioritarios para cada unidad GG .

6.4.1. Vínculos Prioritarios.

En una red de cinco unidades, dos estáticas y tres móviles, se designan los vínculos prioritarios para cada unidad. La unidad de inicio es un Gateway GW_I , posee sólo un vínculo que corresponde al vínculo prioritario inferior de la unidad GG_1 . La unidad GG_1 comparte un link de comunicación con GG_2 , correspondiente al vínculo prioritario superior de la unidad GG_1 y el vínculo prioritario inferior para GG_2 . La unidad GG_2 comparte un link de comunicación con GG_3 correspondiente al vínculo prioritario superior de la unidad GG_2 y el vínculo prioritario inferior para GG_3 . Por último, la unidad GG_3 comparte un link de comunicación con GW_S correspondiente al vínculo prioritario superior de la unidad GG_3 y al único link de comunicación de la unidad GW_S .

6.4.2. Validación de la Estrategia Q-Learning de Estado Único Binario.

La forma de evaluar la Estrategia Q-Learning de Estado Único Binario es mediante tres simulaciones. Las simulaciones 17, 18 y 19, cada una ellas resumidas en un cuadro con los parámetros correspondientes de cada simulación y tres figuras donde es observable el rendimiento de la estrategia de control. Las Figuras 6.15, 6.17 y 6.19 (a) que exponen la posición de las unidades GW y el desplazamiento de los Router Robóticos, desplazamientos que al igual que los anteriores, las tonalidades azules corresponden a los primeros movimientos, tonalidad que varía a verde a medida que se ejecuta la simulación de las mismas Figuras (b) 6.15, 6.17 y 6.19 exponen las distancias al PO de cada unidad GG . La tercera figura de cada simulación (Figuras 6.16, 6.18 y 6.20) se divide en tres, cada una de ellas exponen los RSSI capturados de los vínculos prioritarios.

Los parámetros de cada caso particular son; Cuadro 6.8 simulación 17, Cuadro 6.9 simulación 18 y Cuadro 6.10 simulación 19.

CUADRO 6.8: Parámetros para ejecución de simulación 17.

Parámetros	Valores
Nk	: 500.
V_{pi}	: $[0 \ 0 \ 1 \ -25 \ 9 \ 5 \ -5 \ 12 \ 0]$.
$\Delta Paso$: 0.1(m).
Modelo de RSSI	: Log-TJP.
$M \times P$: 20.
Estados	: Sb_1 y Sb_1 .
Acciones	: $A_1 \ A_2 \ A_3$ y A_3 .
Recompensa	: $Sb_1 = 5$ y $Sb_2 = -5$.
Indice de aprendizaje	: $\gamma = 0,5$ y $\alpha = 0,5$.
Matriz Q inicial	: $Q_{(S \times A)} = 0$.

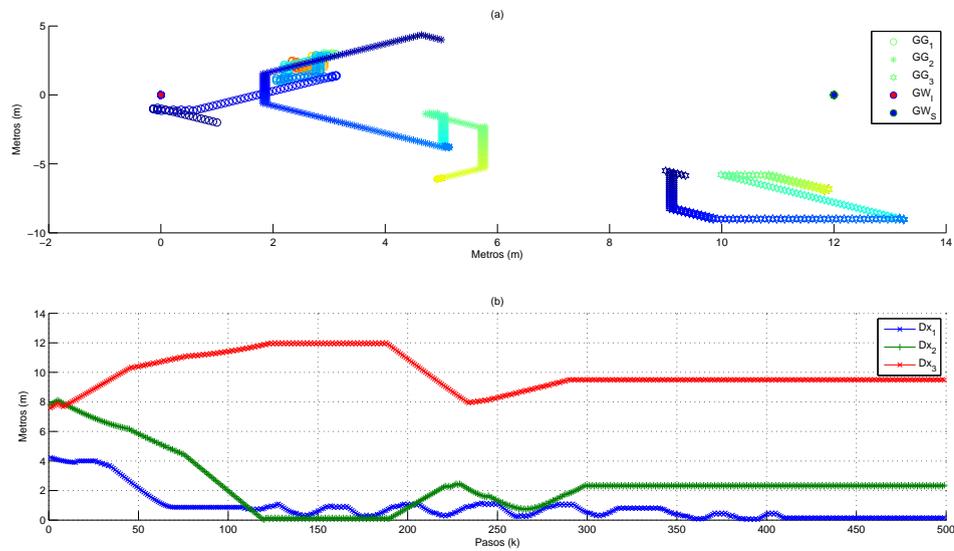


FIGURA 6.15: Simulación 17: (a) Posición de Nodos,(b) distancia al Punto óptimo

La Simulación 17 cumple el objetivo de hacer converger en una coordenada a los Router Robóticos. La Figura 6.15, apreciable en La Figura 6.15 (b), expone la distancia a PO de cada unidad GG , distancias que se mantienen constantes aproximadamente después de 400 pasos. La distancia a PO de las unidades GG_1 y GG_2 disminuyó, en cambio aumentó para GG_3 en relación a las posiciones iniciales.

El algoritmo logra mantener a las unidades GG en una posición fija, pero los valores de RSSI no logran ser igualados, sólo los valores de RSSI de los vínculos de la unidad GG_1 logran converger en un valor, apreciable en la Figura 6.16 (a). Para la

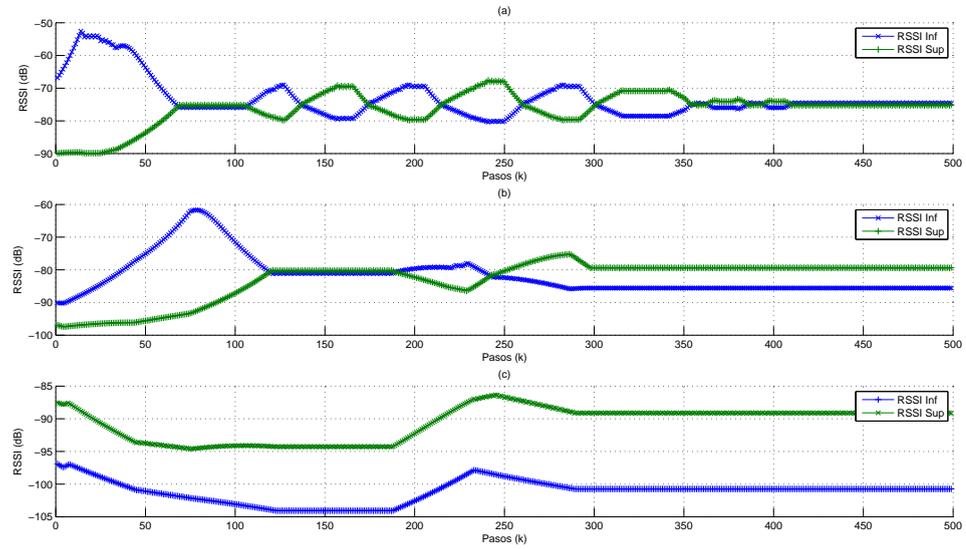


FIGURA 6.16: Simulación 17, RSSI de Vínculos Prioritarios: (a) GG_1 , (b) GG_2 (c) GG_3 .

unidad GG_2 y GG_3 los valores de RSSI son disimiles, observado en la Figura 6.16 (b) y (c).

CUADRO 6.9: Parámetros para ejecución de simulación 18.

Parámetros	Valores
Nk	: 750.
V_{pi}	: $[0 \ 0 \ 1 \ -2,5 \ 7 \ 4 \ 12 \ -5,5 \ 15 \ 0]$.
$\Delta Paso$: 0.1(m).
Modelo de RSSI	: Log-TJP.
$M \times P$: 20.
Estados	: Sb_1 y Sb_1 .
Acciones	: $A_1 \ A_2 \ A_3$ y A_3 .
Recompensa	: $Sb_1 = 5$ y $Sb_2 = -5$.
Indice de aprendizaje	: $\gamma = 0,5$ y $\alpha = 0,5$.
Matriz Q inicial	: $Q_{(S \times A)} = 0$.

La Simulación 18 cumple el objetivo de hacer converger en una coordenada a los Router Robóticos. Apreciable en la figura 6.17 (b), expone la distancia a PO de cada unidad GG , distancias que se mantienen constantes aproximadamente después de 500 pasos. La distancia a PO de todas las unidades disminuyó en relación a los valores iniciales.

La Simulación 18 cumple el objetivo de hacer converger en una coordenada a los Router Robóticos. Apreciable en la Figura 6.17 (b), expone la distancia a PO de cada unidad GG , distancias que se mantienen constantes aproximadamente después de 500

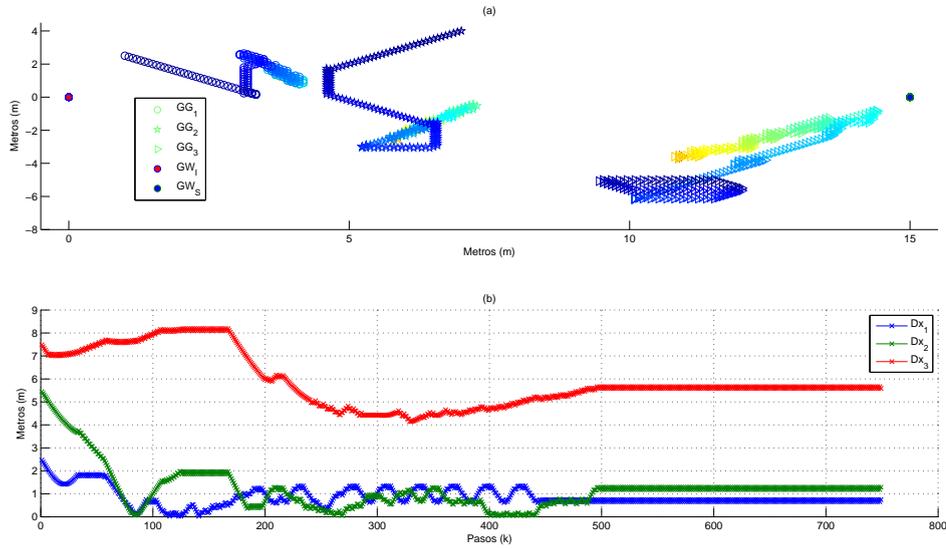


FIGURA 6.17: Simulación 18: (a) Posición de Nodos,(b) Distancia al Punto Óptimo

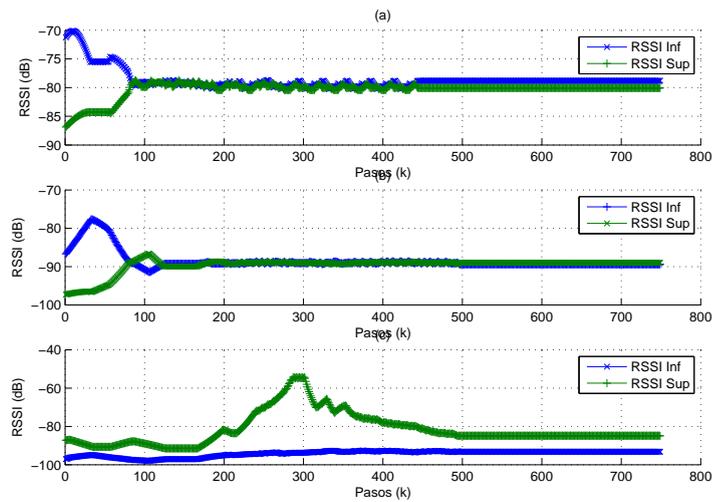


FIGURA 6.18: Simulación 17, RSSI de Vínculos Prioritarios: (a) GG_1 , (b) GG_2 (c) GG_3 .

pasos. La distancia a PO de todas las unidades disminuyó en relación a los valores iniciales.

El algoritmo logra mantener los nodos móviles en una posición fija, pero los valores de RSSI no logran ser igualados. Sólo los valores de RSSI de los vínculos de las unidad GG_1 y GG_2 logran converger en un valor cercano. La Figura 6.18 (a) y (b), para la unidad GG_3 los valores de RSSI son disimiles, observado en La Figura 6.18 (c).

CUADRO 6.10: Parámetros para ejecución de simulación 19.

Nk	: 750.
V_{pi}	: [0 0 1 2 3 5 6 6 0 15].
$\Delta Paso$: 0.1(m).
Modelo de RSSI	: Log-TJP.
$M \times P$: 20.
Estados	: Sb_1 y Sb_1 .
Acciones	: A_1 A_2 A_3 y A_3 .
Recompensa	: $Sb_1 = 5$ y $Sb_2 = -5$.
Indice de aprendizaje	: $\gamma = 0,5$ y $\alpha = 0,5$.
Matriz Q inicial	: $Q_{(S \times A)} = 0$.

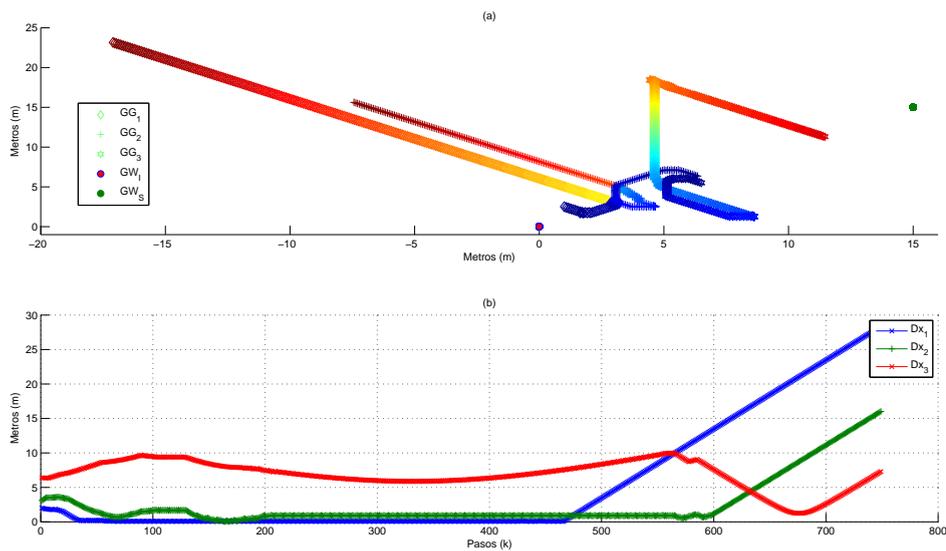


FIGURA 6.19: Simulación 19: (a) Posición de Nodos,(b) distancia al Punto óptimo

La Simulación 19 no cumple el objetivo de hacer converger en una coordenada a los Router Robóticos. Apreciable en La Figura 6.19 (b), expone la distancia a PO de cada unidad GG , aproximadamente después de 700 pasos comienza a aumentar para todas las unidades GG .

Los valores de RSSI de la Simulación 19 se exponen en La Figura 6.20. Los valores de RSSI de los vínculos tienden a converger en la Zona de Calidad de señal IV (inservible).

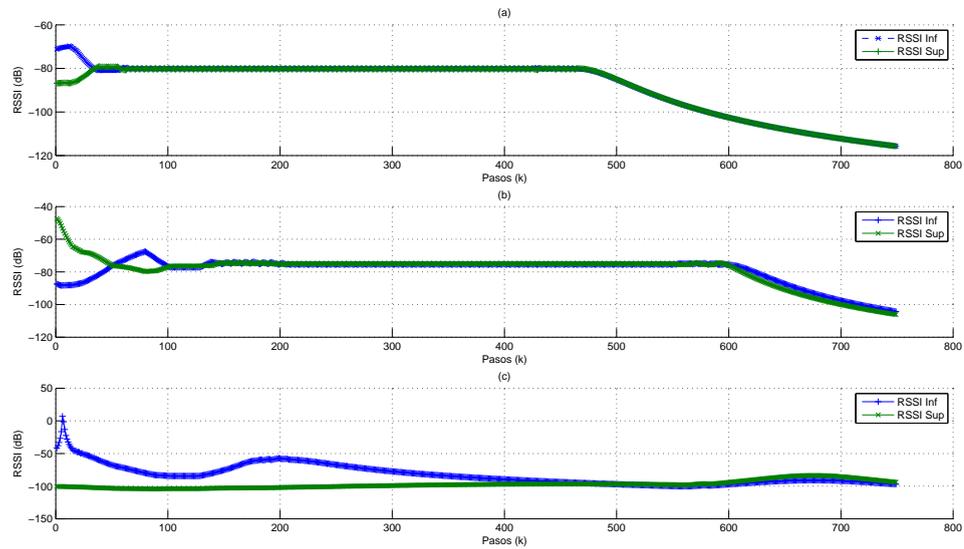


FIGURA 6.20: Simulación 19, RSSI de Vínculos Prioritarios: (a) GG_1 , (b) GG_2 (c) GG_3 .

6.4.3. Análisis y Conclusión Final para el Algoritmo de Estado Único Binario.

Evaluando el Algoritmo de Estado Único Binario en una red de tres unidades móviles, se puede lograr convergencia de las unidades GG en una coordenada. Lograr la convergencia en una coordenada no implica un óptimo resultado, es necesario que la coordenada se ubique en las proximidades de PO. Un resultado ideal es que los valores de RSSI de cada unidad de la red convergen en un mismo valor, lo cual no sucede en las simulaciones 17, 18 y 19.

En la Simulación 19 las unidades GG divergen de PO. La estrategia de control sólo basa sus acciones en un vínculo (el lejano), lo que puede provocar bonificar acciones incorrectas. La orientación en base a un solo vínculo no es eficiente. Las simulaciones 17, 18 y 19 son ejemplos claros del rendimiento del algoritmo de Estado Único Binario. De más de 100 simulaciones aproximadamente un tercio de ellas divergen, simulaciones realizadas para diferentes V_{pi} .

Capítulo 7

Desarrollo de Algoritmo de Mínimos Movimientos.

El algoritmo de Estado Único Binario logra posicionar a GG en la proximidad de PO cuando sus vínculos prioritarios son unidades estáticas. Para una red con más de una unidad GG , el algoritmo de Estado Único Binario no logra igualar los valores de RSSI en las cercanías de PO. En este capítulo se presenta un diseño que busca cumplir con la condición de converger en las cercanías de PO, basándose en corregir los problemas presentados en los modelos anteriores.

A continuación se describe una estrategia de control con una Heurística confeccionada en base al algoritmo Q-learning, heurística que intenta no perder la orientación a PO mediante la realización de acciones favorables para converger en PO. La Heurística señalada con el nombre de Mínimos Movimientos, como su nombre lo indica, busca realizar los mínimos desplazamientos para evitar llegar a las zonas de Calidad de señal III y IV, mala e inservible. La estrategia de control identifica las acciones que son beneficiosas para GG mediante el cumplimiento de tres objetivos en vez de uno. Los objetivos fueron maximizar el vínculo lejano, minimizar el módulo de la diferencia y se incluyó un nuevo objetivo: minimizar el vínculo cercano.

7.1. Incorporación de Estados y Acciones.

Se identificó en las simulaciones anteriores que movimientos erróneos pueden ser calificados como favorables y asignarle una recompensa positiva. La dinámica producida por las interacciones de las unidades de red, sumado a que los valores de RSSI a converger son desconocidos, generan un escenario complejo.

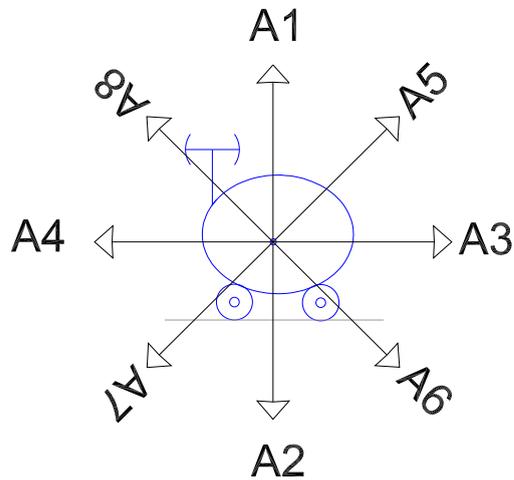


FIGURA 7.1: Acciones Ampliadas.

Para mejorar el algoritmo fueron ampliadas las Acciones de cuatro a nueve. La Figura 7.1 representa a ocho desplazamientos fijos o pre-establecidos. La novena Acción, identificada con el nombre de Retroceder, genera La Acción contraria al último desplazamiento realizado. Al ejecutar la Acción retroceder, la unidad GG se posiciona en la coordenada inicial del desplazamiento pasado, posicionando al nodo en la ubicación inicial de la iteración pasada.

El objetivo de maximizar el vínculo lejano entrega información útil pero no suficiente al fijar la atención en un solo vínculo. Para mejorar la eficiencia de la estrategia de control se considerará información de ambos vínculos y del valor del módulo de la diferencia. A continuación se definen los objetivos de la estrategia de control Heurística de Mínimos Movimientos.

Objetivo Maximizar el vínculo lejano.

El objetivo "Maximizar el vínculo lejano", corresponde al planteado anteriormente. El objetivo se identificará con el acrónimo MAX_{vl} . El valor MAX_{vl} depende de MAX_{VS} y calculado en la Expresión 6.4 y MAX_{VI} , calculado en la Expresión 6.5.

El valor de MAX_{vl} es dependiente del nodo más lejano, determinado por el indicador de orientación diferencia digital Dif_d . El valor de MAX_{vl} es obtenido mediante el Algoritmo 3.

Algorithm 3 Maximizar vinculo lejano. MAX_{vl}

```

if  $Dif_d = -1$  then
  if  $MAX_{VS} = 1$  then
     $MAX_{vl} = 1$ 
  else
     $MAX_{vl} = 0$ 
  end if
else
  if  $MAX_{VI} = 1$  then
     $MAX_{vl} = 1$ 
  else
     $MAX_{vl} = 0$ 
  end if
end if

```

7.1.1. Objetivo Minimizar el Vínculo Cercano.

Minimizar el vínculo cercano corresponde al opuesto de maximizar el vínculo lejano. El objetivo definido por el acrónimo Min_{vc} , es determinado por el Algoritmo 4. De igual manera, el cumplimiento del objetivo es asignándole un valor de 1. Alejarse del vínculo cercano (minimizar el RSSI), no implica acercarse al vínculo lejano. El valor de Min_{vc} depende de las variables, Min_{VS} calculado mediante Expresión 7.1 y Min_{VI} calculado mediante Expresión 7.2.

$$Min_{VS} = \begin{cases} 0 & \text{SI } RSSI_{VS}(k) - RSSI_{VS}(k-1) > 0 \\ 1 & \text{SI } RSSI_{VS}(k) - RSSI_{VS}(k-1) < 0 \end{cases} \quad (7.1)$$

$$Min_{VI} = \begin{cases} 0 & \text{SI } RSSI_{VI}(k) - RSSI_{VI}(k-1) > 0 \\ 1 & \text{SI } RSSI_{VI}(k) - RSSI_{VI}(k-1) < 0 \end{cases} \quad (7.2)$$

Algorithm 4 Minimizar vinculo cercano. Min_{vc}

```

if  $Dif_d = -1$  then
  if  $Min_{VI} = 1$  then
     $Min_{vc} = 1$ 
  else
     $Min_{vc} = 0$ 
  end if
else
  if  $Min_{VS} = 1$  then
     $Min_{vc} = 1$ 
  else
     $Min_{vc} = 0$ 
  end if
end if

```

Objetivo Minimizar el Módulo de la Diferencia.

Minimizar el módulo de la diferencia de RSSI de los vínculos prioritarios es de importancia, puesto que el PO es parte de la recta de diferencia nula. El objetivo es obtenido mediante la Expresión 6.2, objetivo utilizado en el capítulo anterior.

7.2. Falsos Positivos.

Los falsos positivos corresponden a movimientos incorrectos calificados como correctos. Un movimiento incorrecto es aquel que al ser ejecutado tiene como resultado posicionar a GG en una coordenada más lejana de PO en relación a su coordenada anterior.

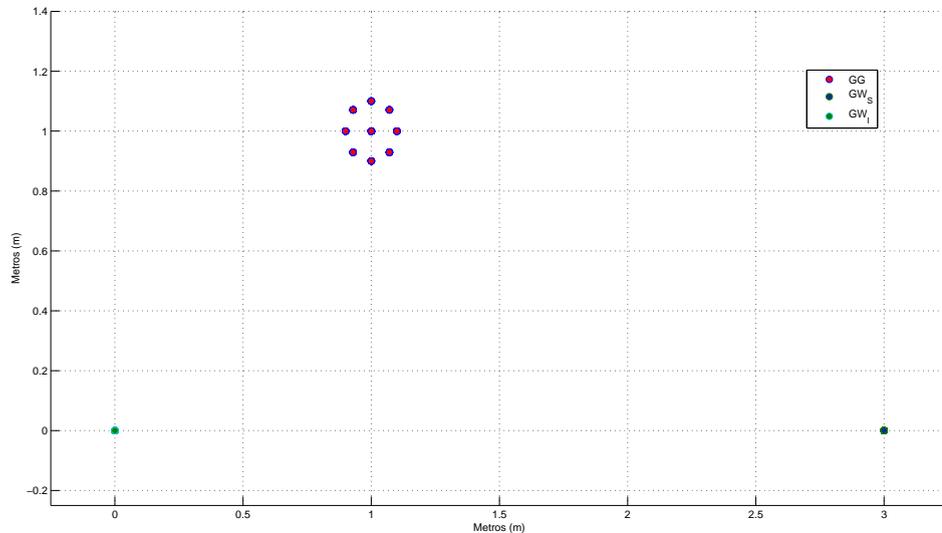


FIGURA 7.2: Plataforma de simulación Para ciclos de Acción-Retroceso, modelo de un agente móvil dos unidades estáticas.

Es de importancia determinar si es posible tener una orientación clara de los movimientos correctos, evitando falsos positivos. Se plantean los siguientes experimentos.

La primera plataforma de experimentos consta de dos nodos estáticos y un nodo móvil, posicionados en las coordenadas (0,0) y (3,0) para las unidades GW y GG en (1,1). Se define como ciclo Acción-Retroceso a la ejecución de una acción aleatorio (A_1 , A_2 , A_3 , A_4 , A_5 , A_6 , A_7 y A_8), la evaluación de los tres Objetivos y la ejecución de la Acción nueva retroceder, de esta forma el desplazamiento neto de GG en un Ciclo Acción-Retroceso es nulo.

Para la primera plataforma de experimentos se presentan dos cuadros con los resultados de la ejecución de 10 (Cuadro 7.1) y 100 (Cuadro 7.2) ciclos Acción-Retroceso.

	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7	A_8
MAX_{vl}	1	1	x	x	x	x	x	1
MIN_{vc}	0	1	x	x	x	x	x	1
MIN_{Dif}	0	0	x	x	x	x	x	0

CUADRO 7.1: Resultado para 10 Ciclos Acción-Retroceder, para figura 7.2

	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7	A_8
MAX_{vl}	1	1	1	1	1	1	1	1
MIN_{vc}	0	1	0	0	0	0	0	1
MIN_{Dif}	1	1	0	1	1	1	1	1

CUADRO 7.2: Resultado para 100 Ciclos Acción-Retroceder, para figura 7.2

La segunda plataforma de experimentos consta de: dos nodos estáticas y un nodo móvil, posicionados en las coordenadas (0,0) y (9,0) para las unidades GW y tres unidades GG en (1,1), (3,0) y (8,0). Cada unidad realiza simultáneamente ciclos Acción-Retroceso.

Para la segunda plataforma de experimentos se presentan dos cuadros con los resultados de la ejecución de 10 (Cuadro 7.3) y 100 (Cuadro 7.4) ciclos Acción-Retroceso de la unidad GG_2 .

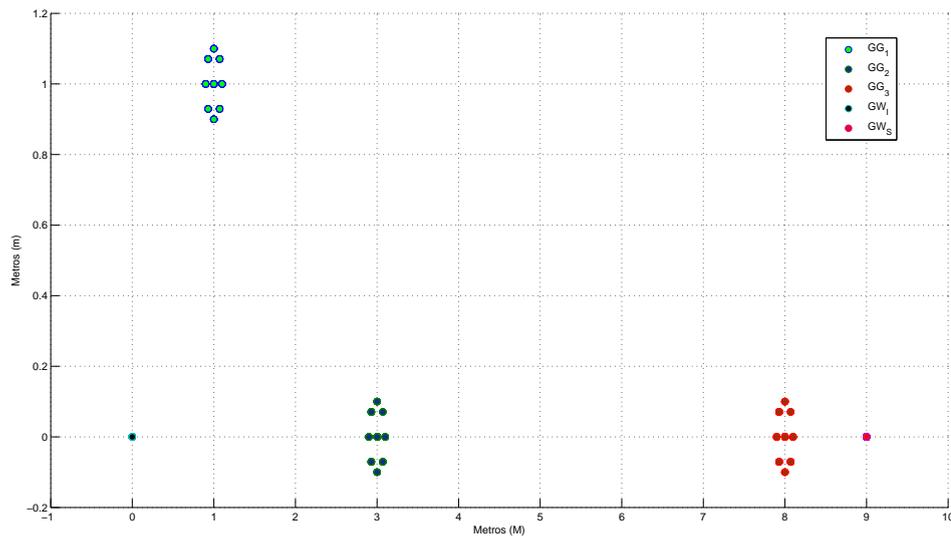


FIGURA 7.3: Plataforma de simulación para ciclos de Acción-Retroceso, modelo de tres agentes móviles y dos unidades estáticas.

	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7	A_8
MAX_{vl}	x	1	1	1	x	x	1	x
Min_{vc}	x	0	0	0	x	x	1	x
Min_{Dif}	x	1	0	0	x	x	1	x

CUADRO 7.3: Resultado para 10 Ciclos Acción-Retroceder, para figura 7.3

Los valores expuestos en los cuadros pueden ser "1", "0" y "X" definidos como: La asignación de un "1" corresponde al cumplimiento de a lo menos una vez el objetivo específico para una Acción. La asignación del valor de "0" Corresponde al no cumplimiento del objetivo en ninguna oportunidad. La asignación de una "X" corresponde a que no fue realizada la acción por lo cual no se tiene información, debido que no se pudo evaluar los objetivos.

	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7	A_8
MAX_{vl}	1	1	1	1	1	1	1	1
Min_{vc}	1	1	0	1	0	1	1	1
Min_{Dif}	1	1	1	1	1	1	1	1

CUADRO 7.4: Resultado para 100 Ciclos Acción-Retroceder, para figura 7.3

Análisis de resultados.

La cantidad de ciclos Acción-Retroceso es fundamental para la elección del número de ciclos y para poder obtener información de todas las acciones, ya que con 10 ciclos se observa que no son realizadas todas las acciones, puesto que ellas son designadas de forma aleatoria.

La ejecución de 10 ciclos, valores en Cuadros 7.1 y 7.3, expone que es un número insuficiente para poder deambular por todas las acciones, representado por los casilleros con el valor de "X". Conclusiones en base a los Cuadros 7.1 y 7.3, no son válidas por no tener información de todas las acciones. Si se realizan análisis en base a estos cuadros, pueden llevar a conclusiones incorrectas. Los Cuadros 7.2 y 7.4 fueron asignados a las posiciones Objetivo-Acción; un "1" si este fue cumplido a lo menos una vez. En las simulaciones no se especifica cuales son los movimientos favorables y cuales no, por el motivo que GG , en la realidad, no cuenta con esa información. Si el Router Robótico es capaz de identificar una tendencia de acciones favorables. El segundo paso es determinar si las acciones que GG determina como favorables son, en la realidad, desplazamientos que acercan a PO.

Asumiendo que una Acción favorable es aquella cuya columna presenta el cumplimiento de todos los objetivos al menos una vez. Las acciones favorables para el primer experimento ejecutando 100 ciclos, fueron A_2 y A_8 . Además que en siete de ocho acciones presentan el cumplimiento de a lo menos una vez dos objetivos, expuesto en Cuadro 7.2. Las acciones favorables para el segundo experimento ejecutando 100 ciclos y calculando los objetivos en función de la unidad GG_2 , fueron más de la mitad de las Acciones, seis de ocho.

El aumento de las Acciones que se pueden considerar beneficiosas del segundo experimento en relación al primero, es cuando los vínculos prioritarios son nodos móviles en comparación a modelos donde los vínculos son estáticos. Se puede explicar debido al comportamiento de sus vínculos prioritarios (GG_1 y GG_3) distorsionando los valores en relación al primer experimento. La pérdida de certeza al juzgar las acciones es ilustrado en un caso particular. El caso particular a exponer es cuando todas las unidades GG ejecutan las misma Acción. Al realizar un desplazamiento de sentido y magnitud igual, la distancia relativa de GG_2 a sus vínculos permanece constante. Las variaciones de RSSI capturadas por la unidad GG_2 solo son provocadas por las perturbaciones, ya que las distancias permanecen constantes.

Lo esperado de los experimentos es identificar acciones beneficiosas. Una Acción que el Router Robótico considere beneficiosa por el cumplimiento de los objetivos puede no serlo. Debido a lo expuesto anteriormente se concluye que no es posible identificar en primera instancia acciones mejores que las demás, y es probable obtener falsos positivos al intentar una orientación del rumbo a PO, sobre todo cuando los vínculos prioritarios son unidades móviles.

7.3. Diseño de Controlador de Mínimos Movimientos.

Debido al dinamismo producido por una red con más de una unidad GG , es posible realizar movimientos erróneos y cumplir algún o todos los objetivos. Entre más movimientos realice el Router Robótico para encontrar una tendencia que lo oriente hacia PO puede producir desplazamiento no requeridos. Los movimientos innecesarios y falsos positivos realizados en la búsqueda de la orientación provocan que GG diverge o converge en un área distante de PO. Se plantea una consideración en el diseño con el fin de obtener un algoritmo capaz de lidiar con el problema de los falsos positivos y movimientos innecesarios. La consideración fue que el Router Robótico solo realice desplazamientos cuando sean cumplidos todos los objetivos.

7.3.1. Estructura del Controlador de Mínimos Movimientos.

Manteniendo la estrategia de control Q-learning, se plantea una heurística para ser utilizada en una red de múltiples unidades móviles. La matriz de $Q_{(S \times A)}$ para las estrategias de control de Mínimos Movimientos se compone de nueve acciones, ocho de ellas representadas en la Figura 7.1 y la novena corresponde a retroceder. Los estados son expuesto en el Cuadro 7.5, representan las posibles combinaciones de los objetivos: MIN_{Dif} , MIN_{vc} y MAX_{vl} . Donde el Estado SM_1 es el cumplimiento de todos los objetivos .

	MIN_{Dif}	MIN_{vc}	MAX_{vl}
SM_1	1	1	1
SM_2	1	1	0
SM_3	1	0	1
SM_4	1	0	0
SM_5	0	1	1
SM_6	0	1	0
SM_7	0	0	1
SM_8	0	0	0

CUADRO 7.5: Estados, Modelo cumplimiento de tres Objetivos: MIN_{Dif} , MIN_{vc} y MAX_{vl}

El cumplimiento del Estado SM_1 implica una clara tendencia de acercamiento a PO. El estado más desfavorable es SM_8 que no cumple ningún objetivo. Pero los estados intermedios que cumplen parte de los objetivos son difíciles de juzgar, si representan o no una Acción favorable. Para evitar ambigüedades que signifiquen falsos positivos o desplazamientos innecesarios, de los ocho Estados se determinan dos nuevos. Los dos estados nuevos corresponden a; cumplimiento de los objetivos (SM_1) designado con el acrónimo SS_1 y el no cumplimiento de todos los objetivos ($SM_2, SM_3, SM_4, SM_5, SM_6, SM_7$ y SM_8) designado con el acrónimo SS_2 . Generando una estructura similar a las estrategias de Estado Único binario.

Recompensa.

La asignación de Recompensas para los pares Estado-Acción es similar a las anteriores. Los valores de recompensa son expuestos en el Cuadro 7.6.

Es penalizada la transición a Estados-Acción no deseadas, SS_2 , con un valor negativo y bonificando una transición favorable SS_1 con un valor positivo.

Estado	Recompensa
SS_1	1
SS_2	-1

CUADRO 7.6: Recompensa, de estado SS .

Modificación al algoritmo Q-learning.

La heurística de Mínimos Movimientos es basada en Q-learning. A continuación se desarrolla el planteamiento de la matriz $Q_{(S \times A)}$ y luego se exponen las modificaciones al modelo de Q-learning.

La matriz $Q_{(S \times A)}$ inicial ($k = 0$) es la expuesta en la Expresión 7.3, donde las filas están formadas por el vector V_E (Expresión 7.4) y las columnas por el vector V_A (Expresión 7.5), el producto entre ambas forman los pares Estados-Acción.

$$Q_{(S \times A)}(k = 0) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\infty \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & +\infty \end{bmatrix} \quad (7.3)$$

$$V_E = | SS_1 SS_2 | \quad (7.4)$$

$$V_A = | SM_1, SM_2, SM_3, SM_4, SM_5, SM_6, SM_7, SM_8 | \quad (7.5)$$

La Acción a realizar es determinada por la Acción que representa la coordenada con mayor valor en la fila de Estado actual. Si se encuentra en el estado SS_1 la Acción 9 Retroceder no será realizada, debido a que su valor es $-\infty$, esta jamás será la coordenada con el mayor valor. Si se esta en el Estado SS_2 la Acción 9 Retroceder siempre será realizada ya que es la coordenada con mayor valor.

Los valores iniciales impuestos en la matriz $Q_{(S \times A)}$ son para lograr imponer los siguientes comportamientos.

Cuando la unidad GG realiza una transición de cualquier Estado a SS_1 el algoritmo Q-learning opera de forma normal y debido al valor $-\infty$, es obligado a realizar cualquier acción menos retroceder.

Cuando la unidad GG realiza una transición de SS_1 a SS_2 , el algoritmo Q-learning determina la Acción A_9 retroceder, obligado por el valor $+\infty$.

El algoritmo planteado logra que, desde una coordenada de inicio de GG , sólo se traslade a otra y permanezca en ella si la Acción realizada logra cumplir todos los objetivos.

La estrategia planteada presenta un problema. Al realizar una transición del estado SS_2 a SS_2 mediante la Acción nueve Retroceder, se designará una nueva Acción A_9 . Esto puede provocar un ciclo repetitivo de desplazamientos, Repetir queda confinado GG a deambular entre dos coordenadas con desplazamiento neto nulo.

Para evitar la posibilidad de realizar indefinidamente la Acción Retroceder, se utiliza una Heurística de supervisión capaz de modificar el valor de Acción escogido por el controlar Q-learning.

La Heurística de supervisión consiste en detectar la realización de dos acciones A_9 consecutivas. Se identifica si la Acción pasada y la ejecutar son A_9 , de ser así, se cambia la Acción a realizar por una escogida aleatoriamente, que no incluye en el sorteo a A_9 .

La implementación del algoritmo supervisor se expone en el Algoritmo 5. El algoritmo identifica si la Acción pasada ($A(k-1)$) y la Acción seleccionada a ejecutar ($A(k)$) fue A_9 modificándola por otra escogida de forma aleatoria.

Algorithm 5 Algoritmo supervisor

```

if ( $A(k) = 9$ )AND( $A(k-1)$ ) then
     $A(k)$ = Movimiento aleatorio  $A_W$  donde  $W \forall [1, 8]$ 
end if

```

Esta Heurística está basada en los modelos de Aprendizaje por Refuerzo más un algoritmo Auxiliar. Fue ideada como una estrategia de control para realizar mínimos desplazamientos de GG evitando entrar en las zonas de calidad de señal III y IV.

7.4. Desempeño del Controlador de Mínimos Movimientos.

En este método de evaluación para el algoritmo Heurística de Mínimos Movimientos, el algoritmo Estado Único Binario no dio resultados satisfactorios. Se ejecutó la Heurística en una red de cinco unidades, dos estáticas y tres móviles, siguiendo el esquema planteado en el capítulo anterior.

A continuación se expone una simulación en detalle, exponiendo el rendimiento general de la estrategia de control.

7.4.1. Desempeño General del Algoritmo.

La Simulación 20 expone el desempeño del Controlador de Mínimos Movimientos detallado en seis figuras. La primera Figura 7.4 gráfica tridimensional donde la abscisa y ordenada representan el plano correspondiente a la plataforma de simulación (en metros). El tercer eje perpendicular al plano representa las coordenadas en el plano de cada iteración ($Pasos(k)$). Las coordenadas cercanas al origen en el eje perpendicular corresponden a los primeros movimientos (de color azul cambiando de tonalidad a medida que avanza la ejecución hasta el color rojo). Los parámetros correspondiente a la Simulación 20 que expuesto en el Cuadro 7.7

CUADRO 7.7: Parámetros para ejecución de simulaciones 20.

Nk	: 500.
V_{pi}	: $[0 \ 0 \ 1 \ -1 \ 2 \ 0 \ 5 \ -1 \ 9 \ 0]$.
$\Delta Paso$: 0.1(m).
Modelo de RSSI	: Log-TJP.
$M \times P$: 20.
Estados	: SS_1 y SS_2 .
Acciones	: $A_1 \ A_2 \ A_3, A_3, A_5 \ A_6 \ A_7, A_8$ y A_9 .
Recompensa	: $SS_1 = 1$ y $SS_2 = -1$.
Índice de aprendizaje	: $\gamma = 0,5$ y $\alpha = 0,5$.
Matriz Q inicial	: $Q_{(S \times A)} = 0$.

La segunda Figura 7.5 expone dos gráficas por unidad GG de manera ordenada, el indicador de orientación $Difa$ y los valores RSSI de cada vínculo prioritario.

La tercera Figura 7.6 expone dos gráficas correspondientes a la distancia de la unidad GG a PO instantánea e ideal. La primera gráfica corresponde a la distancia hacia el Punto Óptimo calculado instantaneamente, formado por los vínculos prioritarios.

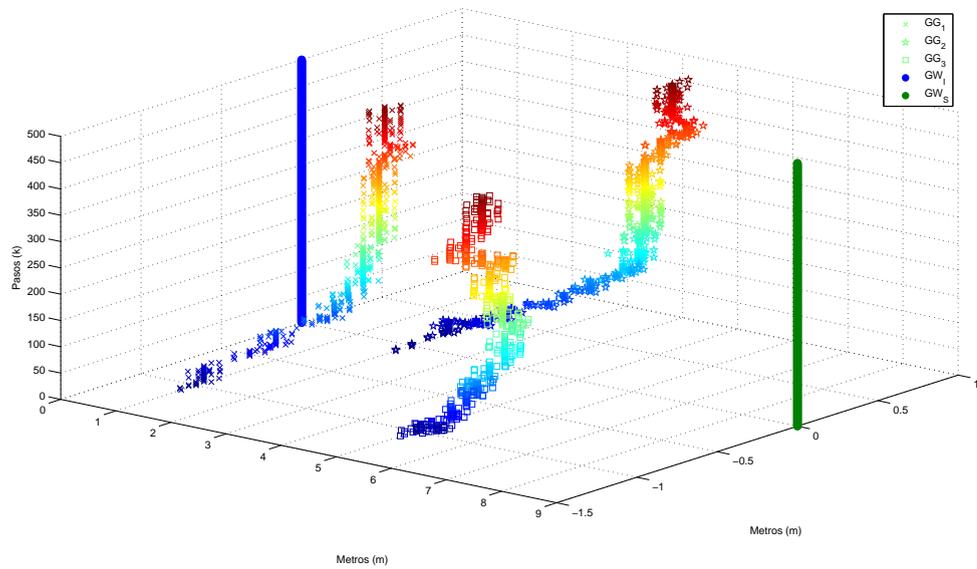


FIGURA 7.4: Simulación 23 desplazamiento de los Nodos en función de los Pasos.

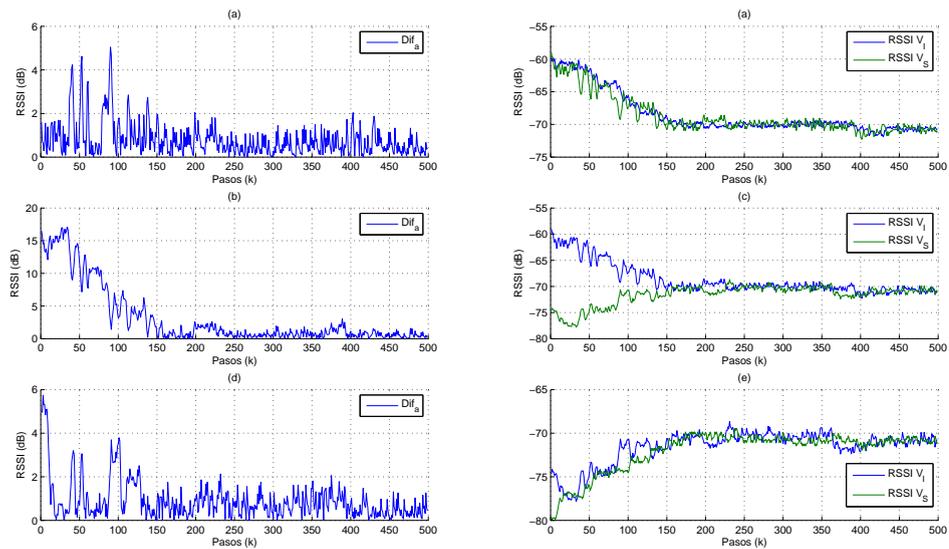


FIGURA 7.5: Simulación 23 Módulo de la Diferencia y RSSI de vínculos prioritarios para cada Agente Móvil:(a) Dif_a de la unidad GG_1 , (b) RSSI capturado de la unidad GG_1 , (c) Dif_a de la unidad GG_1 (d) RSSI capturado GG_3 .(a) RSSI capturado GG_1 , (e) Dif_a de la unidad GG_3 (c) RSSI capturado GG_2 ,(d) RSSI capturado GG_3 .

La segunda gráfica corresponde a la distancia al Punto Óptimo Ideal para la unidad, coordenada de PO calculada en función del primer y último terminal de la red.

Las Figuras 7.7, 7.8 y 7.8 ilustran el comportamiento de cada unidad GG .

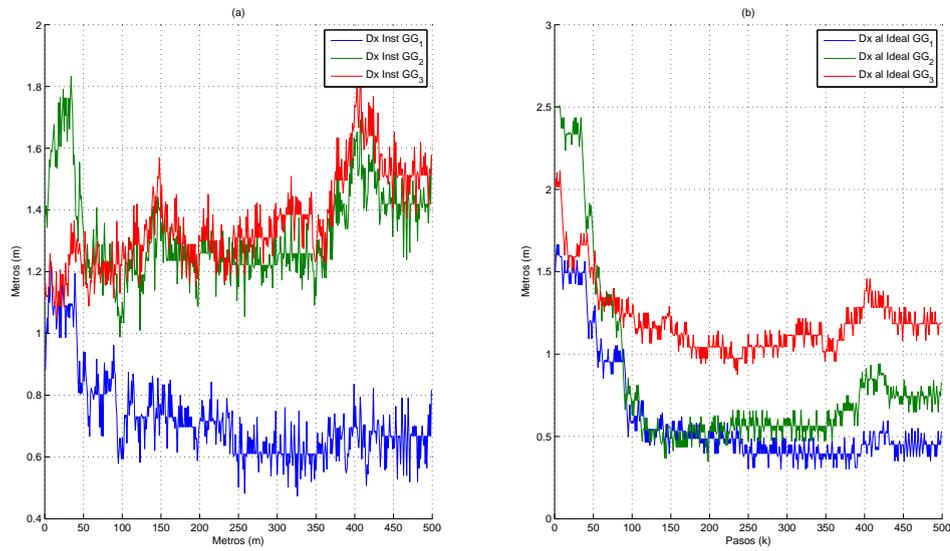


FIGURA 7.6: Simulación 23 Distancia al Punto Óptimo: (a) Instantáneo (b) Ideal.

Para cada Router Robótico se expone una figura dividida en ocho gráficos: (a) Posición de los nodos y desplazamiento del Router Robótico, (b) Indicadores de Tendencia, módulo de la diferencia y Suma de valores de RSSI, (c) Diferencia entre los valores de los indicadores actuales y pasados, (d) Recompensa $R_{(s \times a)}$, (e) Estado (S), (f) Valor Calculado $Q_{s \times a}$, (g) Distancia al Punto Óptimo y (h) RSSI capturado de los vínculos.

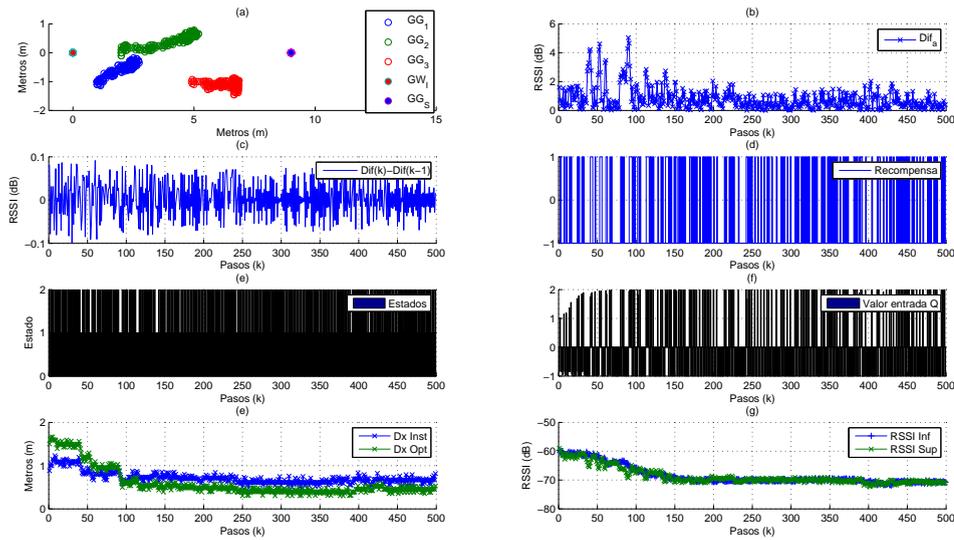


FIGURA 7.7: Simulación 20 unidad GG_1 : (a) Posición de Nodos,(b) Indicadores de Tendencia, (c) Pendiente de Indicadores,(d) Recompensa $R_{(s \times a)}$, (e) Estado (S), (f) Valor Calculado $Q_{s \times a}$, (g) Distancia al Punto Óptimo instantáneo e ideal (h) RSSI Superior e Inferior.

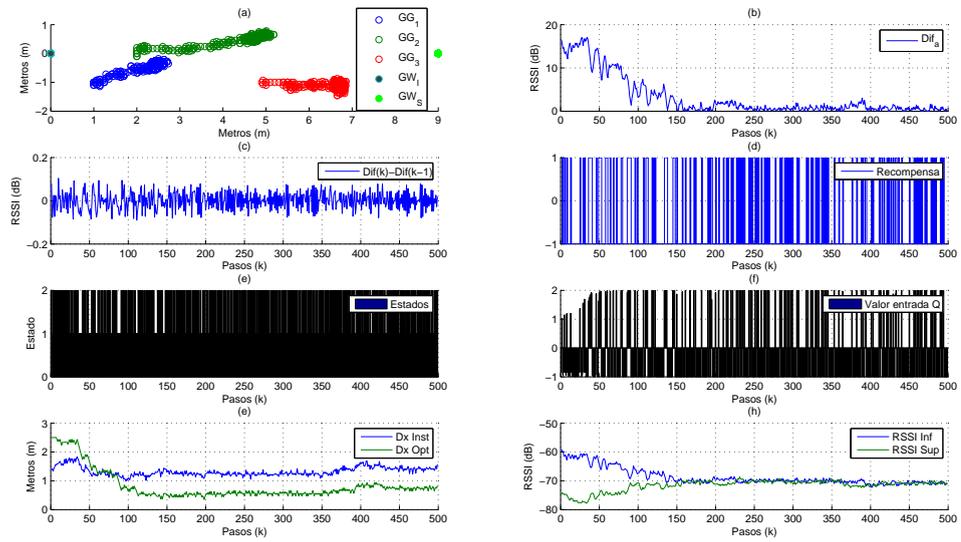


FIGURA 7.8: Simulación 20 unidad GG_2 : (a) Posición de Nodos,(b) Indicadores de Tendencia, (c) Pendiente de Indicadores,(d) Recompensa $R_{(s \times a)}$, (e) Estado (S), (f) Valor Calculado $Q_{s \times a}$, (g) Distancia al Punto Óptimo instantáneo e ideal (h) RSSI Superior e Inferior.

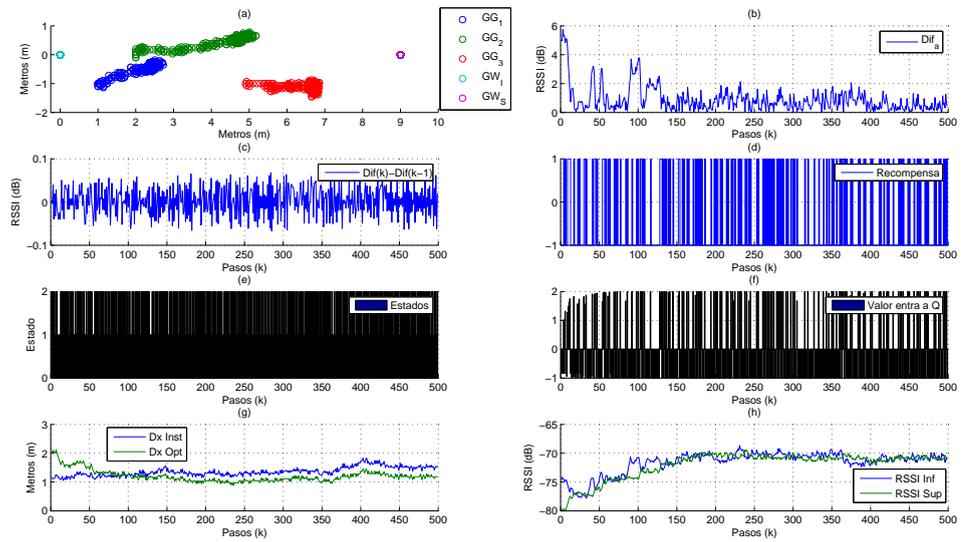


FIGURA 7.9: Simulación 20 unidad GG_3 : (a) Posición de Nodos,(b) Indicadores de Tendencia, (c) Pendiente de Indicadores,(d) Recompensa $R_{(s \times a)}$, (e) Estado (S), (f) Valor Calculado $Q_{s \times a}$, (g) Distancia al Punto Óptimo instantáneo e ideal (h) RSSI Superior e Inferior.

7.4.2. Análisis de los resultados.

El algoritmo de mínimos movimientos expone los siguientes resultados en la simulación 20 que corresponde a una simulación escogida porque representa el comportamiento de la red cuando la distancia entre los terminales se encuentra entre las zonas II y III. El algoritmo converge, apreciable en la Figura 1, además, cumple con los requerimientos de minimizar la diferencia e igualar los valores de RSSI y, lo más relevante, que todos los valores de los vínculos de la red convergen en las cercanías de -70 dB, expuesto en la Figura 2. La distancia al PO instantáneo no entrega información de mucha utilidad, en cambio la gráfica de distancia a PO ideal, expone claramente que la distancia de GG a PO disminuye en relación a las condiciones iniciales. Las Figuras 4,5,6 exponen los valores calculados y medidos de cada unidad GG. Lo más importante a señalar es que los valores de entrada a la matriz Q que corresponde a SS2, se mantienen constantes en -1 . Esto se debe a que en la elección de las acciones del estado de SS2 no la define el algoritmo Q, sino que es predefinido Retroceder o generar una acción aleatoria. Es posible concluir en base a las figuras expuestas, que representan mas de 100 simulaciones, que el algoritmo logra converger en las cercanías de PO para el modelo de red expuesto, y, lo más importante, que iguala los valores de RSSI en la red en las cercanías de un valor único. La distancia hacia PO no tiende a cero, pero es mejor que las posiciones iniciales anteriores.

En la Figura 7.4 muestra el comportamiento de la red compuesta por cinco unidades para el algoritmo de Mínimos Movimientos en función de las iteraciones. Es posible apreciar que los nodos móviles no salen del área comprendida entre las dos unidades estáticas. La Figura 7.6 representa las distancia al Punto Óptimo, 7.6 (a) instantáneo y (b) ideal, La distancia al punto óptimo instantáneo no es concluyente, pero la Figura 7.6 (b) expone claramente una mejora en relación a las ubicaciones iniciales de los nodos disminuyendo la distancia.

Aunque la distancia al Punto Óptimo decrece (Figura 7.3), no es posible juzgar el comportamiento general del algoritmo. La Figura 7.5 permite evaluar el rendimiento del algoritmo, figura que expone los indicadores identificadores Dif_a y las gráficas del RSSI de los vínculos prioritarios. El algoritmo muestra dos tendencias favorables: La primera tendencia es que el módulo de la diferencia disminuye a medida que avanzan las iteraciones ($Pasos(k)$). La segunda tendencia es que los RSSI pertenecientes a los vínculos superiores e inferior a pesar de partir de valores muy distintos, logran estrechar su diferencia, lo que no se observó con los Algoritmo anteriores. Una observación aún más importante es que todos los RSSI de las tres unidades convergen en un valor próximo, para el caso de la Simulación 23 el valor de convergencia aproximada es $-70dB$ apreciable en la Figura 7.5 (b), (d) y (f).

Las figuras 7.7, 7.8 y 7.9, exponen las tendencia de las métricas que permiten al algoritmo converger en las cercanías del Punto Óptimo, es posible observar en Figura (f), de cada uno los Agentes móviles, que no hay proceso de aprendizaje para los Estados-Acción que pertenecen a SS_2 debido a que la Acción a ejecutar en ese caso es retroceder, representado en la gráfica por los valores negativos que son constantes.

Capítulo 8

Aseguramiento de Enlaces Inalámbricos de datos mediante Router Robóticos.

La Heurística de mínimos movimientos demostró ser eficiente en una red con más de una unidad GG . El presente trabajo tiene como finalidad desarrollar un Router Robótico para la problemática de aseguramiento de enlaces inalámbricos de datos mediante una colonia de robot móviles autónomos. Por este motivo la estrategia de control debe ser evaluada en un modelo donde el terminal cabeza de red sea un robot de comportamiento independiente. En este capítulo se plantea un sistema básico de inteligencia colectiva (inteligencia de enjambre) que coordina la activación de las unidades GG . En el modelo planteado es ejecutada la Heurística de mínimos movimientos en las unidades GG para dar servicio de aseguramiento de enlaces a una unidad objetivo que simula ser un robot explorador.

8.1. Formulación del Modelo de Exploración.

Se plantea una red inalámbrica con tres tipos de terminales; unidades estáticas Gateway GW , Router Robóticos Gangway GG y unidades de comportamiento independiente Target TG . El sistema a analizar fue planteado en el capítulo Caso de Estudio, correspondiente a una red compuesta de; un GW , tres GG y un TG . Los detalle de este sistema son expuesto en el Capítulo 4. La unidad Gangway se nombrará como base y todas las unidades móviles en el origen de las simulaciones se encuentran es su cercanía. La unidad Target TG realiza desplazamientos simulando el comportamiento de un robot

explorador. El modelo de red a evaluar la estrategia de control es expuesto en la Figura 8.1.

La unidad exploradora (TG) se despliega de una coordenada aledaña a la Base (GW). La unidad TG al alejarse de la base puede llegar a la zona de calidad inservible y perder la comunicación con la base GW . Para evitar la pérdida de el link de comunicación se despliegan unidades GG para dar el servicio de anclaje de red (Tethering).

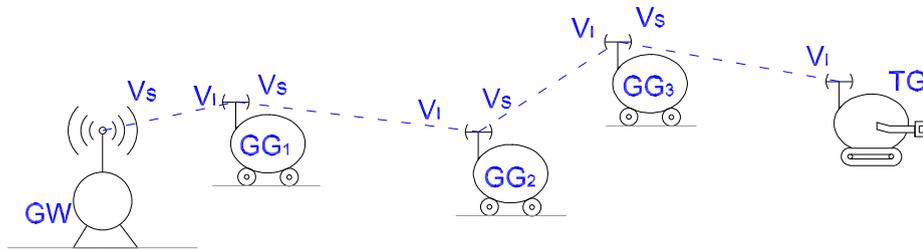


FIGURA 8.1: Modelo de aseguramiento de enlaces mediante Robot Autónomos; Topología de red, Vínculos prioritarios y orden de despliegue.

Vínculos prioritarios de unidades.

En una red de cinco unidades Figura 8.1, se designan los vínculos prioritarios para cada unidad GG . La unidad de comienzo de red corresponde a una unidad Gateway GW capaz de vincularse a una unidad, ésta en una primera instancia corresponde a TG , vínculo que debería modificarse cada vez que se active una unidad GG . El explorador activa una unidad GG por la atenuación de la calidad de señal, el vínculo debe pasar de la unidad TG_s a la unidad GG . La misma lógica es aplicada cada vez que se requiera agregar otra unidad GG al link para asegurar el enlace de comunicación. La modificación de los vínculos prioritarios para cada activación de unidades genera discontinuidades en las gráficas de RSSI al pasar de una unida a otra.

Para facilitar el entendimiento se establecen vínculos prioritarios fijos, asumiendo que una unidad GG desactivada (no en movimiento) se considera como unidad Base. Los vínculos son: La unidad GW_I que posee sólo un vínculo prioritario que corresponde al vínculo prioritario inferior de la unidad GG_1 . La unidad GG_1 comparte un link de comunicación con GG_2 correspondiente al vínculo prioritario superior de la unidad GG_1 y el vínculo prioritario inferior para GG_2 . La unidad GG_2 comparte un link de comunicación con GG_3 correspondiente al vínculo prioritario superior de la unidad GG_2 y el vínculo prioritario inferior para GG_3 . Por último la unidad GG_3 comparte un link de comunicación con GG_2 correspondiente al vínculo prioritario inferior de GG_3 y un link

de comunicación de la unidad TG_S correspondiente al vínculo prioritario superior de GG_3 .

Activación de Unidades.

La finalidad del presente trabajo es diseñar una estrategia de control para un Router Robótico, por lo cual se designa una estrategia de comportamiento general simple, para evaluar el algoritmo de control de las unidades GG . La estrategia simple sólo se encarga de la activación de las unidades GG . La activación de las unidades GG es determinada por la primera transición del vínculo superior, entre las zonas de calidad de señal I (buena) a la II (aceptable). En referencia al Cuadro 5.4 se identifica un valor umbral de activación μ_{UM} de $-68(dB)$

Desplazamiento de explorador y restricciones cinemáticas.

Los desplazamientos de la unidad TG pueden ser combinaciones de las acciones definidas para las unidades GG más una décima acción: mantener la posición (no moverse). La velocidad de desplazamiento de la unidad TG es restringida cuando el factor ν_{TG} es menor a 1. Se agrega como restricción al problema que la Unidad TG posea una velocidad menor que las GG , para facilitar las acciones de las unidades móviles ante cambios de posición de la unidad TG .

Coordenadas iniciales de las Unidades.

Las coordenadas de las unidades deben obedecer a los siguientes criterios: El primero consiste en que la posición inicial de TG corresponda a una coordenada en la proximidad de la base, coordenada que lo ubique en la primera zona de calidad de señal. El segundo criterio es una consideración pensada en sistemas reales, la cual indica que no pueden partir dos unidades en la misma coordenada, además la separación entre terminales debe ser levemente mayor a un $\Delta Paso$ para evitar colisiones.

* Consideraciones en las coordenadas iniciales.

Una coordenada inicial para una unidad GG favorable es aquella en donde la unidad GG , al activarse, queda en vista directa entre el vínculo inferior y el vínculo superior. Una condición desfavorable para la activación de GG es aquella cuando en el momento de activación, GG no se encuentra en vista directa con sus vínculos. * Una condición favorable en función de la distancia a PO es cuando al activar la unidad GG la distancia a PO es mayor a la formada entre PO y los vínculos prioritarios.

8.2. Parámetros de simulación del Controlador de Mínimos Movimientos en un modelo de exploración

Para desarrollar una simulación en la plataforma del modelo de red de exploración, es necesario indicar los valores para la ejecución de los Algoritmos, conceptualizado en los cuadros Parámetros para la ejecución de la simulación. Para realizar simulaciones en el modelo de exploración es preciso señalar los parámetros nuevos que corresponden a: Factor de velocidad de la unidad TG (ν_{TG}), Umbral de activación (μ_{UM}) y la trayectoria de la unidad TG . La trayectoria de la unidad TG para el simulador, se especifica en un vector cuyos elementos son las acciones a realizar (Λ_{TG}). Las acciones corresponden a la Figura 7.1 incluyendo retroceder A_9 y otra acción que no genera desplazamientos en una iteración (A_{10}).

El vector de acciones para Λ_{TG} es visualizado para una simulación mediante una figura que expone dos gráficas, cada una de ellas representa el desplazamiento que realizará TG en cada eje. Cada figura representa el desplazamiento de un eje en función de las iteraciones.

8.3. Desempeño del Router Robótico para un desplazamiento del explorador paralelo a los ejes.

Para evaluar el desempeño del Algoritmo de mínimos movimientos en un modelo de exploración, se efectuaron diferentes simulaciones para una trayectoria establecida de la unidad TG . La Figura 8.2 , expone en forma de coordenadas rectangulares el desplazamiento de TG . La Figura 8.2 (a) expone los valores de la componente en el eje de la abscisa de cada iteración y la Figura 8.2 (b) expone los valores los componente en el eje de la ordenada de cada iteración. El desplazamiento de TG corresponde a una trayectoria recta en el eje de la ordenada con algunos momentos de detención, luego cambia de desplazamiento del eje de la abscisa a la ordenada, donde TG al final queda estático, representado en las Figuras 8.2 y 8.2 que mantienen valores constantes.

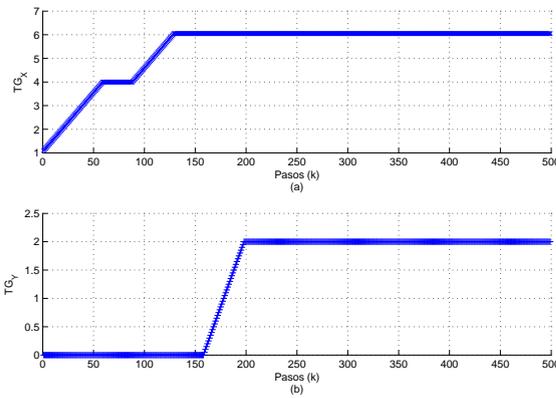


FIGURA 8.2: Desplazamiento recto de la unidad TG ; (a) componente en abscisa y (b) componente en ordenada.

Cada simulación consta de: un cuadro con los parámetros de simulación, una Figura que expone de manera gráfica el comportamiento de la red para cada iteración y una gráfica con los valores de Dif_a y RSSI de los vínculos prioritarios.

Los valores escogidos para identificar la eficacia de el Algoritmo, es el módulo de la diferencia que nos indica una tendencia de proximidad a PO y los valores de RSSI que en lo ideal deben converger en la cercanías de un valor único para la red. La primera unidad en activarse corresponde a la unidad GG_3 , luego la unidad GG_2 y por último la unidad GG_1 , manteniendo los vínculos prioritarios expuestos anteriormente.

La velocidad de desplazamiento de TG corresponde a la mitad de la velocidad de las unidades GG . En función de los desplazamientos, la unidad TG se desplaza la mitad que GG en un $Paso(k)$. Las simulaciones 21 y 22 poseen una ubicación inicial favorable. La simulación 23 parte de una ubicación inicial desfavorable.

8.3.1. Simulaciones para explorador de movimientos paralelos

En la simulación 21 los parámetros de simulación son los siguientes, presentes en el Cuadro 8.1.

CUADRO 8.1: Parámetros para ejecución de simulaciones 21.

Parámetros	: valores
Nk	: 500.
V_{pi}	: $[0 \ 0 \ 0,15 \ 0 \ 0,3 \ 0 \ 0,45 \ 0 \ 1 \ 0]$
$\Delta Paso$: 0.1(m).
Modelo de RSSI	: Log-TJP.
$M \times P$: 20.
Estados	: SS_1 y SS_2 .
Acciones	: $A_1 \ A_2 \ A_3, A_3, A_5 \ A_6 \ A_7, A_8$ y A_9 .
Recompensa	: $SS_1 = 1$ y $SS_2 = -1$.
Indice de aprendizaje	: $\gamma = 0,5$ y $\alpha = 0,5$.
Matriz Q inicial	: $Q_{(S \times A)} = 0$.

La primera Figura 8.3, gráfica tridimensional donde la abscisa y ordenada representan el plano correspondiente a la plataforma de simulación (en metros). El tercer eje perpendicular al plano representa las coordenadas en el plano de cada iteración ($Pasos(k)$). Las coordenadas cercanas al origen del eje perpendicular, corresponden a los primeros movimientos de color azul, cambiando de tonalidad a medida que avanza la ejecución hasta el color rojo.

La segunda Figura 8.4 expone seis gráficas, dos por unidad GG de manera ordenada, representando los valores escogidos para identificar la eficacia. La que se representa mediante la aproximación de los valores de RSSI de la red.

En la simulación 22 los parámetros de simulación son los siguientes, presentes en el Cuadro 8.2.

La primera Figura 8.5, gráfica tridimensional donde la abscisa y ordenada representan el plano correspondiente a la plataforma de simulación (en metros). El tercer eje perpendicular al plano representa las coordenadas en el plano de cada iteración ($Pasos(k)$). Las coordenadas cercanas al origen del eje perpendicular, corresponden a los primeros movimientos de color azul, cambiando de tonalidad a medida que avanza la ejecución hasta el color rojo.

La segunda Figura 8.6 expone seis gráficas, dos por unidad GG de manera ordenada, representando los valores escogidos para identificar la eficacia. La que se representa mediante la aproximación de los valores de RSSI de la red.

CUADRO 8.2: Parámetros para ejecución de simulaciones 22.

Parámetros	: valores
Nk	: 500.
V_{pi}	: $[0 \ 0 \ 0,15 \ 0 \ 0,3 \ 0 \ 0,45 \ 0 \ 1 \ 0]$.
$\Delta Paso$: 0.1(m).
Modelo de RSSI	: Log-TJP.
$M \times P$: 20.
Estados	: SS_1 y SS_2 . .
Acciones	: $A_1 \ A_2 \ A_3, A_3, A_5 \ A_6 \ A_7, A_8$ y A_9 .
Recompensa	: $SS_1 = 1$ y $SS_2 = -1$.
Indice de aprendizaje	: $\gamma = 0,5$ y $\alpha = 0,5$.
Matriz Q inicial	: $Q_{(S \times A)} = 0$.

En la simulación 23 los parámetros de simulación son los siguientes, presentes en el Cuadro 8.3.

CUADRO 8.3: Parámetros para ejecución de simulaciones 23.

Parámetros	: valores
Nk	: 500.
V_{pi}	: $[0 \ 0 \ -0,15 \ 0 \ -0,3 \ 0 \ -0,45 \ 0 \ 1 \ 0]$.
$\Delta Paso$: 0.1(m).
Modelo de RSSI	: Log-TJP.
$M \times P$: 20.
Estados	: SS_1 y SS_2 . .
Acciones	: $A_1 \ A_2 \ A_3, A_3, A_5 \ A_6 \ A_7, A_8$ y A_9 .
Recompensa	: $SS_1 = 1$ y $SS_2 = -1$.
Indice de aprendizaje	: $\gamma = 0,5$ y $\alpha = 0,5$.
Matriz Q inicial	: $Q_{(S \times A)} = 0$.

La primera Figura 8.7, gráfica tridimensional donde la abscisa y ordenada representan el plano correspondiente a la plataforma de simulación (en metros). El tercer eje perpendicular al plano representa las coordenadas en el plano de cada iteración ($Pasos(k)$). Las coordenadas cercanas al origen del eje perpendicular, corresponden a los primeros movimientos de color azul, cambiando de tonalidad a medida que avanza la ejecución hasta el color rojo.

La segunda Figura 8.8 expone seis gráficas, dos por unidad GG de manera ordenada, representando los valores escogidos para identificar la eficacia. La que se representa mediante la aproximación de los valores de RSSI de la red.

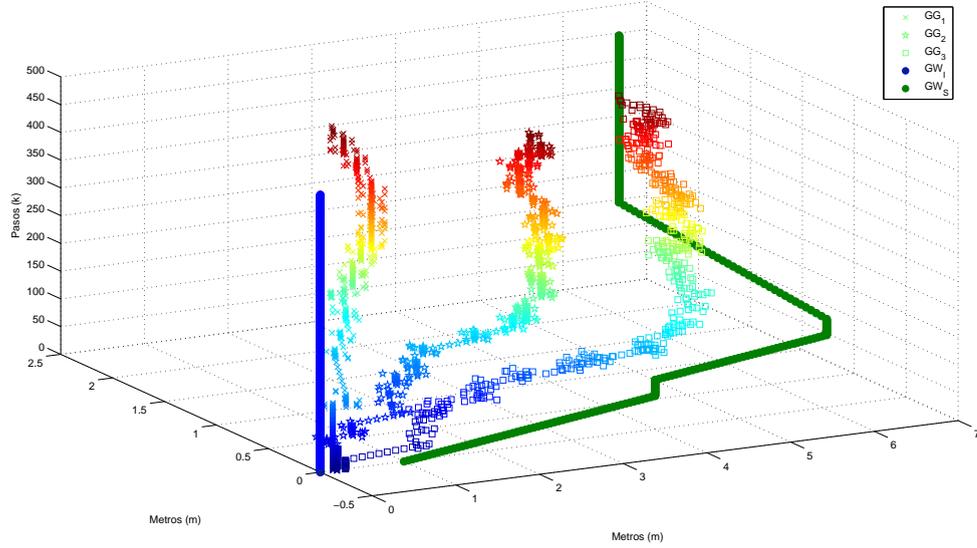


FIGURA 8.3: Simulación 21 desplazamiento de los Nodos en función de las las Pasos.

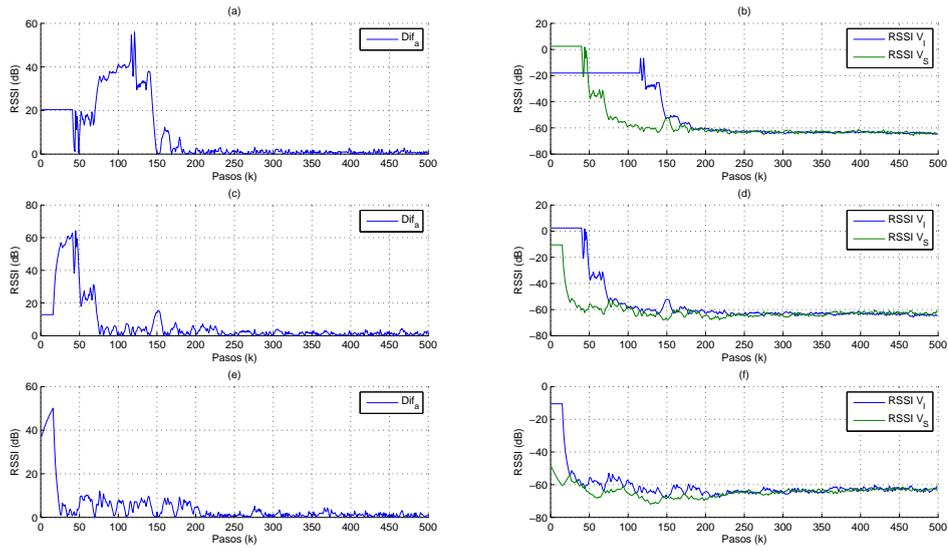


FIGURA 8.4: Simulación 21 Módulo de la Diferencia y RSSI de vínculos prioritarios para cada Agente Móvil:(a) $Difa$ de la unidad GG_1 , (b) RSSI capturado de la unidad GG_1 , (c) $Difa$ de la unidad GG_3 (d) RSSI capturado GG_3 .(a) RSSI capturado GG_1 , (e) $Difa$ de la unidad GG_2 (c) RSSI capturado GG_2 ,(d) RSSI capturado GG_3 .

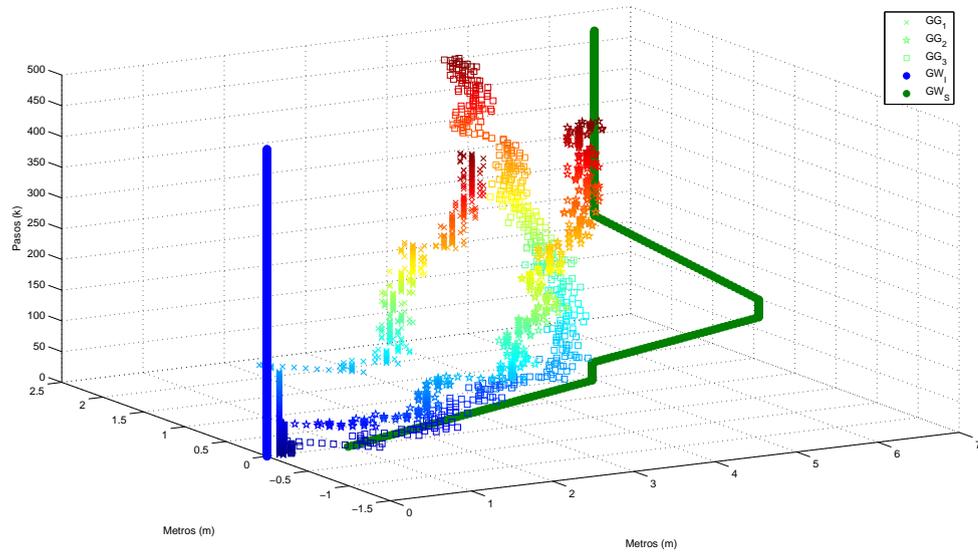


FIGURA 8.5: Simulación 22 desplazamiento de los Nodos en función de las las Pasos

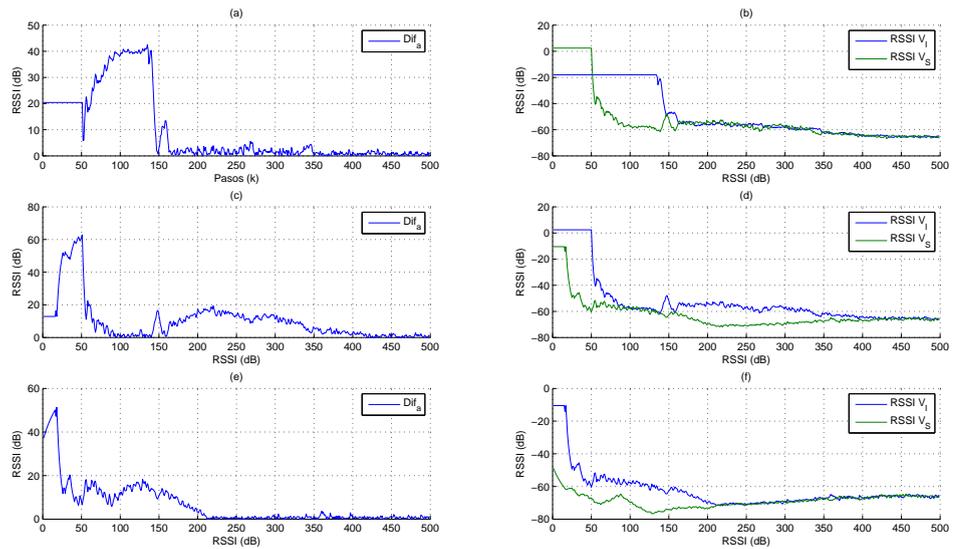


FIGURA 8.6: Simulación 22 Módulo de la Diferencia y RSSI de vínculos prioritarios para cada Agente Móvil:(a) $Difa$ de la unidad GG_1 , (b) RSSI capturado de la unidad GG_1 , (c) $Difa$ de la unidad GG_3 (d) RSSI capturado GG_3 .(a) RSSI capturado GG_1 , (e) $Difa$ de la unidad GG_2 (c) RSSI capturado GG_2 ,(d) RSSI capturado GG_3 ..

8.4. Desempeño del Router Robótico para un desplazamiento diagonales cursados

Para evaluar el desempeño del algoritmo de mínimos movimientos en un modelo de exploración con un desplazamiento de mayor complejidad, para que su utilización

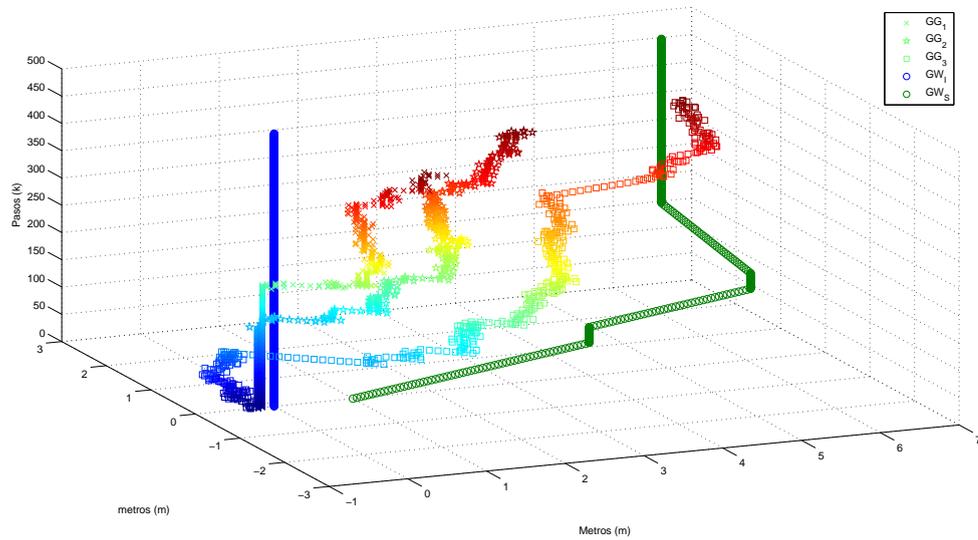


FIGURA 8.7: Simulación 23 desplazamiento de los Nodos en función de las las Pasos.

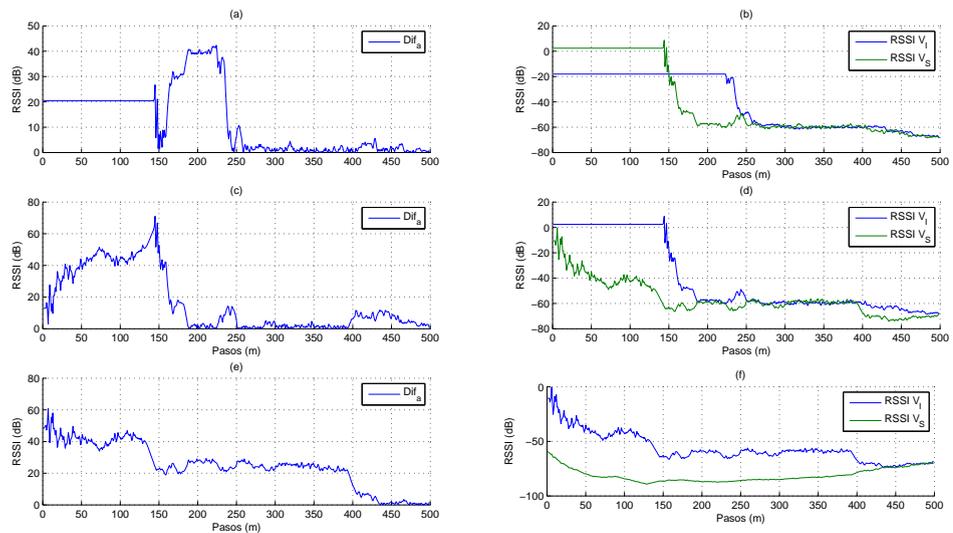


FIGURA 8.8: Simulación 23 Módulo de la Diferencia y RSSI de vínculos prioritarios para cada Agente Móvil:(a) $Difa$ de la unidad GG_1 , (b) RSSI capturado de la unidad GG_1 , (c) $Difa$ de la unidad GG_3 (d) RSSI capturado GG_3 .(a) RSSI capturado GG_1 , (e) $Difa$ de la unidad GG_2 (c) RSSI capturado GG_2 ,(d) RSSI capturado GG_3 .

en un sistema real donde la trayectoria no será conocida, sea factible. Se efectuaron diferentes simulaciones para una trayectoria en zigzag con un patrón compuesto de ángulo constantes (90°).

La Figura 8.9 , expone en forma de coordenadas rectangulares el desplazamiento de TG . La Figura 8.9 (a) expone los valores del componente en el eje de la abscisa de

cada iteración y la Figura 8.9 (b) expone los valores del componente en el eje de la ordenada de cada iteración.

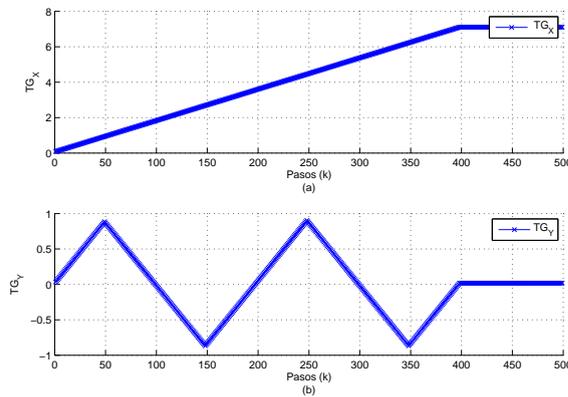


FIGURA 8.9: Desplazamiento Zigzag de la unidad TG ; (a) componente en abscisa y (b) componente en ordenada.

Cada simulación consta de: un cuadro con los parámetros de simulación, una Figura que expone de manera gráfica el comportamiento de la red para cada iteración y una gráfica con los valores de $Difa$ y RSSI de los vínculos prioritarios.

Los valores escogidos para identificar la eficacia de el algoritmo, es el módulo de la diferencia que nos indica una tendencia de proximidad a PO y los valores de RSSI que en lo ideal deben converger en la cercanías de un valor único para la red. La primera unidad en activarse corresponde a la unidad GG_3 , luego la unidad GG_2 y por último la unidad GG_1 , manteniendo los vínculos prioritarios expuestos anteriormente.

La velocidad de desplazamiento de TG corresponde a la mitad de la velocidad de las unidades GG . En función de los desplazamientos, la unidad TG se desplaza la mitad que GG en un $Paso(k)$. Todas las simulaciones poseen posiciones iniciales no favorables.

8.4.1. Simulaciones para explorador diagonal cruzada

En la simulación 24 los parámetros de simulación son los siguientes, presentes en el Cuadro 8.4.

La primera Figura 8.10, gráfica tridimensional donde la abscisa y ordenada representan el plano correspondiente a la plataforma de simulación (en metros). El tercer eje perpendicular al plano representa las coordenadas en el plano de cada iteración ($Pasos(k)$). Las coordenadas cercanas al origen del eje perpendicular, corresponden a los primeros movimientos de color azul, cambiando de tonalidad a medida que avanza la ejecución hasta el color rojo.

CUADRO 8.4: Parámetros para ejecución de simulaciones 24.

Parámetros	: valores
Nk	: 500.
V_{pi}	: $[0 \ 0 \ 0 \ -0,15 \ 0 \ -0,3 \ 0 \ -0,45 \ 0 \ 0,1]$.
$\Delta Paso$: 0.1(m).
Modelo de RSSI	: Log-TJP.
$M \times P$: 20.
Estados	: SS_1 y SS_2 .
Acciones	: $A_1 \ A_2 \ A_3, A_3, A_5 \ A_6 \ A_7, A_8$ y A_9 .
Recompensa	: $SS_1 = 1$ y $SS_2 = -1$.
Indice de aprendizaje	: $\gamma = 0,5$ y $\alpha = 0,5$.
Matriz Q inicial	: $Q_{(S \times A)} = 0$.

La segunda Figura 8.11 expone seis gráficas, dos por unidad GG de manera ordenada, representando los valores escogidos para identificar la eficacia. La que se representa mediante la aproximación de los valores de RSSI de la red.

En la simulación 24 los parámetros de simulación son los siguientes, presentes en el Cuadro 8.5.

CUADRO 8.5: Parámetros para ejecución de simulaciones 25.

Parámetros	: valores
Nk	: 500.
V_{pi}	: $[0 \ 0 \ 0 \ -0,15 \ 0 \ -0,3 \ 0 \ -0,45 \ 0 \ 0,1]$.
$\Delta Paso$: 0.1(m).
Modelo de RSSI	: Log-TJP.
$M \times P$: 20.
Estados	: SS_1 y SS_2 .
Acciones	: $A_1 \ A_2 \ A_3, A_3, A_5 \ A_6 \ A_7, A_8$ y A_9 .
Recompensa	: $SS_1 = 1$ y $SS_2 = -1$.
Indice de aprendizaje	: $\gamma = 0,5$ y $\alpha = 0,5$.
Matriz Q inicial	: $Q_{(S \times A)} = 0$.

La primera Figura 8.12, gráfica tridimensional donde la abscisa y ordenada representan el plano correspondiente a la plataforma de simulación (en metros). El tercer eje perpendicular al plano representa las coordenadas en el plano de cada iteración ($Pasos(k)$). Las coordenadas cercanas al origen del eje perpendicular, corresponden a los primeros movimientos de color azul, cambiando de tonalidad a medida que avanza la ejecución hasta el color rojo.

La segunda Figura 8.13 expone seis gráficas, dos por unidad GG de manera ordenada, representando los valores escogidos para identificar la eficacia. La que se representa mediante la aproximación de los valores de RSSI de la red.

En la simulación 26 los parámetros de simulación son los siguientes, presentes en el Cuadro 8.3.

CUADRO 8.6: Parámetros para ejecución de simulaciones 26.

Parámetros	: valores
Nk	: 500.
V_{pi}	: $[0 \ 0 \ 0 \ -0,15 \ 0 \ -0,3 \ 0 \ -0,45 \ 0 \ 0,1]$.
$\Delta Paso$: 0.1(m).
Modelo de RSSI	: Log-TJP.
$M \times P$: 20.
Estados	: SS_1 y SS_2 .
Acciones	: $A_1 \ A_2 \ A_3, A_3, A_5 \ A_6 \ A_7, A_8$ y A_9 .
Recompensa	: $SS_1 = 1$ y $SS_2 = -1$.
Indice de aprendizaje	: $\gamma = 0,5$ y $\alpha = 0,5$.
Matriz Q inicial	: $Q_{(S \times A)} = 0$.
Matriz Q inicial	: $Q_{(S \times A)} = 0$.

La primera Figura 8.14, gráfica tridimensional donde la abscisa y ordenada representan el plano correspondiente a la plataforma de simulación (en metros). El tercer eje perpendicular al plano representa las coordenadas en el plano de cada iteración ($Pasos(k)$). Las coordenadas cercanas al origen del eje perpendicular, corresponden a los primeros movimientos de color azul, cambiando de tonalidad a medida que avanza la ejecución hasta el color rojo.

La segunda Figura 8.15 expone seis gráficas, dos por unidad GG de manera ordenada, representando los valores escogidos para identificar la eficacia. La que se representa mediante la aproximación de los valores de RSSI de la red.

8.5. Conclusiones Análisis de resultados del algoritmo de mínimos movimientos en modelo de exploración

Las simulaciones consideraron posiciones iniciales favorables y desfavorables de las unidad GG en relación a sus vínculos, en los dos escenarios de simulación planteados se presentaron movimiento recto y movimiento en zigzag. Utilizando la estrategia de activación de unidades planteado mediante gfd y restringiendo la velocidad de desplazamiento mediante kjj, se concluye lo siguiente.

Que todas las simulaciones presentaron Acciones que no conducen a GG a la zona de calidad IV inservible. Las simulaciones presentan un comportamiento similar al evaluado en despliegue dinámico de unidades (red de cinco nodos). Cada simulación presenta dos resultados favorables:

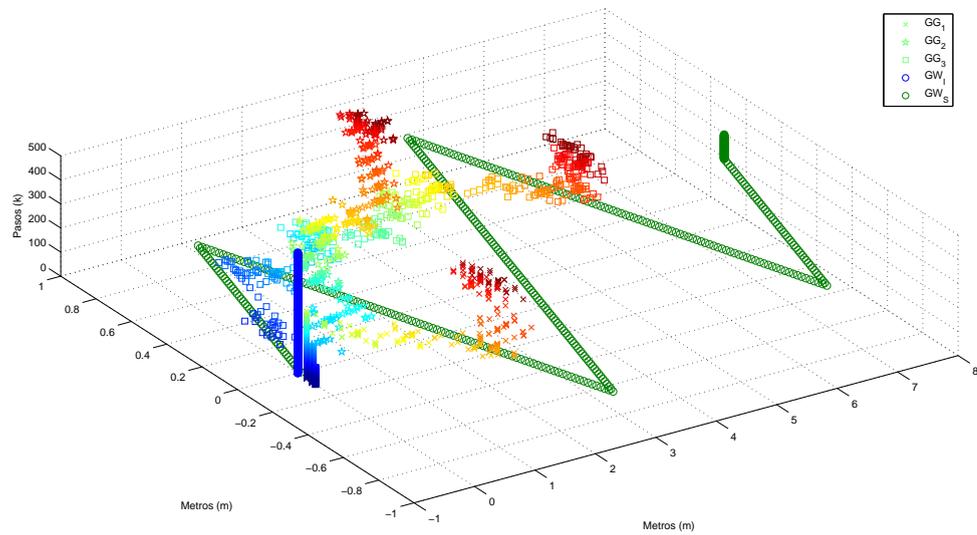


FIGURA 8.10: Simulación 24 desplazamiento de los Nodos en función de las las Pasos.

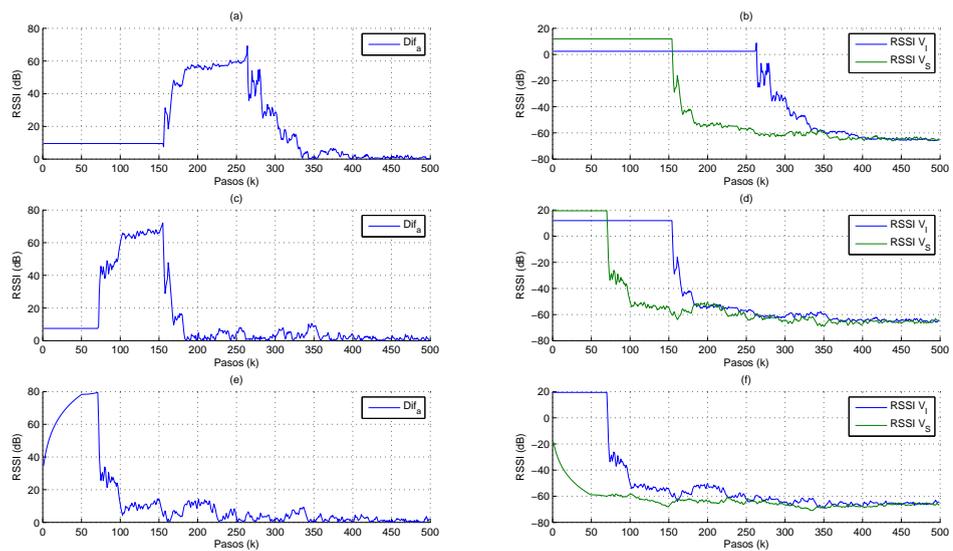


FIGURA 8.11: Simulación 24 Módulo de la Diferencia y RSSI de vínculos prioritarios para cada Agente Móvil:(a) $Difa$ de la unidad GG_1 , (b) RSSI capturado de la unidad GG_1 , (c) $Difa$ de la unidad GG_3 (d) RSSI capturado GG_3 .(a) RSSI capturado GG_1 , (e) $Difa$ de la unidad GG_2 (c) RSSI capturado GG_2 ,(d) RSSI capturado GG_3 .

1.- La minimización del indicador de orientación $Difa$. 2.- La aproximación de los RSSI de los vínculos Prioritarios en las cercanías el valor para cada unidad de la red.

Se confirma los resultados del capítulo anterior, donde la estrategia de Mínimos Movimientos entrega favorables resultados para el problema de red planteado.

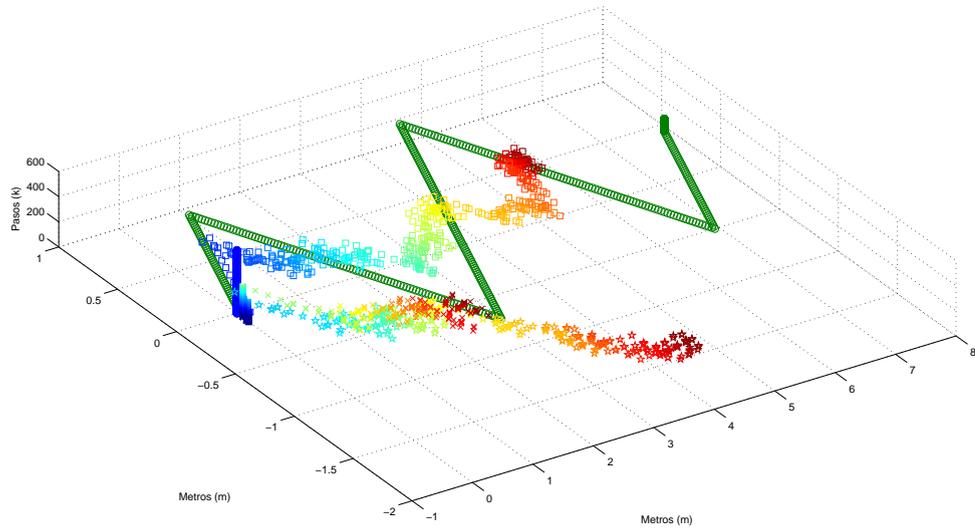


FIGURA 8.12: Simulación 25 desplazamiento de los Nodos en función de las las Pasos.

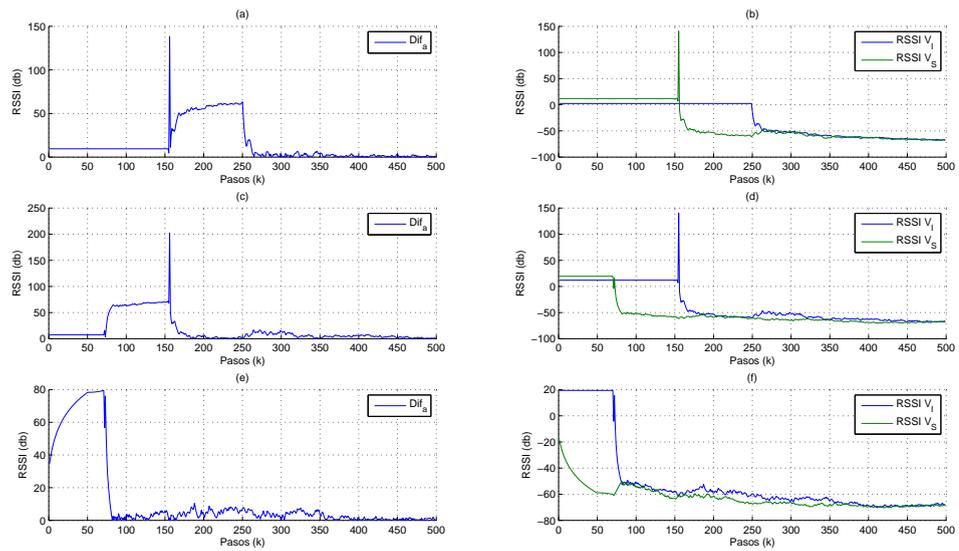


FIGURA 8.13: Simulación 25 Módulo de la Diferencia y RSSI de vínculos prioritarios para cada Agente Móvil:(a) Dif_a de la unidad GG_1 , (b) RSSI capturado de la unidad GG_1 , (c) Dif_a de la unidad GG_3 (d) RSSI capturado GG_3 .(a) RSSI capturado GG_1 , (e) Dif_a de la unidad GG_3 (c) RSSI capturado GG_2 ,(d) RSSI capturado GG_3 .

Por los resultados obtenidos se concluye la viabilidad de la aplicación del algoritmo para un modelo de Aseguramiento de Enlaces Inalámbricos de datos mediante Router Robóticos.

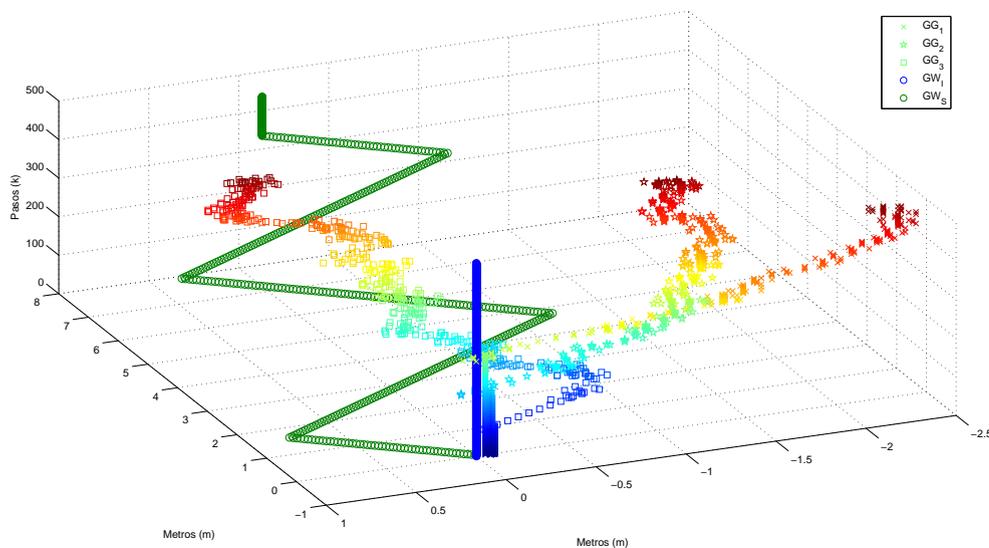


FIGURA 8.14: Simulación 26 desplazamiento de los Nodos en función de las Pasos.

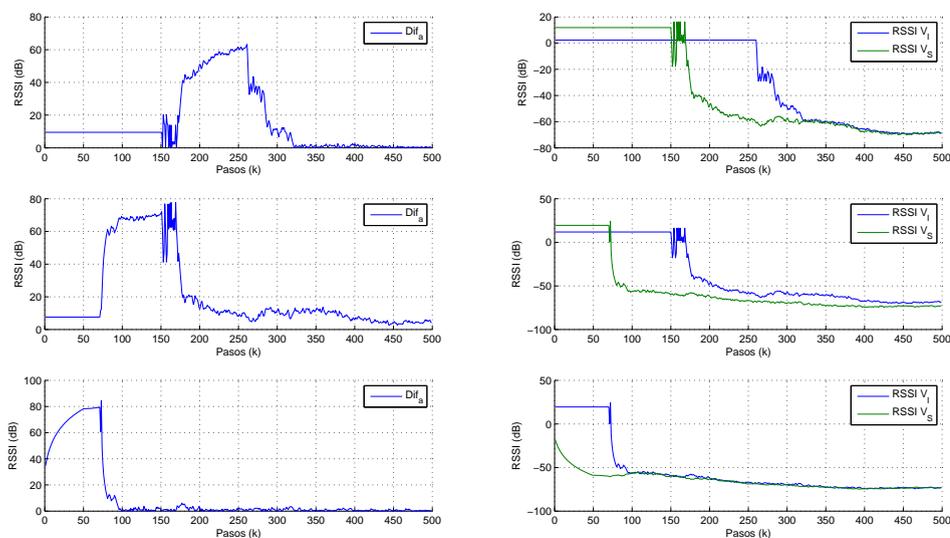


FIGURA 8.15: Simulación 26 Módulo de la Diferencia y RSSI de vínculos prioritarios para cada Agente Móvil:(a) $Difa_a$ de la unidad GG_1 , (b) RSSI capturado de la unidad GG_1 , (c) $Difa_b$ de la unidad GG_2 (d) RSSI capturado GG_2 .(a) RSSI capturado GG_1 , (e) $Difa_c$ de la unidad GG_3 (c) RSSI capturado GG_3 ..

8.6. Conclusiones Generales

Según los análisis de las estrategias de control desarrolladas en los capítulos anteriores, una forma de juzgar la eficacia de los algoritmos de control para Router Robóticos, son; lograr que la unidad o unidades convergen en una coordenada estable e igualar los valores de RSSI entorno a un valor único para la red. En base a estos planteamientos el Algoritmo de mínimos movimientos es eficaz para el modelo expuesto. La eficiencia del algoritmo no se encuentra cuantificada, una forma de cuantificar la eficiencia es mediante el error formado entre el valor de RSSI que presenta PO y el que se obtiene en la coordenada donde el algoritmo posiciona a la unidad GG .

El Algoritmo es eficaz debido a que logra que la red convergen e iguale los valores de RSSI. Su eficiencia no se pudo determinar con certeza puesto que al comparar los resultados de la estrategia de control con los valores ideales de RSSI que corresponden a PO, entregarán resultados no deseables por el error.

Una justa comparación de Algoritmo es evaluar su resultado con otra estrategia de control, lo cual no ha sido posible debido a que hasta el momento no se han encontrado en el estado del arte un algoritmo que realice una función similar.

Capítulo 9

Conclusiones

El problema que plantea el caso de estudio de este trabajo es realizar anclaje de red (Teathering), mediante una colonia de robots móviles a un robot explorador. El problema de Teathering al ser analizado, presentó variadas complejidades, por lo cual se decidió subdividir el problema en tres, desarrollando en profundidad la problemática de la estrategia de control de un Router Robótico.

En el capítulo 5, se desarrollaron los experimentos de los que se puede concluir una hipótesis que consiste en, hacer que un Router Robótico minimice la diferencia de RSSI y maximice la suma de RSSI. Además se planteó una segunda hipótesis que consistió en que el modelo de controlar más apropiado para cumplir la primera hipótesis según el marco teórico, fuera una estrategia de aprendizaje por refuerzo. Las hipótesis fueron conceptualizadas en Heurísticas que se basaron en una navegación que utilizó solamente el RSSI capturado de las tramas de recepción, para poder orientarse hacia PO. Se plantearon diferentes modelos de control basados en el comportamiento de los indicadores de orientación cumpliendo las hipótesis anteriores. La evaluación de las diferentes estrategias, fueron desarrolladas en un modelo no idealizado de RSSI-Distancia para aproximar los resultados a valores reales.

En el capítulo 6 se evaluó un controlador que premiaba el cumplimiento de minimizar la diferencia y maximizar la suma mediante la estrategia de Q learning evaluado; sin aprendizaje inicial, con aprendizaje inicial y modificando los primeros movimientos de GG . Con lo mencionado anteriormente no fue posible lograr converger al Router Robótico en las cercanías de PO. Estos resultados fueron la primera información del fenómeno de falsos positivos que fue detectada en todas las demás simulaciones, siendo los falsos positivos, movimientos erróneos calificados como favorables.

Para obtener la primera solución factible que logró converger al Router Robótico en una coordenada, se planteó el controlador de Estado Único Binario. La estrategia de estado único binario resumía el conocimiento de la red obtenido mediante los indicadores de orientación en dos estados, representados por el cumplimiento del objetivo maximizar el vínculo lejano. Este Algoritmo logra posicionar al Router Robótico en una coordenada en las cercanías de PO, para una red de 3 unidades (dos estáticas y una móvil), aunque su posición inicial sea desfavorable. Esta estrategia de control no logra convergencia en una coordenada en todos los experimentos a GG, para el modelo de despliegue dinámico de unidades (red de dos unidades estáticas y tres móviles).

Se concluye que los problemas de divergencia se deben a dos motivos. El primer motivo es la realización de movimientos innecesarios en busca de una orientación y el segundo motivo es que movimientos erróneos son calificados como favorables. En el capítulo 7, se plantea la estrategia final que se utilizó en el problema de Teathering. Para desarrollar esta estrategia en primera instancia, fueron definidos tres objetivos que intentaban caracterizar con la mayor precisión posible la evaluación del beneficio de una acción. En segunda instancia fue intentado evaluar la obtención de las acciones más favorables para el Router Robótico, concluyendo que aunque se amplíen los objetivos a cumplir en pos de caracterizar mejor la evaluación de una acción, se presenta el problema de los falsos positivos, no consiguiendo una tendencia de las acciones favorables.

Basado en los resultados anteriores fue ideada la estrategia de control de mínimos movimientos. En esta estrategia se generaron ocho estados, donde seis de ellos eran difíciles de juzgar si representaban una acción favorable o no. Para evitar ambigüedades se acotó a dos estados; cumplimiento de todos los objetivos y no cumplimiento de todos los objetivos. La confección de estos estados buscaba evitar realizar movimientos innecesarios y falsos positivos. Los Router Robóticos al realizar una acción, solo mantienen su posición si son cumplidos todos los objetivos, de lo contrario retroceden a la coordenada anterior. Estrategia que logra convergencia de los Router Robóticos en los modelos de red, donde los demás controladores planteados fallaron.

En el capítulo 8 fue evaluado la estrategia de Mínimos Movimientos en un modelo de red diseñado para simular el problema general de la exploración mediante Robots Móviles autónomos, donde los Router Robóticos logran igualar los RSSI de toda la red. El algoritmo de Mínimos Movimientos es eficaz debido a que logra posicionar a los Agentes Robóticos en una coordenada y logra converger en las cercanías de un valor a todos los RSSI pertenecientes a los vínculos de las unidades. La eficiencia del Algoritmo evaluada en la sección 8B, es difícil de juzgar, debido a que el error es calculado mediante la diferencia de los valores ideales versus los entregados por el algoritmo. Esto significa que

se compara con el mejor valor posible (el óptimo). Una evaluación más justa sería contrastar los resultados del algoritmo planteado con otras estrategias de control, señalando así, ventajas y desventajas de la estrategia de control de Mínimos Movimientos con otras.

En el análisis bibliográfico, no fue posible encontrar un algoritmo de control para Router Móviles que pudiera ser aplicado al problema del caso de estudio. Si se encontraron modelos de Router Robóticos pensado en; espacios acotados (pasillos, edificios), despliegue dinámico en base a enlaces múltiples, modelos que buscan las cercanías de una unidad mediante relaciones probabilísticas de RSSI y variada literatura de localización y navegación en redes inalámbricas. Para el caso de estudio de este trabajo no se encontraron algoritmos de control que cumplieran con todas las condiciones solicitadas.

La contribución de este trabajo al Estado del Arte de las redes de actuadores y sensores inalámbricos son las siguientes, Analizar y segmentar el problema de explotación mediante Robots Móviles y entregar un algoritmo de control para un Router Robótico. Todo lo realizado en este trabajo puede ser conceptualizado en un problema de optimización, donde los valores a converger son desconocidos. Para lo cual fue desarrollado un algoritmo basado en modelos existentes en la literatura de WSN's (WASN), además se generó

o una plataforma informática de simulación. Finalmente una conclusión básica pero importante de señalar, es que los resultados obtenidos al aplicar la estrategia de control de Mínimos Movimientos en las redes expuestas, son mejores que no aplicar.

Bibliografía

- [1] Agudo de Carlos, A. (2009). Sistema de localización de dispositivos móviles basada en wireless lan.
- [2] Akyildiz, I. F. and Kasimoglu, I. H. (2004). Wireless sensor and actor networks: research challenges. *Ad hoc networks*, 2(4):351–367.
- [3] Al Salami, N. M. (2009). Ant colony optimization algorithm. *UbiCC Journal*, 4(3):823–826.
- [4] Alliance, Z. (2013a). Zigbee.
- [5] Alliance, Z. (2013b). Zigbee alliance, control your world.
- [6] Arzola, L. B.-H. A. C. (2012). *Diseño y construcción de una colonia de mini-robots para la implementación de algoritmos de inteligencia de enjambre*. Tesis de Ingeniero de Ejecución en Electrónica, Universidad del Bío-Bío.
- [7] Camazine, S. (2003). *Self-organization in biological systems*. Princeton University Press.
- [8] Chen, X. and Tan, J. (2009). An adaptive mobile robots tethering algorithm in constrained environments. In *Proceedings of the 2009 IEEE/RSJ international conference on Intelligent robots and systems, IROS'09*, pages 1377–1382, Piscataway, NJ, USA. IEEE Press.
- [9] Digi (2013a). The digimesh networking protocol.
- [10] Digi (2013b). Need wireless choose xbee.
- [11] Dorigo, M., Di Caro, G., and Gambardella, L. M. (1999). Ant algorithms for discrete optimization. *Artificial life*, 5(2):137–172.
- [12] Duran-Faundez, C. (2013). Proyecto fidie 422010: Diseño y construcción de una colonia de micro-robots para la implementación de algoritmos de inteligencia de enjambre.

- [Faúndez and Carrasco] Faúndez, J. A. S. and Carrasco, C. A. Sistema de control basado en la percepción de unidades móviles y reacciones anticipadas mediante el uso de tecnologías inalámbricas.
- [14] Herman Bruyninckx, J. D. S. (2013). Advanced robot control systems (h06u9a).
- [15] IEEE (2013a). Ieee 802: Local and metropolitan area network standards.
- [16] IEEE (2013b). Ieee 802.15TM: Wireless personal area networks (pans).
- [17] Instruments, N. (2013a). ¿qué es una red de sensores inalámbricos?
- [18] Instruments, T. (2013b). Calculation and usage of lqi and rssi.
- [19] Kenyeres, J., Sajban, S., Farkas, P., and Rakus, M. (2010). Indoor experiment with wsn application. In *MIPRO, 2010 Proceedings of the 33rd International Convention*, pages 863–866.
- [20] Kim, S. (2004). Structural health monitoring using wireless sensor networks,” berkeley deeply embedded network system course report. Technical report.
- [21] Kiriy, E. and Buehler, M. (2002). Three-state extended kalman filter for mobile robot localization. *McGill University., Montreal, Canada, Tech. Rep. TR-CIM*, 5.
- [22] Lapuente, M. J. L. (2013). Robot y agentes.
- [23] Li, X., Mao, Y., and Liang, Y. (2008). A survey on topology control in wireless sensor networks. In *Control, Automation, Robotics and Vision, 2008. ICARCV 2008. 10th International Conference on*, pages 251–255.
- [24] Li, Y., Wu, T.-J., and Hill, D. J. (2003). An accelerated ant colony algorithm for complex nonlinear system optimization. In *Intelligent Control. 2003 IEEE International Symposium on*, pages 709–713. IEEE.
- [25] Low, K.-S., Win, W., and Er, M.-J. (2005). Wireless sensor networks for industrial environments. In *Computational Intelligence for Modelling, Control and Automation, 2005 and International Conference on Intelligent Agents, Web Technologies and Internet Commerce, International Conference on*, volume 2, pages 271–276.
- [26] Mainwaring, A., Culler, D., Polastre, J., Szewczyk, R., and Anderson, J. (2002). Wireless sensor networks for habitat monitoring. In *Proceedings of the 1st ACM International Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications, WSNA '02*, pages 88–97, New York, NY, USA. ACM.
- [27] Mao, Y., Zhou, X., and Zhu, Y. (2008). An energy-aware coverage control protocol for wireless sensor networks. In *Information and Automation, 2008. ICIA 2008. International Conference on*, pages 200–205.

- [28] Martínez, D., Blanes, F., Balbastre, P., Simo, J., and Crespo, A. Design of control applications on wsan with mesh architecture. In *Ibero-American Conference on Trends in Engineering: Wireless Sensors Networks Session*.
- [29] Martínez, D., Blanes, F., Balbastre, P., Simo, J., and Crespo, A. Design of control applications on wsan with mesh architecture. In *Ibero-American Conference on Trends in Engineering: Wireless Sensors Networks Session*.
- [30] Michael, N., Zavlanos, M. M., Kumar, V., and Pappas, G. J. (2009). Maintaining connectivity in mobile robot networks.
- [31] Muñoz, M. A., López, J. A., and Caicedo, E. F. (2008). Inteligencia de enjambres: sociedades para la solución de problemas (una revisión). *Ingeniería e Investigación*, 28(2):119–130.
- [32] Nakayama, H., Fadlullah, Z. M., Ansari, N., and Kato, N. (2011). A novel scheme for wsan sink mobility based on clustering and set packing techniques. *Automatic Control, IEEE Transactions on*, 56(10):2381–2389.
- [33] Oliveira, T., Raju, M., and Agrawal, D. P. (2012). Accurate distance estimation using fuzzy based combined rssi/lqi values in an indoor scenario: Experimental verification. *Network Protocols and Algorithms*, 4(4):174–199.
- [34] Ollero, A., Maza, I., Rodríguez-Castaño, A., Martínez-de Dios, J., Caballero, F., and Capitán, J. (2012). Proyecto aware. integración de vehículos aéreos no tripulados con redes inalámbricas de sensores y actuadores. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI*, 9(1):46–56.
- [35] Pezeshkian, N., Neff, J. D., and Hart, A. (2012). Link quality estimator for a mobile robot. Technical report, DTIC Document.
- [Pezeshkian et al.] Pezeshkian, N., Nguyen, H. G., and Burmeister, A. Unmanned ground vehicle non-line-of-sight operations using relaying radios. In *IASTED Robotics and Applications (RA 2006)*, pages 17–20.
- [37] Polo, E. M. G. Técnicas de localización en redes inalámbricas de sensores.
- [38] Polo, E. M. G. Técnicas de localización en redes inalámbricas de sensores.
- [39] R., W. F. (2011). *Curso Moderno en Teoría y Diseños de Antenas*. Universidad del Bío Bío.
- [Rao et al.] Rao, A., Trivedi, V., and Richaria, V. Mobile positioning system using a mathematical approach.

- [41] Reddy, P. P. and Veloso, M. M. (2011a). Rssi-based physical layout classification and target tethering in mobile ad-hoc networks. In *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2011 IEEE/RSJ International Conference on*, pages 2327–2332. IEEE.
- [42] Reddy, P. P. and Veloso, M. M. (2011b). Rssi-based physical layout classification and target tethering in mobile ad-hoc networks. In *IROS*, pages 2327–2332. IEEE.
- [43] Reddy, P. P. and Veloso, M. M. (2011c). Rssi-based physical layout classification and target tethering in mobile ad-hoc networks. In *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2011 IEEE/RSJ International Conference on*, pages 2327–2332. IEEE.
- [44] Richards, S., Gibbs, R. A., Weinstock, G. M., Brown, S. J., Denell, R., Beeman, R. W., Gibbs, R., Bucher, G., Friedrich, M., Grimmelikhuijzen, C. J., et al. (2008). The genome of the model beetle and pest *tribolium castaneum*. *Nature*, 452(7190):949–955.
- [45] Russell, S. J. and Norvig, P. (2004). *Inteligência artificial, un enfoque moderno*. Elsevier.
- [46] Shi, Z. (2011). *Advanced Artificial Intelligence*. Series on intelligence science. World Scientific.
- [47] Swartz, R., Lynch, J., and Loh, C.-H. (2009). Near real-time system identification in a wireless sensor network for adaptive feedback control. In *American Control Conference, 2009. ACC '09.*, pages 3914–3919.
- [48] TAN, J.-d. and CHEN, X. (2010). An adaptive mobile robot tethering algorithm in constrained environments. *Journal of Shandong University (Engineering Science)*, 40(2):34–42.
- [49] Tan, X. C. W. Z. J. (June 2009). The maintaining of communication links quality in unknown environment. In *ICIA '09*, pages 218 –223.
- [50] Tekdas, O., Isler, V., Lim, J. H., and Terzis, A. (2009). Using mobile robots to harvest data from sensor fields. *Wireless Communications, IEEE*, 16(1):22–28.
- [51] tendencias tecnologicas 21, Y. M. (2013). ¿crean un enjambre de pequeños robots que funciona como un “líquido pensante”?
- [52] Tomasi, W. (2003). *Sistemas de comunicaciones electrónicas*. Pearson educación.
- [53] Trianni, V. (2010). *Evolutionary Swarm Robotics: Evolving Self-Organising Behaviours in Groups of Autonomous Robots*. Studies in Computational Intelligence. Springer.
- [54] Wei, Z. and Tan, J. (2012). Maintaining communication links using a team of mobile robots. In *Int. J. of Computers, Communications y Control*.

-
- [55] Yan, Y. and Mostofi, Y. (2012). Robotic router formation in realistic communication environments. *Robotics, IEEE Transactions on*, 28(4):810–827.
- [56] Zeng, D., He, Q., Leng, B., Zheng, W., Xu, H., Wang, Y., and Guan, G. (2012). An improved ant colony optimization algorithm based on dynamically adjusting ant number. In *Robotics and Biomimetics (ROBIO), 2012 IEEE International Conference on*, pages 2039–2043. IEEE.
- [57] Zickler, S. and Veloso, M. (2010). Rss-based relative localization and tethering for moving robots in unknown environments. In *Robotics and Automation (ICRA), 2010 IEEE International Conference on*, pages 5466–5471. IEEE.