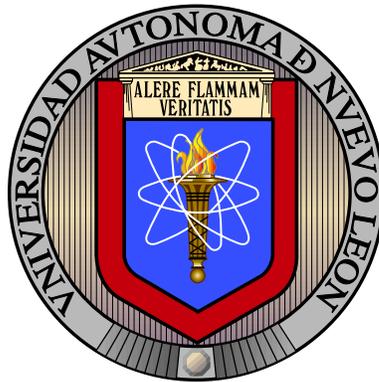


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE LICENCIATURA



OPTIMIZACIÓN DE COSTOS DE REEMPLAZO EN
REDES SENSORAS INALÁMBRICAS

POR

CARLOS ALBERTO CASTILLO SALAZAR

EN OPCIÓN AL GRADO DE

INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA

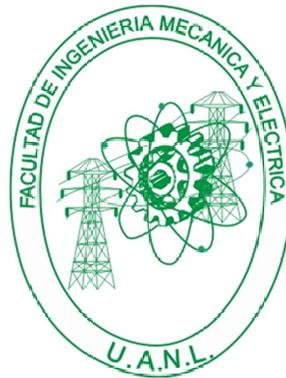
SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, NUEVO LEÓN

OCTUBRE DE 2009

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE LICENCIATURA



OPTIMIZACIÓN DE COSTOS DE REEMPLAZO EN
REDES SENSORAS INALÁMBRICAS

POR

CARLOS ALBERTO CASTILLO SALAZAR

EN OPCIÓN AL GRADO DE

INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA

SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, NUEVO LEÓN

OCTUBRE DE 2009

Universidad Autónoma de Nuevo León
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
División de Estudios de Licenciatura

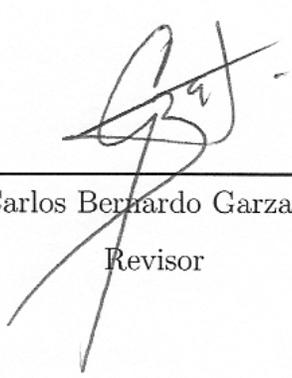
Los miembros del Comité de Tesis recomendamos que la Tesis «Optimización de Costos de Reemplazo en Redes Sensoras Inalámbricas», realizada por el alumno Carlos Alberto Castillo Salazar, con número de matrícula 1249685, sea aceptada para su defensa como opción al grado de Ingeniero Mecánico Electricista.

El Comité de Tesis



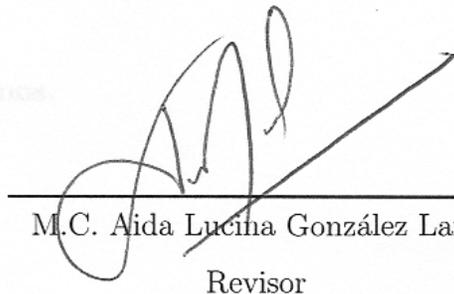
Dra. Satu Ehsa Schaeffer

Asesor



M.C. Carlos Bernardo Garza Treviño

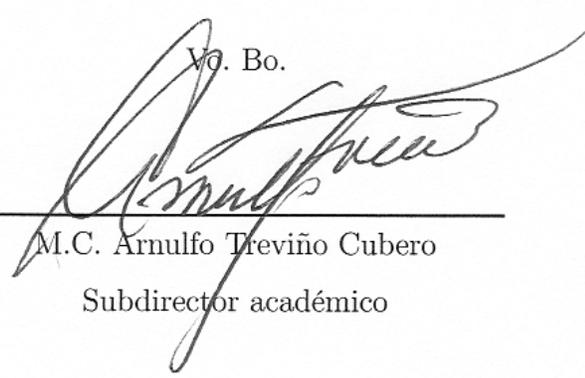
Revisor



M.C. Aida Lucina González Lara

Revisor

Vº. Bo.



M.C. Arnulfo Treviño Cubero

Subdirector académico

San Nicolás de los Garza, Nuevo León, octubre de 2009

Dedico este trabajo a las personas que más me aman, a quienes sin importarles la situación me apoyan, me alientan y confían en mí, especialmente

a Jesús y a María,

a mis padres,

*El Ing. Luis Javier Castillo Granados,
la Sra. Rosa Laura Salazar Macías (†) y
la Sra. Alma Ofelia Chávez Chávez,*

y a mis hermanos.

ÍNDICE GENERAL

Lista de abreviaciones	xx
Lista de símbolos	xxi
Agradecimientos	xxiii
Resumen	xxv
1. Introducción	1
1.1. Planteamiento del problema	3
1.2. Objetivo	5
1.3. Hipótesis	7
1.4. Contribución	8
1.5. Estructura de la tesis	8
2. Antecedentes	10
2.1. Redes	10
2.1.1. Rango de cobertura	11
2.1.2. Titularidad de la red	12

2.1.3.	Transferencia de la información	13
2.1.4.	Topología de la red	14
2.2.	Redes ad hoc	18
2.3.	Redes sensoras inalámbricas	19
2.4.	Partes de una red sensora inalámbrica	23
2.4.1.	Nodos sensores	23
2.4.2.	Unidad de detección	24
2.4.3.	Unidad de procesamiento	32
2.4.4.	Unidad de comunicación	33
2.4.5.	Unidad de energía	36
2.5.	Aplicaciones de las WSN	37
2.5.1.	Aplicaciones militares	38
2.5.2.	Aplicaciones ambientales	40
2.5.3.	Aplicaciones en la salud	42
2.5.4.	Aplicaciones en el hogar	44
2.5.5.	Aplicaciones comerciales	45
2.6.	Factores de diseño	46
2.6.1.	Tolerancia a fallos	46
2.6.2.	Escalabilidad	47
2.6.3.	Costos de producción	48
2.6.4.	Restricciones del hardware	49
2.6.5.	Topología de las WSN	50
2.6.6.	Ambiente	53

2.6.7. Medios de transmisión	54
2.6.8. Consumo de energía	54
2.6.9. Requerimientos	56
3. Modelo	61
3.1. Características generales	61
3.1.1. Enrutamiento	66
4. Generador de redes sensoras	72
4.1. Programado en lenguaje ANSI C	72
4.1.1. Red generada en el terminal	73
4.1.2. Red generada gráficamente	75
4.2. Programado en lenguaje Java	80
4.2.1. Clases	81
4.2.2. Simulación gráfica	85
4.2.3. Simulación no gráfica	95
5. Experimentación	100
5.1. Diseño de los experimentos	100
5.1.1. Medidas para comparación	102
5.1.2. Paisajes generados	103
5.2. Resultados	106
5.2.1. Simulaciones iniciales	106
5.2.2. Simulaciones en campos a sensor generados utilizando solo δ .	110
5.2.3. Simulaciones en campos a sensor generados aleatoriamente . .	112

5.2.4. Simulaciones en campos a sensor generados con parámetros $\delta = 0$, $\gamma = 0.1$ y $\zeta = 0.9$	117
5.2.5. Simulaciones realizadas variando la duración de la corrida . . .	121
5.2.6. Simulaciones realizadas variando el tamaño del paisaje	129
6. Conclusiones y trabajo futuro	131
6.1. Conclusiones	131
6.2. Trabajo futuro	133
A. Resultados	142
A.1. Simulaciones realizadas en el software programado en ANSI C	142
A.2. Simulaciones realizadas en el software programado en Java	143
A.2.1. Simulación gráfica	144
A.2.2. Simulación no gráfica	145
B. Parámetros utilizados en las simulaciones	146
B.1. Simulaciones con 100 SN desplegados	146
B.2. Simulaciones en campos a sensor generados a partir de la distancia . .	147
B.3. Simulaciones en campos a sensor generados aleatoriamente	148
B.4. Simulaciones en campos a sensor generados con los parámetros $\delta = 0$, $\gamma = 0.1$ y $\zeta = 0.9$	149
B.5. Simulaciones realizadas variando la duración de la corrida	150
B.6. Simulaciones realizadas variando la división del paisaje	151

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1. Campo a sensor dividido en zonas con diferentes dificultades de acceso, en una escala del 1 al 10, siendo 1 para un área con fácil acceso. El usuario puede establecer la dificultad de acceso de cada zona.	5
1.2. Red sensora inalámbrica desplegada en un campo a sensor con zonas con diferentes dificultades de acceso.	6
2.1. Rango de cobertura aproximado de las redes [14].	12
2.2. En una malla todos los nodos se interconectan.	14
2.3. Todos los nodos son conectados a un nodo central en la topología en estrella.	15
2.4. En la topología bus todos los nodos son conectados a un solo cable. .	15
2.5. Los dos extremos del nodo están conectados a otro nodo en una topología en anillo.	16
2.6. Varios anillos se conectan mediante nodos comunes para formar la topología de intersección de anillo.	16
2.7. Los nodos se conectan como en una estructura jerárquica en una topología de árbol.	17
2.8. La única restricción para tener una topología irregular es que todos los nodos tengan como mínimo un enlace.	17

2.9. La topología mixta se forma al mezclar diferentes topologías.	18
2.10. Diagrama de una red sensora inalámbrica.	20
2.11. Unidades principales de un nodo sensor.	23
2.12. Unidades adicionales de un nodo sensor. La unidad de detección se divide en el sensor y el conversor analógico a digital, la de procesamiento consta de almacenamiento y un procesador. Las unidades opcionales se observan en líneas punteadas.	24
2.13. Los sensores primarios toman del sistema una magnitud física y la convierten en una más fácil de medir. Otro sensor puede tomar la salida del sensor primario y convertirla en una señal eléctrica.	27
2.14. Diagrama de una red sensora inalámbrica desplegada en un bosque, se muestra el rango de detección de cada nodo sensor y el del usuario.	41
2.15. Nodos sensores desplegados desde un avión en el campo a sensar.	52
2.16. Diferencias entre el enrutamiento centrado en la dirección (a) y el centrado en la información (b) [5].	59
2.17. (a) ER: todos los nodos ubicados dentro de una distancia r_d son seleccionados como fuentes. (b) RS: las fuentes son seleccionadas aleatoriamente [4, 5].	60
3.1. Distancia euclidiana entre dos puntos.	64
3.2. Seleccionar un nodo vecino al cual enviarle la información, tomando en cuenta la energía restante y el costo de reemplazo.	66
3.3. En este caso podría ser conveniente enviar la información por los nodos que tienen un menor costo de reemplazo, a pesar de que implique tener un mayor número de saltos hacia el usuario.	68
3.4. Seleccionar el nodo al cual enviarle la información.	69

4.1. Campo a sensar dividido en zonas con diferente costo de reemplazo, basado solamente en la distancia manhattan.	76
4.2. La distancia manhattan entre dos puntos puede ser definida como el número de segmentos de recta entre ellos.	77
4.3. La letra A representa la zona para la cual se calculará el costo de reemplazo, las zonas enumeradas representan las zonas vecinas, las cuales se promediarán.	78
4.4. Dibujo de la red sensora generada, el diagrama se realiza utilizando la herramienta <i>Xfig</i>	79
4.5. Diagrama de clases del generador de redes sensoras.	84
4.6. Ventana principal del software generador de redes sensoras.	85
4.7. Botones para crear una red, un paisaje de costos y un evento.	85
4.8. Simulación de una red sensora inalámbrica funcionando.	86
4.9. Evento detectado por un nodo sensor, el cual a su vez envía la información a los nodos vecinos.	86
4.10. Botones para mover, pausar, mover paso a paso o detener un evento.	87
4.11. Barra para controlar la velocidad de la simulación. Además se muestra el tiempo transcurrido.	88
4.12. Del menú opciones se despliega el panel de control.	88
4.13. Control del modelo de la red.	88
4.14. Control del rango de detección de la estación base.	89
4.15. Controles para el modelo del paisaje.	89
4.16. Campos a sensar generados con diferente número de divisiones en el paisaje.	90

4.17. Zonas con diferentes costos de reemplazo, combinando los parámetros distancia (δ), aleatoriedad (γ) y promedio de los nodos vecinos (ζ).	90
4.18. Control del evento.	91
4.19. Control de los coeficientes para el enrutamiento.	92
4.20. Control del intervalo y tiempo de vida de los mensajes del usuario a los nodos sensores y de los nodos a sus vecinos.	92
4.21. Control de el consumo de energía en los nodos sensores.	93
4.22. Control de la visualización de la simulación.	94
4.23. Del menú opciones se despliega el panel de control.	95
4.24. Comparación de los parámetros obtenidos en ambas simulaciones mediante diagramas de caja y bigotes. (G) interfaz gráfica, (NG) interfaz no gráfica.	99
5.1. Campos a sensor utilizados en las simulaciones, presentan zonas con diferentes costos de reemplazo, generadas a partir de los coeficientes que aparecen en la tabla 5.2. Cuando se toma una las combinaciones que utilizan un componente aleatorio, independientemente del peso que éste tenga, los campos a sensor generados no son exactamente iguales.	105
5.2. Porcentaje de utilización ($\%u$) de los nodos sensores de cada zona para 100 nodos desplegados, empleando los parámetros mostrados en la tabla B.1.	107
5.3. Costo total (C_t) de los nodos reemplazados de cada zona para 100 nodos desplegados, empleando los parámetros mostrados en la tabla B.1.	109
5.4. 500 nodos desplegados en un campo a sensor generado, utilizando solamente el parámetro δ	111

5.5. 1000 nodos desplegados en un campo a sensor generado utilizando solamente el parámetro δ	112
5.6. 500 nodos desplegados en un campo a sensor generado, utilizando solamente el parámetro ζ	113
5.7. 1000 nodos desplegados en un campo a sensor generado, utilizando solamente el parámetro ζ	115
5.8. 500 nodos desplegados en un campo a sensor generado, utilizando parámetros $\delta = 0$, $\gamma = 0.1$ y $\zeta = 0.9$	118
5.9. 1000 nodos desplegados en un campo a sensor generado, utilizando parámetros $\delta = 0$, $\gamma = 0.1$ y $\zeta = 0.9$	118
5.10. 1000 nodos desplegados en un campo a sensor generado, utilizando solamente el parámetro ζ , con una duración de 9000 pasos.	122
5.11. 1000 nodos desplegados en un campo a sensor generado, utilizando parámetros $\delta = 0$, $\gamma = 0.1$ y $\zeta = 0.9$	124
5.12. Costo de reemplazo respecto al tiempo, en una red con 1000 SN desplegados en un campo a sensor generado aleatoriamente.	127
5.13. Costo de reemplazo normalizado respecto al tiempo, desplegando 1000 SN en un campo a sensor generado aleatoriamente.	127
5.14. Comparación del desempeño en redes con 1000 SN desplegados en un campo a sensor generado, utilizando parámetros $\delta = 0$, $\gamma = 0.1$ y $\zeta = 0.9$, variando el tamaño del paisaje.	129
5.15. Comparación del desempeño de redes con 1000 SN desplegados en un campo a sensor generado aleatoriamente, variando el tamaño del paisaje.	130

ÍNDICE DE TABLAS

2.1. Definición de los tipos de redes sensoras.	22
2.3. Clasificación de sensores.	26
3.1. Datos de entrada al problema.	70
3.3. Sustitución de los datos del problema, mostrados en la tabla 3.1, en la ecuación 3.2.	70
3.5. Según el algoritmo de enrutamiento, es menos costoso enviar la infor- mación al nodo B.	71
4.1. Se ingresan los datos necesarios para construir una red sensora.	73
4.2. El software comienza a procesar los datos y se dispone a generar la red sensora.	73
4.3. Costo de reemplazo de cada subdivisión del campo a sensar, dividido en un paisaje de 5×5	74
4.4. Arreglo que muestra las coordenadas y costo de reemplazo de los nodos sensores desplegados en la red.	74
4.5. Aristas formadas entre los nodos desplegados en la red.	75
4.6. Definir los datos de entrada para la generación de la red.	79

4.7. Se confirman los datos de entrada y se genera la red, mostrada en la figura 4.4.	79
4.8. Paisaje de costos generado por el simulador de redes sensoras.	80
4.9. Parámetros utilizados en la generación de las redes, para ambas interfaces.	96
4.10. Promedio y desviación estandar de los resultados de las simulaciones gráfica y no gráfica.	98
5.1. Combinaciones de los coeficientes de C_r y de N_s utilizadas en las simulaciones que se realizaron.	101
5.2. Coeficientes utilizados para la generación de cinco diferentes campos a sensar.	103
5.3. Porcentajes de aumento o reducción en la utilización de los nodos sensores de cada zona. Los resultados demuestran que los nodos con costos bajos fueron reemplazados más veces implementando el algoritmo con respecto a no implementarlo. Lo contrario sucede con los nodos con un costo alto.	108
5.4. Diferencia de sumatorias de costos totales ($\sum C_t$) para definir el porcentaje de ahorro o pérdida de costos implementando el algoritmo. . .	110
5.5. Diferencia de sumatorias costos totales ($\sum C_t$) y porcentaje de reducción de costos al implementar el algoritmo respecto a no implementarlo, desplegando 500 SN en un campo a sensar generado aleatoriamente. . .	114
5.6. Total de nodos reemplazados para cada zona, comparando la implementación del algoritmo, con los casos en los que no fue implementado, desplegando 500 SN en un campo a sensar generado aleatoriamente. .	114

5.7. Diferencia de sumatorias de costos totales ($\sum C_t$) y porcentaje de reducción de costos al implementar el algoritmo respecto a no implementarlo, desplegando 1000 SN en un campo a sensor generado aleatoriamente. 116

5.8. Total de nodos reemplazados para cada zona, comparando la implementación del algoritmo con los casos en los que no fue implementado, desplegando 1000 SN en un campo a sensor generado aleatoriamente. 116

5.9. Porcentaje de reducción en los reemplazos de nodos con costo alto y de aumento en los nodos con costo bajo, para 1000 nodos desplegados en un campo a sensor generado aleatoriamente. 117

5.10. Diferencia de sumatorias costos totales ($\sum C_t$) y porcentaje de reducción de costos al implementar el algoritmo respecto a no implementarlo, desplegando 500 SN en un campo a sensor generado con $\delta = 0$, $\gamma = 0.1$ y $\zeta = 0.9$ 119

5.11. Diferencia de sumatorias costos totales ($\sum C_t$) y porcentaje de reducción de costos al implementar el algoritmo respecto a no implementarlo, desplegando 1000 SN en un campo a sensor generado con $\delta = 0$, $\gamma = 0.1$ y $\zeta = 0.9$ 119

5.12. Total de nodos reemplazados para cada zona, comparando la implementación del algoritmo con los casos en los que no fue implementado, desplegando 500 SN en un campo a sensor generado con $\delta = 0$, $\gamma = 0.1$ y $\zeta = 0.9$ 120

5.13. Total de nodos reemplazados para cada zona, comparando la implementación del algoritmo con los casos en los que no fue implementado, desplegando 1000 SN en un campo a sensor generado con $\delta = 0$, $\gamma = 0.1$ y $\zeta = 0.9$ 120

5.14. Porcentaje de reducción en los reemplazos de nodos con costo alto y de aumento en los nodos con costo bajo; 1000 nodos desplegados en un campo a sensor generado con $\delta = 0$, $\gamma = 0.1$ y $\zeta = 0.9$ 121

5.15. Diferencia de sumatorias costos totales ($\sum C_t$) y porcentaje de reducción de costos al implementar el algoritmo respecto a no implementarlo, desplegando 1000 SN en un campo a sensor generado aleatoriamente con una duración de 9000 pasos. 122

5.16. Total de nodos reemplazados para cada zona, comparando la implementación del algoritmo con los casos en los que no fue implementado, desplegando 1000 SN en un campo a sensor generado aleatoriamente con una duración de 9000 pasos. 123

5.17. Porcentaje de reducción en los reemplazos de nodos con costo alto y de aumento en los nodos con costo bajo, 1000 nodos desplegados en un campo a sensor generado aleatoriamente con una duración de 9000 pasos. 123

5.18. Diferencia de sumatorias costos totales ($\sum C_t$) y porcentaje de reducción de costos al implementar el algoritmo respecto a no implementarlo, desplegando 1000 SN en un campo a sensor generado con $\delta = 0$, $\gamma = 0.1$ y $\zeta = 0.9$ y una duración de 9000 pasos. 125

5.19. Total de nodos reemplazados para cada zona, comparando la implementación del algoritmo con los casos en los que no fue implementado, desplegando 1000 SN en un campo a sensor generado con $\delta = 0$, $\gamma = 0.1$ y $\zeta = 0.9$ y una duración de 9000 pasos. 125

5.20. Porcentaje de reducción en los reemplazos de nodos con costo alto y de aumento en los nodos con costo bajo, 1000 nodos desplegados en un campo a sensor generado con $\delta = 0$, $\gamma = 0.1$ y $\zeta = 0.9$ y una duración de 9000 pasos. 126

5.21. Costo total respecto al tiempo para cada combinación, desplegando 1000 SN en un campo a sensor generado aleatoriamente con una duración de la simulación de 150000 pasos.	128
5.22. Porcentaje de separación entre el mejor y peor valor de costo total, desplegando 1000 SN en un campo a sensor generado aleatoriamente con una duración de la simulación de 150000 pasos.	128
A.1. Coordenadas y costo de reemplazo de los nodos desplegados.	142
A.2. Aristas formadas entre los nodos desplegados en la red. También se muestra la longitud de las aristas. Para ser reales, la longitud debe ser menor al rango de comunicación establecido (0.3).	143
A.3. Resultados de las 30 simulaciones realizadas en la interfaz gráfica. . .	144
A.4. Resultados de las 30 simulaciones realizadas en la interfaz no gráfica.	145
B.1. Parámetros utilizados en las primeras simulaciones, en las que desplegamos 100 SN.	146
B.2. Parámetros utilizados para simular una red con 500 nodos desplegados, en un campo a sensor generado tomando en cuenta sólo la distancia.	147
B.3. Parámetros utilizados para simular una red con 1000 SN desplegados, en un campo a sensor generado tomando sólo con δ	147
B.4. Parámetros utilizados para simular una red con 500 SN desplegados, en un campo a sensor generado a partir del coeficiente ζ	148
B.5. Parámetros utilizados para simular una red con 1000 SN desplegados, en un campo a sensor generado a partir del coeficiente ζ	148
B.6. Parámetros utilizados para simular una red con 500 SN desplegados, en un campo a sensor generado con $\delta = 0$, $\gamma = 0.1$ y $\zeta = 0.9$	149

B.7. Parámetros utilizados para simular una red con 1000 SN desplegados, en un campo a sensar generado con $\delta = 0$, $\gamma = 0.1$ y $\zeta = 0.9$	149
B.8. Parámetros utilizados para simular una red con 1000 SN, en un campo a sensar generado aleatoriamente y una duración de 9000 pasos.	150
B.9. Parámetros utilizados para simular una red con 1000 SN desplegados, en un gampo a sensar generado con $\delta = 0$, $\gamma = 0.1$ y $\zeta = 0.9$, con una duración 9000 pasos.	150
B.10. Parámetros utilizados para simular una red y observar el comportamiento del costo de reemplazo con respecto al tiempo, en un campo a sensar generado aleatoriamente.	151
B.11. Combinaciones de parámetros utilizadas en las simulaciones, para observar el comportamiento del costo total con respecto al tiempo.	151
B.12. Divisiones de paisaje utilizadas en las simulaciones.	151
B.13. Parámetros utilizados para simular una red con 1000 SN desplegados, en un campo a sensar generado a partir de los coeficientes $\delta = 0$, $\gamma = 0.1$ y $\zeta = 0.9$, variando el tamaño de la división del paisaje.	152
B.14. Parámetros utilizados para simular una red con 1000 SN desplegados, utilizando el coeficiente ζ para la generación del campo a sensar y variando el tamaño de la división del paisaje.	152

LISTA DE ABREVIACIONES

ABR	...	Adaptive-Based Routing.
C4ISR	...	Command, Control, Communications, Computers, Intelligence, Surveillance, Reconnaissance, and Targeting.
DARPA	...	Defense Advanced Research Projects Agency.
ER	...	Event Radius.
FBR	...	Flat-Based Routing.
GPS	...	Global Positioning System.
HCR	...	Hierarchical-Based Routing.
HVAC	...	Heating, Ventiling, and Air Conditioning.
LAN	...	Local Area Network.
MAN	...	Metropolitan Area Network.
MANET	...	Mobile Ad hoc NETWORK.
MEMS	...	MicroElectroMechanical Systems.
MIT	...	Massachusetts Institute of Technology.
PAN	...	Personal Area Network.
RAN	...	Regional Area Network.
RTD	...	Resistance Temperature Detector.
SN	...	Sensor Nodes.
UML	...	Unified Modeling Language.
WAN	...	Wide Area Network.
WSAN	...	Wireless Sensor and Actuator Networks.
WSN	...	Wireless Sensor Networks.

LISTA DE SÍMBOLOS

a_i	=	Identificación de cada valor en un conjunto de resultados.
A_n	=	Número de aristas entre los nodos.
A_u	=	Número de aristas entre los nodos y el usuario.
β	=	Coeficiente del número de saltos.
c_c	=	Consumo de energía por comunicación.
c_d	=	Consumo de energía por detección.
c_e	=	Consumo de energía por recepción.
C_i	=	Costo de reemplazo de nodo sensor.
c_n	=	Consumo de energía normal.
c_p	=	Consumo de energía por procesamiento.
C_u	=	Coordenadas del usuario.
C_n	=	Coordenadas del nodo sensor (x_i, y_i) .
C_r	=	Costo de reemplazo de la zona.
C_t	=	Costo total de los nodos reemplazados para cada zona.
δ	=	Coeficiente de distancia.
d_e	=	Distancia euclidiana entre nodos sensores.
d_m	=	Distancia manhattan.
E_i	=	Energía inicial del nodo sensor.
$E_{i(t)}$	=	Batería restante.
ϵ	=	Coeficiente de energía.
e	=	Cantidad de aristas que contiene la red.
γ	=	Coeficiente de promedio de los vecinos.

i	=	Identificación del nodo sensor.
k	=	Total de valores en una simulación.
m_e	=	Mensaje de evento.
m_u	=	Mensaje de usuario.
m_v	=	Mensaje de vecinos.
N_s	=	Número de saltos al usuario.
n	=	Cantidad total de nodos sensores desplegados.
n_z	=	Cantidad de nodos sensores desplegados por zona.
p	=	Tamaño de la división del paisaje.
p_v	=	Promedio de costos de los nodos vecinos.
ϕ	=	Coefficiente de costo de reemplazo.
φ	=	Densidad de la red sensora inalámbrica.
r	=	Componente aleatorio.
r_c	=	Rango de comunicación del nodo sensor.
r_d	=	Rango de detección del nodo sensor.
r_u	=	Rango de comunicación del usuario.
σ	=	Desviación estándar.
$\sum C_t$	=	Sumatoria de costos de reemplazo.
$\sum m_e$	=	Sumatoria de mensajes de evento.
T_r	=	Total de nodos reemplazados.
t	=	Hora.
t_s	=	Tiempo que dura la simulación.
t_u	=	Intervalo de tiempo para que el usuario envíe mensajes.
t_v	=	Intervalo de tiempo para enviar un mensaje a los nodos vecinos.
to_u	=	Tiempo de vida del mensaje enviado por el usuario.
to_v	=	Tiempo de vida del mensaje a los nodos vecinos.
v_i	=	Nodos vecinos.
\bar{x}	=	Promedio o media aritmética.
ζ	=	Coefficiente de aleatoriedad.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco principalmente a Dios y a mi madre María Santísima, por levantarme en cada caída, mostrarme lo hermosa que es la vida, porque cada aspecto de mi vida depende de Dios, quien es mi roca, mi refugio, mi torre y mi fortaleza en todo momento.

«Yo te he llevado de la mano, hice que las puertas se abrieran ante ti y no volvieran a cerrarse. Yo iré delante de tí y aplanaré las pendientes, destrozaré las puertas de bronce y romperé las trancas de hierro. Te daré los tesoros secretos y las riquezas escondidas, para que sepas que Yo soy Yavé, el Dios que te llamó por tu nombre.»

Is 45, 1-2.

A mis padres, Luis, Laura (†) y Alma por el apoyo incondicional en cada decisión que tomo, por las palabras de aliento, por las correcciones, por los buenos consejos, por ocuparse de mi bienestar y sobre todo por los momentos juntos.

A mis hermanos, Luis, Claudia, Laura, Miguel, Dinorah y Esmeralda, por formar parte de la familia, por regalarme la dicha de ser tío de hasta ahora once sobrinos, por alentarme a ser una mejor persona y por los domingos en casa.

A mis amigos y hermanos en Cristo, por brindarme un abrazo en el momento más oportuno, una sonrisa en el momento más triste y un hombro firme para descansar en los momentos más difíciles. A los grupos parroquiales con los que el Señor me ha permitido compartir momentos inolvidables, Fiat, Shaddai, Ruah, Berith, Sión, PU, etcétera.

A mis amigos, los sacerdotes que el Señor generosamente ha puesto en mi camino, Aymeric, Ramón, Vicente, Victor, Hernán, Julio, Esteban, Jorge, Gerardo, Tomás, Pablo, Luis, Didier, etcétera y los hermanos Juan Lázaro, Benito y Vicente, gracias por entregar su vida al servicio de Dios, por las oraciones y por ser excelentes pastores y ejemplos.

A la Dra. Elisa Schaeffer por ser una excelente asesora de tesis y apoyarme durante toda la realización de mi trabajo. Por la oportunidad que me dió de trabajar con ella, por las enseñanzas, las aclaraciones, las revisiones, los comentarios, los consejos, los regaños, por ayudarme con algunos trámites, entre muchas cosas más. Sobre todo gracias por ayudarme con la programación de la simulación.

A los miembros del comité de tesis, el M.C. Carlos Bernardo Garza Treviño y la M.C. Aída Lucina González Lara, por los comentarios y correcciones acerca del trabajo y por el apoyo con la redacción del artículo de revista.

A Nidia, Vanesa, Tania, Perla y David, estudiantes de maestría y doctorado, y a los profesores de PISIS por los comentarios, explicaciones y recomendaciones. Además, gracias por enseñarme a usar los programas y herramientas empleados en la realización presente trabajo.

La tesis fué escrita en el editor de textos *emacs*, mientras que el documento en *PDF* fue producido por \LaTeX [40, 45]. Para la realización de diagramas y edición de imágenes se utilizó *Gimp* [51, 69] y *Dia* [38]. Para crear imágenes en el software generador de redes sensoras, se utilizó *Xfig* [52, 68] y para graficar los resultados de las simulaciones realizadas se utilizó *Gnuplot* [32, 39]. El diagrama de clases fue generado utilizando el modelador UML *Umbrello* [64].

A mis compañeros, maestros y amigos de la FIME, y de las demás dependencias en que he estudiado, por ayudarme a desarrollarme personal y profesionalmente.

A los proyectos PROMEP 103,5/07/2523 y PROMEP 103,5/08/4804, a través de los cuales recibí una beca durante 24 meses y al proyecto PROVERICYT, por brindarme una beca para la estancia de varano científico.

RESUMEN

Carlos Alberto Castillo Salazar.

Candidato para el grado de Ingeniero Mecánico Electricista.

Universidad Autónoma de Nuevo León.

Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica.

Título del estudio:

OPTIMIZACIÓN DE COSTOS DE REEMPLAZO EN REDES SENSORAS INALÁMBRICAS

Número de páginas: 153.

OBJETIVO: El objetivo de este trabajo es el implementar un algoritmo de enrutamiento para redes sensoras inalámbricas donde, además de los parámetros que actualmente se implementan en algunos algoritmos, como el número de saltos hacia el usuario y la energía restante del nodo sensor, se añada el costo de reemplazo del nodo sensor para decidir la ruta que tomará la información hasta el usuario.

Un algoritmo que tome en cuenta el costo de reemplazo sería de gran utilidad cuando el campo a sensar se divide en zonas con diferentes dificultades de acceso, definidas por el usuario dependiendo de la aplicación. El interés es lograr que los nodos que se encuentren desplegados en zonas con alta dificultad de acceso incrementen su vida útil, de tal manera que el mantenimiento de la red para zonas con costos altos sea programado con menor frecuencia.

Suponiendo que el costo de reemplazo del nodo sensor sea definido por el tiempo que le lleva al usuario sustituirlo, el reemplazar con menor frecuencia los nodos con un costo alto implicaría un ahorro de tiempo, que se ve reflejado en ahorro de dinero en cuanto al mantenimiento de la red.

MÉTODO DE ESTUDIO: Se programó en lenguaje ANSI-C y posteriormente en lenguaje Java un software generador de redes sensoras, simulador del funcionamiento de una red sensora inalámbrica desde la fase de despliegue hasta el reemplazo de los nodos sensores que pierden la vida. Podemos variar entre un total de 23 parámetros para simular la implementación del algoritmo en diferentes aplicaciones.

Utilizando el software se realizaron una serie de experimentos computacionales para evaluar las medidas de desempeño en redes sensoras inalámbricas implementando el algoritmo propuesto y se compararon con los resultados de las simulaciones al no implementarlo.

CONTRIBUCIONES: La contribución consiste en la programación de un software que simula el funcionamiento de una red sensora inalámbrica, desde la fase de despliegue, hasta el reemplazo de los nodos sensores. También se desarrolló un algoritmo de enrutamiento que toma en cuenta el costo de reemplazo del nodo sensor, con la finalidad de reducir la utilización de los nodos desplegados en zonas con costos altos.

Por último, se contribuyó con la experimentación necesaria para determinar en qué tipo de aplicaciones traería beneficios la implementación.

CONCLUSIONES: Los resultados obtenidos al realizar una serie de experimentos permiten concluir que para algunas aplicaciones el algoritmo de enrutamiento cumplió con el objetivo de reducir la utilización y el reemplazo de los nodos sensores con un costo alto.

Firma del asesor: _____

Dra. Satu Elisa Schaeffer

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

Los dispositivos computacionales son muy usados para procesar información centrada en torno al usuario de un sistema, sin embargo, están indirectamente relacionados con un fenómeno físico. En otra clase de aplicaciones, el ambiente físico es el foco de atención y la computación es utilizada para controlar cierto proceso físico, por ejemplo, corregir la presión o la temperatura de un proceso en determinada fábrica. En este caso, la *computación* está integrada con el *control* y directamente relacionada (*immersa*) con el sistema físico [26].

Los sistemas inmersos (en inglés: embedded systems) son frecuentemente utilizados en aplicaciones ingenieriles y su impacto en la vida diaria sigue creciendo a alta velocidad. La computación puede repercutir en gran medida en lo cotidiano, acercándose cada vez más a una visión de “*ambiente inteligente*”, donde muchos diferentes dispositivos pueden reunir y procesar información de distintas fuentes para controlar procesos físicos e interactuar con humanos. Para realizar esta visión, entra en juego otro aspecto importante, además de la computación y el control se necesita de la *comunicación* [30].

Las fuentes de información deben ser capaces de transferirla con la mayor precisión posible hacia el lugar donde se necesita, por ejemplo, a un actuador o al usuario. Para algunas aplicaciones se tiene una solución existente: la *tecnología de comunicación con cables*, sin embargo, para otras aplicaciones el uso de cables representa un importante obstáculo debido a la presencia de algunas desventajas:

1. El cable es caro, además, su mantenimiento es costoso y laborioso.
2. Los cables se desordenan y enredan fácilmente.
3. En ambientes extremos no es posible utilizar cable.
4. El cableado no permite a la red ser completamente móvil.
5. La limitación en la longitud del cable, en algunas aplicaciones, impide a la red encontrarse cerca del fenómeno a sensar.
6. Al dejar de utilizar una red que fué desplegada, en ambientes al aire libre los cables producen mayor contaminación.

Debido a estas razones y a requerimientos específicos de ciertas aplicaciones, en algunos casos la *comunicación inalámbrica* entre los dispositivos es un requerimiento difícil de evitar [26, 30].

Con este objetivo en mente, una nueva clase de redes ha surgido en los últimos años: las llamadas ***redes sensoras inalámbricas*** (en inglés: *Wireless Sensor Networks, WSN*). Las WSN constan de un gran número de pequeños dispositivos inteligentes, llamados *nodos sensores* (en inglés: sensor nodes, SN) [28], que se distribuyen en un lugar determinado y son capaces de interactuar con el medio ambiente.

Los nodos sensores utilizan *sensores convencionales* para tomar una lectura de diversas condiciones o fenómenos como la temperatura, la presión, la vibración, el movimiento, la presencia o ausencia de algo o alguien, entre muchos ejemplos más [1, 30].

Para llevar a cabo sus tareas, los SN cooperan entre sí de manera inalámbrica para formar una red y así recolectar, difundir y analizar la información detectada. Dicha información se hace llegar al usuario final, quien no tiene que estar en contacto directo con la red sensora [16].

Físicamente, los SN son unidades autónomas que constan de cuatro unidades principales [1]:

- Unidad de detección.
- Unidad de procesamiento.
- Unidad de comunicación.
- Unidad de energía.

La vida útil del nodo sensor se rige en gran medida por la duración limitada de la batería a bordo -cuando un nodo sensor queda sin energía, se dice que el nodo muere-, debido a esta importante limitación, los nodos se construyen teniendo muy presente la *conservación de la energía*. En algunas aplicaciones es posible que los nodos sensores pasen algún tiempo en *modo de reposo o durmiente* (en inglés: sleep mode), con el fin de consumir la menor cantidad de energía [1, 2, 3, 27, 62].

Los SN pueden ser *desplegados* manualmente y formar una *topología de red* previamente diseñada, o aleatoriamente, de tal forma que los nodos sensores deban autoorganizarse. Una red sensora inalámbrica presenta una capacidad de autores-tauración, es decir, si un nodo es averiado, destruido o termina su vida útil, la red podrá encontrar nuevas rutas para enviar los datos y sobrevivir aunque algunos nodos dejen de funcionar [1, 2, 3].

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Una red sensora inalámbrica se forma de nodos sensores interconectados sin cables [16]. Al presentarse una conexión inalámbrica, al usuario le es difícil suplir de energía extra al nodo sensor, por lo que la vida útil del mismo depende de la energía que pueda llevar a bordo [27].

Debido a esta importante limitación, gran parte de los esfuerzos en el desarrollo de las WSN van enfocados al *ahorro de energía* [2]. El ahorro de energía en cada nodo sensor se ve a la larga reflejado en una reducción en los costos de mantenimiento de la red.

Existen algunas aplicaciones específicas en las que se pueden llevar a bordo materiales *piezoeléctricos*, los cuales pueden obtener energía del medio ambiente [25]. Un ejemplo de la obtención de energía del medio ambiente es el estudio realizado por investigadores de la Universidad de Washington [29]. En este proyecto se demuestra que es posible obtener energía de los árboles, suficiente para hacer trabajar un pequeño circuito electrónico, como un nodo sensor.

El panorama ideal para una red sensora inalámbrica sería desplegar los nodos sensores y no tener que ocuparse de su mantenimiento ni de su reemplazo, desafortunadamente, en la actualidad esta opción parece aún estar lejos de la realidad. En determinado momento, los nodos sensores deben ser reemplazados, sobre todo cuando la muerte de algunos compromete el funcionamiento de la red en general.

Los reemplazos de los nodos sensores son programados con el fin de reducir los costos de mantenimiento de la red. Si los costos de mantenimiento de la red sensora exceden los beneficios obtenidos, la red puede ser simplemente desechada, generando una considerable cantidad de *basura electrónica* distribuida en el ambiente.

En algunas aplicaciones, los nodos sensores son desplegados en zonas con diferentes *dificultades de acceso*, por consiguiente, le puede ser asignado un *costo de reemplazo* a cada nodo sensor dependiendo de la zona en que se encuentre ubicado. Para este tipo de aplicaciones es para las que va enfocada la aportación.

Por ejemplo, algunos nodos pueden ser colocados en la cima de una montaña, otros en la ladera de la misma y algunos más cerca de la carretera. Se puede deducir que es más difícil para el usuario reemplazar un nodo sensor que se encuentre en la cima de la montaña. Además el reemplazarlo implica mayor tiempo de trabajo, mayor riesgo de sufrir un accidente y por consiguiente un mayor costo. En este tipo de aplicaciones sería de mucha utilidad para el usuario que los nodos con mayor dificultad de acceso incrementaran su vida útil. Otra ventaja radica en reducir los costos de mantenimiento de la red, incrementando las posibilidades de que la red sea útil por un mayor período de tiempo.

La figura 1.1 muestra un diagrama de un campo a sensor dividido en zonas de diferente dificultad de acceso.

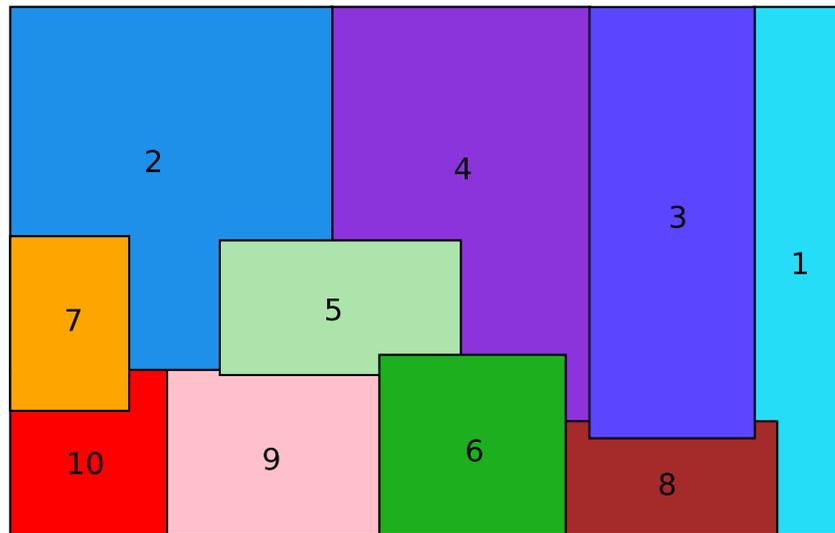


Figura 1.1: Campo a sensor dividido en zonas con diferentes dificultades de acceso, en una escala del 1 al 10, siendo 1 para un área con fácil acceso. El usuario puede establecer la dificultad de acceso de cada zona.

1.2 OBJETIVO

El objetivo es implementar un *algoritmo de enrutamiento* que tome en cuenta el *costo de reemplazo* de los nodos sensores al momento de elegir la ruta por la cual enviar la información al usuario, buscando que los nodos sensores que se encuentren desplegados en zonas con un alto costo de reemplazo puedan permanecer inactivos durante el mayor tiempo posible, con el fin de incrementar su vida útil.

De ser posible, los nodos con un costo alto nunca servirían como escalón hacia el usuario hasta que el fenómeno pase cerca y sean ellos quienes tengan que enviar esa información hacia el usuario. La figura 1.2 muestra un diagrama de nodos sensores desplegados en un campo con diferentes dificultades de acceso.

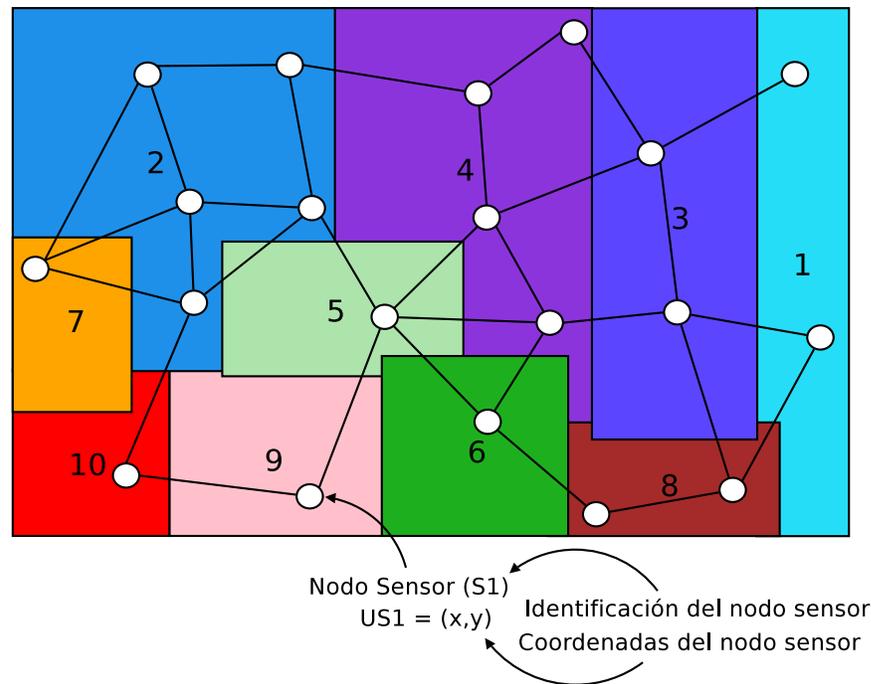


Figura 1.2: Red sensora inalámbrica desplegada en un campo a sensor con zonas con diferentes dificultades de acceso.

Un trabajo relacionado con lo que se desea implementar es el enrutamiento en internet consciente del ahorro de energía, desarrollado en el Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT, por sus siglas en inglés). En esta aportación se desea implementar un algoritmo de enrutamiento de internet que monitorea los cambios en el precio de la energía eléctrica, con la finalidad de dirigir la información hacia donde la energía sea menos costosa. De esta manera se pretende ahorrar hasta millones de dólares en compañías operadoras de una gran cantidad de sistemas de redes, como Google, Yahoo!, Microsoft, Amazon, entre otras [55].

Esta implementación depende en gran medida de la aplicación de la red sensora inalámbrica. Las características que debe de tener una aplicación en la que se pueda implementar este algoritmo de enrutamiento, se mostrarán más adelante.

1.3 HIPÓTESIS

La aportación de este proyecto desea orientarse a aplicaciones de WSN en las que el usuario desee conservar la red, a pesar de la muerte de algunos nodos sensores, es decir, aplicaciones en las que el usuario debe dar mantenimiento a la red, reemplazando los que han dejado de funcionar.

Como se describió en la sección anterior, en ciertas aplicaciones es más sencillo y por consiguiente menos costoso para el usuario acceder a algunas zonas de la red que a otras, por lo que se puede crear una red sensora inalámbrica con diferentes dificultades de acceso.

Las zonas con mayor dificultad de acceso representan un mayor costo al usuario, lo que incrementa el costo total de mantenimiento de la red, por lo tanto, una buena opción sería que el usuario tuviera que reemplazar con mayor frecuencia los nodos que se encuentran en zonas de fácil acceso y en intervalos de tiempo mucho mayores, reemplazar los nodos que se encuentran en zonas con difíciles de acceder.

Se desea implementar un algoritmo de enrutamiento que tome en cuenta los *costos de reemplazo* de los nodos sensores. Esto implica que los nodos con un alto costo de reemplazo sean utilizados lo menor posible, con el fin de incrementar su vida útil, los nodos con un costo de reemplazo bajo serán más utilizados y tendrán que ser reemplazados con mayor frecuencia.

De esta manera, el usuario continuamente le daría mantenimiento a la red en las zonas de fácil acceso, mientras que en las zonas de difícil acceso el mantenimiento sería en intervalos de tiempo mayores. Además, el costo total de reemplazar los nodos sensores se reduciría, comparado con algoritmos que únicamente tomen en cuenta la energía restante del nodo sensor o el número de saltos hasta el usuario.

1.4 CONTRIBUCIÓN

En el presente trabajo se contribuye con el desarrollo de un algoritmo de enrutamiento para redes sensoras inalámbricas. Además del número de saltos hasta el usuario y la energía restante del nodo sensor, se toma en cuenta, como parámetro principal, el costo de reemplazo de los nodos sensores para trazar la trayectoria que la información seguirá hasta llegar al usuario.

Para realizar la experimentación necesaria y determinar bajo qué condiciones es útil implementar el algoritmo propuesto, se programó un software generador de redes sensoras, en el cual se puede simular el funcionamiento de una red sensora inalámbrica, desde la fase de despliegue, hasta el reemplazo de los nodos sensores.

Los experimentos computacionales realizados permitieron determinar en qué tipo de aplicaciones es conveniente implementar el algoritmo de enrutamiento propuesto y definir posibles líneas de investigación para trabajos futuros.

1.5 ESTRUCTURA DE LA TESIS

El presente trabajo de tesis está dividido en los siguientes capítulos: introducción, antecedentes, modelo, generador de redes sensoras programado en *ANSI C* [33] y en *Java* [23], experimentación y resultados, conclusiones y trabajo futuro, para terminar con las referencias bibliográficas y los apéndices.

En este primer capítulo se definieron algunos conceptos básicos sobre las redes sensoras inalámbricas, además se describió, a grandes rasgos, la aportación que se desea realizar. En las primeras secciones se describió el problema, se plantearon los objetivos, la hipótesis y la contribución esperada.

En el segundo capítulo se presentan los antecedentes del trabajo, se define a detalle qué es una red sensora inalámbrica, además de describir sus partes, algunos de los múltiples campos de aplicación y los factores que influyen en su diseño.

En el capítulo tercero, llamado modelo, se explica detalladamente el algoritmo de enrutamiento que se desea implementar, los parámetros que se tomarán en cuenta para el desarrollo del software, los cálculos realizados, los tipos de mensajes con que los nodos se comunicarán, etcétera.

El cuarto capítulo va enfocado a explicar el diseño y a comprobar el funcionamiento del software generador de redes sensoras, en el cual se desarrollaron los experimentos computacionales para determinar la validez de la aportación. Se describe desde que se comenzó a programar en el lenguaje ANSI C, hasta desarrollar la simulación gráfica, programada en Java.

En el quinto capítulo se presentan los resultados arrojados por las simulaciones que realizadas en el software, se graficaron los valores de algunas simulaciones, mediante los cuales se obtuvieron los resultados necesarios para determinar si la aportación es útil y en qué tipo de aplicaciones es posible y factible implementarla.

Por último, se presentan las conclusiones alcanzadas y los proyectos de trabajo a futuro, seguidos de las referencias bibliográficas correspondientes. En los apéndices se muestran las tablas de los parámetros utilizados y los resultados de algunas de las simulaciones realizadas.

CAPÍTULO 2

ANTECEDENTES

En el presente capítulo se introduce sobre los conceptos básicos de las redes sensoras inalámbricas. Dicho de otra forma, lo escrito a continuación corresponde al teórico del trabajo de tesis.

Las primeras secciones corresponden a la descripción de las redes en general, para después definir algunos conceptos clave como redes ad hoc, redes sensoras inalámbricas, etcétera; luego se procede a describir de una manera más completa las partes, las funciones, las aplicaciones y las restricciones de las WSN.

2.1 REDES

Cuando los dispositivos de comunicación están muy separados o que uno necesite interactuar a su vez con otros, no es práctico conectar los dispositivos directamente. Una posibilidad es conectar ambos dispositivos a una *red de comunicación* [63, 65].

Una red de comunicación es un sistema distribuido de computadoras u otros dispositivos (nodos sensores, actuadores, etcétera) que se pueden comunicar con otros dispositivos conectados a la red para intercambiar información [34]. Dicho de otra forma, los dispositivos deben de ser capaces de manejar distinta información (voz, archivos, datos, etcétera) y enviarla hacia donde ésta es necesitada [37].

Para que exista una comunicación efectiva, es necesario cumplir las tres reglas siguientes:

1. Deben de existir dos entidades, un *emisor* y un *receptor* que compartan información.
2. Contar con un medio a través del cual esta información pueda ser compartida.
3. Cumplir con las reglas de comunicación o *protocolos*.

Las redes de comunicación pueden ser clasificadas de distintas maneras, por ejemplo, de acuerdo al *rango o cobertura*, a la *titularidad*, a la *transferencia de información* o a la *topología de la red*. En las siguientes secciones se definen detalladamente cada una de estas clasificaciones.

2.1.1 RANGO DE COBERTURA

De acuerdo con su rango de cobertura, las redes tradicionalmente son clasificadas en [14, 47, 65]:

Red de área personal (en inglés: personal area network, PAN). El rango de cobertura es de tan sólo unos diez metros, pudiendo conectarse impresoras, computadoras, celulares, etcétera.

Red de área local (en inglés: local area network, LAN). Cubre aproximadamente 150 metros; su uso general es para conectar computadoras en un edificio o campus universitario.

Red de área metropolitana (en inglés: metropolitan area network, MAN). El rango de cobertura es de unos 5 kilómetros; puede cubrir hasta pequeñas ciudades enteras.

Red de área amplia (en inglés: wide area network, WAN). Cubre distancias de hasta 15 kilómetros y puede abarcar ciudades, estados o países.

Red de área regional (en inglés: regional area network, RAN). Actualmente son las que cubren una distancia de decenas de kilómetros, son capaces de tener aplicaciones rurales y en áreas remotas.

En la Figura 2.1 se muestra el rango aproximado que abarca cada una de estas clasificaciones [14].

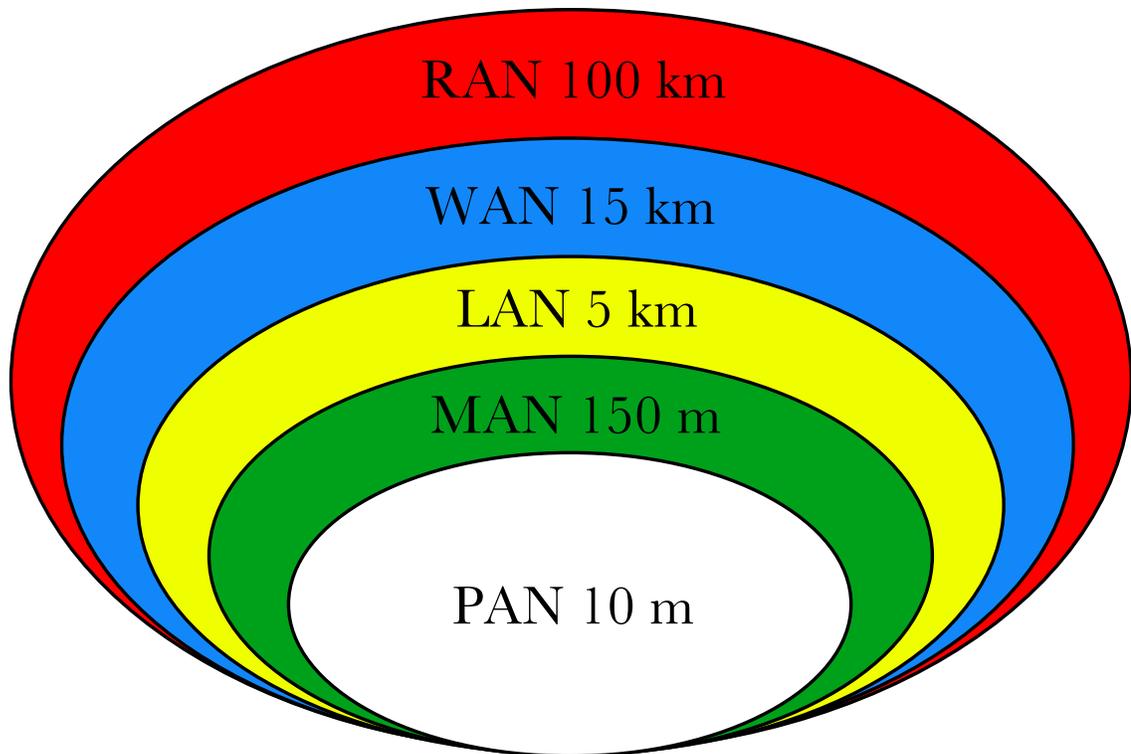


Figura 2.1: Rango de cobertura aproximado de las redes [14].

2.1.2 TITULARIDAD DE LA RED

La clasificación llamada titularidad de la red hace referencia a la propiedad de la red, es decir, se puede hacer una división en dos tipos de redes [47]:

Redes dedicadas. Sus líneas de comunicación son diseñadas e instaladas por el usuario o administrador, o bien, alquiladas a las compañías que ofrecen este

tipo de servicios. Siempre son para uso exclusivo, un ejemplo de esta red puede ser la red local de una oficina.

Redes compartidas. Son aquellas en las que las líneas de comunicación soportan información de varios usuarios. En todos los casos son redes de servicio público ofertadas por compañías de telecomunicaciones bajo cuotas de alquiler. Ejemplos de esta red pueden ser la de telefonía fija, la de telefonía móvil, las de fibra óptica, etcétera.

2.1.3 TRANSFERENCIA DE LA INFORMACIÓN

Para clasificar una red en lo que se refiere a la transferencia de información, se toma en cuenta la técnica empleada para transferirla desde el emisor (punto de origen) a un receptor (punto de destino) [47].

Redes conmutadas (punto a punto). En este tipo de redes, un emisor selecciona un receptor, y la red se encarga de habilitar la conexión entre los puntos. Normalmente pueden seleccionarse varios caminos candidatos para efectuar la transmisión. Existen tres métodos para habilitar la conexión y transferir la información:

1. **Conmutación de circuitos.** Se establece un camino único dedicado. La ruta que ha de seguir la información es establecida durante todo el proceso de comunicación, a pesar de que existan algunos tramos de la ruta en que se compartan rutas diferentes. Al final se debe de liberar la conexión, de tal manera que los pasos a seguir son establecer la conexión, transferir la información y liberar la conexión.
2. **Conmutación de paquetes.** El mensaje a enviar es dividido en fragmentos, cada uno de ellos es enviado a la red y circula por ésta hasta llegar a su destino.

3. **Conmutación de mensajes.** La información que envía el emisor se aloja en un único mensaje con la dirección del destino y es enviada al siguiente nodo. Éste almacena la información hasta que exista un camino disponible, así se da lugar al envío al siguiente nodo. El proceso se repite hasta que la información llega a su destino.

Redes de difusión (multipunto). Un nodo le envía la información a todos los nodos y el destinatario es el encargado de seleccionar esa información. La topología de la red condiciona a esta forma de transmitir la información ya que se caracteriza por disponer de un único camino que se comparte por todos los nodos o equipos.

2.1.4 TOPOLOGÍA DE LA RED

En la clasificación de acuerdo a la topología se toma en cuenta la arquitectura de la red, es decir, la forma en que se conectan los diferentes nodos o usuarios a ella [18, 36, 47, 63].

Malla. Es la interconexión total de todos los nodos. Si una ruta falla se puede seleccionar una nueva alternativa. Una desventaja es que es costoso construir este tipo de red, debido a que se necesita mucho cable. Se suele utilizar para la *conmutación de circuitos*, redes públicas, etcétera (figura 2.2).

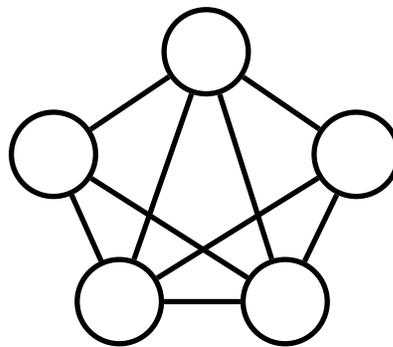


Figura 2.2: En una malla todos los nodos se interconectan.

Estrella. Todos los equipos son conectados a un nodo central que tiene funciones de distribución, conmutación y control. Si el nodo central presenta una falla, toda la red queda inhabilitada (figura 2.3).

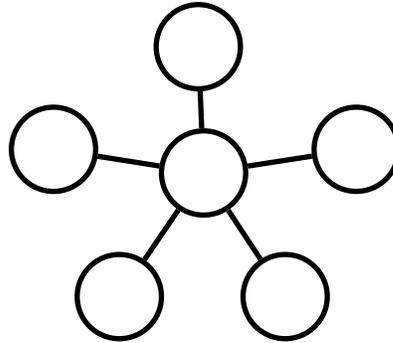


Figura 2.3: Todos los nodos son conectados a un nodo central en la topología en estrella.

Bus. Los nodos se conectan al medio de transmisión en cualquier punto del mismo, es decir, se utiliza un solo cable para conectar los equipos. Es el tipo de configuración que utiliza menos cable, la desventaja radica en que si uno de los enlaces falla, algunos nodos o incluso todos pueden quedar aislados (figura 2.4).

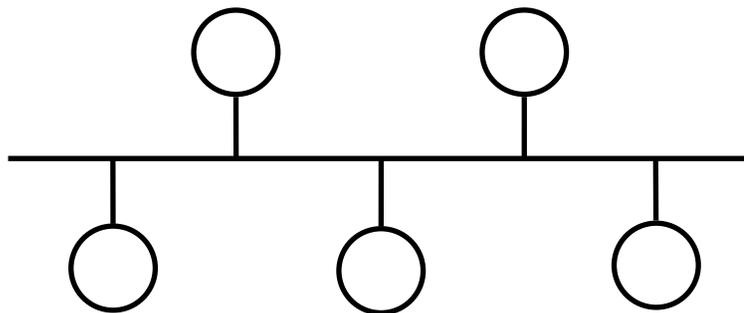


Figura 2.4: En la topología bus todos los nodos son conectados a un solo cable.

Anillo. Todos los nodos están conectados a una única vía, sus dos extremos están unidos a otro nodo. Si falla uno de los enlaces la información tendría que recorrer una mayor distancia para llegar a su destino. Si se presenta la falla de dos de los enlaces, por lo menos un nodo quedaría incomunicado (figura 2.5).

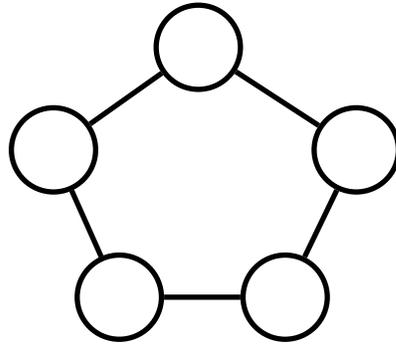


Figura 2.5: Los dos extremos del nodo están conectados a otro nodo en una topología en anillo.

Intersección de Anillo. Varios anillos son conectados por nodos comunes, la desventaja es que si fallan, se puede perder la comunicación entre los anillos (figura 2.6).

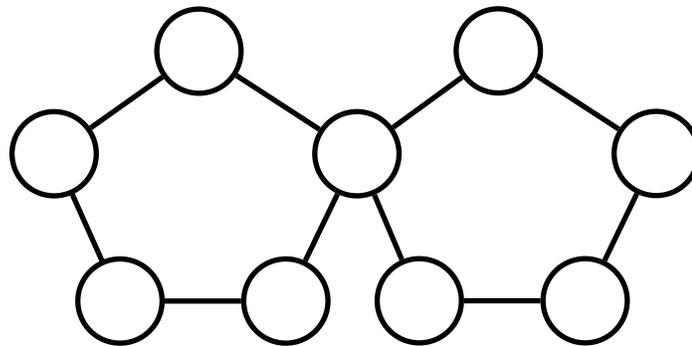


Figura 2.6: Varios anillos se conectan mediante nodos comunes para formar la topología de intersección de anillo.

Árbol. Aquí los nodos se conectan como una estructura jerárquica. También puede considerarse como la unión de varias redes de bus o como una estrella ramificada. Si uno de los enlaces falla, se puede perder la comunicación con ciertos nodos, mientras más alta sea la jerarquía del nodo que falla, más grave es el problema (figura 2.7).

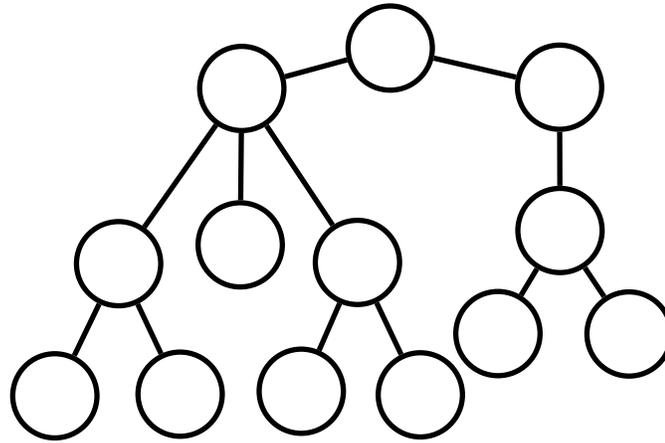


Figura 2.7: Los nodos se conectan como en una estructura jerárquica en una topología de árbol.

Irregular. Cada nodo debe tener por lo menos un enlace, de ahí en más no existe otra restricción. Es la red más utilizada en las aplicaciones que ocupan zonas geográficas amplias (figura 2.8).

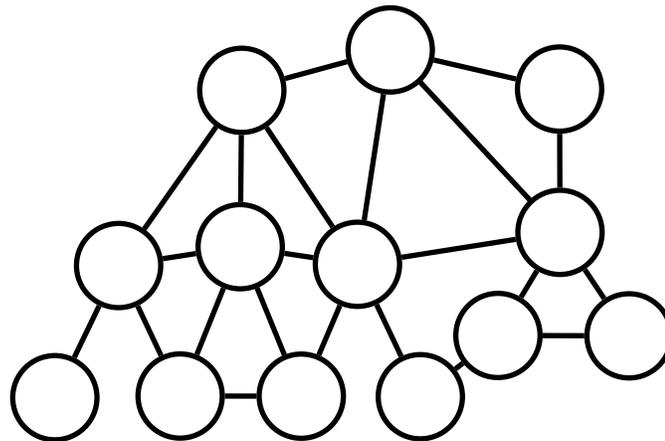


Figura 2.8: La única restricción para tener una topología irregular es que todos los nodos tengan como mínimo un enlace.

Mixta. La topología mixta está formada por la interconexión de redes en malla, estrella, anillo, bus, árbol, etcétera, un ejemplo es la mostrada en la figura 2.9.

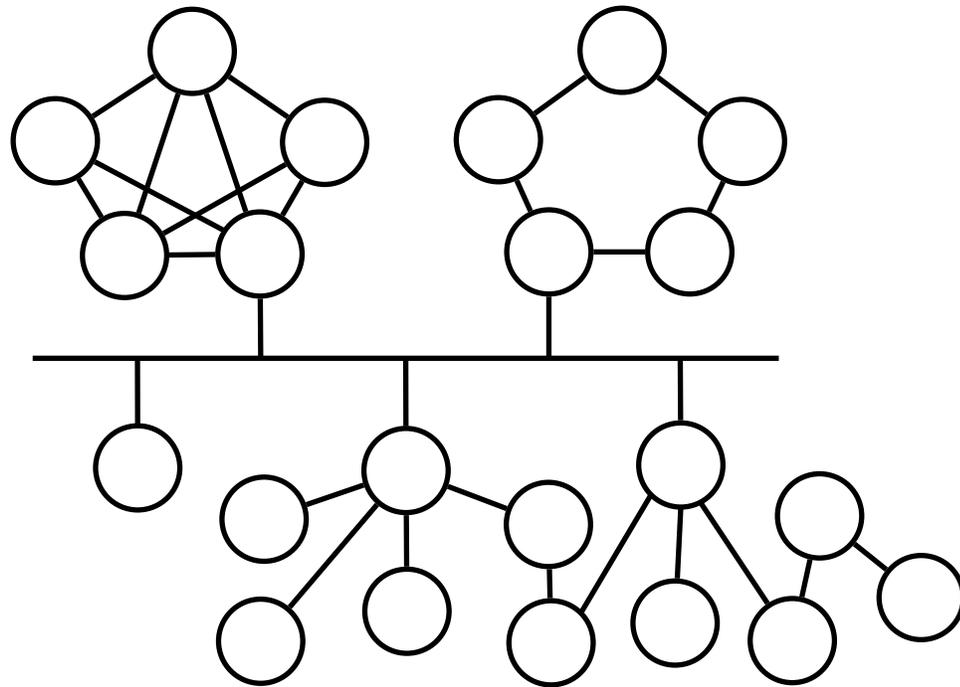


Figura 2.9: La topología mixta se forma al mezclar diferentes topologías.

2.2 REDES AD HOC

Se puede definir una red *ad hoc* como la red que se forma para un propósito en específico, es decir, no necesita soporte por parte de una infraestructura o de algún tipo de estación previamente diseñada. Debido a esto, las redes ad hoc pueden ser desplegadas y puestas en funcionamiento mucho más rápidamente [43]. Una red ad hoc también se puede definir como la colección autoorganizada de nodos móviles (en inglés: mobile nodes), tanto servidores como ruteadores [22], la cual está conectada de manera inalámbrica. La comunicación entre estos nodos hace posible la formación de la red.

En cuanto a su modo de operación, son redes inalámbricas móviles con *comunicación multisalto punto a punto*, donde paquetes de información son transmitidos de una fuente a un punto intermedio cualquiera hasta llegar a su destino [14].

2.3 REDES SENSORAS INALÁMBRICAS

En la actualidad, los sensores son utilizados en un gran número de sistemas y dispositivos electrónicos. Por lo general, estos sensores no tienen la capacidad de procesar y analizar los datos que detectan, limitándose a realizar la medición de una o más variables de su entorno y enviar la información a un procesador central [50].

Los últimos avances tecnológicos han permitido el desarrollo de diminutos mecanismos distribuidos con un bajo costo de implementación y consumo de energía. Dichos dispositivos son capaces de procesar parcialmente información de forma local y comunicarse remotamente y de forma inalámbrica entre ellos [3].

Las WSN son el resultado de la reducción en costo y tamaño de complejos sistemas microelectromecánicos (en inglés: microelectromechanical systems, MEMS), que tienen como objetivo establecer líneas de comunicación dentro de grandes extensiones de territorio [3]. Además, las WSN suponen uno de los avances tecnológicos más investigados en la actualidad. Debido a un gran número de investigaciones se prevee que este tipo de redes provocarán una revolución tecnológica parecida a la ocasionada por el internet [50].

A través de redes sensoras se puede integrar funcionalidades que antes eran independientes unas de otras, con el fin de lograr máxima eficiencia sobre todo en los campos de consumo y gestión de energía.

El primer paso en la implementación de una red sensora inalámbrica es el despliegue de los nodos sensores [28, 62], que están densamente distribuidos dentro del fenómeno a estudiar, o muy cerca de él [2]. La posición de estos nodos sensores no necesita ser prediseñada, pueden ser distribuidos de manera aleatoria en terrenos inaccesibles, zonas hostiles u operaciones de auxilio en casos de desastre. Esto significa que los nodos sensores deben poseer algoritmos con capacidades de autoorganización [2, 3].

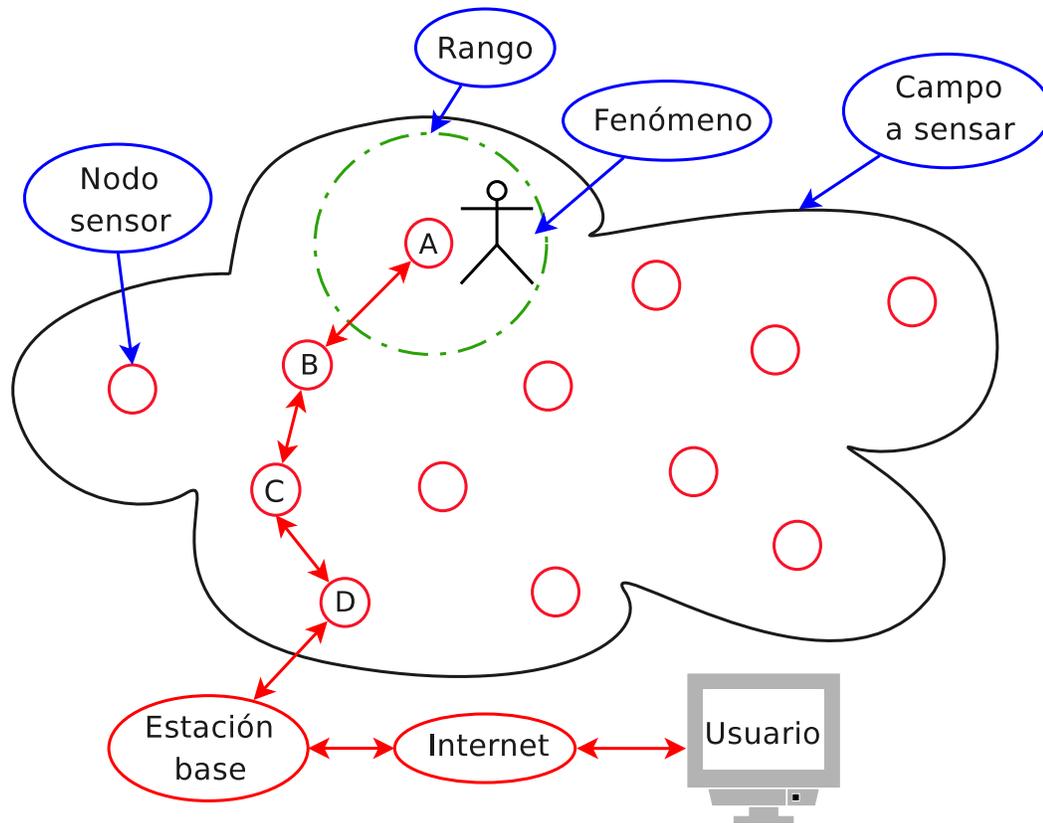


Figura 2.10: Diagrama de una red sensora inalámbrica.

Una red sensora generalmente está distribuida en el *campo a sensor* (en inglés: sensor field), como se muestra en la figura 2.10. Los nodos sensores tienen la capacidad de detectar la presencia del fenómeno, procesar parcialmente la información y enviarla, dependiendo de la aplicación, a la *estación base* (en inglés: sink node) o al usuario mediante multsaltos. La estación base se debe comunicar con el usuario final vía internet o satélite [2].

Cada uno de los sensores posee un rango de detección y de comunicación. El hecho de que sean del mismo fabricante, incluso del mismo lote, no significa que estos rangos vayan a ser exactamente iguales, ya que sus características se pueden ver afectadas por condiciones ambientales, obstrucciones, etcétera [60].

Las WSN comenzaron a ser utilizadas en operaciones militares, sin embargo, poco a poco han incrementado su campo de utilización en áreas como la monitори-

zación ambiental, salud, hogar, entre otras. Una red sensora inalámbrica puede ser considerada un caso especial de redes ad hoc con limitada o nula movilidad [14]. Algunas de las diferencias entre las WSN y las redes ad hoc se enlistan a continuación [19, 66]:

- El número de nodos en una red sensora inalámbrica puede ser una magnitud muchas veces mayor a los nodos en una red ad hoc.
- Los nodos sensores están densamente desplegados.
- La topología de las redes sensoras cambia frecuentemente.
- Los nodos sensores son propensos a fallas.
- Los nodos sensores tienen limitaciones en cantidad de energía, memoria y capacidades computacionales.
- Los nodos sensores no necesariamente cuentan una identificación global (ID) debido al gran número de sensores desplegados.
- Las redes sensoras son desplegadas con una aplicación específica en mente.

También existe otro tipo de redes que comparte muchas de las características de las WSN, las llamadas *redes inalámbricas de sensores y actuadores* (en inglés wireless sensor/actuator networks, WSAN) son sistemas distribuidos de nodos sensores y actuadores interconectados inalámbricamente. Los nodos sensores recolectan información del medio ambiente y transmiten la información recolectada a los actuadores, los cuales se encargan de corregir el comportamiento del fenómeno analizado. Debido a este aporte, se facilita la interacción remota con el medio ambiente [58, 74, 75].

En la tabla 2.1 se definen básicamente los conceptos anteriores [11]. Debido a estas diferencias, el diseño de un protocolo de comunicación en una red sensora inalámbrica requiere atención específica [66].

Tabla 2.1: Definición de los tipos de redes sensoras.

Tipo de Red	Definición
Ad hoc móvil (<i>mobile ad hoc network, MANET</i>).	Es una red autoconfigurable de nodos móviles conectada inalámbricamente. Debido a que los nodos son libres de moverse y organizarse, la topología de la red cambia de manera rápida e impredecible.
Sensora inalámbrica (<i>wireless sensor network</i>).	Red inalámbrica conformada por nodos autónomos distribuidos en el campo a sensor, los cuales utilizan sensores para monitorizar cooperativamente ciertas condiciones físicas o ambientales.
Sensora y actuadora inalámbrica (<i>wireless sensor/actuator network, WSAN</i>).	Es un sistema distribuido de nodos y actuadores interconectados inalámbricamente. Los sensores recolectan información y la transmiten a los actuadores, que realizan algunas acciones para corregir el comportamiento en el ambiente.
Sensora inalámbrica móvil (<i>mobile wireless sensor network</i>).	Red sensora inalámbrica en la que los nodos tienen la capacidad de cambiar de posición. Se puede realizar el movimiento con la finalidad de que la red se autorestaure, para captar con mayor precisión la presencia del fenómeno, etcétera.
Sensora inalámbrica ad hoc (<i>ad hoc wireless sensor network</i>).	Red sensora inalámbrica formada para un propósito en específico, los nodos se autoorganizan y no se necesita de una infraestructura previamente diseñada, lo que permite que la red se ponga en funcionamiento rápidamente.

2.4 PARTES DE UNA RED SENSORA INALÁMBRICA

2.4.1 NODOS SENSORES

Son elementos integrados que toman los datos del sensor a través de sus puertas de datos y envían la información a la estación base, encargada de recolectar esta información y enviarla al usuario final [2]. Como se mencionó anteriormente, los nodos sensores se componen de cuatro partes principales [3]

- Unidad de detección.
- Unidad de procesamiento.
- Unidad de comunicación.
- Unidad de energía.

En la figura 2.11 se pueden observar las cuatro unidades principales de un nodo sensor.

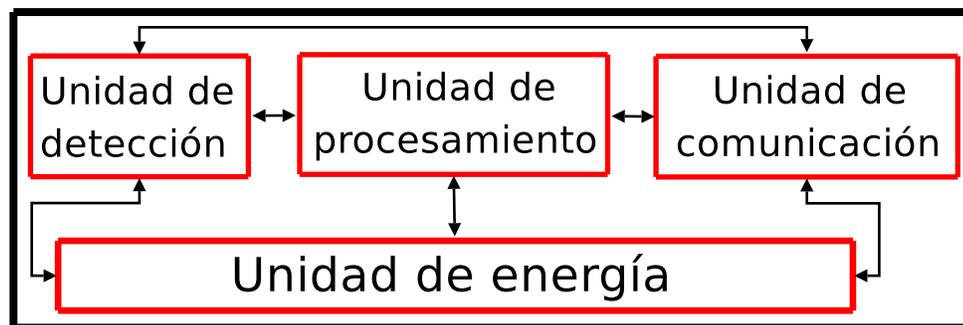


Figura 2.11: Unidades principales de un nodo sensor.

Ahora, en la figura 2.12 se puede observar en líneas punteadas otros componentes opcionales. El sistema de posicionamiento global (en inglés: global positioning system, GPS) sirve para determinar las coordenadas en las que se encuentra el nodo

sensor. El movilizador se utiliza en aplicaciones en las que se necesite que el nodo sensor cambie de posición y el generador de energía podría constar de un material piezoeléctrico o alguna otra forma de obtener energía del ambiente.

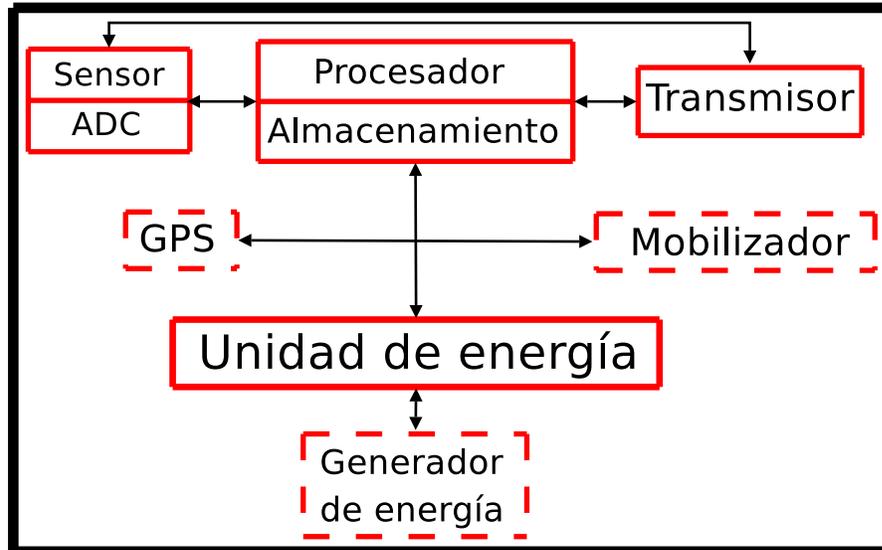


Figura 2.12: Unidades adicionales de un nodo sensor. La unidad de detección se divide en el sensor y el conversor analógico a digital, la de procesamiento consta de almacenamiento y un procesador. Las unidades opcionales se observan en líneas punteadas.

2.4.2 UNIDAD DE DETECCIÓN

La unidad de detección en un nodo sensor realiza la tarea de adquirir la información de los objetos detectados [49]. Está compuesta por mínimo un sensor y puede contar con uno o más actuadores, además de un conversor de análogo a digital. La energía consumida por esta unidad incluye: [70]

1. La detección de la magnitud física y su conversión a una señal eléctrica.
2. El acondicionamiento de la señal.
3. La conversión de señal análoga a digital.

Esta unidad de ninguna manera puede ser despreciada, ya que el propósito de una red sensora inalámbrica no es el procesamiento o la comunicación, sino la detección y monitorización de eventos [21]. Uno de los principales retos para las WSN es elegir el tipo y cantidad de sensores que se han de utilizar, y determinar el lugar donde se desplegarán. Este punto se torna difícil debido al gran número de tipos de sensores con características distintas, tales como resolución, costo, exactitud, tamaño y consumo de energía [21].

Un sensor es un dispositivo que detecta manifestaciones de cualidades o fenómenos físicos o químicos, como la temperatura, la intensidad luminosa, la distancia, la aceleración, la inclinación, el desplazamiento, la presión, la humedad, el pH, etcétera, y convierte estos fenómenos físicos o químicos en un cambio de alguna de las siguientes variables, por ejemplo: resistencia eléctrica, tensión eléctrica, corriente eléctrica, etcétera. Dicho de otra manera, un sensor es un dispositivo que, a partir de la energía del medio ambiente donde se mide, da una señal de salida transducible que es función de la variable de entrada [46].

CLASIFICACIÓN Y TIPOS DE SENSORES

Existe una gran cantidad de sensores disponibles para distintas magnitudes físicas, por lo tanto, no se puede proceder a su estudio sin una previa clasificación, tomando en cuenta algún criterio.

Según el aporte de energía los sensores se pueden dividir en moduladores y generadores. En los moduladores o activos, la mayor parte de la energía de la señal de salida procede de una fuente de energía auxiliar. Mientras que en los sensores generadores o pasivos, la energía de salida es suministrada por la entrada, es decir, son aquellos que generan una señal eléctrica a partir de la magnitud que miden, sin necesidad de una alimentación eléctrica externa.

Debido a que la energía de alimentación se suministra mediante conexiones distintas a las empleadas para la señal, los sensores moduladores requieren en general

más conexiones que los generadores. La sensibilidad de los moduladores puede ser modificada mediante la señal de alimentación, lo que no permiten los generadores [53].

Según la señal de salida los sensores pueden ser clasificados en analógicos y digitales. En los analógicos la salida varía a nivel macroscópico de forma continua. Mientras que en los digitales la salida varía en forma de saltos o pasos discretos. Estos no requieren conversión analógica a digital y la transmisión de su salida es más fácil. Tienen mayor fiabilidad y fidelidad y muchas veces mayor exactitud, sin embargo, no hay modelos digitales para muchas de las magnitudes físicas de mayor interés [7]. Por el modo de funcionamiento, los sensores pueden ser de deflexión o de comparación. En los sensores que funcionan por deflexión, la magnitud medida produce algún efecto físico que engendra algún efecto similar, pero opuesto en alguna parte del instrumento y relacionado con una variable útil. En los sensores que funcionan por comparación, se intenta mantener nula la deflexión mediante la aplicación de un efecto bien conocido, opuesto al generado por la magnitud a medir. Hay un detector del desequilibrio y un medio para restablecerlo. Las medidas por comparación pueden ser más exactas porque el efecto conocido opuesto se suele calibrar con un patrón o magnitud de referencia de calidad [53]. En la tabla 2.3, mostrado por Ramón Pallás en [7], se dan ejemplos de las clases de sensores.

Tabla 2.3: Clasificación de sensores.

Criterio	Clases	Ejemplos
Aporte de energía	Moduladores	Termistor
	Generadores	Termopar
Señal de salida	Analógicos	Potenciómetro
	Digitales	Codificador de posición
Modo de operación	De deflexión	Acelerómetro de deflexión
	De comparación	Servoacelerómetro

Los sensores también pueden ser clasificados de acuerdo a la magnitud que se desea sensar, como algunas que se enlistan abajo [17]:

- Temperatura.
- Desplazamiento, velocidad o aceleración.
- Magnitudes eléctricas y magnéticas.
- Luminosidad y radiación.
- Deformación, presión, fuerza.
- Sonido.

SENSORES PRIMARIOS. Convierten una magnitud física en otra más fácil de medir, es decir, permiten obtener una señal transducible a partir de la magnitud física a medir [7]. Sin embargo, no ofrecen una salida en forma de señal eléctrica como lo muestra la figura 2.13. Ejemplos de sensores primarios se describen a continuación.

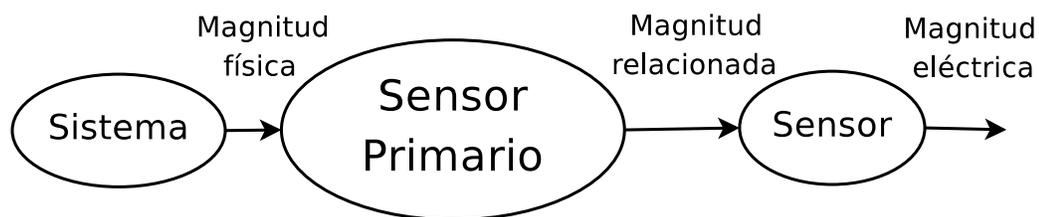


Figura 2.13: Los sensores primarios toman del sistema una magnitud física y la convierten en una más fácil de medir. Otro sensor puede tomar la salida del sensor primario y convertirla en una señal eléctrica.

Bimetal. El bimetalo es una pieza formada por metales con distinto coeficiente de dilatación térmica unidos firmemente, por ejemplo, mediante soldaduras autógenas y sometidos a la misma temperatura. Cuando se produce un cambio de temperatura, la pieza se deforma según un arco circular uniforme, realizándose una transformación de temperatura a desplazamiento.

La desventaja de este sensor primario es su lentitud. Puede ser usado para abrir o cerrar contactos (termostatos) o como protección en circuitos eléctricos (interruptores térmicos por bimetal). Otro sensor primario es el manómetro, que convierte presión en desplazamiento [7, 46].

Sensores de presión. Los sensores de presión están basados en tecnología piezorresistiva, combinada con microcontroladores que proporcionan una alta precisión, independiente de la temperatura y capacidad de comunicación digital directa con una PC. Las aplicaciones afines a estos productos incluyen instrumentos para aviación, laboratorios, controles de quemadores y calderas, comprobación de motores, tratamiento de aguas residuales y sistemas de frenado.

Sensores de flujo y caudal. Los sensores de flujo y caudal de aire contienen una estructura de película fina aislada térmicamente que contiene elementos sensibles de temperatura y calor. La estructura de puente suministra una respuesta rápida al caudal de aire u otro gas que pase sobre el circuito integrado.

SENSORES RESISTIVOS. Los sensores basados en la variación de la resistencia eléctrica de un dispositivo son probablemente los más abundantes. Esto se debe a que son muchas las magnitudes físicas que afectan el valor de la resistencia eléctrica de un material [17, 46].

Potenciómetros. Un potenciómetro es un resistor que posee un contacto móvil deslizante o giratorio. La resistencia medida es proporcional al recorrido del cursor. Esto no siempre es así, pues la resistividad del material no suele ser uniforme a lo largo de todo el recorrido.

Galgas extensiométricas. Las galgas extensiométricas se basan en la variación de la resistencia de un conducto cuando se le somete a un esfuerzo mecánico.

Detectores de temperatura resistivos. Estos tipos de sensores suelen designarse por sus siglas en inglés RTD (Resistance Temperature Detector). Las RTD se basan en la variación de la resistencia de un conductor con la temperatura.

Termistores. Son resistores variables con la temperatura, basados en semiconductores. En función de que su coeficiente de temperatura sea positivo o negativo, se distingue entre PTC (por sus siglas en inglés: Positive Temperature Coefficient) y NTC (por sus siglas en inglés: Negative Temperature Coefficient).

Los termistores se basan en el aumento de portadores en los semiconductores con el aumento de la temperatura, lo que da lugar a una disminución de su resistencia. Cuando el dopado es muy intenso, el semiconductor adquiere propiedades de coeficiente de temperatura positivo en un rango de temperaturas limitado.

Existen muchos otros tipos de sensores cuyas características resistivas varían cuando cambia alguna magnitud física del ambiente que lo rodea. Este es el caso, por ejemplo, de las magnetoresistencias. Cuando un campo magnético rodea a un conductor se produce una reducción de corriente debido a que algunos electrones son desviados de su trayectoria. Este comportamiento es especialmente importante en materiales ferromagnéticos [46].

Fotorresistencias. Las fotorresistencias se basan en la variación de la resistencia eléctrica de un semiconductor al incidir sobre él una radiación. La radiación de una determinada energía provoca que los electrones salten de la banda de valencia a la de conducción en el semiconductor, aumentando la conductividad del mismo. Este efecto es más importante cuando se incrementa la temperatura del material, ya que la energía de los electrones aumenta, y con ello, la probabilidad de que se produzcan saltos de una banda a otra.

OTROS TIPOS DE SENSORES.

Detectores de ultrasonidos. Los detectores de ultrasonidos resuelven los problemas de detección de objetos de prácticamente cualquier material. Trabajan en ambientes secos y polvorientos. Normalmente se usan para control de la distancia, presencia, ausencia o rastreo de un objeto.

Sensores de humedad. Los sensores de temperatura y humedad relativa están configurados con circuitos integrados que proporcionan una señal acondicionada. Estos sensores calibrados por láser, contienen un elemento sensible capacitivo en base de polímeros que interacciona con electrodos de platino.

Sensores de posición de estado sólido. Los sensores de posición de estado sólido, detectores de proximidad de metales y de corriente, se consiguen en varios tamaños y terminaciones.

Estos sensores combinan fiabilidad, velocidad, durabilidad y compatibilidad con diversos circuitos electrónicos para aportar soluciones a las necesidades de aplicación.

Sensores de presión y fuerza. Los sensores de presión son pequeños, fiables y de bajo costo. Ofrecen una excelente repetitividad y una alta precisión y fiabilidad bajo condiciones ambientales variables. Además, presentan unas características operativas constantes en todas las unidades y un incremento sin recalibración.

Sensores de temperatura. Los sensores de temperatura se catalogan en dos series diferentes: TD y HEL/HRTS. Estos sensores consisten en una fina película de resistencia variable con la temperatura (RTD), y están calibrados por láser para una mayor precisión e intercambiabilidad. Las salidas lineales son estables y rápidas.

Sensores de turbidez Los sensores de turbidez aportan una información rápida y práctica de la cantidad relativa de sólidos suspendidos en el agua u otros líquidos. La medición de la conductividad da una medición relativa de la concentración iónica de un líquido dado.

Sensores magnéticos. Los sensores magnéticos se basan en la tecnología magnetoresistiva MandPS, este tipo de sensores ofrecen una alta sensibilidad. Entre las aplicaciones se incluyen brújulas, control remoto de vehículos, detección de vehículos, realidad virtual, sensores de posición, sistemas de seguridad e instrumentación médica.

SELECCIÓN DE SENSORES. Un aspecto importante en el momento de diseñar un determinado sistema, es conocer las características de los sensores, para así elegir el que se acople mejor las necesidades de la aplicación. Entre los aspectos a tener en cuenta se pueden mencionar [17, 72]:

- Estabilidad.
- Precio.
- Consumo de energía.
- Rango de operación.
- Exactitud y resolución.
- Velocidad (operación en tiempo real).
- Compatibilidad de las partes en la fabricación y el ensamble.
- Requerimientos computacionales.
- Tamaño de la unidad completa.
- Capacidad de *embalaje*.

A continuación se describen algunos de estos aspectos [72]:

Tamaño de la unidad completa. A pesar de que la parte activa del sensor puede ser pequeña, el sistema completo para operar el sensor o la interfaz con el medio ambiente puede ser mucho mayor. Por ejemplo, un sensor químico puede requerir un espacio más grande para la interpretación de lo detectado.

Consumo de energía. El nodo sensor tiene una cantidad dada de energía, ésta se puede distribuir para cada uno de los procesos. Por lo tanto la unidad de detección debe reducir la energía necesaria para detectar el fenómeno.

Capacidad de administrar la energía. Uno de los métodos más fuertes para reducir el consumo de energía es el encender la unidad solamente cuando sea

necesario utilizarla. Debido a esto es importante que el sensor sea capaz de encenderse y apagarse relativamente rápido.

Compatibilidad de las partes en la fabricación y el ensamble. Si existe una compatibilidad en la fabricación y el ensamble, se aumenta la posibilidad de tener una unidad compacta. De no ser posible que el nodo sensor sea armado de una sola pieza, el hecho de contar con una compatibilidad con las unidades de comunicación, energía y procesamiento, trae beneficios.

Capacidad de embalaje. Algunos sensores podrían necesitar estar en contacto con el medio ambiente. Por ejemplo, en terreno húmedo es posible que las filtraciones de líquido comprometan el funcionamiento del sensor.

2.4.3 UNIDAD DE PROCESAMIENTO

La unidad de procesamiento, que provee de inteligencia al nodo sensor, está compuesta de memoria para almacenar datos y aplicaciones de programas, y de un microcontrolador para recibir las señales provenientes de la unidad de detección [70].

El procesador a bordo que lleva cada nodo sensor desempeña un papel importante, debido a que en lugar de enviar una gran cantidad de información (lo cual puede ser innecesario y representa un importante gasto de energía), digiere parcialmente la información recibida por la unidad de detección y envía solamente lo necesario. La memoria que posee cada uno de los nodos sensores viene a representar una de las restricciones de las WSN, puesto que es limitada [2, 3].

El consumo total de energía en esta unidad se basa en dos partes principales, la energía utilizada y la energía perdida. La energía utilizada se refiere a la parte que se gasta mientras se realizan algunas operaciones, la energía perdida es aquella consumida mientras no se realiza ninguna operación, sólo se consume porque el procesador está encendido.

Algunas investigaciones demuestran que la energía perdida puede consumir casi la mitad del total de energía, por ello es importante enfocarse en minimizar las pérdidas [70].

2.4.4 UNIDAD DE COMUNICACIÓN

La unidad de comunicación consiste en *transmitir* y *recibir* inalámbricamente la información necesaria, aplicando la *radio de corto alcance*, el *Bluetooth*, el *láser* e *infrarrojo*, etcétera [49, 70].

En esta unidad es donde se gasta más energía, estudios recientes indican que la unidad de comunicación consume más del doble de la energía consumida por el procesamiento, almacenamiento y sensado en la mayor parte de las aplicaciones [57], por lo tanto, en esta unidad juega un papel importante el digerir parcialmente (en la unidad de procesamiento) los datos obtenidos por la unidad de sensado, con el fin de solo enviar y recibir la información necesaria, significando esto un ahorro considerable de energía [3]. Este punto incrementa su importancia tomando en cuenta que aproximadamente el 65 % de la información recibida por un nodo sensor tiene que ser reenviada [57].

La *distancia de transmisión* también juega un papel importante en el consumo de energía, entonces, debido a que los nodos están densamente poblados en un área específica dentro del fenómeno o muy cercano a él, se espera que la comunicación en multisaltos (en inglés: multihop) consuma menos energía que la comunicación de un solo salto (en inglés: singlehop) [5, 70]. Además los niveles de transmisión se mantienen bajos, lo cual es de gran importancia en operaciones encubiertas [2].

Los nodos sensores suelen tener distintos rangos de comunicación [60], dado que la comunicación puede ser limitada por el ambiente geográfico en el que se encuentra ubicado el nodo sensor. Así pues, la cercanía de dos nodos sensores, no garantiza establecer una comunicación adecuada, dando lugar al recurso de una ruta alterna.

PROTOCOLOS DE ENRUTAMIENTO EN WSN

El enrutamiento utilizado para redes convencionales como las que se manejan en una oficina no puede ser aplicado directamente a las WSN debido a que [5, 19]:

1. Los nodos sensores suelen autoorganizarse al ser desplegados en el campo a sensar, su organización y configuración en la red no dependen directamente del usuario.
2. En la mayor parte de las aplicaciones la red es estática, sin embargo, existen algunos escenarios en los que tiene la capacidad de moverse.
3. Las redes sensoras son diseñadas con un objetivo específico, es decir, los requerimientos de diseño cambian dependiendo de la aplicación de la red sensora inalámbrica.
4. La recolección de datos en una red sensora inalámbrica está basada en un fenómeno en común, por ejemplo, detectar la presencia o ausencia de animales en un bosque, desplegando la posibilidad de que exista una redundancia continua. De aquí que para reducir al mínimo esta redundancia es necesario un protocolo para hacer más eficiente el uso de la energía.
5. En algunas aplicaciones se despliegan miles de nodos sensores.
6. En las redes centradas en la información, como las WSN, es más importante conocer esta información que el nodo de donde proviene.

Para que un protocolo de enrutamiento sea bueno para una red sensora inalámbrica debe contar con las siguientes características [61]:

Consciente de la energía. La fuente de energía de los nodos sensores es limitada, obligando al protocolo de enrutamiento a ser consciente de la energía restante en el nodo sensor. El conocimiento de la energía puede permitir al protocolo

evadir los nodos que están por morir y utilizar los que cuentan con suficiente energía.

Simple. Esta característica se refiere a evitar que los protocolos sean muy largos y complejos, y permite minimizar la capacidad de memoria utilizada, además de que reducir los paquetes de información que se deseen enviar.

Adaptable. Los nodos sensores no son confiables, pueden fallar en cualquier momento debido a la falta de energía o moverse a otra región del campo a sensar. Por tanto, el protocolo debe adaptarse a la muerte o cambio de posición de algunos nodos sensores.

Escalable. El protocolo debe de funcionar con un gran número de nodos sensores.

En general, el enrutamiento en WSN puede ser dividido en [5]:

- Enrutamiento basado en la *igualdad* (flat-based routing, FBR).
- Enrutamiento basado en la *jerarquía* (hierarchical-based routing, HBR).
- Enrutamiento basado en la *adaptación* (adaptive-based routing, ABR).

En el FBR, típicamente todos los nodos tienen la misma función o tarea dentro de la red; en el enrutamiento basado en la jerarquía (HBR), los nodos juegan diferentes roles en la red; en el enrutamiento basado en la adaptación (ABR), algunos parámetros del sistema son controlados con el fin de adaptarlos a las condiciones actuales de la red y los niveles de energía actuales [4, 5]. Además, los protocolos de enrutamiento pueden ser clasificados en [14]:

Proactivos. Los nodos en la red periódicamente encienden sus sensores y transmisores, monitorean el medio ambiente y proveen una visión de los parámetros relevantes en intervalos de tiempo regulares.

Reactivos. Tienen aplicación en situaciones críticas por su capacidad de reaccionar inmediatamente a cambios drásticos en los valores de los atributos sensados.

Híbridos. Es una combinación de redes proactivas y reactivas donde los nodos sensores no solamente envían información periódicamente, sino que también responden a cambios abruptos en los valores sensados.

En los protocolos proactivos todas las rutas son calculadas y probadas antes de ser realmente necesarias, mientras que los protocolos reactivos son calculados en base a la demanda, los híbridos utilizan una combinación de los dos anteriormente mencionados. Otra clase de enrutamiento es el llamado enrutamiento *cooperativo*, en éste, todos los nodos envían su información a un nodo central, donde toda la información es recopilada y posteriormente procesada [4].

2.4.5 UNIDAD DE ENERGÍA

Una de las principales restricciones en el diseño de una red sensora inalámbrica, radica en el requerimiento de bajo consumo de energía. Esta restricción se debe a que la fuente de energía de un nodo sensor es por lo general una batería adjunta que habitualmente posee energía finita y es casi irremplazable. Cuando un nodo sensor queda sin energía se dice que el nodo muere. La muerte de algunos nodos sensores puede comprometer el funcionamiento de la red, en la inteligencia de que las arquitecturas de redes sensoras y las aplicaciones, así como estrategias de despliegue, deben desarrollarse con un bajo consumo de energía como un requisito importante [3, 12, 27, 28, 50, 62].

Tomando en cuenta que los nodos sensores suelen estar dispersos en zonas poco accesibles, la vida de una red sensora depende del tiempo de vida que los recursos de energía de los nodos dispongan. La energía es también un recurso escaso, dependiente de las limitaciones de tamaño. Una batería alcalina típica provee cerca de 50 *watt-hora* de energía, esto se puede traducir a menos de un mes de operación continua para cada nodo en un estado completamente activo [12].

Debido a estas limitaciones, se ha trabajado en encontrar fuentes de energía que provengan del medio ambiente, para así ampliar la vida de la red sensora por

medio de la recuperación de energía. Las celdas solares son un ejemplo de las técnicas usadas para la recuperación de energía [3].

En otros casos son utilizados materiales piezoeléctricos para la obtención de energía del medio ambiente, por ejemplo, del viento y de la lluvia, como se explica a continuación.

Los materiales piezoeléctricos, al recibir una deformación al aplicárseles energía mecánica, la transforman en energía eléctrica. De esta manera, la energía que provee cada golpe de las gotas de lluvia sobre el material, puede producir una diferencia de potencial y por lo tanto ser una fuente de energía para el nodo sensor [25]. El mismo principio se utiliza para la obtención de energía del viento. Otra opción es la aportación que se mencionó anteriormente, en la que se desea obtener energía de los árboles [29]. Tal como en estos casos, se buscan soluciones al problema crítico de las WSN, debido a todo lo que involucra la energía en una red sensora.

Sería interesante incorporar estas formas de obtención de energía en un sólo nodo sensor, de tal manera que en todo momento quede alimentado. Es probable que en algunas zonas halla árboles, viento, sol y lluvia en el campo donde esté desplegado el sensor, pero esto no es siempre posible en todas las aplicaciones.

2.5 APLICACIONES DE LAS WSN

Las redes sensoras pueden poseer muchos diferentes tipos de sensores, tales como sísmicos, de muestreo magnético, térmico, visual, infrarrojos, acústicos y de radar, a la vez monitorizar una gran cantidad de condiciones ambientales, temperatura, humedad, circulación de vehículos, presión, iluminación, niveles de ruido, presencia o ausencia de objetos, niveles de esfuerzo mecánico sobre determinado tipo de objetos y condiciones como velocidad, dirección y tamaño de un objeto en movimiento.

Los nodos sensores pueden ser usados para una monitorización continua, detección e identificación de eventos, control local de actuadores, operaciones de rescate en zonas de desastre, detección de elementos químicos o biológicos, entre otros ejemplos [3, 28].

Las aplicaciones se pueden clasificar en militares, ambientales, de salud, hogar y demás áreas comerciales. Por otra parte, el concepto de microsensores amplía su clasificación a más categorías, como la exploración del espacio, microcirugías, educación infantil, transformación de químicos y socorro en casos de desastre [3, 54], que se describen a detalle en las siguientes secciones.

2.5.1 APLICACIONES MILITARES

Las WSN pueden ser una parte integral para el comando militar, control, comunicaciones, computación, inteligencia, supervisión, reconocimiento y objetivos (C4ISRT, por sus siglas en inglés) en un sistema [3].

Debido a que las redes sensoras están basadas en desplegar un gran número de nodos sensores desechables y de bajo costo, la destrucción de algunos nodos por acciones hostiles no afecta en gran medida la operación militar como la destrucción de un sensor tradicional. Esto hace que el concepto de las redes sensoras tenga un mejor enfoque a campos de batalla.

Algunas de las aplicaciones militares de las redes sensoras son la monitorización de las fuerzas aliadas, el equipamiento y el armamento, la vigilancia del campo de batalla, el reconocimiento de las fuerzas opositoras y del terreno, la evaluación de los daños en la batalla y la detección y reconocimiento de ataques nucleares, biológicos y químicos (NBC, por sus siglas en inglés).

Monitorización de fuerzas aliadas, equipamiento y municiones. Los líderes pueden monitorizar constantemente el estado de las tropas aliadas, la condición y disponibilidad de los equipos y las municiones en el campo de batalla,

usando redes sensoras. Cada tropa, vehículo, equipamiento, etcétera, puede estar conectado con pequeños sensores que reporten su estado, se reúnen en la estación base y de ahí se mandan a los líderes de las tropas, también pueden ser enviados a niveles superiores al tiempo que se agregan los datos de otras unidades [2].

Vigilancia del campo de batalla. Los terrenos críticos, las rutas a seguir, los caminos estrechos, etcétera, pueden ser rápidamente cubiertos por redes sensoras y así observar muy de cerca a las fuerzas opositoras. Como las operaciones evolucionan y existen nuevos planes operativos, nuevas redes sensoras tienen la oportunidad de ser desplegadas en cualquier momento.

Campo de minas autorestaurado. Una aplicación interesante y a su vez escalofriante, por el objetivo que tiene, es la desarrollada por la DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) en Estados Unidos. Consiste en acoplar una red sensora inalámbrica en las minas que son desplegadas en el campo de batalla. Cuando algunas minas antitanques son utilizadas, la red es capaz de reorganizarse para que otras se muevan al paso del enemigo, obstaculizando así su avance [54].

Otra opción consiste en desplegar nodos sensores en lugar de minas, cuando el nodo sensor detecte presencia de tropas enemigas se pueden lanzar misiles o algún otro tipo de arma. Si se decide por esta opción se cuenta con la ventaja de que al terminar las operaciones hostiles, se podrían dejar desplegados los nodos sensores en el campo, tomando en cuenta que no son dañinos como lo es una mina.

Es importante mencionar que en aplicaciones militares, la vida útil del nodo sensor no siempre es un importante factor a tomar en cuenta.

2.5.2 APLICACIONES AMBIENTALES

Algunas aplicaciones ambientales de las redes sensoras incluyen el seguimiento de los movimientos de las aves, pequeños animales e insectos, la vigilancia ambiental en condiciones que afectan a los cultivos y al ganado, la detección de incendios forestales, la investigación meteorológica o geofísica, algunas aplicaciones en tiraderos de basura, vigilancia del suelo marino y el entendimiento del proceso de erosión, entre muchas otras [3, 20, 30].

Aplicaciones en la naturaleza. El mantenimiento y cuidado de espacios y parques naturales resulta complejo en gran medida por las especiales características de los mismos. Se trata de áreas de grandes dimensiones, en algunos casos de difícil acceso, que están repletos de especies vegetales y animales que hay que preservar, por lo que la supervisión debe realizarse empleando métodos lo menos invasivos posibles [50].

Monitorización de hábitat ecológico. Las redes WSN pueden resultar de gran ayuda al monitorizar el hábitat ecológico. Los sensores de pequeño tamaño pueden disimularse con el entorno, procesando los datos de diversos parámetros ecológicos y transmitiendo la información de manera inalámbrica hasta un centro de control, situado normalmente en la caseta de los guardias forestales. De este modo se evita, en la medida de lo posible, la circulación de personas y vehículos por el parque, y se obtiene una información más clara del hábitat monitoreado. Entre los parámetros a monitorizar se pueden enumerar: temperatura, humedad, crecimiento de árboles y arbustos, desplazamientos de especies, conteo de animales, caudales de ríos, etcétera [36].

Detección de incendios forestales. Debido a que los nodos sensores pueden estar estratégicamente (o al azar) desplegados en un bosque, éstos revelan la ubicación exacta del origen del incendio antes de que se propague de manera incontrolable. La figura 2.14 muestra una red sensora inalámbrica desplegada

en un bosque, donde la mayor parte del área es monitoreada. En caso de que se generara un incendio, los nodos sensores comunicarían al usuario la ubicación de éste.

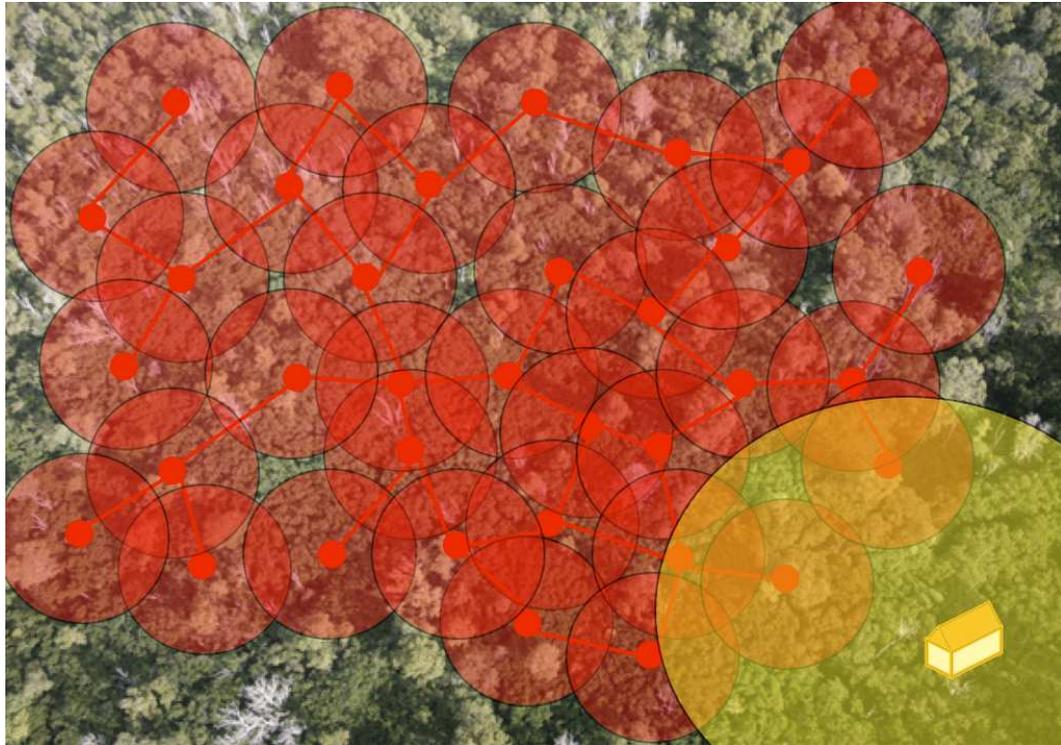


Figura 2.14: Diagrama de una red sensora inalámbrica desplegada en un bosque, se muestra el rango de detección de cada nodo sensor y el del usuario.

El desarrollo de nodos sensores capaces de obtener energía de los árboles, provee una opción barata para desplegar una WSN en los bosques [29], donde la red podría ser utilizada para la detección de incendios forestales o para monitorizar la salud de los árboles.

Detección de inundaciones. Un ejemplo de la detección de inundaciones es el proyecto llamado sistema de alerta temprana de inundaciones basada en redes sensoras (en inglés: early warning flood systems based on sensor networks), que se está desarrollando en los Estados Unidos. Se despliegan varios tipos de sensores, que suministran información a la base de datos, como el de lluvia, nivel de agua y meteorológicos. [9].

Aplicaciones agrícolas. La agricultura constituye una de las áreas donde se prevé que pueda implantarse con mayor rapidez este tipo de tecnología. Por ejemplo, las redes sensoras favorecen una reducción en el consumo de agua y pesticidas, contribuyendo a la preservación del entorno. Adicionalmente, pueden alertar sobre la llegada de heladas, así como ayudar en el trabajo de las cosechadoras. Gracias a los desarrollos que se han producido en las WSN en los últimos años, especialmente la miniaturización de los dispositivos, han surgido nuevas tendencias en el sector agrícola como la llamada agricultura de precisión. Esta disciplina cubre múltiples prácticas relativas a la gestión de cultivos y cosechas, árboles, flores y plantas, ganado, etcétera.

Entre las aplicaciones más interesantes se encuentra el control de plagas y enfermedades. Por medio de sensores estratégicamente situados, se pueden monitorizar parámetros como el clima, la temperatura o la humedad de las hojas, con el fin de detectar rápidamente situaciones adversas y desencadenar los tratamientos apropiados. La gran ventaja del uso de esta tecnología es la detección a tiempo y la aplicación óptima de los pesticidas, únicamente en aquellas zonas donde resulta realmente necesario [50].

La ventaja de utilizar WSN radica en que se puede estar muy cerca del fenómeno, y que los sensores son suficientemente pequeños para no obstruir la vida de las plantas o animales que se van a estudiar. No obstante, para esta aplicación se necesita que los nodos tengan una vida útil grande [30].

Monitorización estructural y sísmico. Otra clase de aplicaciones consiste en monitorizar la condición de estructuras civiles, como puentes, edificios, calles, etcétera [36].

2.5.3 APLICACIONES EN LA SALUD

Algunas de las aplicaciones en la salud de las redes sensoras son proporcionar interfaces para discapacitados, monitorización de pacientes, diagnósticos, adminis-

tración de medicamentos en hospitales, vigilancia de movimientos y procesos internos en animales, monitorización de datos fisiológicos humanos, seguimiento, supervisión de los médicos, etcétera. Los datos recogidos por los sensores se pueden almacenar por una gran cantidad de tiempo y después ser utilizados para la investigación médica [26].

Estos pequeños nodos sensores permiten una mayor libertad de movimiento e identificar con anticipación distintos síntomas. Mediante el uso de una WSN situada en puntos estratégicos del domicilio del paciente, así como en objetos de uso cotidiano, los cuidadores pueden monitorizar en tiempo real el comportamiento de las personas, evitando la realización de tareas tediosas y centrándose en aspectos más importantes como es la mejora de su calidad de vida [8, 71].

Monitorización de epidemias. Se pueden desplegar redes sensoras con el fin de recolectar información sobre las causas de muerte y síntomas de las personas infectadas. También se puede monitorizar las condiciones ambientales, como la humedad y lluvia, para evitar la proliferación de insectos portadores de virus como la malaria [71].

Microcirugía. Una gran cantidad de nodos sensores montados en robots pueden colaborar en la realización de microcirugías [26]. Los robots se pueden utilizar en operaciones del corazón, cerebro, al implementar una prótesis, en una cirugía estética, etcétera [10, 59].

Seguimiento y supervisión de médicos y pacientes en un hospital. Cada paciente lleva pequeños y ligeros nodos sensores que tienen una tarea específica. Por ejemplo, uno puede detectar la frecuencia cardíaca mientras otro detecta la presión arterial. Los médicos también pueden llevar un nodo sensor que permita localizarlos en el hospital [8].

Administración de medicamentos en el hospital. Si el nodo sensor puede ser unido al medicamento, la posibilidad de recibir un medicamento inadecuado se

reduce al mínimo debido a que los pacientes tienen nodos sensores los cuales identifican sus alergias y medicamentos necesarios [8].

Un ejemplo de esta aplicación es el proyecto CodeBlue, desarrollado en la Universidad de Harvard [41, 42]. En este caso se han implementado distintos tipos de sensores para la monitorización de parámetros vitales: tasa de latidos del corazón, concentración de oxígeno en sangre, datos electrocardiograma, etcétera. Toda esta información se recoge por los sensores y se distribuye de forma inalámbrica a una PDA u ordenador portátil para su procesamiento. De este modo, cualquier señal de alerta puede detectarse a distancia en tiempo real.

2.5.4 APLICACIONES EN EL HOGAR

Las WSN pueden tomar papeles clave en proveer ambientes inteligentes y convenientes no solamente en aplicaciones industriales, también en algunas más cercanas al ser humano, como las descritas a continuación:

Mediciones remotas. Las redes sensoras pueden ser utilizadas para leer el consumo en los servicios básicos, como el agua, el gas y la electricidad y después enviar inalámbricamente la información recabada en las lecturas al usuario o a la compañía proveedora. Podrían además utilizarse en un estacionamiento, la red enviaría un mensaje al usuario antes de que el tiempo parquímetro expire, de esta manera el usuario puede evitar una multa [71], entre otras aplicaciones.

Automatización del hogar. Con los avances tecnológicos, nodos sensores inteligentes y actuadores, pueden ser colocados en aparatos, tales como aspiradoras, aparatos de video, microondas, hornos, refrigeradores, etcétera, estos nodos sensores dentro de los dispositivos domésticos pueden interactuar entre ellos y con una red externa mediante el internet o vía satélite. Esto permite a los usuarios finales administrar, útil y fácilmente los dispositivos del hogar de manera local y remota [71].

2.5.5 APLICACIONES COMERCIALES

Algunas de las aplicaciones comerciales incluyen la supervisión de la fatiga de un material, la calidad de un producto, el manejo de inventario, juguetes interactivos, museos interactivos, control de robots, monitorización de zonas de desastre, diagnósticos de maquinaria, transporte, detección y vigilancia de robos de automóviles, etcétera.

Museos interactivos. En el futuro, el hombre será capaz de interactuar con objetos en museos, y podrá participar en tiempo real en experimentos de causa-efecto, que le informen acerca de la ciencia y el ambiente. Además, las redes sensoras serán útiles para la búsqueda y localización de objetos o personas.

Aplicaciones en empresas y oficinas. Cada elemento del inventario en una empresa o complejo de oficinas tendría un nodo sensor agregado, que pudiera ser localizado en las paredes, inmerso en el suelo o en el techo, etcétera, abriendo paso a la monitorización de todas las actividades realizadas con esos elementos [19].

Detección y monitorización de vehículos. Los nodos sensores pueden ser desplegados para detectar e identificar amenazas de robo dentro de una región geográfica y el informe de estas amenazas pueden ser enviados por internet a los usuarios finales para su análisis.

Otro ejemplo de aplicación sería la comunicación entre los vehículos, cuando uno llegue a una avenida con mucho tráfico podría comunicárselo a otros, con el fin de evitar un mayor congestionamiento.

En otra aplicación, al pasar por una caseta de cobro, un nodo sensor dentro del vehículo podría dar información sobre la localización, tamaño del vehículo, velocidad, condiciones de la carretera y comunicarle al personal de la caseta a qué cuenta cargar el importe, evitando así que el conductor se detenga a pagar.

Edificios inteligentes. Los edificios gastan una gran cantidad de energía debido al uso ineficiente de los sistemas de humedad, ventilación y aire acondicionado (en inglés: HVAC Systems) y a la desatención de los sistemas de iluminación. La implementación de WSN provee una mejor monitorización, en tiempo real y de alta resolución de éstos y otros parámetros, incrementando considerablemente el nivel de confort de los habitantes, y la reducción del uso innecesario de energía. Además, cada nodo sensor puede ser utilizado para monitorizar niveles de esfuerzo mecánico de edificios en zonas sísmicas activas.

Dependiendo de las aplicaciones, los nodos sensores pueden ser desplegados cuando el edificio ya está terminado (HVAC) o mientras el edificio está siendo construido (monitorización de esfuerzo). Si no es posible contar con una fuente adicional de energía, la vida de los nodos sensores puede ser hasta de unos años [30].

2.6 FACTORES DE DISEÑO

El diseño de una red sensora se encuentra bajo la influencia de muchos factores que incluyen la tolerancia a fallos, la escalabilidad, los costos de producción, el ambiente de operaciones, la topología de red sensora, las restricciones de hardware, los medios de transmisión y el consumo de energía.

En la actualidad, diversos investigadores estudian acerca de estos factores, sin embargo, ninguno tiene una completa visión donde se integren todos que conducen al diseño de redes sensoras y nodos sensores. En las siguientes páginas se describen a detalle cada una de estos factores.

2.6.1 TOLERANCIA A FALLOS

Algunos nodos sensores pueden fallar o ser bloqueados debido a la carencia de energía, por tener un daño físico o la interferencia de elementos ambientales. La falla

de unos cuantos nodos sensores no debería afectar la tarea total de las actividades que se lleven a cabo en la red sensora, pese a ello, la tolerancia a fallos permite su confiabilidad [2].

La tolerancia de fallos es la capacidad de mantener funcionando la red sensora sin importar cualquier interrupción debido a fallos en algún nodo sensor [3]. Los paquetes de información deben ser redireccionados hacia áreas en las que los nodos sensores cuenten con energía suficiente para hacer llegar la información al usuario [5].

Los protocolos y los algoritmos pueden ser diseñados dependiendo del nivel de la tolerancia a fallos requeridos por las redes sensoras, según los objetivos y aplicaciones de la red. Si en el ambiente donde los nodos sensores son desplegados existe muy poca interferencia, entonces, los protocolos usados pueden ser más relajados. En cambio, en ambientes en los que sea importante que los nodos no fallen, o que la detección de un evento sea crítica, el protocolo usado debe ser más estricto [35].

Por ejemplo, si los nodos sensores están siendo desplegados en una casa para rastrear y almacenar los niveles de humedad y temperatura, la exigencia de tolerancia a fallos puede ser baja, ya que esta clase de redes sensoras no se daña fácilmente ni existe interferencia de ruido ambiental. Por otra parte, si los nodos sensores son desplegados en un campo de batalla para la detección y supervisión, entonces la tolerancia a fallos tiene que ser alta, porque los datos que se perciben son críticos y los nodos sensores pueden ser destruidos por acciones hostiles. Por consiguiente, el nivel de tolerancia a fallos depende de la aplicación que tengan las redes sensoras y los esquemas deben ser desarrollados tomando en cuenta este factor.

2.6.2 ESCALABILIDAD

El número de nodos sensores desplegados para estudiar un fenómeno puede estar en el orden de los cientos o miles. Según la aplicación, el número puede alcanzar un valor extremo de millones. Los nuevos esquemas deben ser capaces de trabajar

con este número de nodos [36] y utilizar la naturaleza de densidad alta de las redes sensoras. La densidad puede extenderse de algunos pocos, hasta cientos de nodos sensores en una región, que puede ser de por lo menos diez metros de diámetro [3].

Además, el número de nodos en una región puede ser usado para indicar la densidad de la red, que depende de la aplicación de los nodos sensores y de la manera en que son desplegados. Para una aplicación de diagnóstico de maquinaria, la densidad de nodo se encuentra alrededor de 300 nodos sensores en una región de por lo menos $25 m^2$, la densidad para el vehículo que rastrea la aplicación se encuentra alrededor de diez nodos sensores por región. En general, la densidad puede ser tan alta como 20 nodos sensores por m^3 . Una casa puede contener alrededor de dos docenas de aparatos electrodomésticos que integren nodos sensores, pero este número crecerá si los nodos sensores son empotrados en los muebles y otros artículos diversos [2].

El protocolo de enrutamiento de la red sensora inalámbrica debe ser capaz de trabajar con un número grande de nodos sensores. Además, debe responder correctamente a cualquier número de eventos detectados [4, 26]. Tampoco el cambio en el tamaño de la red, la densidad de los nodos o la topología, deben afectar en el funcionamiento de la red [5].

2.6.3 COSTOS DE PRODUCCIÓN

Las WSN presentan algunas ventajas económicas comparadas con las redes tradicionales. Ejemplos claros podrían ser la menor frecuencia de mantenimiento, el despliegue, la formación y reorganización automática de la red, entre otros [71].

Sin embargo, ya que las WSN consisten en un gran número de nodos sensores, el costo de un nodo sensor es importante para justificar el costo total de las redes [3]. Si el costo de la red es más caro que el despliegue de sensores tradicionales, entonces la red sensora no es justificada por un alto costo [71]. En este caso, el costo de cada nodo sensor tiene que ser bajo. La tecnología de punta permite que un sistema de radio de tipo *Bluetooth* salga en menos de diez dólares. También, el precio de un

PicoNode tiene como objetivo costar menos de un dólar. El costo de un nodo sensor debería ser mucho menos de un dólar para que la red sensora sea viable [2].

El costo de una radio tipo Bluetooth conocida por ser un dispositivo económico, es hasta diez veces más caro que el precio destinado a un nodo sensor. Un nodo sensor tiene algunas unidades adicionales como las de detección y procesamiento. Además, puede ser equipado con un sistema de detección de ubicación, movilizador o generador de energía, según las aplicaciones de las redes sensoras [4]. El costo total incluye el del hardware, de mantenimiento de la red y de despliegue de la red [49]. Debido a ello, el desafío de los costos de los nodos sensores emerge de la cantidad de funcionalidades que requiere, a partir del número de nodos desplegados.

2.6.4 RESTRICCIONES DEL HARDWARE

Un nodo sensor se compone básicamente de la unidad de detección, la unidad de procesamiento, la unidad de comunicación y la unidad de energía. Estos dispositivos pueden tener a su vez componentes adicionales dependientes de la aplicación, como un sistema de posicionamiento global, un generador de energía y un movilizador [2].

La unidad de procesamiento, que generalmente tiene que ver con una pequeña unidad de almacenamiento, maneja los procedimientos que realiza el nodo sensor, mientras que la unidad de detección colabora con los nodos vecinos para realizar las tareas de monitorización. Una unidad de comunicación conecta el nodo a la red y transmite la información al usuario. Uno de los componentes más importantes de un nodo sensor es la unidad de energía, la cual puede ser apoyada por unidades de recuperación como celdas solares. Existen también otras subunidades, que son dependientes de la aplicación [3].

La mayor parte de las técnicas de enrutamiento y tareas de detección en redes sensoras requieren del conocimiento de localización con exactitud. Así, es común que un nodo sensor tenga un sistema de localización de posición. Un movilizador puede ser necesario para reubicar nodos sensores cuando la aplicación lo requiera.

Todas estas subunidades necesitan instalarse en un espacio pequeño parecido al de una caja de cerillos. El tamaño requerido puede ser tan pequeño, como un centímetro cúbico y ligero para permanecer suspendido en el aire. Aparte del tamaño, existen otras restricciones rigurosas para los nodos sensores, que deben consumir muy poca energía, funcionar en grandes densidades volumétricas, tener un costo bajo de producción y ser prescindibles, ser adaptables a una variedad de ambiente y ser autónomos y funcionar sin mantenimiento. Es decir, idealmente el hardware de una red sensora inalámbrica debe ser poco costoso, pequeño, flexible usar eficazmente la energía para maximizar la vida de la red, necesitar muy poco mantenimiento y brindar facilidad para recolectar la información [54].

2.6.5 TOPOLOGÍA DE LAS WSN

Los numerosos nodos sensores inaccesibles y con mantenimiento casi nulo, son propensos a frecuentar fallas, y por lo tanto, hacen que el mantenimiento de las redes sea una tarea difícil. De cientos a varios miles de nodos pueden ser desplegados en el campo a sensar, la densidad de nodos sensores depende de diversos factores, como la exactitud deseada, movilidad de los sensores, tolerancia a fallos, etcétera [49] y pueden ser tan altas como $20 \text{ nodos}/m^3$. El despliegue de un número elevado de nodos hace que se requiera un trabajo cauteloso para el mantenimiento de la topología [6, 13].

Cuestiones relacionadas directamente con la topología de la red sensora inalámbrica, son las fases de predespliegue, despliegue, postdespliegue y redesplicue que a continuación se describen [3, 4]:

PREDESPLIEGUE Y FASE DE DESPLIEGUE

Como se mencionó anteriormente, el número de nodos sensores desplegados en una red sensora inalámbrica es mayor a los que posee una red convencional. Así pues, el área que alcanza a cubrir una red sensora inalámbrica es muy grande.

La idea consiste en abarcar áreas grandes mediante el despliegue de muchos nodos sensores de poca cobertura y bajo costo. Esta característica hace que la red sea mucho más flexible y que pueda ser reajustada moviendo o desplegando nodos sensores a ella [49].

Otro beneficio de tener una red densamente desplegada es, que debido a la disminución exponencial probable de la detección del nodo por la distancia del fenómeno hacia el sensor, una red con alto número de nodos sensores cubre pequeñas áreas, abriendo camino a la posibilidad de que el evento sea detectado [15].

El despliegue de los nodos sensores es fundamental en la red, siendo su objetivo maximizar la parte cubierta del campo a sensar y minimizar el número de nodos sensores desplegados, cumpliendo con las restricciones de costo, confiabilidad, escalabilidad, calidad de servicio, etcétera [71].

En la mayor parte de los casos, el usuario acomoda los nodos sensores cuando el campo a sensar es conocido y de fácil acceso. El despliegue aleatorio de nodos sensores se realiza en campos a sensar con gran dificultad de acceso o en zonas hostiles [28, 71].

Aunque los nodos sensores se encuentren distribuidos en un lugar poco accesible y sin mantenimiento, también pueden ser colocados por el usuario, según un plan de dispersión cuidadosamente ingeniado [71]. Los esquemas para el despliegue inicial deben reducir el costo de instalación, eliminar la necesidad de cualquier preorganización y preplanificación, aumentar la flexibilidad del arreglo y promover la autoorganización y la tolerancia crítica. A continuación se enlistan algunas maneras de desplegar los nodos sensores en el campo a sensar:

- Dejándolos caer desde un avión, como en la figura 2.15.
- Desplegándolos en lanzamientos de artillería, catapultados, disparados o en forma de misil.
- Colocándolos uno por uno, ya sea por un humano o un robot.

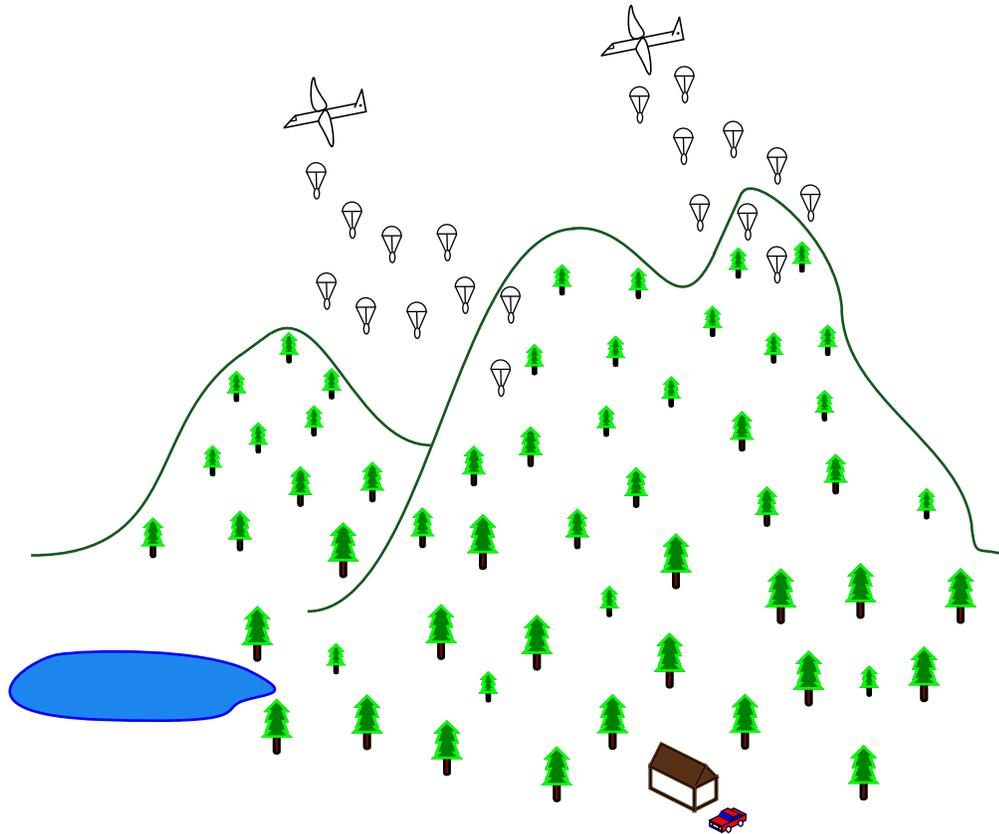


Figura 2.15: Nodos sensores desplegados desde un avión en el campo a sensar.

FASE DE POSTDESPLIEGUE

Después del despliegue, los cambios de topología son realizados en los nodos sensores y suelen ser resultado de la ubicación de los nodos, la accesibilidad (debido a bloqueos, ruido, movimiento, obstáculos, etcétera), la energía disponible, el funcionamiento defectuoso y los detalles de la tarea.

FASE DE REDESPLIEGUE DE NODOS ADICIONALES

Los nodos sensores adicionales pueden ser desplegados de nuevo en cualquier momento para reemplazar a los que funcionan mal debido a cambios de la dinámica en el objetivo de las tareas. La adición de nuevos nodos plantea una necesidad de reorganizar la red. Hacer frente a cambios frecuentes en la topología para una gran

cantidad de nodos, significaría para una red ad hoc, un consumo de energía bastante restringido, requiriendo protocolos de enrutamiento especiales.

2.6.6 AMBIENTE

Los nodos sensores son densamente desplegados muy cerca o directamente dentro del fenómeno que será observado. Por lo tanto, trabajan generalmente sin mantenimiento y en áreas geográficas remotas, y en ocasiones, poco accesibles. Los nodos sensores pueden trabajar por ejemplo [2, 3, 4]:

- En intersecciones ocupadas.
- En el interior de una maquinaria grande.
- En el fondo de un océano.
- Dentro de un tornado.
- En la superficie de un océano durante un tornado.
- En un espacio contaminado biológicamente o por medios químicos.
- En un campo de batalla más allá de las líneas enemigas.
- En una casa o un edificio grande.
- En un depósito grande.
- Integrado en animales.
- Anexado a vehículos de movimientos rápidos.
- En un desagüe o río que se mueve con corriente.

Esta lista nos da una idea acerca de las condiciones en las que se espera que los nodos sensores trabajen. Pueden trabajar con alta presión en el fondo de un océano, en ambientes ásperos como unos escombros o un campo de batalla, bajo calor o frío extremos, en el inyector de un motor de avión o en regiones árticas y en un ambiente

muy ruidoso con bloqueos intencionales. El funcionamiento de la red depende en gran medida del terreno en donde está desplegada, el del nodo sensor se puede ver afectado por condiciones extremas, además pueden existir interferencias en la comunicación, entre otras cosas [49].

2.6.7 MEDIOS DE TRANSMISIÓN

En una red sensora multisalto, los nodos que se comunican son conectados por un medio inalámbrico. Estos enlaces pueden ser formados por radio, medios infrarrojos u ópticos. Para habilitar la operación global de estas redes, el medio de transmisión elegido debe estar disponible en cualquier parte del mundo.

Una opción para radio enlaces es el uso de bandas industriales, científicas y médicas (en inglés: industrial, scientific and medical, ISM), que ofrecen la comunicación libre en la mayor parte de países.

Otro posible modo de comunicación inter nodo en redes sensoras es por medio de la tecnología infrarroja. La comunicación infrarroja libre y robusta a la interferencia de dispositivos eléctricos. Los transeptores basados en comunicación infrarroja son más baratos y más fáciles de construir, aunque el inconveniente principal es la exigencia de una línea visible entre emisor y receptor. Esto hace que la opción infrarroja sea difícil para escenarios de transmisión en medios de redes sensoras.

Los inusuales requerimientos de aplicación hacen que los medios de transmisión para redes sensoras sean desafiantes. Por ejemplo, las aplicaciones marítimas pueden requerir el uso del medio de transmisión acuoso. Aquí, se podría usar la radiación de longitud de onda larga que pueda penetrar la superficie del agua.

2.6.8 CONSUMO DE ENERGÍA

El nodo sensor inalámbrico, siendo un dispositivo microelectrónico, sólo puede ser equipado con una fuente de alimentación limitada [4]. En algunos escenarios

de aplicación, el reabastecimiento de recursos energéticos podría ser imposible. El tiempo de vida de un nodo sensor, por lo tanto, muestra una fuerte dependencia al tiempo de vida de la batería.

Es probable que la muerte de algunos nodos sensores ocasione cambios topológicos significativos y se requiera nuevamente del enrutamiento de paquetes y de la reorganización de la red. Debido a esto, la conservación y administración de la energía adquieren mayor importancia. Es por estos motivos que los investigadores se enfocan actualmente en el diseño de protocolos conscientes de la energía y algoritmos para redes sensoras [3]. En otras redes móviles y ad hoc, el consumo de energía ha sido un factor de diseño importante, pero no la consideración primaria, simplemente porque los recursos de energía pueden ser reemplazados por el usuario. En cambio, en las redes sensoras el uso eficaz de la energía es una métrica importante, que influye directamente en el tiempo de vida de la red.

La tarea principal de un nodo sensor es detectar acontecimientos, realizar el cómputo local de forma rápida y luego transmitir los datos. El consumo de energía puede ser de ahí dividido en tres dominios: detección, comunicación, y procesamiento [26].

La energía varía con las aplicaciones naturales para la detección, la detección esporádica podría consumir menos energía que la monitorización constante de eventos. La complejidad de la detección de eventos también desempeña un papel crucial en la determinación del gasto de energía. Los niveles de ruido ambientales más altos podrían causar una corrupción significativa y aumentar la complejidad de de la detección [2]. Para profundizar un poco más acerca del consumo de energía en la comunicación de datos y procesamiento se tratan los siguientes puntos:

PROCESAMIENTO DE DATOS

El gasto de la energía en el procesamiento es mucho menor comparado con la comunicación de datos. Al procesar los datos -proceso crucial para minimizar el

consumo de energía en una red sensora multisalto- se reduce la cantidad total de información que es enviada, por lo tanto, se reduce el consumo de energía en la comunicación [3, 70].

COMUNICACIÓN

De los tres dominios, un nodo sensor gasta la energía máxima en la comunicación de datos, que implica tanto a la transmisión como a la recepción de información [70]. Esto puede ser mostrado en la comunicación a corto plazo con la energía de baja radiación, donde los gastos de energía en la transmisión y recepción tienen casi el mismo valor [3].

Es importante que en este cálculo no sólo se considere la energía activa sino también el consumo de energía del arranque en la circuitería de transceptor. El tiempo de arranque, que es de la orden de cientos de microsegundos, hace que esa energía no sea tan insignificante [2].

El gasto total de energía también puede ser reducido utilizando multisaltos para llegar al usuario. De esta manera se comunicará la información a nodos que se encuentren a pequeñas distancias. De tal manera que realizar un procesamiento de la información adecuado y enviar la información mediante multisaltos, son elementos claves para reducir el consumo de energía en la comunicación de datos [70].

2.6.9 REQUERIMIENTOS

Mecanismos innovadores para una red de comunicaciones, deben ser encontrados para poder satisfacer los factores que influyen en el diseño de una red inalámbrica de sensores. Lo importante es encontrar mecanismos suficientemente específicos para los rasgos y necesidades de cada aplicación y satisfacer la calidad de servicio, escalabilidad, tolerancia a fallos, tiempo de vida, etcétera.

Sin embargo, estos mecanismos deben ser compatibles en una amplia gama de aplicaciones. Si un desarrollo e implementación de redes sensoras inalámbricas se hace necesario para muchas aplicaciones individuales, las redes sensoras inalámbricas probablemente serían una tecnología económicamente factible [30]. Algunos de los mecanismos que forman parte de las redes sensoras inalámbricas son los siguientes:

Comunicación inalámbrica con multisaltos. La comunicación entre un emisor y un receptor en una WSN se enfrenta con algunas limitaciones, la principal es, que actualmente la comunicación en grandes distancias es posible sólo gastando una gran cantidad de energía [70].

Los nodos sensores tienen una fuente limitada de energía, además, la comunicación por salto sencillo no siempre es posible debido a que en ocasiones hay objetos que obstruyen la comunicación entre el nodo sensor y la estación base, por lo tanto, ésta no es una opción.

El uso de nodos intermedios reduce el consumo total de energía en comparación con un salto sencillo [56], además de que puede encontrar rutas para llegar a la estación base evitando obstáculos, siendo para muchas aplicaciones de las WSN, un ingrediente necesario [30].

Operación eficiente de la energía. Tener un consumo eficiente de la energía es la clave para poder obtener un gran tiempo de vida [28, 70], para lograrlo se deben diseñar WSN totalmente conscientes de la energía, es decir, que en cada uno de sus procesos, como la detección, el procesamiento y la recepción se tome muy en cuenta el ahorro de energía [27, 62].

Este requerimiento toma mayor importancia en el proceso de comunicación, por ser el que representa un mayor consumo.

Autoconfiguración. Una red sensora inalámbrica tiene que configurar todos sus parámetros operacionales de manera autónoma, independientemente de la configuración externa. Por ejemplo, los nodos deberían ser capaces de determinar

exactamente su posición usando sólo otros nodos sensores de la red (autolocalización).

La red también debe ser capaz de detectar cuando uno de sus nodos muere, así como de aceptar e integrar nuevos nodos. Estas acciones deben ser realizadas con el fin de que la red se mantenga trabajando a pesar de algunas bajas [5, 36].

Colaboración y procesamiento dentro de la red. En algunas aplicaciones un solo nodo sensor no es capaz de detectar si un fenómeno existe o no, no obstante, varios nodos sensores tienen que colaborar para detectar un evento y sólo el conjunto de información de estos nodos sensores puede proveer de suficiente información [30]. Un ejemplo sería determinar el promedio de temperatura en un área específica, dado que un solo nodo sensor no puede proveer información correcta, es necesario el trabajo en conjunto de varios nodos sensores.

Centrada en la información. Tradicionalmente las redes de comunicación están centradas en la transmisión de información entre dos dispositivos, cada uno equipado cuando menos, con una dirección de red, la operación de estas redes es, por lo tanto, centrada en la dirección.

En una red sensora inalámbrica donde los nodos sensores están densamente desplegados, identificar exactamente qué nodo es el que provee la información se hace innecesario. Mientras se obtengan los valores y la información requerida, el conocer de dónde proviene la información no es importante, a lo que se le llama una red centrada en la información [5, 19, 30].

La figura 2.16 muestra la diferencia entre un enrutamiento centrado en la dirección y otro centrado en la información. La ventaja de despreciar el lugar exacto del que viene la información y centrarse solamente en la información, radica en el ahorro de energía al enviar una menor cantidad de mensajes.

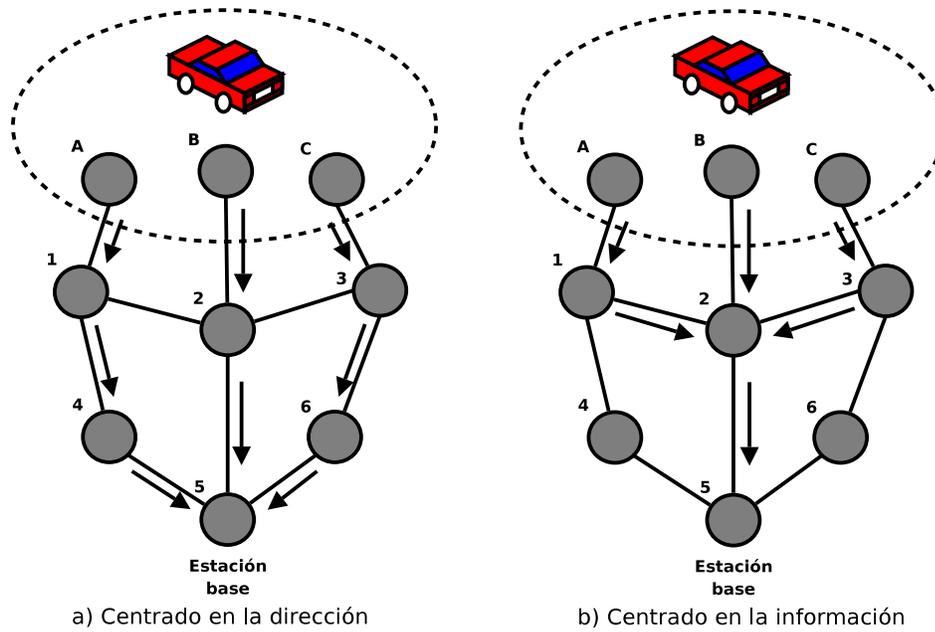


Figura 2.16: Diferencias entre el enrutamiento centrado en la dirección (a) y el centrado en la información (b) [5].

Utilizando el ejemplo de la sección anterior, al determinar promedio de temperatura en un área determinada, mientras la red obtenga el promedio del área que se le solicita, no se necesita saber qué temperatura detectó cada uno de los nodos sensores.

Un ejemplo de enrutamiento centrado en la información es la *difusión dirigida* (en inglés: directed diffusion) [12, 14, 30], que es un enfoque centrado en la información y consciente del ahorro de energía, útil para aplicaciones que requieren difusión y procesamiento de tareas.

La idea principal consiste en combinar la información proveniente de distintas fuentes y enrutar, minimizando la redundancia y el número de transmisiones, ahorrando así energía en los nodos sensores y prolongando la vida útil de la red.

En la difusión dirigida los nodos sensores son *conscientes de la aplicación* (en inglés: application aware), cada nodo sensor envía la información detectada a un nodo que se convierte en una fuente. Este nodo se encarga de recolectar la

información, procesarla y solamente enviar lo que sea necesario a la estación base o al usuario.

La difusión dirigida se ve afectada por la localización de los nodos convertidos en fuentes, el número de fuentes y la topología. En [4, 5] se proponen dos modelos para la difusión dirigida:

- *Radio del evento* (en inglés: event radius, ER).
- *Fuentes aleatorias* (en inglés: random sources, RS).

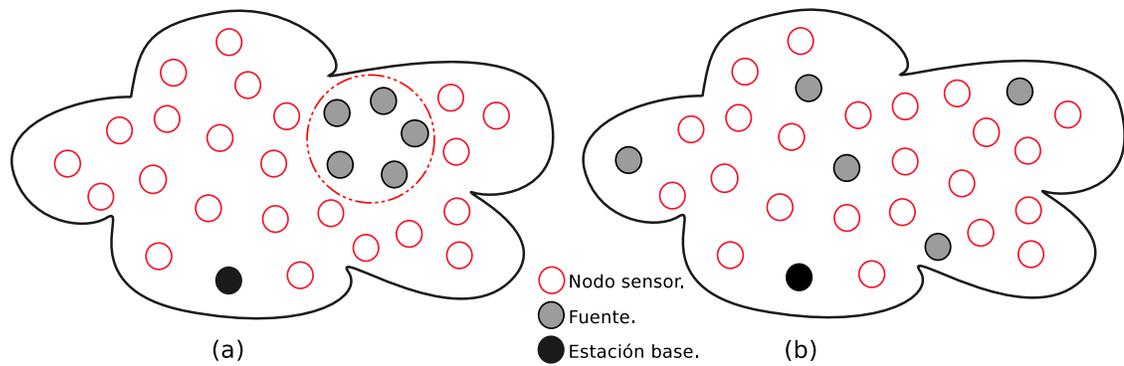


Figura 2.17: (a) ER: todos los nodos ubicados dentro de una distancia r_d son seleccionados como fuentes. (b) RS: las fuentes son seleccionadas aleatoriamente [4, 5].

La figura 2.17 muestran los dos tipos de modelos propuestos en [4, 5]. En ER un punto en la red es definido como la ubicación de un evento, todos los nodos dentro de una distancia r_d (rango de detección) con respecto al evento, no son nodos sensores, sino que se consideran como fuentes.

En RS cierto número de nodos son aleatoriamente seleccionados para ser fuentes. A diferencia del modelo ER, en el modelo RS las estaciones base no necesariamente deben estar cerca unas de otras [14].

CAPÍTULO 3

MODELO

Para implementar este algoritmo de enrutamiento y experimentar con él, se debe contar con una red sensora inalámbrica con la cual trabajar. Por ello, una parte importante de esta aportación consiste en la realización de un software que genere una red sensora inalámbrica. El presente capítulo, describirá las características con las que deberá contar el modelo que se desea implementar en un software.

3.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES

Es un requisito primordial que el campo a sensar cuente con zonas de distinta dificultad de acceso para implementar un algoritmo de enrutamiento capaz de incrementar la vida de los nodos sensores desplegados en zonas con un alto costo de reemplazo.

Las zonas tendrán un costo de reemplazo automático o asignado por el usuario, que irán en escala desde uno hasta diez, utilizando el diez para zonas con muy alta dificultad de acceso, y por tanto, un alto costo de reemplazo.

En el campo a sensar se desplegarán cierto número de nodos sensores como sea necesario para la aplicación. Cada uno de los nodos sensores porta una fuente limitada de energía, por lo que es importante que el usuario tenga conocimiento de la cantidad de energía que le resta al nodo sensor.

Al tener conocimiento de esta información, el usuario puede darse cuenta de las zonas de la red en las cuales se debe programar un mantenimiento.

E_i = Energía inicial del nodo sensor.

$E_{i(t)}$ = Energía restante.

Los sensores pueden ser desplegados de manera aleatoria o previamente planificada, de cualquier manera el nodo en algún momento morirá. Si esto afecta el funcionamiento de la red, el nodo tendrá que ser reemplazado. El reemplazo de cada nodo sensor implica un costo adicional, el cual varía dependiendo de la localización del nodo sensor.

De tal manera que en este modelo, para la fase de despliegue el nodo sensor debe saber quién es (i) y conocer sus coordenadas (U_{s_i}). Además, cada nodo sensor debe conocer las coordenadas del usuario (U_u), para saber hacia dónde se enviará la información. También debe conocer la hora (t) para agregar este dato a los mensajes enviados, con el fin de que el usuario sepa la hora en que se creó cada mensaje y el tiempo que tardó en llegar. Por último, el nodo sensor debe saber cuál es su costo de reemplazo (C_i).

Para que el nodo sensor conozca esta información, es necesaria la interacción de la red con el usuario. Cada uno de estos datos pueden ser alimentados por el usuario al nodo sensor al momento del despliegue o ser detectados automáticamente por el nodo sensor, empleando por ejemplo un sistema de posicionamiento global (GPS) para las coordenadas, un reloj para la hora, etcétera.

C_n = Coordenadas del nodo sensor. (x_i, y_i).

C_u = Coordenadas del usuario.

C_i = Costo de reemplazo del nodo sensor.

t = Hora.

En el modelo de la red sensora inalámbrica se cuenta con tres tipos de mensajes:

m_e = Mensaje de evento.

m_v = Mensaje de vecinos.

m_u = Mensaje de usuario.

El mensaje de evento, como su nombre lo dice, es el encargado de comunicar al usuario que un fenómeno fue detectado, como se explicará a detalle más adelante. Al ser desplegados, los nodos sensores deberán enviar un mensaje inicial para identificarse con sus nodos vecinos y así poder formar la red. En intervalos de tiempo, el nodo sensor deberá enviar un mensaje a sus nodos vecinos (M_v) indicándoles que sigue vivo, este mensaje deberá de contener la siguiente información:

i = Identificación.

$E_{i(t)}$ = Energía restante.

C_i = Costo de reemplazo del nodo sensor.

En intervalos de tiempo mayores, el usuario enviará mensajes a cada nodo sensor vía multisaltos (m_u), con el fin de que el nodo se dé cuenta si sigue unido a la red. Los nodos vecinos y los intervalos de tiempo para mandar esta información a los nodos y al usuario se definen de la siguiente manera:

v_i = Nodos vecinos.

t_v = Intervalo de tiempo para enviar un mensaje a los nodos vecinos.

t_u = Intervalo de tiempo para que el usuario envíe su mensaje.

Como se mencionó anteriormente, los nodos sensores tienen un rango de detección o sensado y un rango de comunicación, que no necesariamente son iguales [60], definiéndose de la siguiente manera:

r_c = Rango de comunicación del nodo sensor.

r_d = Rango de detección del nodo sensor.

El nodo sensor podrá comunicarse con su nodo vecino (v_i) sólo si la distancia entre el nodo emisor y el nodo receptor (d) es menor o igual al rango de comunicación del nodo sensor (r_c). De igual manera, el nodo sensor podrá detectar la presencia del fenómeno sólo si la distancia entre el nodo sensor y el fenómeno es menor o igual al rango de detección (r_d).

En algunas situaciones, a pesar de que el rango de detección o comunicación sea menor que la distancia del nodo sensor a su vecino o al fenómeno, la detección o comunicación podría no llevarse a cabo debido a algún obstáculo.

Para determinar la distancia entre los nodos vecinos y la distancia entre el nodo sensor y el fenómeno, se utilizará la distancia euclidiana.

$$d_e = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}, \quad (3.1)$$

donde

d_e = Distancia euclidiana entre nodos sensores.

A continuación, en la figura 3.1 se muestran dos puntos, entre los cuales se determinará la distancia euclidiana utilizando la ecuación 3.1.

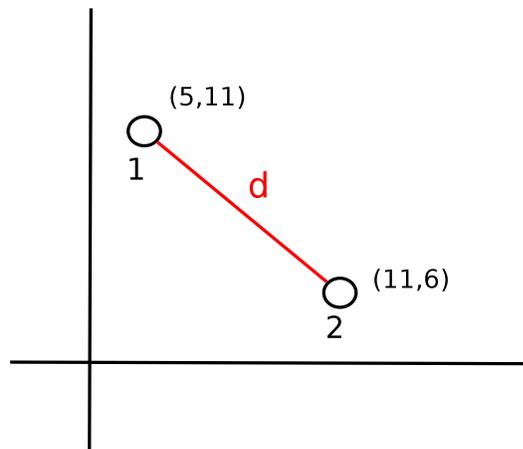


Figura 3.1: Distancia euclidiana entre dos puntos.

$$d(x, y) = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2},$$

$$d(x, y) = \sqrt{(11 - 5)^2 + (6 - 11)^2},$$

$$d(x, y) = \sqrt{(6)^2 + (-5)^2},$$

$$d(x, y) = \sqrt{36 + 25},$$

$$d(x, y) = \sqrt{61},$$

$$d(x, y) = 7.8102.$$

El nodo deberá decidir a cuál nodo vecino enviará la información, tomando en cuenta parámetros como la energía restante, el costo de reemplazo y el número de saltos hacia el usuario.

Al momento de desplegar los nodos sensores, se identifican con sus vecinos y se disponen a detectar el fenómeno. En ese momento también puede ser iniciada la simulación, donde un fenómeno estará moviéndose aleatoriamente por el campo a sensar.

t_s = Tiempo que dura la simulación.

Cuando un nodo sensor detecte un evento, enviará el siguiente paquete de información al usuario (m_e):

i = Identificación.

$E_{i(t)}$ = Energía restante.

t = Hora de detección.

d = Dato enviado al usuario

El tiempo que dure la simulación (t_s) es mucho mayor al tiempo para que el usuario envíe un mensaje a los nodos sensores (t_u), que a su vez es mayor que el tiempo para enviar el mensaje de presencia a los vecinos (t_v).

Tomando en cuenta los aspectos anteriores, cuando un nodo sensor seleccione la ruta que tomará para llegar al usuario debe de conocer la energía con la que cuentan sus nodos vecinos ($E_{i(t)}$), las coordenadas (C_n) y el costo de reemplazo de los mismos (C_i).

Por ejemplo, si existen dos nodos a los que se les puede transmitir la información, como en la figura 3.2, el nodo A con bajo costo de reemplazo y el nodo B con alto costo de reemplazo, aunque el nodo A tuviera poca batería y el nodo B contara con la mitad de su batería, la información podría ser enviada al nodo A , debido a que no es costoso reemplazarlo y de esta manera se incrementaría la vida del nodo B .

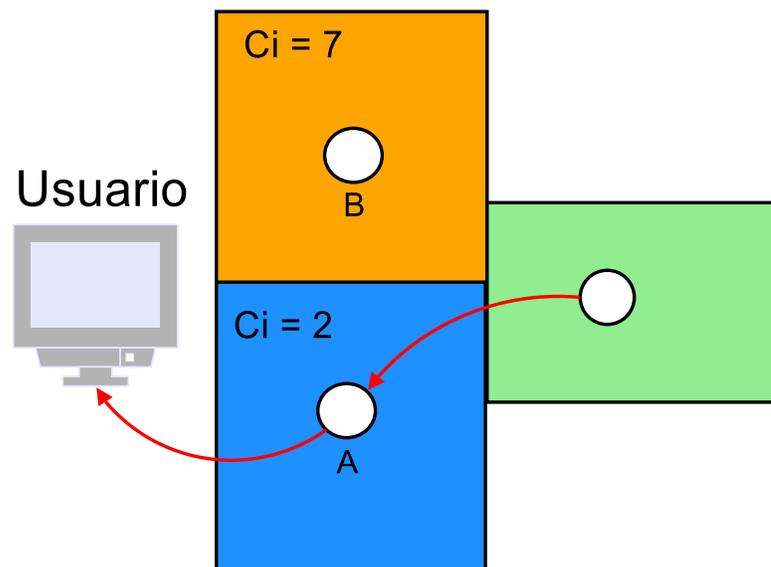


Figura 3.2: Seleccionar un nodo vecino al cual enviarle la información, tomando en cuenta la energía restante y el costo de reemplazo.

3.1.1 ENRUTAMIENTO

Un aspecto de suma importancia en la vida de una red sensora inalámbrica, es la manera en que se efectúa la comunicación entre los nodos sensores, así como la transmisión de los datos recabados por cada nodo sensor hacia el usuario. Siendo éste el objetivo de una red sensora inalámbrica. El enrutamiento juega un papel importante debido a que el consumo de energía en este proceso es una cantidad lejos

de ser despreciable en los nodos sensores [73], por lo tanto, una red que cuente con un adecuado protocolo de enrutamiento, garantiza un incremento en su vida útil, disminuyendo así costos de reemplazo o mantenimiento de los nodos sensores.

A grandes rasgos, el enrutamiento consiste en elegir hacia dónde enviar la información recabada, para que un nodo sensor elija a qué nodo vecino enviar la información. Los algoritmos de enrutamiento pueden tomar en cuenta algunas parámetros del nodo vecino, como la energía restante, el costo de reemplazo, el número de saltos hasta el usuario, la distancia y sus características.

La importancia de cada una de estos factores varía dependiendo de la aplicación para la que la red es diseñada. Por ejemplo, el despliegue de nodos sensores en un área que tenga diferentes dificultades de acceso, como un drenaje, sería mucho más difícil, poco accesible y desagradable cambiar o reparar los nodos que se encuentran en el suelo del drenaje, que los que están colocados en la pared. Así que, al diseñar un protocolo de enrutamiento en ese tipo de aplicaciones, es importante considerar el *costo de reemplazo* para incrementar la vida útil de los nodos sensores que tengan una mayor dificultad de acceso.

El algoritmo de esta investigación estará enfocado a aplicaciones en las que se cuente con zonas de diferentes dificultades de acceso. Los nodos serán colocados por el usuario o aleatoriamente, pero el usuario debe conocer su ubicación exacta. Las distancias entre nodos pueden ser iguales, pero no necesariamente deben serlo. Los nodos comunicarán la información al usuario mediante multisaltos, considerando que este tipo de comunicación consume menos energía que la de un sólo salto [2, 5, 56, 70].

Tomando en cuenta estos aspectos, se pueden elegir los parámetros que se utilizarán en el protocolo, como irá enfocado a aplicaciones en las que existan zonas con distintas dificultades de acceso, el parámetro principal será el costo de reemplazo de los nodos sensores.

Además, otro parámetro referencial será el número de saltos desde el nodo sensor hasta el usuario, considerando que a menor número de saltos, se disminuye el

consumo total de energía [56]. Sin embargo, en algunas situaciones podría ser más conveniente enviar la información hacia un nodo que tenga un número mayor de saltos, como se muestra en la figura 3.3.

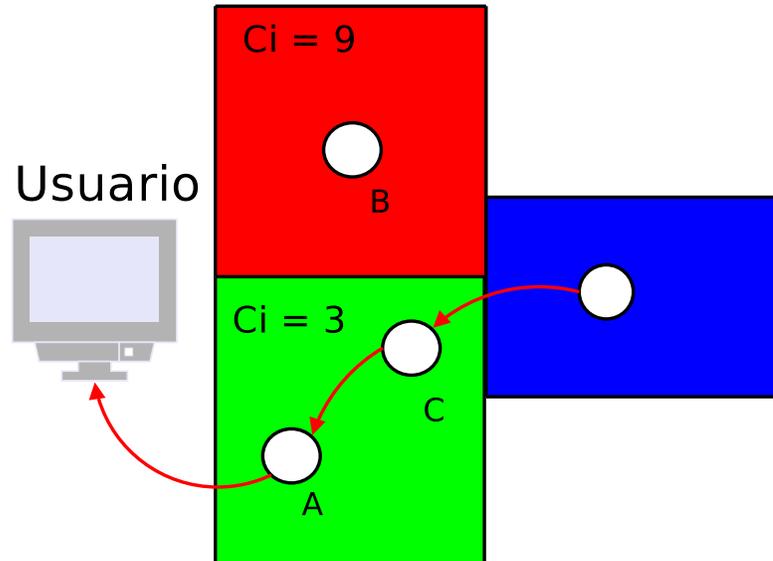


Figura 3.3: En este caso podría ser conveniente enviar la información por los nodos que tienen un menor costo de reemplazo, a pesar de que implique tener un mayor número de saltos hacia el usuario.

Por último, se considerará la energía restante de los nodos sensores, siendo éste un aspecto que en protocolos de enrutamiento enfocados al ahorro de energía no puede dejarse de lado.

Si al ejemplo mencionado en la figura 3.3, se le agrega el parámetro energía, y se toma en cuenta que este parámetro varía con respecto al tiempo, se pueden presentar casos en los que sea difícil decidir a simple vista o de manera rápida a qué nodo enviarle la información, incrementando la importancia de que el protocolo una estos parámetros en un algoritmo que pueda dar mayor o menor peso al costo de reemplazo, el número de saltos o el restante de energía, con el fin de que el nodo sensor pueda elegir la ruta más adecuada.

A continuación, la ecuación 3.2 muestra el algoritmo de enrutamiento que se desea implementar:

$$C_i = \frac{(C_r \times \phi^3) + (N_s \times \beta)}{(E_{i(t)} \times \epsilon)}, \quad (3.2)$$

donde:

C_i = Costo de reemplazo de nodo sensor.

C_r = Costo de reemplazo de la zona.

N_s = Número de saltos hasta el usuario.

$E_{i(t)}$ = Energía restante.

ϕ = Coeficiente de costo de reemplazo.

β = Coeficiente de número de saltos.

ϵ = Coeficiente de energía.

El algoritmo de enrutamiento consiste en seleccionar el nodo vecino que tenga un menor costo de reemplazo, basándose en la ecuación 3.2. Los coeficientes, de la misma manera que en la ecuación 4.1 sirven para darle mayor o menor prioridad a los parámetros.

Los valores que puede tomar cada coeficiente van desde *cero* hasta *diez* para el costo de reemplazo y número de saltos y desde *uno* hasta *diez* para la energía restante. El coeficiente para el costo de reemplazo (ϕ) es elevado al cubo con el fin de darle una mayor importancia a este parámetro.

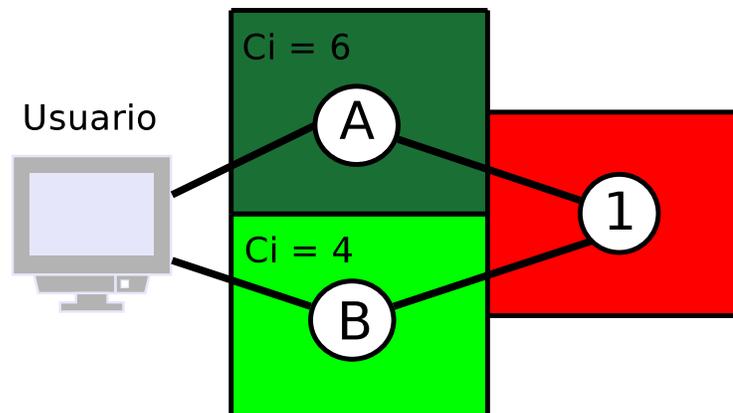


Figura 3.4: Seleccionar el nodo al cual enviarle la información.

Tabla 3.1: Datos de entrada al problema.

Parámetros	Nodo A	Nodo B
C_r	6	4
N_s	1	1
$E_{i(t)}$	80	60
Coeficientes		
ϕ	1	1
β	1	1
ϵ	1	1

Tabla 3.3: Sustitución de los datos del problema, mostrados en la tabla 3.1, en la ecuación 3.2.

$$\begin{array}{l|l}
 C_A = \frac{(6 \times 1^3) + (1 \times 1)}{(80 \times 1)}, & C_B = \frac{(4 \times 1^3) + (1 \times 1)}{(60 \times 1)}, \\
 C_A = \frac{(6) + (1)}{(80)}, & C_B = \frac{(4) + (1)}{(60)}, \\
 C_A = \frac{7}{(80)}, & C_B = \frac{5}{(65)}, \\
 C_A = 0.0875. & C_B = 0.0833.
 \end{array}$$

Suponiendo que se tiene un caso como en la figura 3.4, en el que el nodo 1 tenga que decidir si enviar la información al nodo A o al nodo B , el costo de reemplazo y la energía de los nodos sensores es diferente, mientras que ambos están a un sólo salto del usuario. Los datos del problema se muestran en la tabla 3.1: En la tabla 3.3 se calculó el costo total para cada nodo sensor, sustituyendo los datos del problema en la ecuación 3.2. En la tabla 3.5 se muestra la comparación del costo de reemplazo de los nodos A y B .

Tabla 3.5: Según el algoritmo de enrutamiento, es menos costoso enviar la información al nodo B.

$$0.0875 > 0.0833,$$

$$\underline{C_A > C_B.}$$

Por lo tanto, para el ejemplo de la figura 3.4 es menos costoso enviar la información hacia el nodo B (tabla 3.5), a pesar de que tiene una menor cantidad de energía. El algoritmo permite variar los coeficientes dependiendo de las necesidades de la aplicación.

Con la finalidad de tener una medida con la cual comparar los resultados obtenidos por el algoritmo, se corrieron algunas simulaciones en las que sólo se tomaba en cuenta la energía restante del nodo sensor al momento de decidir hacia dónde enviar la información, como se muestra en la ecuación 3.3

$$C_i = \frac{1}{E_{i(t)} \times \epsilon}, \quad (3.3)$$

donde:

$$E_{i(t)} = \text{Energía restante.}$$

$$\epsilon = \text{Coeficiente de energía.}$$

De la misma manera que en la ecuación 3.2, el nodo que se selecciona para enviarle la información es el que tenga el C_i menor.

CAPÍTULO 4

GENERADOR DE REDES SENSORAS

En este capítulo se describe el trabajo realizado para la creación de un software que genera WSN capaces de interactuar con el usuario. Como se mencionó anteriormente, el software fue creado con la intención de realizar las simulaciones necesarias para aceptar o descartar el algoritmo de enrutamiento propuesto.

4.1 PROGRAMADO EN LENGUAJE ANSI C

El software generador de redes sensoras se programó primero en lenguaje ANSI C, con el fin de obtener una red sensora inalámbrica simulada estáticamente, es decir, sin detección de eventos ni comunicación entre nodos sensores. La simulación es capaz de generar una red sensora inalámbrica en un campo a sensar dividido en zonas con diferente dificultad de acceso, lo que se refleja en los diferentes costos de reemplazo para cada nodo sensor. Antes de describir la simulación, vale la pena hacer algunas aclaraciones:

- El campo a sensar tiene la misma longitud a lo ancho que a lo largo, la unidad de medida puede ser en centímetros, metros, kilómetros, etcétera.
- Las coordenadas en x y en y del nodo sensor tendrán un valor entre 0 y 1.
- La palabra *paisaje* (p) hace referencia al número de filas y columnas en las que se dividirá el campo a sensar.

4.1.1 RED GENERADA EN EL TERMINAL

Como lo dice el nombre de la sección, la parte inicial de la simulación no cuenta con un ambiente gráfico, solamente es generada en un *terminal*, como se describe a continuación.

Al ejecutar el “*Generador de redes sensoras*” en un terminal, es necesario introducir el número de nodos sensores que deseas desplegar en el campo a sensor, el rango de comunicación de los nodos sensores y el tamaño del paisaje (tabla 4.1).

Tabla 4.1: Se ingresan los datos necesarios para construir una red sensora.

```
Define el número de nodos: 5
Define el rango de comunicacion: .5
Define el tamano del paisaje: 5
```

Una vez introducidos estos datos, devuelve la información que se proporcionó y el software genera la red sensora (tabla 4.2).

Tabla 4.2: El software comienza a procesar los datos y se dispone a generar la red sensora.

```
Generando una red con 5 nodos.
Usando un rango de comunicacion de 0.50.
Con un paisaje de 5 por 5 celdas.
```

En este caso se generó un campo a sensor de 5 filas por 5 columnas, la simulación despliega un arreglo como el de la tabla 4.3 en el que se indica el costo de reemplazo de cada una de las subdivisiones.

Tabla 4.3: Costo de reemplazo de cada subdivisión del campo a sensar, dividido en un paisaje de 5×5 .

8	10	9	9	1
2	9	8	3	1
5	1	2	5	1
7	7	3	2	5
3	1	5	4	1

El arreglo mostrado en la tabla 4.4, que consta de cinco columnas, tiene la finalidad de indicarnos las coordenadas y costo de reemplazo de cada nodo sensor. En la primera aparece la letra n , que indica que es un nodo sensor; en la segunda se enumeran los nodos sensores que fueron generados; la tercera y la cuarta muestran las coordenadas en x y y de éstos; y la última muestra el costo de reemplazo del nodo sensor, basándose en la subdivisión en la que se encuentra.

Tabla 4.4: Arreglo que muestra las coordenadas y costo de reemplazo de los nodos sensores desplegados en la red.

n	1	0.739463	0.053377	9
n	2	0.960753	0.635273	5
n	3	0.541276	0.430555	2
n	4	0.157537	0.135868	8
n	5	0.848262	0.944517	1

El último arreglo tiene como finalidad mostrar las aristas (enlaces entre nodos) existentes en la red sensora. Consta de cuatro columnas y la primera de ellas despliega la letra e , solo para indicarnos que ya no se hace referencia a nodos sensores sino a aristas.

La segunda y tercera columna refiere entre cuáles nodos existe esta arista, mientras que la última columna despliega la distancia euclidiana entre ese par de nodos. Por último, debajo del arreglo se despliega el número total de aristas que contiene el campo.

Tabla 4.5: Aristas formadas entre los nodos desplegados en la red.

e 1 3 0.426077

e 2 3 0.466766

e 2 5 0.329069

e 3 4 0.483835

El grafo contiene 4 aristas

4.1.2 RED GENERADA GRÁFICAMENTE

En la sección pasada se inició la generación del campo a sensar, desplegando aleatoriamente los nodos sensores, las aristas que conforman la red, así como las zonas con diferente dificultad de acceso.

Debido a que las zonas con diferentes costos de reemplazo se generaban aleatoriamente, se presentaban algunos casos, en los que zonas con un costo de reemplazo *uno* eran seguidas de zonas con un costo de reemplazo *siete*, *diez* o algún caso parecido.

En un campo a sensar real es muy difícil encontrar situaciones como ésta, en la que los costos de reemplazo pequeños se encuentren a unos metros de distancia de los costos de reemplazo mayores. En esta sección se generarán campos que se acerquen más a la realidad, tomando en cuenta aspectos como la distancia, los vecinos y un coeficiente aleatorio, definidos detalladamente a continuación.

Los nodos más cercanos al usuario deben tener un costo de reemplazo pequeño, mientras que los lejanos, un costo mayor. Sin embargo, si se toma en cuenta sólo

este punto, los campos a sensor serían exactamente iguales en cada una de las simulaciones (como en la figura 4.1), dificultando determinar si la propuesta es válida o no lo es.

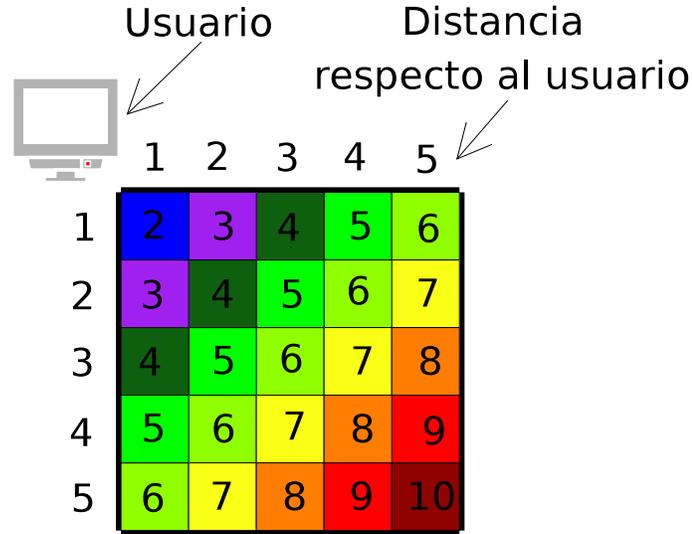


Figura 4.1: Campo a sensor dividido en zonas con diferente costo de reemplazo, basado solamente en la distancia manhattan.

Considerando el gráfico anterior, se tomará en cuenta la distancia de la zona con respecto al usuario, incluyendo como parámetros el promedio de las zonas vecinas y componentes aleatorios. La ecuación 4.1 describe la manera en la que son determinados los costos de las zonas en las que se divide el campo a sensor:

$$C_r = (d_m \times \delta) + (p_v \times \gamma) + (r \times \zeta), \quad (4.1)$$

donde:

C_r = Costo de reemplazo de la zona.

d_m = Distancia manhattan.

p_v = Promedio de costos de los nodos vecinos.

r = Componente aleatorio.

δ = Coeficiente de distancia.

γ = Coeficiente de promedio de los vecinos.

ζ = Coeficiente de aleatoriedad.

Para calcular el costo de reemplazo de la zona, primero se determina la *distancia manhattan* (*city block distance*) entre la zona a calcular y el usuario. La distancia manhattan representa la distancia entre puntos de una ciudad dividida en bloques o manzanas, es decir, determina la distancia absoluta entre las coordenadas de un par de objetos, obteniéndose mediante la ecuación 4.2:

$$d_m = |x_1 - x_2| + |y_1 - y_2|. \quad (4.2)$$

Suponiendo que un nodo se localiza en la zona localizada en las coordenadas (4, 3) y el usuario se encuentra en las coordenadas (0, 0), utilizando la ecuación 4.2, la distancia manhattan se obtendría de la siguiente manera:

$$d_m = |4 - 0| + |3 - 0|,$$

$$d_m = |4| + |3|,$$

$$d_m = 7.$$

El ejemplo calculado anteriormente puede ser ilustrado en la figura 4.2, donde se observa que para llegar desde el origen al punto más lejano en las coordenadas (4, 3) se necesitan siete segmentos de recta, lo que es igual a la distancia manhattan.

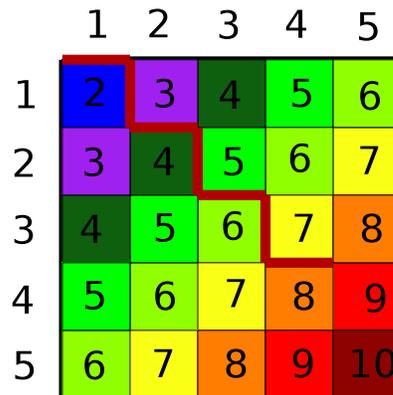


Figura 4.2: La distancia manhattan entre dos puntos puede ser definida como el número de segmentos de recta entre ellos.

Para el segundo parámetro, se calcula el promedio de costos de las zonas superior, izquierda y superior izquierda. En la figura 4.3, suponiendo que la zona para la cuál se calcula el costo se representa con la letra A , los vecinos de los cuales se calcularía el promedio se representan con los números 1, 2 y 3. A este promedio se le llamará pv o promedio de vecinos.

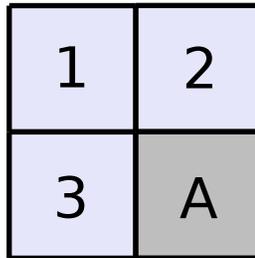


Figura 4.3: La letra A representa la zona para la cual se calculará el costo de reemplazo, las zonas enumeradas representan las zonas vecinas, las cuales se promediarán.

Por último se genera un número totalmente aleatorio del *uno* al *diez*, al cual se le llama r . Como aparece en la ecuación 4.1, cada uno de estos parámetros es multiplicado por un coeficiente δ , γ o ζ . La sumatoria de estos coeficientes es igual a uno, como lo describe la ecuación 4.3:

$$\delta + \gamma + \zeta = 1. \quad (4.3)$$

Los coeficientes mencionados se agregan para darle mayor o menor prioridad a cada parámetro en la generación del campo a sensar, lo que garantiza la generación de campos a sensar distintos en cada simulación.

En el ejemplo que aparece a continuación se muestra una red generada, mediante la cual se explicarán los conceptos anteriores. Se ejecutó el software introduciendo los valores necesarios para crear la red.

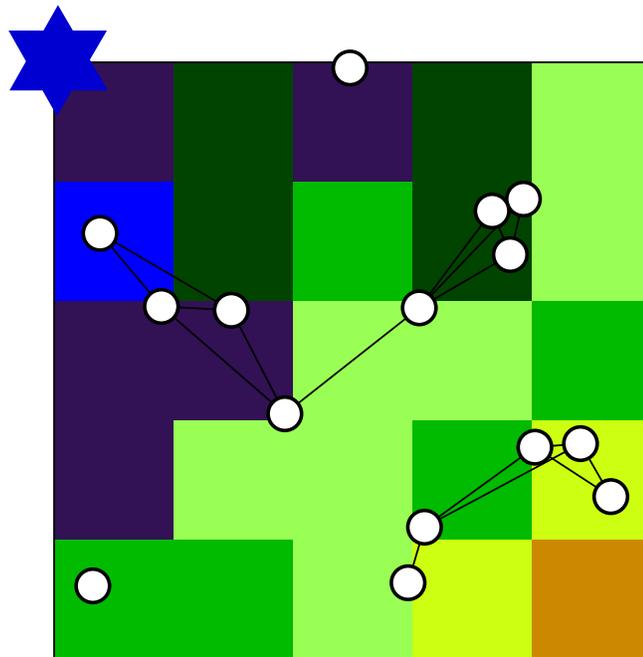
Tabla 4.6: Definir los datos de entrada para la generación de la red.

Generador de redes sensoras
Define el número de nodos: 15
Define el rango de comunicación: .3
Define el tamaño del paisaje: 5

Se confirman los valores introducidos y se genera la red sensora inalámbrica.

Tabla 4.7: Se confirman los datos de entrada y se genera la red, mostrada en la figura 4.4.

Generando una red con 15 nodos.
Usando rango de comunicación de 0.30.
Dividiendo el área en un paisaje de 5 por 5.

**Figura 4.4:** Dibujo de la red sensora generada, el diagrama se realiza utilizando la herramienta *Xfig*.

El software utiliza la herramienta *Xfig* para crear una imagen en la que se muestra un campo a sensar con los nodos desplegados, adicionalmente se dibujan las zonas con diferentes costos de reemplazo, como se muestra en la figura 4.4.

Además del dibujo de la red sensora, el software también genera un paisaje de costos en un archivo de texto, como el que se generaba en el capítulo anterior. Este paisaje de costos nos permite comprobar el costo de alguna zona determinada.

Tabla 4.8: Paisaje de costos generado por el simulador de redes sensoras.

3	4	3	4	6
2	4	5	4	6
3	3	6	6	5
3	6	6	5	7
5	5	6	7	8

Por último el software genera un archivo con las coordenadas de cada nodo, como se puede ver en la tabla A.1, así como los nodos entre los cuales se formó alguna arista, mostrado en el tabla A.2. Ambas tablas se muestran en el apéndice A.

4.2 PROGRAMADO EN LENGUAJE JAVA

Con el fin de obtener una red sensora inalámbrica en la que el usuario sea capaz de interactuar, ajustar parámetros, analizar redes de distintos tamaños, y tener un ambiente gráfico, se decidió realizar la simulación en el lenguaje de programación *Java*. El generador de redes sensoras, programado en Java se basa en los mismos principios y parámetros básicos que la versión en *ANSI C*. Algunos fueron corregidos con el fin de obtener un mejor funcionamiento, y se implementaron otros, que se describen en la presente sección.

La simulación consta de dos archivos ejecutables, uno de ellos muestra una red sensora inalámbrica generada capaz de interactuar con el usuario. El usuario puede ver la manera en que se genera la red, cómo los nodos sensores detectan un fenómeno y envían la información hacia el usuario, etcétera. El otro realiza las mismas funciones, con la excepción de que la parte gráfica no se muestra sino que la simulación se corre en un terminal y sólo imprime los resultados.

4.2.1 CLASES

En Java, una *clase* es una agrupación de datos y de funciones que operan sobre esos datos. A los datos y funciones se les denomina *variables* y *métodos*, al conjunto de variables y métodos relacionados se le llama *objeto*, mientras que un *paquete* es el que agrupa y organiza un conjunto de clases relacionadas [24, 67].

El software generador de redes sensoras consta de 18 clases, agrupadas en un paquete llamado **sensor**, descritas a continuación.

Agent. La clase Agent -en la que se agregan los vecinos potenciales de los nodos sensores- es la encargada de controlar los tres tipos de mensajes enviados (m_e , m_u y m_v), enfilándolos y dándole prioridad a los que deben ser procesados. De esta clase se derivan las subclases Node y BaseStation.

BaseStation. Su función es dibujar la estación base y asignarle los parámetros de rango de comunicación, intervalo en que envía los mensajes, etcétera. Es una subclase de Agent, por lo que comparte sus atributos.

Controller. La clase Controller es la clase padre de Display y ExperimentController. Es un enlace entre la simulación gráfica y la no gráfica.

Display. La función de la clase Display es imprimir la simulación en la pantalla.

Event. La clase Event es la encargada de crear y dibujar el fenómeno en un punto al azar del perímetro del campo a sensor, también delimita el tiempo de vida del evento y la trayectoria a seguir. Para definir la trayectoria se utiliza un *modelo de punto intermedio aleatorio* (en inglés: random waypoint model) [31].

EventMessage. En la clase EventMessage se genera el mensaje que envía el nodo sensor al detectar un evento (m_e).

ExperimentController. La clase ExperimentController realiza la función de controlar el experimento en la simulación no gráfica.

Experimenter. Su función es dar entrada al software no gráfico.

Generator. En la clase Generator se crean números aleatorios, los cuales son utilizados para definir las coordenadas de los nodos sensores y la ruta que seguirá el evento.

HopMessage. Genera los mensajes que el usuario envía a los nodos sensores (m_u).

Landscape. La clase Landscape está encargada de producir el paisaje en el campo a sensor, calcula el costo de reemplazo de las zonas mediante la ecuación 4.1, además de asignar un color a las zonas dependiendo su costo de reemplazo.

Log. La clase log crea los archivos de salida, para analizar los resultados.

Message. La clase Message determina la hora en la que se generaron los mensajes, de dónde provienen y el tiempo que tardaron en ser procesados. Ésta es la clase padre de las subclases EventMessage, PingMessage y HopMessage

Neighbor. La clase Neighbor compara la distancia entre nodos, si la distancia es menor al rango de comunicación y ambos nodos están vivos, establece una conexión entre ellos.

Network. La clase Network despliega el número de nodos sensores que el usuario desea, por lo tanto es la encargada de generar y darle mantenimiento a la red, es decir, reemplaza los nodos muertos y cuenta el costo total de reemplazos.

Node. La clase Node genera y dibuja cada nodo sensor y establece los parámetros del nodo, como el r_s y el r_c . Al igual que BaseStation, es una subclase de Agent, además calcula el costo de reemplazo de los nodos sensores mediante la ecuación 3.2.

Esta clase también está encargada de definir el intervalo de tiempo en que se envían los (m_v), detectar el fenómeno, reducir la energía de cada nodo sensor dependiendo de la actividad que realice y de cambiar el color del nodo sensor de acuerdo a su energía restante.

PingMessage. En la clase PingMessage se genera el mensaje que los nodos sensores envían a sus nodos vecinos para indicar que siguen vivos (m_v).

Simulator. Crea la ventana del simulador y da entrada a la interfaz gráfica.

DIAGRAMA DE CLASES

Un *diagrama de clases* (en inglés: class diagram) es un diagrama estático en el que se muestran las clases y la relación entre ellas, con la finalidad de describir la estructura de un programa. Es un tipo de diagrama de lenguaje unificado de modelado (en inglés: unified modeling language, **UML**) [44, 48].

La importancia de contar con un diagrama de clases es que le da al analista, al diseñador y al programador de un software un vocabulario común para hablar sobre su diseño[44]. En la figura 4.5 se muestra el diagrama de clases del generador de redes sensoras.

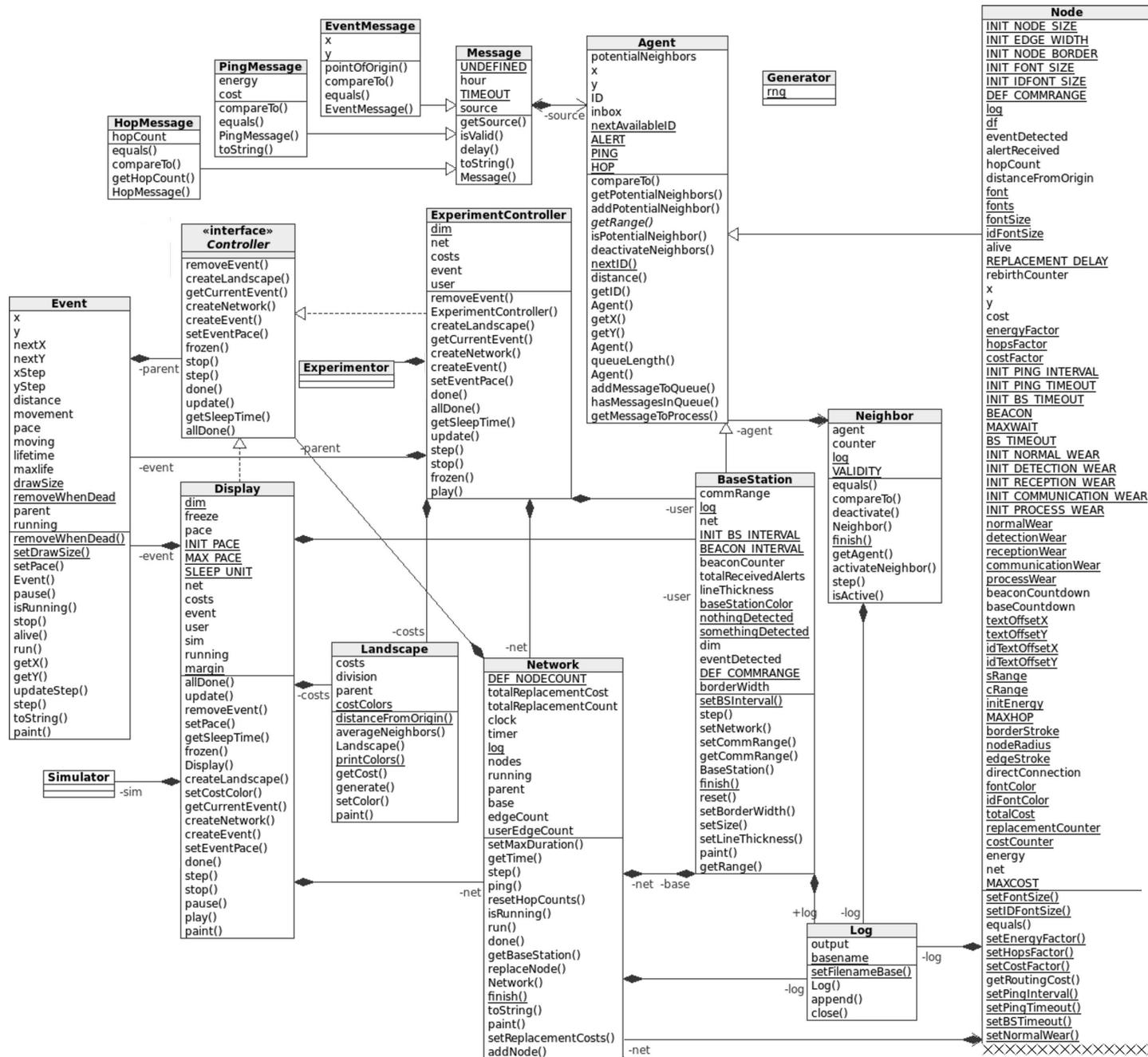


Figura 4.5: Diagrama de clases del generador de redes sensoras.

4.2.2 SIMULACIÓN GRÁFICA

VENTANA PRINCIPAL

Al ejecutar el software simulador de redes sensoras, se abre la ventana mostrada en la figura 4.6. En dicha ventana aparecen los botones necesarios para controlar la simulación.



Figura 4.6: Ventana principal del software generador de redes sensoras.

En la figura 4.7 se muestran los botones *crear una red*, *crear un paisaje de costos* y *crear un evento* (en inglés: create network, create landscape y create event), después se describen las acciones que cada uno realiza.



Figura 4.7: Botones para crear una red, un paisaje de costos y un evento.

Crear una red. Genera una red sensora en la que los nodos sensores son distribuidos aleatoriamente en el campo a sensor.

Crear un paisaje de costos. Genera un campo a sensor dividido en zonas con diferentes costos de reemplazo, identificados mediante colores.

Crear un evento. Genera el fenómeno que en la simulación se ha de detectar.

La figura 4.8 muestra una red sensora inalámbrica generada aleatoriamente, desplegada en un campo a sensor dividido en zonas con diferentes dificultades de acceso. Además se muestra un evento a detectar. Después se describen las características gráficas de la red sensora generada (figuras 4.8 y 4.9):

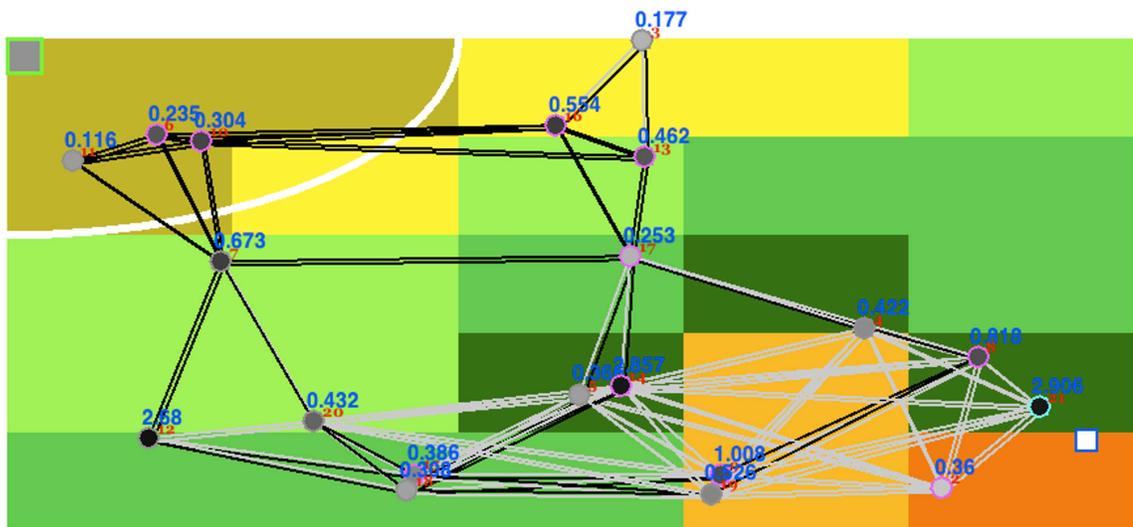


Figura 4.8: Simulación de una red sensora inalámbrica funcionando.

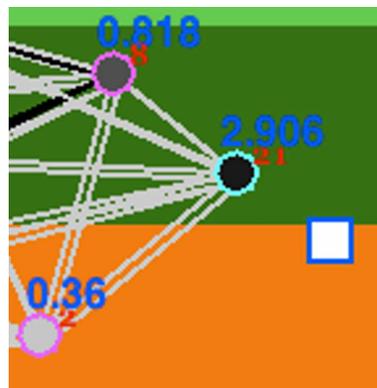


Figura 4.9: Evento detectado por un nodo sensor, el cual a su vez envía la información a los nodos vecinos.

- Cada nodo sensor es representado por un círculo inicialmente de color blanco, mientras va perdiendo energía se torna negro.
- Los nodos que pueden comunicarse entre ellos están unidos por aristas en color inicialmente gris. Cuando se establece completamente la comunicación entre ellos las aristas son negras.
- El evento se representa con un cuadrado que también inicialmente es blanco y cuando va muriendo se torna negro.
- Los nodos sensores poseen un aro gris. Cuando un evento es detectado el aro se torna color azul claro. Cuando el nodo sensor recibe un mensaje de evento (M_e) el aro se torna morado.
- En la parte superior derecha de cada nodo sensor aparece en color azul el costo de reemplazo del nodo sensor. Antes de que la simulación empiece y al morir el nodo sensor, el costo de reemplazo es infinito. Debajo del costo de reemplazo aparece la identificación del nodo sensor.
- El usuario es representado con un cuadrado negro en la parte superior izquierda del campo. Posee un borde gris, el cual se torna verde en el momento que el usuario empieza a recibir mensajes de alerta de los nodos sensores.
- Antes de crear un evento, los botones mostrados en la figura 4.10 están desactivados. Una vez que se crea el evento, se puede mover, pausar, mover paso a paso o detener.



Figura 4.10: Botones para mover, pausar, mover paso a paso o detener un evento.

- Si la barra para controlar la velocidad de la simulación se encuentra posicionada en su extremo izquierdo, la simulación se congela. El tiempo transcurrido en la simulación se cuantifica por el número de pasos que se han dado.



Figura 4.11: Barra para controlar la velocidad de la simulación. Además se muestra el tiempo transcurrido.

PANEL DE CONTROL

En la barra de menús aparece la pestaña opciones, al presionarla se puede entrar al panel de control 4.12, donde se pueden ajustar los parámetros de la red sensora inalámbrica.

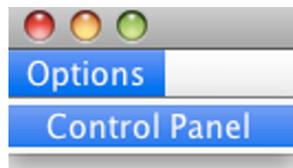


Figura 4.12: Del menú opciones se despliega el panel de control.

El panel de control cuenta con ocho pestañas, descritas a continuación:

MODELO DE LA RED. En esta pestaña se elige el número de nodos que se desean desplegar para formar la red, además se seleccionan los rangos de comunicación y de sensado del nodo sensor (figura 4.13).

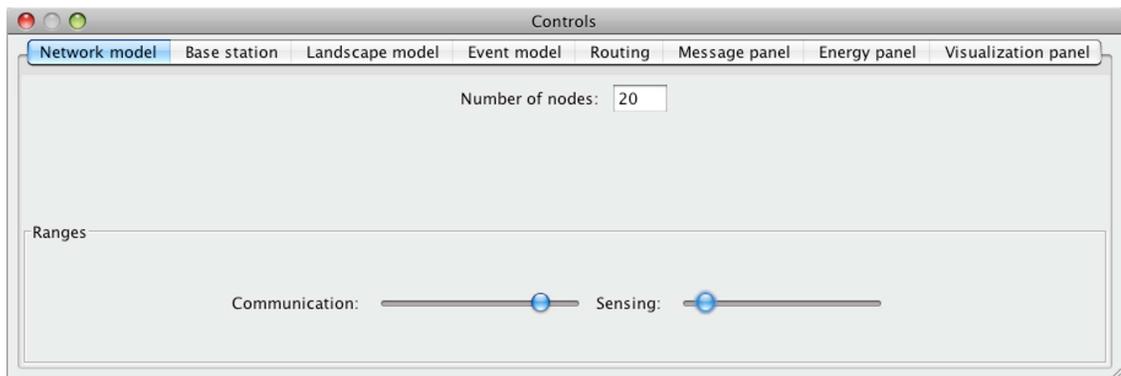


Figura 4.13: Control del modelo de la red.

ESTACIÓN BASE. Se selecciona el rango de comunicación de la estación base (figura 4.14). Este rango debe ser mayor al de un nodo sensor desplegado en la red. En la simulación, el rango de comunicación del usuario se representa con un borde blanco.

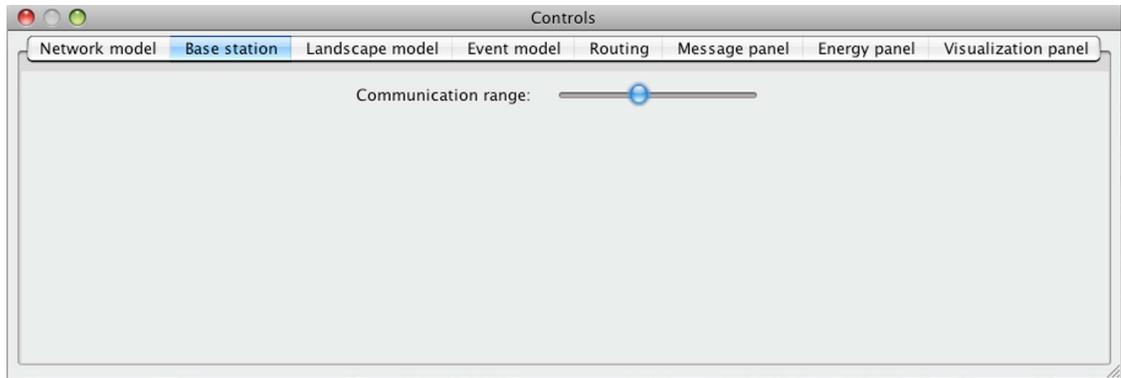


Figura 4.14: Control del rango de detección de la estación base.

MODELO DEL PAISAJE. La opción *dimensión del paisaje* (Landscape grid dimension) permite establecer el número de divisiones que tendrá el campo a sensar, en el ejemplo de la figura 4.15 se establece que se tendrá un campo de 5×5 divisiones.

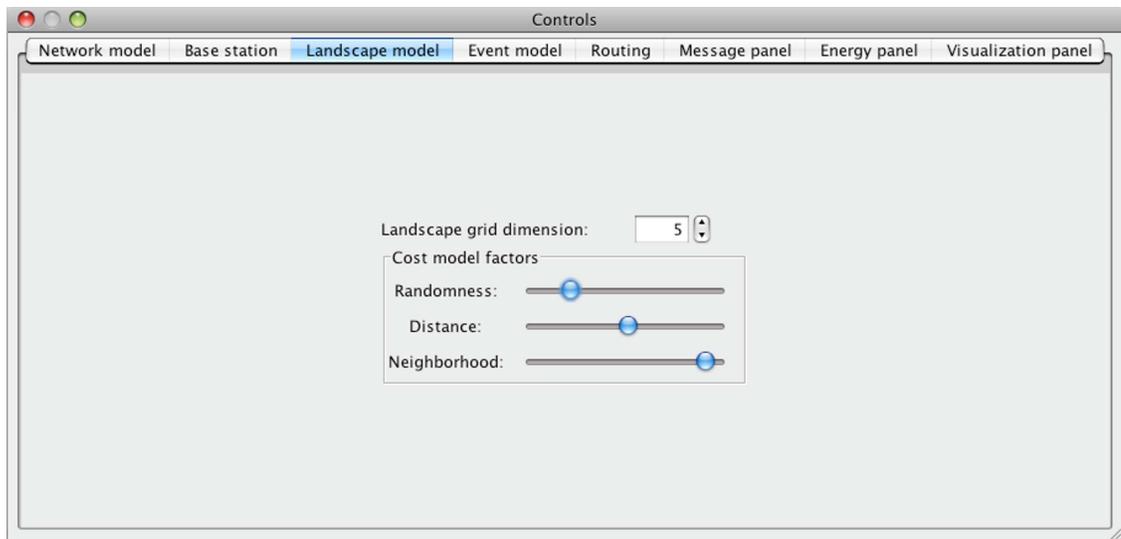


Figura 4.15: Controles para el modelo del paisaje.

En la figura 4.16 se muestran dos campos a sensar generados con diferente cantidad de divisiones en el paisaje, uno de tamaño 5×5 , y el otro de tamaño 10×10 . Sin embargo, el software puede generar campos de hasta 50×50 divisiones.

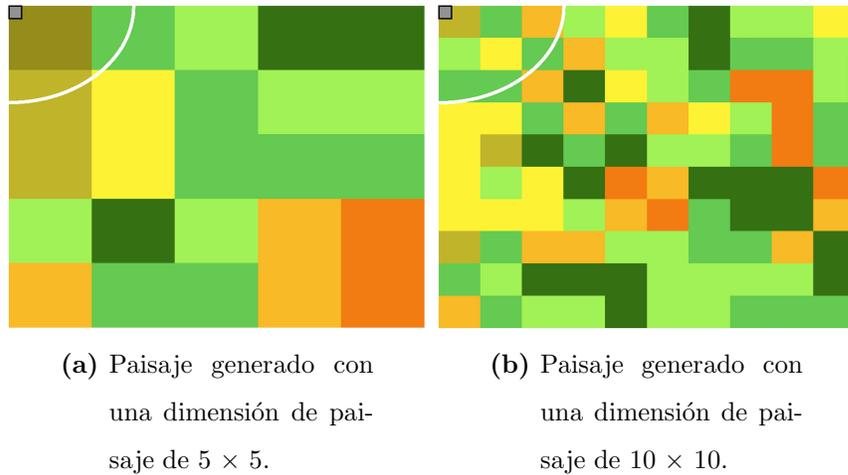


Figura 4.16: Campos a sensor generados con diferente número de divisiones en el paisaje.

La opción de la figura 4.15 que sirve para la asignación de costos para cada zona, varía los parámetros *aleatoriedad*, *distancia* y *vecinos*. De esta manera se pueden crear diferentes zonas en las que las dificultades de acceso sean generadas de acuerdo a la aplicación que se proponga, utilizando la ecuación 4.1. En la figura 4.17 se muestran ejemplos de campos a sensor a partir de la variación de los parámetros δ , γ y ζ .

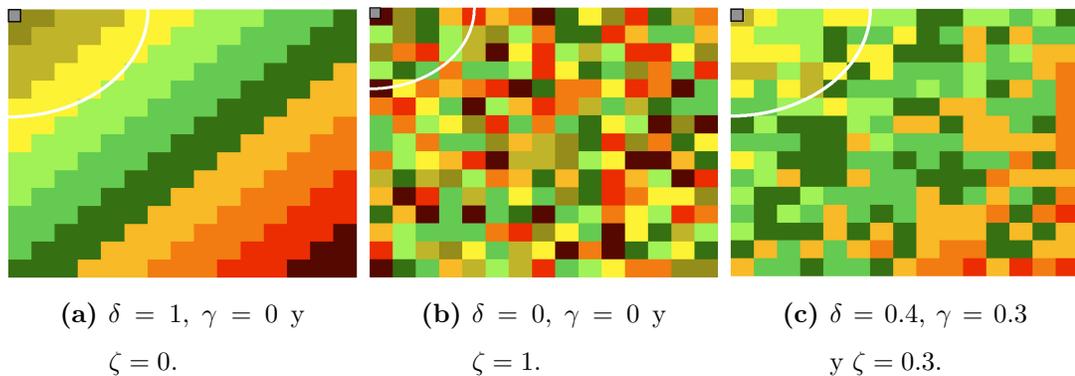


Figura 4.17: Zonas con diferentes costos de reemplazo, combinando los parámetros distancia (δ), aleatoriedad (γ) y promedio de los nodos vecinos (ζ).

- En la figura 4.17a se muestra un campo a sensor generado basándose solamente en el parámetro distancia.

- En la figura 4.17b se presenta un campo a sensor generado aleatoriamente.
- Un campo a sensor generado basándose en la distancia, los vecinos y un componente aleatorio se muestra en la figura 4.17c.

MODELO DEL EVENTO. Una de las opciones que nos brinda esta pestaña es determinar el tamaño del paso del fenómeno (en inglés: step size). En la simulación, este parametro determina la velocidad con que el evento se mueve.

En el panel modelo del evento también se puede decidir el tiempo de vida del fenómeno y si se desea que sea removido de la pantalla al concluir su tiempo de vida. En caso de que el evento no sea removido, los nodos sensores seguirían detectándolo aunque ya no se mueva. El panel se muestra en la figura 4.18.

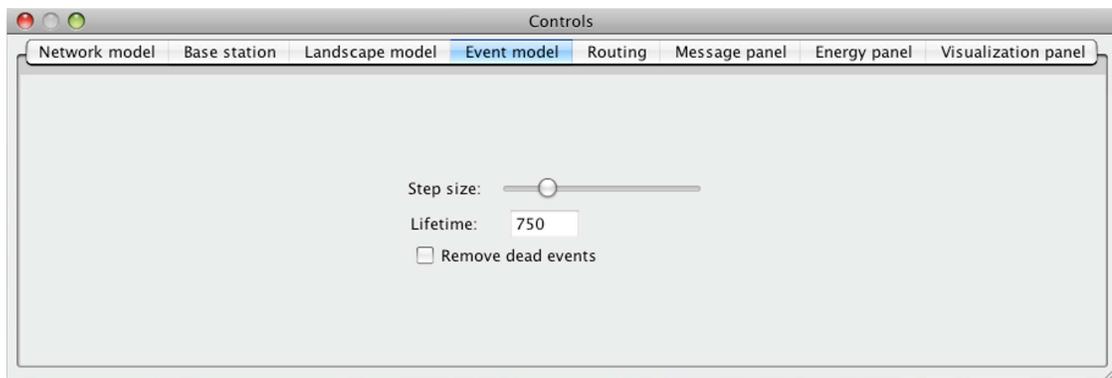


Figura 4.18: Control del evento.

ENRUTAMIENTO. Este control, mostrado en la figura 4.19, permite establecer el valor de los coeficientes que se desean asignar al algoritmo de enrutamiento. Es decir, ajustar los coeficientes de costo de reemplazo (ϕ), número de saltos (β) y energía (ϵ), que se utilizan en la ecuación 3.2 para darles mayor o menor importancia al momento de decidir la ruta por la cuál se enviará el mensaje de evento.

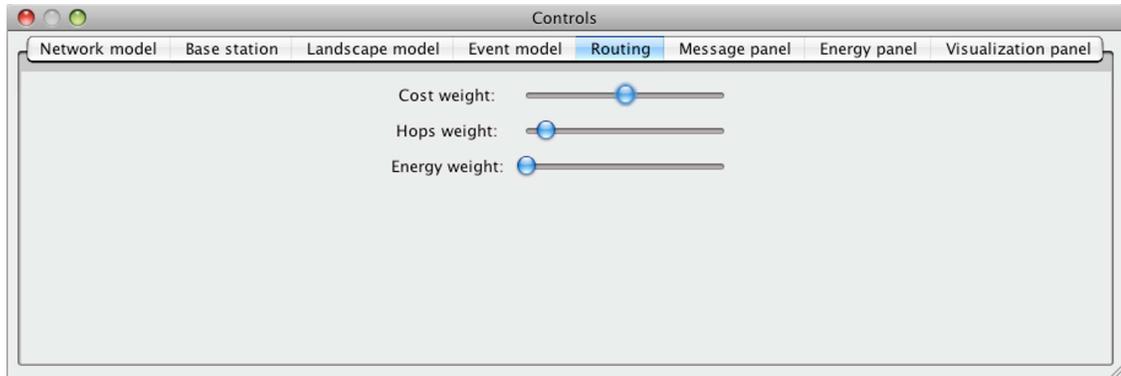


Figura 4.19: Control de los coeficientes para el enrutamiento.

PANEL DE MENSAJES. En el panel de mensajes, mostrado en la figura 4.20, se determina el intervalo de tiempo en que el usuario envía mensajes a los nodos sensores (M_u) y el intervalo en que los nodos sensores enviarán mensajes a sus vecinos para indicar que siguen vivos (M_v). Además, se determina el tiempo de vida de éstos mensajes antes de ser descartados. Se les da un tiempo de vida con la finalidad de eliminar los mensajes viejos y así evitar su procesamiento.

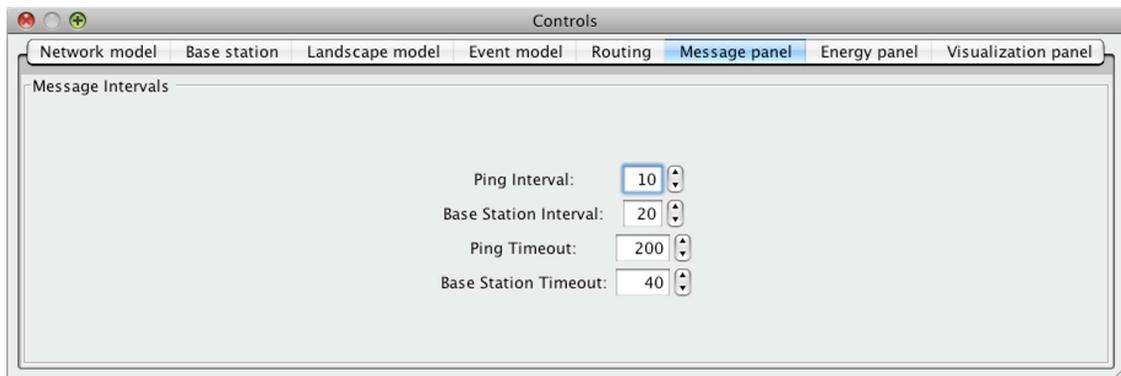


Figura 4.20: Control del intervalo y tiempo de vida de los mensajes del usuario a los nodos sensores y de los nodos a sus vecinos.

PANEL DE ENERGÍA. En el panel de energía se puede definir el consumo energético por cada una de las actividades que realiza el nodo sensor, como la detección de eventos, la comunicación, recepción y procesamiento de mensajes y el gasto normal, el panel se muestra en la figura 4.21.

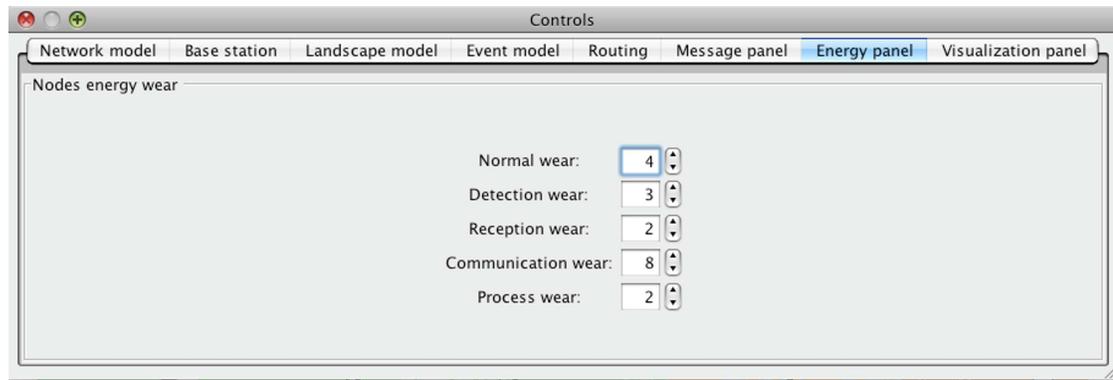


Figura 4.21: Control de el consumo de energía en los nodos sensores.

Como se mencionó en el párrafo anterior, el panel de energía se clasifica en cinco tipos de consumos:

1. Consumo por estar vivo (normal wear, c_n).
2. Consumo por detectar un evento (detection wear, c_d).
3. Consumo por recibir un mensaje (reception wear, c_e).
4. Consumo por enviar un mensaje (communication wear, c_c).
5. Consumo por procesar información (process wear, c_p).

PANEL DE VISUALIZACIÓN. En el panel de visualización, que se muestra en la figura 4.22, se modifica el tamaño y color de los elementos que forman la red sensora inalámbrica, pudiéndose realizar ajustes en los aspectos enlistados a continuación:

- Tamaño del nodo sensor (node size).
- Grosor del borde del nodo sensor (border width).
- Tamaño de la letra que indica el costo de reemplazo (font size).
- Tamaño de la letra que indica la identificación del nodo (ID font size).
- Grosor de la arista (edge width).

- Tamaño del evento (event size).
- Tamaño de la estación base (base station size).
- Grosor del borde de la estación base (base border width).
- Grosor del borde que indica el rango de la estación base (base range indicator thickness).

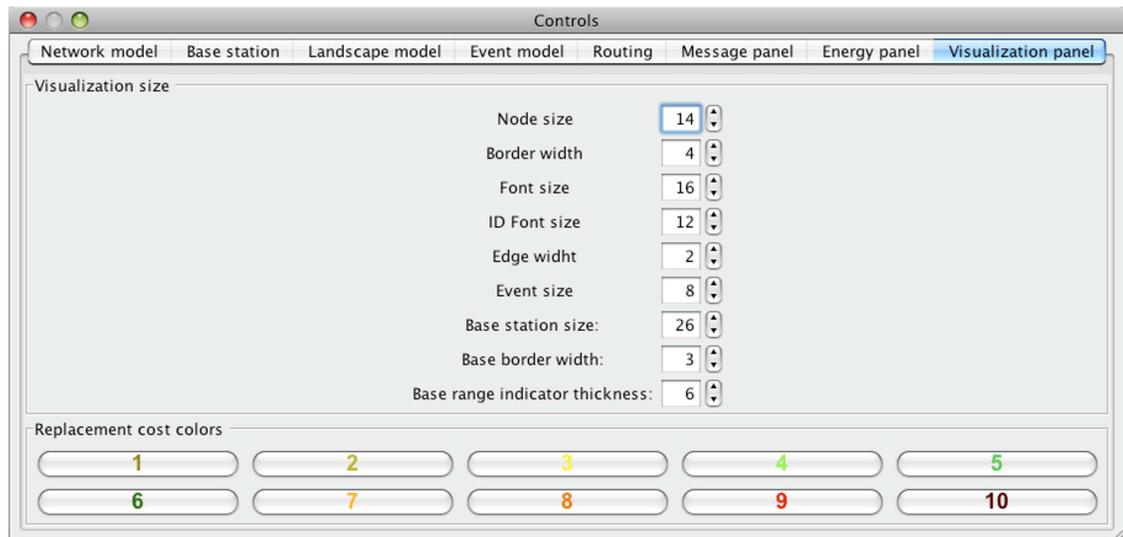


Figura 4.22: Control de la visualización de la simulación.

En el panel de visualización también se define el color de las zonas en las que está dividido el campo a sensar. El usuario puede elegir un color para determinado costo de reemplazo, facilitando así la identificación de las zonas.

Al presionar uno de los números que aparecen en la sección *colores de costo de reemplazo* (replacement cost colors), se abre una ventana como la mostrada en la figura 4.23, en donde se puede elegir el nuevo color que tendrá la zona.

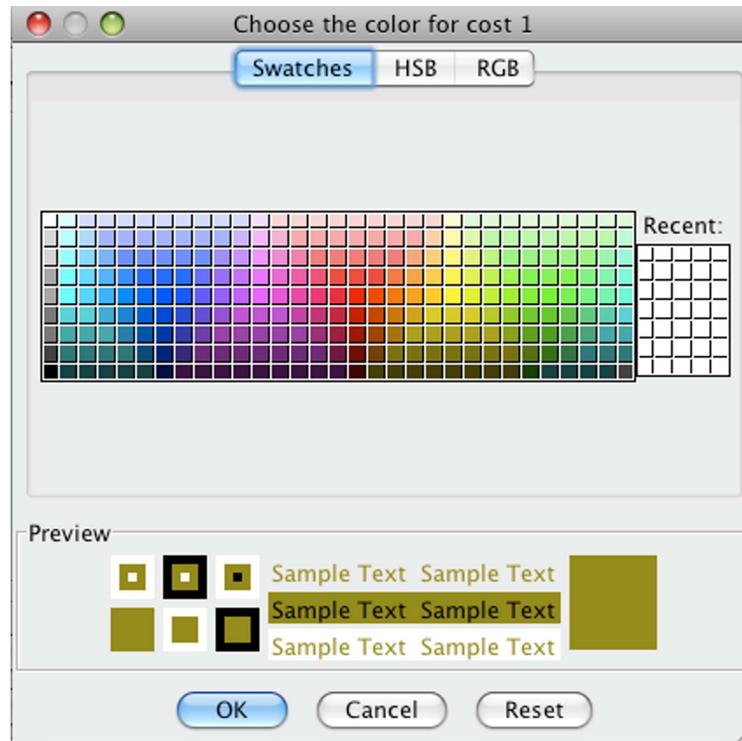


Figura 4.23: Del menú opciones se despliega el panel de control.

4.2.3 SIMULACIÓN NO GRÁFICA

Como se mencionó anteriormente, además de la simulación gráfica en Java, se programó una simulación no gráfica, con el objetivo de realizar la experimentación en esta parte del software. Las clases *Controller*, *Experimentor* y *ExperimentController* son las encargadas de la simulación no gráfica.

Antes de realizar los experimentación para recolectar resultados acerca de la implementación, se corrieron 30 experimentos en cada interfaz con el objetivo de comprobar que ambas funcionan de la misma manera, utilizando los parámetros mostrados en la tabla 4.9:

Tabla 4.9: Parámetros utilizados en la generación de las redes, para ambas interfaces.

$n = 100$		
$r_s = 0.1$	$r_c = 0.17$	$r_u = 0.3$
$\epsilon = 1$	$\phi = 5$	$\beta = 2$
$t_v = 20$		$to_v = 40$
$t_u = 20$		$to_u = 50$
$c_n = 0.5$	$c_d = 3$	$c_c = 3$
$c_p = 8$		$c_e = 2$
$\delta = 0.1515$	$\gamma = 0.5454$	$\zeta = 0.3030$
$p = 25$		
$t_s = 1000$		

A continuación, se describen los cinco puntos seleccionados para comparar los resultados de las simulaciones realizadas en la interfaz gráfica y no gráfica.

Número de aristas entre nodos (A_n). Conociendo el número de aristas y el número de nodos sensores desplegados, se puede conocer la densidad de la red.

Número de aristas de un nodo al usuario (A_u). Conocer el número de nodos sensores que tienen comunicación directa con el usuario ayuda a saber si se ocasionaría un cuello de botella cerca del usuario.

Total de nodos reemplazados (T_r). Permite conocer si el costo normal, además de los costos de comunicación, recepción, procesamiento y detección están funcionando de la misma manera en ambas simulaciones.

Sumatoria de costos de los nodos reemplazados ($\sum C_t$). Sirve para determinar si el algoritmo de enrutamiento está siendo utilizado de la misma manera en ambos casos.

Número de mensajes de evento recibidos por el usuario ($\sum m_e$). Comprueba que el enrutamiento esté funcionando correctamente.

Además de los resultados obtenidos se calculó el *promedio* o *media aritmética* (\bar{x}), que se define como la suma de todos los valores entre el conjunto de sumandos, como se muestra en la ecuación 4.4:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^k a_i}{k} = \frac{a_1 + \dots + a_k}{k}. \quad (4.4)$$

donde:

\bar{x} = Promedio o media aritmética.

a_i = Identificación de cada valor.

k = Total de valores.

En la tabla A.3 se muestran los resultados de las 30 simulaciones realizadas en la interfaz gráfica, mientras que los resultados para la red no gráfica se muestran en la tabla A.4. Ambas tablas se muestran en el apéndice A.

Para comparar qué tanto se separan los conjuntos, se calculó la *desviación estándar* (σ) de cada conjunto de valores, que mide cuánto se separan los valores y se calcula con la ecuación 4.5:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k (\bar{x} - a_i)^2}{k}}. \quad (4.5)$$

donde:

σ = Desviación estándar.

\bar{x} = Promedio o media aritmética.

a_i = Identificación de cada valor.

k = Total de valores.

En la tabla 4.10 se muestra el cálculo de la media aritmética (\bar{x}) de ambas simulaciones. Además, se calculó la desviación estándar (σ) para determinar la separación entre ambos resultados.

Tabla 4.10: Promedio y desviación estandar de los resultados de las simulaciones gráfica y no gráfica.

	A_n	A_u	T_r	$\sum C_t$	$\sum m_e$
\bar{x}_1	381.6	7.066	164.666	887.133	188.333
\bar{x}_2	391.96	6.9	164.46	886.866	190
\bar{x}	386.783	6.983	164.566	887	189.166
σ	7.33	0.117	0.141	0.188	1.178

En la figura 4.24 se muestra un *diagrama de caja y bigotes* (en inglés: boxplots o boxwhiskers) para cada uno de los parámetros analizados, tanto en la simulación gráfica como en la no gráfica. Los diagramas de caja y bigotes ofrecen una representación visual de datos importantes como la dispersión y simetría entre los conjuntos de valores. Se representan los tres *cuartiles* y los valores máximo y mínimo en un rectángulo horizontal o vertical.

Al analizar los resultados de ambas simulaciones y compararlos mediante el cálculo de la desviación estándar y la realización de los diagramas de caja y bigotes, se observa que los resultados se asemejan, concluyendo así que la interfaz gráfica y no gráfica funcionan de la misma manera.

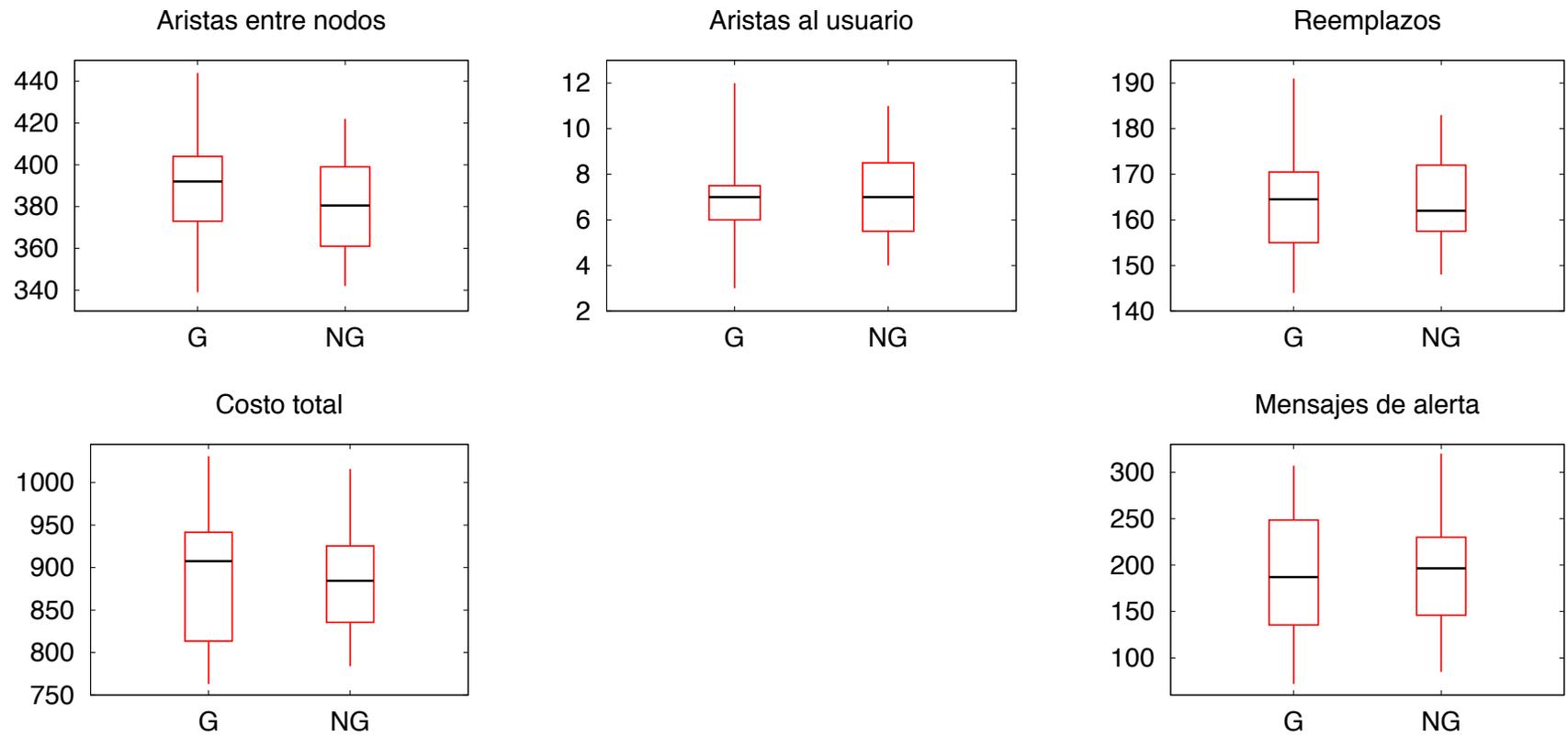


Figura 4.24: Comparación de los parámetros obtenidos en ambas simulaciones mediante diagramas de caja y bigotes. (G) interfaz gráfica, (NG) interfaz no gráfica.

CAPÍTULO 5

EXPERIMENTACIÓN

En el presente capítulo se describen las simulaciones realizadas con la finalidad de descubrir para qué tipo de aplicaciones puede ser útil el algoritmo. En la primera sección se describe el diseño de los experimentos y después se publican los resultados obtenidos.

5.1 DISEÑO DE LOS EXPERIMENTOS

El objetivo de esta investigación es el implementar un algoritmo de enrutamiento que tome en cuenta el costo de reemplazo de los nodos sensores, con la finalidad de que los nodos con un costo alto sean reemplazados con menor frecuencia. Por consiguiente, al reemplazar con menor frecuencia los nodos de alto costo, se deben de reemplazar con mayor frecuencia los nodos de costo bajo.

Tomando en cuenta esta base y utilizando el software generador de redes sensoras, se realizaron simulaciones desplegando redes en zonas con diferentes costos de reemplazo, se cambiaron los demás parámetros con la finalidad de reflejar para qué tipo de aplicaciones podría ser útil la aportación.

En la ecuación 3.2 se describe el algoritmo propuesto para decidir a qué nodo sensor enviar la información. Al realizar las simulaciones se modifican los coeficientes ϕ y β , buscando variar la importancia del costo de reemplazo (C_r) y del número de

saltos hasta el usuario (N_s). Para algunas simulaciones se utilizaron las combinaciones mostradas en la tabla 5.1:

Tabla 5.1: Combinaciones de los coeficientes de C_r y de N_s utilizadas en las simulaciones que se realizaron.

	$C_r (\phi)$	$N_s (\beta)$
1	0	0
2	0	2.5
3	0	5
4	5	0
5	5	2.5
6	7.5	2.5

Como resultado de estas combinaciones, se enumeran los siguientes aspectos considerados:

1. No todas las combinaciones se repitieron para cada escenario, conforme se avanzó en la experimentación se descartaron algunas por no ser relevantes o por encontrar alguna que funcionó mejor.
2. En todas las simulaciones se utilizó un coeficiente de energía igual a uno ($\epsilon = 1$).
3. La primera combinación en la tabla, en la que ambos coeficientes son *cero* se utilizó como medida de control, es decir, para comparar los resultados de una simulación que sólo toma en cuenta la energía al momento de decidir a qué nodo enviar la información, con los resultados de las demás combinaciones.

En cuanto al resto de los parámetros, se realizaron simulaciones desplegando diferentes cantidades de nodos sensores. El despliegue de diferente cantidad de nodos implica la variación de parámetros tales como el rango de comunicación del usuario (r_u), el rango de sensado y de comunicación de los nodos sensores (r_s y r_c). El rango

de comunicación del nodo sensor determina la cantidad de aristas que se forman en la red (e), influyendo directamente en la *densidad de la red* (φ), definida en la ecuación 5.1:

$$\varphi = \frac{e}{n}, \quad (5.1)$$

donde:

φ = Densidad de la red.

e = Cantidad de aristas.

n = Cantidad de nodos desplegados.

Para las simulaciones realizadas se asignó un r_c de tal magnitud, que la densidad de la red tuviera un valor entre 3 y 4, es decir, que cada nodo en la red tuviera entre tres y cuatro vecinos.

5.1.1 MEDIDAS PARA COMPARACIÓN

Cantidad de nodos desplegados por zona (n_z). Es la cantidad de nodos sensores que se encuentran desplegados en cada zona con diferente costo de reemplazo. Se toma en cuenta esta medida para determinar la densidad de nodos sensores en cada zona.

Total de reemplazos (T_r). Es el número total de reemplazos de los nodos sensores de cada zona. Se toma en cuenta esta medida debido a que representa lo que se requiere optimizar con esta investigación, es decir, que los nodos con un alto costo de reemplazo sean menos utilizados y por lo tanto disminuya su cantidad total de reemplazos.

Costo total (C_t). Es el producto del total de reemplazos y el costo de reemplazo de la zona.

$$C_t = T_r \times C_r. \quad (5.2)$$

Por ejemplo si en la simulación se tuvieron 50 reemplazos de nodos desplegados en una zona con costo 2, el costo total sería de 100.

Sumatoria de costos totales ($\sum C_t$). Es la totalidad de los costos de todas las zonas (ecuación 5.3). Se tomó en cuenta esta medida para determinar el porcentaje de reducción o aumento de costo entre las simulaciones.

$$\sum C_t = \sum_{i=1}^{i=10} C_t. \quad (5.3)$$

Porcentaje de utilización Es el porcentaje de veces que fue utilizado un nodo sensor, calculado con la ecuación 5.4

$$\%u = \frac{T_r \times 100}{n_z}. \quad (5.4)$$

5.1.2 PAISAJES GENERADOS

Se generaron paisajes utilizando los coeficientes mostrados en la tabla 5.2, con el objetivo de generar diferentes tipos de campos a sensar y poder simular la implementación del algoritmo para diferentes tipos de escenarios.

Tabla 5.2: Coeficientes utilizados para la generación de cinco diferentes campos a sensar.

	δ	γ	ζ
(a)	1	0	0
(b)	0.15	0.54	0.30
(c)	0.12	0.19	0.67
(d)	0	0.1	0.9
(e)	0	0	1

Los tipos de campos a sensar generados se describen a continuación, mientras que en la figura 5.1 se muestran ejemplos de las zonas producidas al emplear con cada una de estas combinaciones:

- (a) El campo a sensor es generado tomando en cuenta únicamente la distancia manhattan con respecto al usuario. En este tipo de generación las zonas con costos intermedios son las más abundantes, como se muestra en la figura 5.1a.
- (b) Genera un campo a sensor en el que abundan las zonas con costos entre *cuatro* y *siete*, muy pocas zonas con costos *dos*, *tres*, *ocho* y *nueve* y prácticamente ninguna zona con costos *uno* y *diez* (figura 5.1b).
- (c) Existe aproximadamente la misma cantidad de zonas con costos de reemplazo entre *dos* y *nueve*, pero siguen siendo escasas las zonas con costos *uno* y *diez*, como se puede ver en la figura 5.1c.
- (d) Se utiliza esta combinación de parámetros para generar un campo a sensor como el de la figura 5.1d, con características intermedias entre los generados por las combinaciones (c) y (e).

Se busca un campo a sensor que presente aproximadamente la misma cantidad de zonas para cada costo de reemplazo, dándole prioridad al componente aleatorio, también se utiliza el coeficiente γ para agrupar las zonas de acuerdo a sus vecinos.

- (e) El coeficiente aleatorio se utiliza expreso para la generación del campo a sensor, en el que existe aproximadamente la misma cantidad de zonas para cada costo de reemplazo. El no utilizar los otros coeficientes ocasiona que se generen zonas con costos altos al lado de zonas con costos bajos.

Parece difícil que este tipo de campos existan en una aplicación real, sin embargo, debido a que el usuario es quien define los costos de las zonas pueden existir aplicaciones en las que se utilizen. Un claro ejemplo es el mostrado en la figura 5.1e.

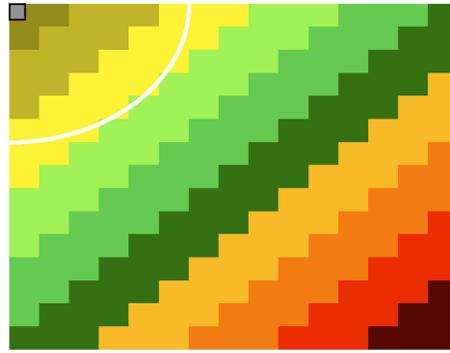
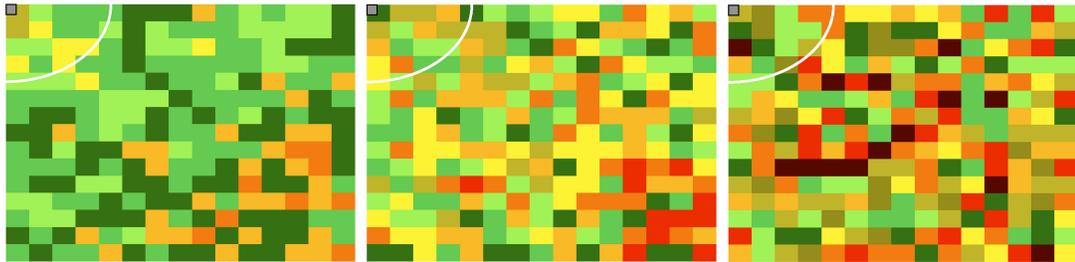
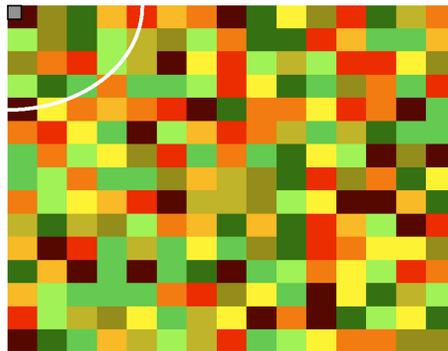
(a) $\delta = 1, \gamma = 0$ y $\zeta = 0$.(b) $\delta = 0.15, \gamma = 0.54$ y $\zeta = 0.3$.(c) $\delta = 0.12, \gamma = 0.19$ y $\zeta = 0.67$.(d) $\delta = 0, \gamma = 0.1$ y $\zeta = 0.9$.(e) $\delta = 0, \gamma = 0$ y $\zeta = 1$.

Figura 5.1: Campos a sensor utilizados en las simulaciones, presentan zonas con diferentes costos de reemplazo, generadas a partir de los coeficientes que aparecen en la tabla 5.2. Cuando se toma una las combinaciones que utilizan un componente aleatorio, independientemente del peso que éste tenga, los campos a sensor generados no son exactamente iguales.

5.2 RESULTADOS

En la presente sección se describen los resultados obtenidos al correr las simulaciones. Cada gráfico presentado, se realizó a partir del promedio de los resultados de 30 corridas. Los parámetros utilizados para cada corrida aparecen en el apéndice B.

5.2.1 SIMULACIONES INICIALES

En las primeras simulaciones realizadas se desplegaron 100 nodos sensores en el campo a sensar, empleando los parámetros mostrados en la tabla B.1. Para estas simulaciones se tomaron las cinco combinaciones de la tabla 5.2. Se graficaron los resultados obtenidos tal como aparece en las figuras 5.2 y 5.3. Mediante los gráficos se puede comparar el porcentaje de utilización y el costo total de los nodos sensores de cada zona implementando el algoritmo ($\phi = 5$) y sin implementarlo ($\phi = 0$). Para ambos casos se utilizó el mismo coeficiente de número de saltos ($\beta = 1$).

Como se puede observar en la figura 5.2, para los incisos **(a)** y **(b)** el %u parece ser el mismo, independientemente de si se implementa o no el algoritmo. Para el inciso **(c)** se aprecia una leve mejoría, al utilizar con mayor frecuencia los nodos con un costo de reemplazo bajo, sin embargo, es hasta los incisos **(d)** y **(e)** que se observa apreciar un cambio significativo.

En la tabla 5.3 se comparan los resultados de las simulaciones en las que se obtuvieron los mejores resultados al implementar el algoritmo con respecto a no implementarlo. Además, se presenta el %u de cada zona y se calcula la diferencia, que representa el porcentaje de aumento o reducción del resultado de la simulación implementando el algoritmo con respecto a no implementarlo.

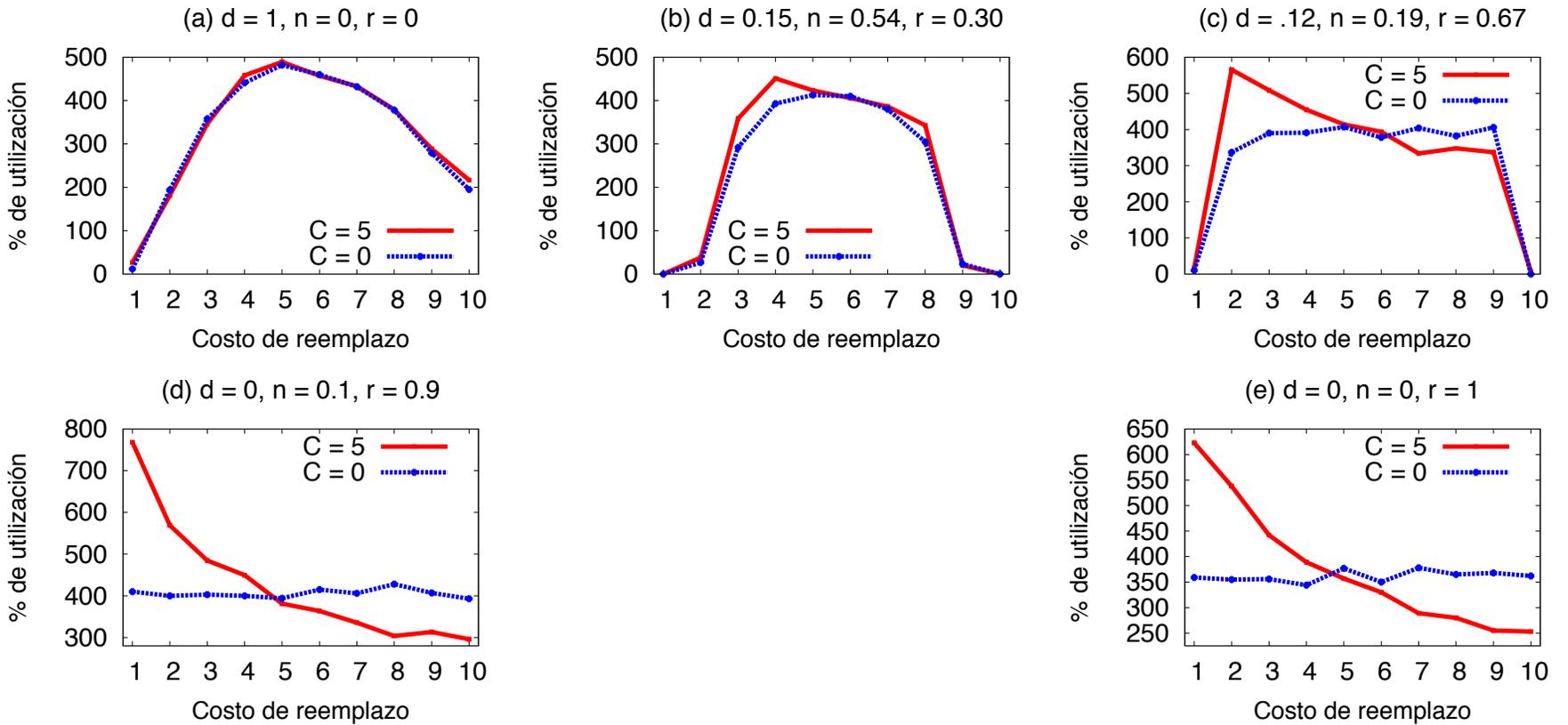


Figura 5.2: Porcentaje de utilización ($\%u$) de los nodos sensores de cada zona para 100 nodos desplegados, empleando los parámetros mostrados en la tabla B.1.

Tabla 5.3: Porcentajes de aumento o reducción en la utilización de los nodos sensores de cada zona. Los resultados demuestran que los nodos con costos bajos fueron reemplazados más veces implementando el algoritmo con respecto a no implementarlo. Lo contrario sucede con los nodos con un costo alto.

C_r	(d) %u		Diferencia	(e) %u		Diferencia
	C = 5	C = 0		C = 5	C = 0	
1	768	410	187 %	622	359	173 %
2	569	400	142 %	538	355	151 %
3	484	403	120 %	441	356	123 %
4	449	400	112 %	389	344	113 %
5	381	394	96 %	357	377	94 %
6	363	415	87 %	330	350	94 %
7	335	406	82 %	289	378	76 %
8	303	428	70 %	280	365	76 %
9	313	407	76 %	255	368	69 %
10	295	393	75 %	252	362	69 %

Los resultados obtenidos al comparar los valores del %u implementando el algoritmo con los valores al no implementarlo, se ven reflejados en el costo total de cada zona, como se muestra en la figura 5.3. Se puede observar que en los incisos (a) y (b) el comportamiento es parecido a la figura 5.2, siendo el costo total de cada zona aproximadamente el mismo, sin importar la implementación del algoritmo.

Nuevamente para el inciso (c) se pueden notar leves mejorías y reducciones de costo, sin embargo, es hasta los incisos (d) y (e) que se aprecia un cambio significativo. En la tabla 5.4 se puede apreciar la comparación de la sumatoria de costos totales para cada escenario.

Los resultados que se muestran en la tabla 5.4, reflejan que al implementar el algoritmo de enrutamiento se cumple el objetivo de usar con menor frecuencia los nodos con un costo de reemplazo alto, por tanto, se produce una reducción en los costos totales de la red, cuando menos para los escenarios de los incisos (d) y (e).

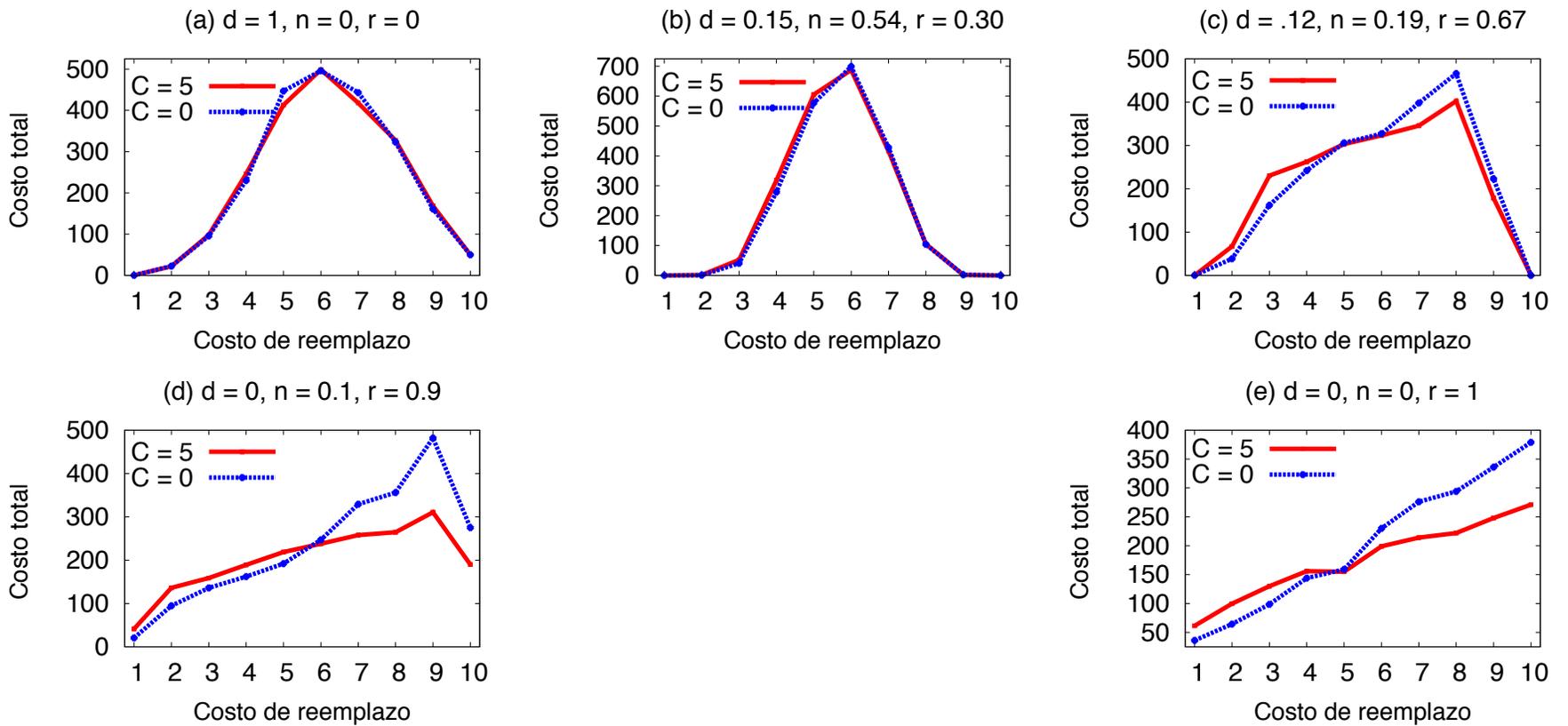


Figura 5.3: Costo total (C_t) de los nodos reemplazados de cada zona para 100 nodos desplegados, empleando los parámetros mostrados en la tabla B.1.

Tabla 5.4: Diferencia de sumatorias de costos totales ($\sum C_t$) para definir el porcentaje de ahorro o pérdida de costos implementando el algoritmo.

	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)
$\sum C_t (\phi = 0)$	2268	2132	2162	2294	2027
$\sum C_t (\phi = 5)$	2243	2189	2113	2005	1757
Diferencia	25	-57	49	289	270
%	1.10 %	-2.67 %	2.26 %	12.59 %	13.32 %

Debido a que son pocos los datos recabados por estas simulaciones, aún no se puede concluir para qué tipo de aplicaciones es conveniente implementar el algoritmo y para cuáles se debería descartar. Por lo tanto, se realizaron más simulaciones variando los parámetros de entrada.

5.2.2 SIMULACIONES EN CAMPOS A SENSAR GENERADOS

UTILIZANDO SOLO δ

A continuación se presentan los resultados de las simulaciones realizadas al desplegar 500 y 1000 nodos. Los parámetros utilizados en las presentes simulaciones también se encuentran en el apéndice A. Con la finalidad de descubrir la razón por la cual la implementación del algoritmo parece no funcionar para ciertos paisajes, se construyó un arreglo diferente para presentar los resultados, además de graficar el $\%u$ y el C_t , se agregó el total de nodos desplegados (n_z) y el total de reemplazos (T_r).

Para tener resultados de control, que comparen a su vez los resultados al implementar el algoritmo de enrutamiento, se corrieron simulaciones en las que sólo se toma en cuenta la energía restante para decidir a qué nodo sensor enviar la información, utilizando como algoritmo de enrutamiento la ecuación 3.3. En la figura 5.4 se presentan los resultados obtenidos al desplegar 500 nodos en un campo a sensor generado tomando en cuenta solamente el parámetro δ . Los parámetros utilizados para estas simulaciones aparecen en la tabla B.2.

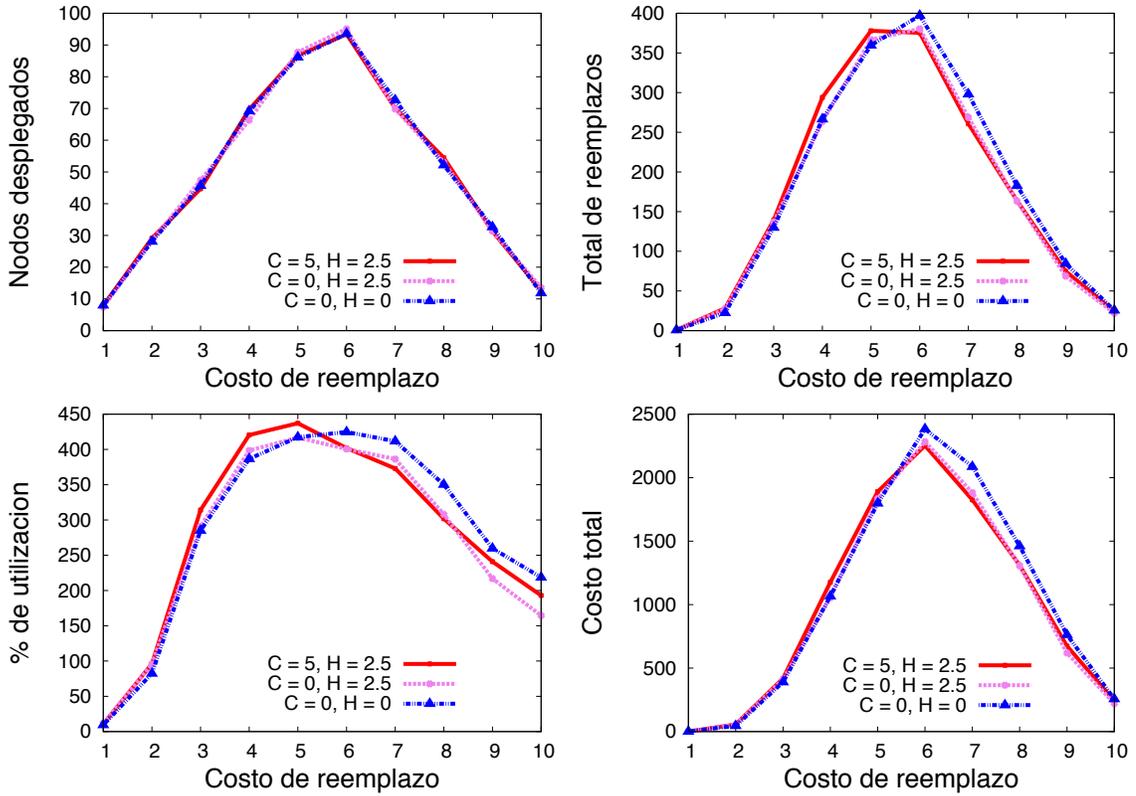


Figura 5.4: 500 nodos desplegados en un campo a sensor generado, utilizando solamente el parámetro δ .

Así pues, se puede observar que los gráficos de $\%u$ y C_t de la figura 5.4, generados desplegando 500 nodos sensores, tienen el mismo comportamiento que con 100 nodos, mostrados en el inciso (a) de las figuras 5.2 y 5.3.

Para comparar los resultados en redes más grandes y verificar si el comportamiento es el mismo, se desplegaron 1000 nodos sensores en el campo a sensor, utilizando los parámetros que aparecen en la tabla B.3. En la figura 5.5 se muestran los resultados de estas simulaciones.

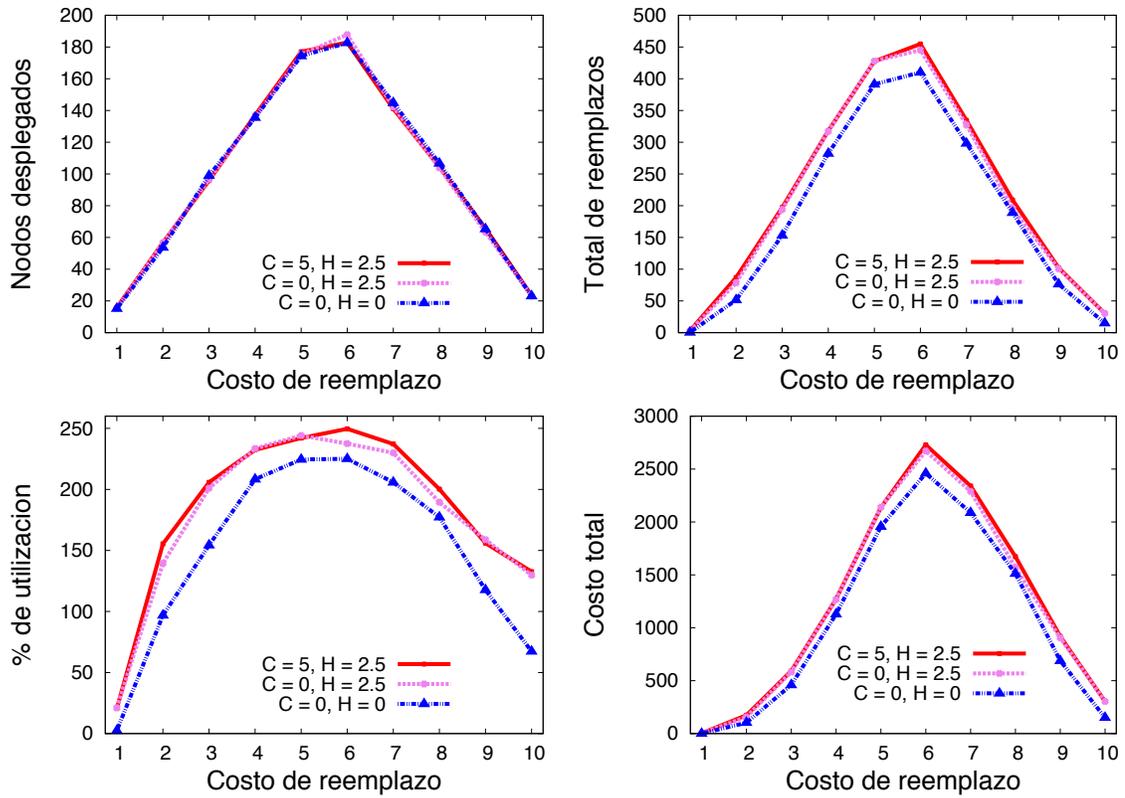


Figura 5.5: 1000 nodos desplegados en un campo a sensor generado utilizando solamente el parámetro δ .

Al analizar los resultados de la figura 5.5 se observa un comportamiento similar que al desplegar 100 y 500 nodos. Existe una mayor cantidad de nodos desplegados en las zonas con costos intermedios (entre *cuatro y seis*), ya que en campos a sensor generados a partir de la distancia, predominan las zonas con estos costos.

5.2.3 SIMULACIONES EN CAMPOS A SENSOR GENERADOS

ALEATORIAMENTE

Se procedió a realizar simulaciones en campos a sensor generados de manera aleatoria, utilizando solamente el parámetro ζ , como aparece en el inciso (e) de la tabla 5.2. Se buscó desplegar aproximadamente la misma cantidad de nodos sensores en cada zona.

A partir de los resultados obtenidos al desplegar 500 nodos sensores, utilizando los parámetros mostrados en la tabla B.4, se generaron los gráficos que aparecen en la figura 5.6.

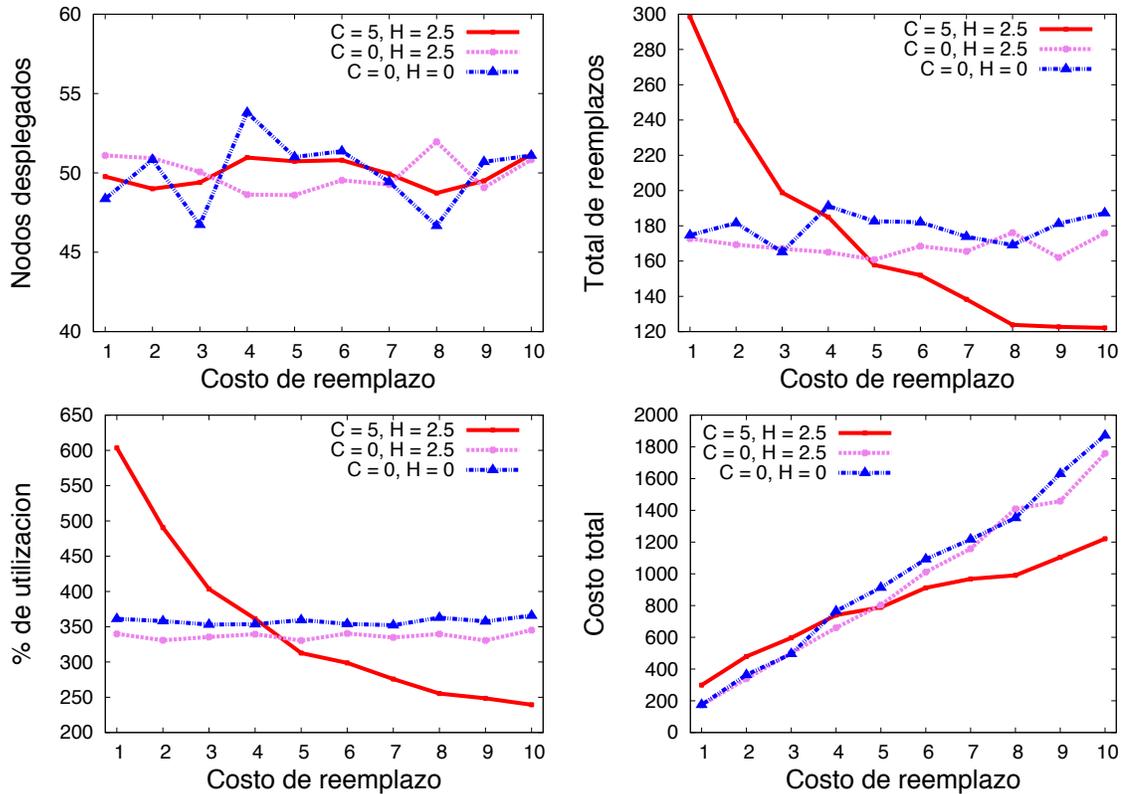


Figura 5.6: 500 nodos desplegados en un campo a sensor generado, utilizando solamente el parámetro ζ .

Se observó un cambio significativo en los resultados obtenidos en la figura 5.6. En primera instancia es notable que cada zona tiene aproximadamente la misma cantidad de nodos desplegados, para los casos en los que no se aplica el algoritmo, se puede apreciar que el total de reemplazos (T_r) es casi el mismo independientemente del costo de la zona (C_r).

En cambio, para el caso en el que se implementó el algoritmo, es decir, se tomó en cuenta el costo de reemplazo al momento de decidir a qué nodo sensor enviar la información, se cumplió el objetivo de reducir el T_r de las zonas con un C_r alto. Por consiguiente, los nodos desplegados en zonas con un C_r bajo, fueron

utilizados con mayor frecuencia.

El mismo tipo de resultados se puede apreciar en los gráficos del $\%u$ y del C_t , los nodos con un costo bajo fueron utilizados con mayor frecuencia. Todo este proceso nos brinda a final de cuentas una reducción en los costos totales, tal como se muestra en la tabla 5.5:

Tabla 5.5: Diferencia de sumatorias costos totales ($\sum C_t$) y porcentaje de reducción de costos al implementar el algoritmo respecto a no implementarlo, desplegando 500 SN en un campo a sensar generado aleatoriamente.

	$\phi = 0, \beta = 0$	$\phi = 0, \beta = 2.5$	$\phi = 5, \beta = 2.5$
$\sum C_t$	9875	9271	8099
Diferencia	0	604	1776
%	0	6.11 %	17.98 %

Se puede notar que para este tipo de aplicacion, al implementar el algoritmo se puede reducir casi hasta un 18% en los costos totales, sin embargo, el principal objetivo es que los nodos con un costo alto sean reemplazados con menor frecuencia, lo cual se muestra en la tabla 5.6

Tabla 5.6: Total de nodos reemplazados para cada zona, comparando la implementación del algoritmo, con los casos en los que no fue implementado, desplegando 500 SN en un campo a sensar generado aleatoriamente.

Enrutamiento	C_r									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\phi = 0, \beta = 0$	174	181	165	191	182	182	173	169	181	187
$\phi = 0, \beta = 2.5$	172	169	167	165	160	168	165	175	162	175
$\phi = 5, \beta = 2.5$	298	239	198	184	157	152	138	123	122	122

Los nodos con costo mas alto ($C_r = 10$) se reemplazan hasta 65 veces menos utilizando el algoritmo, lo que significa poco más de un 34% de reducción, haciendo cumplir el objetivo.

Se realizaron las mismas simulaciones, desplegando un total de 1000 SN en el mismo tipo de campo a sensar, sin embargo, para estas simulaciones se agregó una combinación más ($\phi = 7.5$ y $\beta = 2.5$). Tomando los parámetros que aparecen en la tabla B.5 para mostrar los resultados en la figura 5.7.

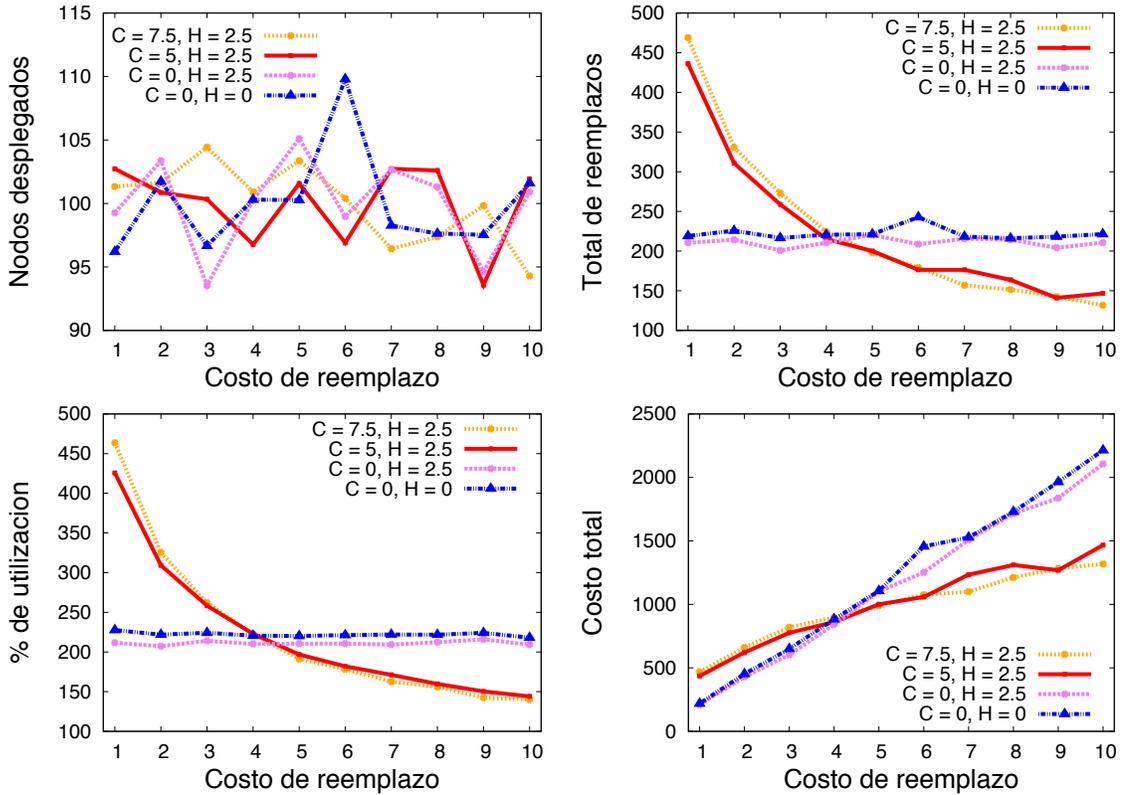


Figura 5.7: 1000 nodos desplegados en un campo a sensar generado, utilizando solamente el parámetro ζ .

Se presenta un comportamiento parecido al obtenido desplegando 100 y 500 nodos sensores. En las tablas 5.7 y 5.8 se muestran las diferencias en el C_t y el T_r al implementar el algoritmo.

Tabla 5.7: Diferencia de sumatorias de costos totales ($\sum C_t$) y porcentaje de reducción de costos al implementar el algoritmo respecto a no implementarlo, desplegando 1000 SN en un campo a sensar generado aleatoriamente.

	$\phi = 0, \beta = 0$	$\phi = 0, \beta = 2.5$	$\phi = 5, \beta = 2.5$	$\phi = 7.5, \beta = 2.5$
$\sum C_t$	12201	11605	10034	9825
Diferencia	0	596	2167	2376
%	0	4.88 %	17.76 %	19.47 %

Al utilizar la combinación $\phi = 5$ y $\beta = 2.5$ se obtiene un porcentaje de reducción de costos muy cercano al que se presentó al desplegar 500 nodos, pero al utilizar la combinación de $\phi = 7.5$ y $\beta = 2.5$ el ahorro se acerca al 20 %. Al analizar ahora la tabla 5.8 se refleja que utilizando el algoritmo, se reemplazan hasta 90 nodos, con un costo *diez* menos, lo que representa un 40.72 % de reducción en los reemplazos.

Tabla 5.8: Total de nodos reemplazados para cada zona, comparando la implementación del algoritmo con los casos en los que no fue implementado, desplegando 1000 SN en un campo a sensar generado aleatoriamente.

Enrutamiento	C_r									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\phi = 0, \beta = 0$	218	225	216	220	221	242	218	216	218	221
$\phi = 0, \beta = 2.5$	210	214	200	210	220	208	215	214	204	210
$\phi = 5, \beta = 2.5$	436	310	258	215	200	176	176	163	141	146
$\phi = 7.5, \beta = 2.5$	468	330	273	224	197	179	157	151	142	131

Tomando en cuenta sólo el mejor y el peor resultado, se muestra en la tabla 5.9 el porcentaje de reducción en el uso de los nodos con un alto costo.

Tabla 5.9: Porcentaje de reducción en los reemplazos de nodos con costo alto y de aumento en los nodos con costo bajo, para 1000 nodos desplegados en un campo a sensor generado aleatoriamente.

Enrutamiento	C_r	
	1 - 5	6 - 10
$\phi = 0, \beta = 0$	1100	1115
$\phi = 7.5, \beta = 2.5$	1492	760
Diferencia	392	-355
%	35.63 %	-31.83 %

Aplicando el algoritmo de enrutamiento, se reemplazaron hasta 355 nodos sensores con un costo alto menos que al no aplicarlo, lo que representa casi un 32 % de reducción. Mientras que se reemplazaron hasta 392 nodos con un costo bajo más, lo que representa un 35 % de aumento en su utilización.

5.2.4 SIMULACIONES EN CAMPOS A SENSOR GENERADOS CON PARÁMETROS $\delta = 0$, $\gamma = 0.1$ Y $\zeta = 0.9$

Como se mencionó anteriormente, se decidió utilizar esta combinación de parámetros para generar un campo a sensor con características similares al generado de manera completamente aleatoria, pero que presentara zonas vecinas con costos de reemplazo similares, para poder asemejarse más a un campo real.

Se realizó el mismo procedimiento que las generadas aleatoriamente, desplegando 500 y 1000 nodos sensores en el campo a sensor, utilizando los parámetros que se muestran en las tablas B.6 y B.7 respectivamente.

Los resultados obtenidos a partir de estas simulaciones aparecen en la figura 5.8 para 500 nodos sensores desplegados, y en la figura 5.9 para 1000 nodos sensores desplegados.

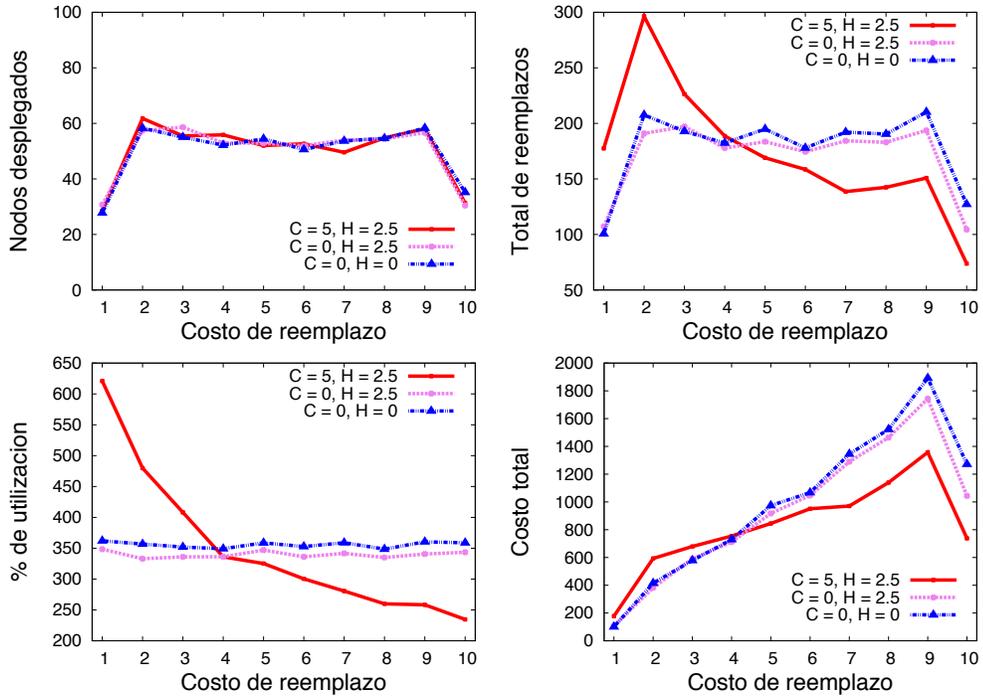


Figura 5.8: 500 nodos desplegados en un campo a sensor generado, utilizando parámetros $\delta = 0$, $\gamma = 0.1$ y $\zeta = 0.9$.

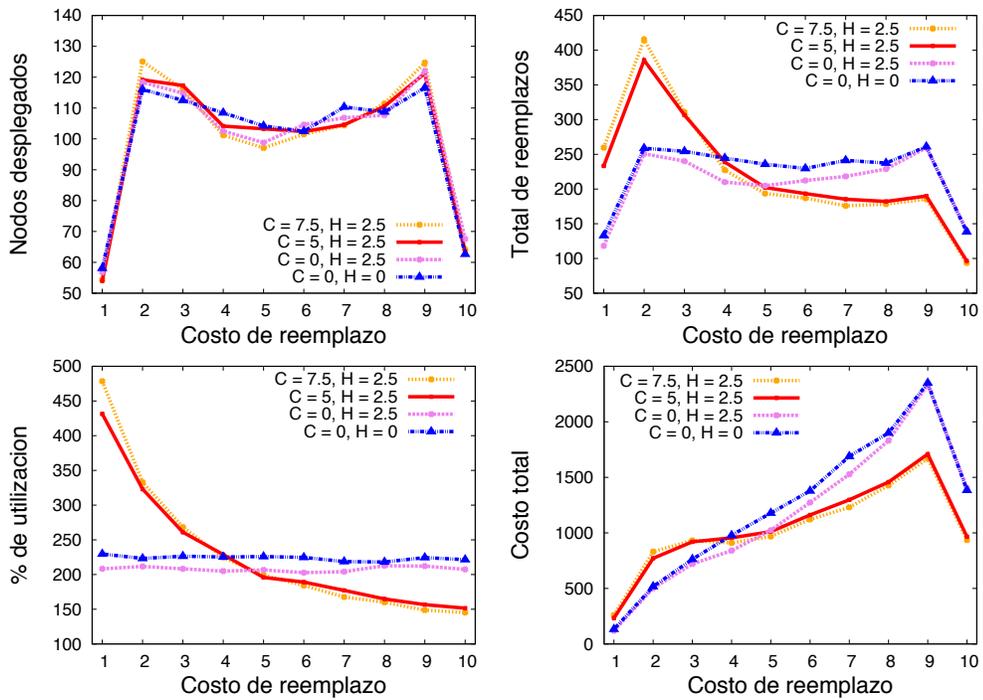


Figura 5.9: 1000 nodos desplegados en un campo a sensor generado, utilizando parámetros $\delta = 0$, $\gamma = 0.1$ y $\zeta = 0.9$.

Como en los casos anteriores, se presenta el mismo patrón de resultados comparado con el despliegue de 100 nodos sensores. Se Puede observar que el total de nodos desplegados en cada zona es prácticamente el mismo, a excepción de las zonas con costos *uno* y *diez*, en las que se despliegan aproximadamente la mitad de nodos sensores.

A pesar de esta limitante, poniendo énfasis en los demás gráficos se aprecia que el algoritmo también funcionó de manera correcta, al reducir el total de nodos reemplazados para los costos altos, utilizando con mayor frecuencia los nodos con costos menores.

En las tablas 5.10 y 5.11 se muestra el desempeño al implementar el algoritmo, comparando el costo total de reemplazo.

Tabla 5.10: Diferencia de sumatorias costos totales ($\sum C_t$) y porcentaje de reducción de costos al implementar el algoritmo respecto a no implementarlo, desplegando 500 SN en un campo a sensor generado con $\delta = 0$, $\gamma = 0.1$ y $\zeta = 0.9$.

	$\phi = 0, \beta = 0$	$\phi = 0, \beta = 2.5$	$\phi = 5, \beta = 2.5$
$\sum C_t$	9895	9296	8203
Diferencia	0	599	1692
%	0	6.05 %	17.09 %

Tabla 5.11: Diferencia de sumatorias costos totales ($\sum C_t$) y porcentaje de reducción de costos al implementar el algoritmo respecto a no implementarlo, desplegando 1000 SN en un campo a sensor generado con $\delta = 0$, $\gamma = 0.1$ y $\zeta = 0.9$.

	$\phi = 0, \beta = 0$	$\phi = 0, \beta = 2.5$	$\phi = 5, \beta = 2.5$	$\phi = 7.5, \beta = 2.5$
$\sum C_t$	12270	11574	10480	10283
Diferencia	0	723	1790	1987
%	0	5.67 %	14.58 %	16.13 %

Al igual que en los casos en que se generó la red aleatoriamente, al implementar el algoritmo de enrutamiento, se logra un porcentaje de ahorro en el costo total de entre 16% y 17%. En las tablas 5.12 y 5.13 se muestra el total de nodos reemplazados por zona, para las simulaciones en las que se desplegaron 500 y 1000 nodos respectivamente.

Tabla 5.12: Total de nodos reemplazados para cada zona, comparando la implementación del algoritmo con los casos en los que no fue implementado, desplegando 500 SN en un campo a sensor generado con $\delta = 0$, $\gamma = 0.1$ y $\zeta = 0.9$.

	C_r									
Enrutamiento	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\phi = 0, \beta = 0$	100	207	192	182	194	177	192	190	210	127
$\phi = 0, \beta = 2.5$	107	190	197	177	183	174	184	182	193	104
$\phi = 5, \beta = 2.5$	177	296	226	188	168	158	138	142	150	70

Tabla 5.13: Total de nodos reemplazados para cada zona, comparando la implementación del algoritmo con los casos en los que no fue implementado, desplegando 1000 SN en un campo a sensor generado con $\delta = 0$, $\gamma = 0.1$ y $\zeta = 0.9$.

	C_r									
Enrutamiento	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\phi = 0, \beta = 0$	133	258	254	244	235	229	241	237	261	138
$\phi = 0, \beta = 2.5$	118	250	240	210	204	212	218	228	259	140
$\phi = 5, \beta = 2.5$	233	385	306	238	202	193	185	182	189	96
$\phi = 7.5, \beta = 2.5$	259	415	310	227	193	186	175	178	185	93

En ambos casos, el algoritmo cumplió con el objetivo de reducir el T_r de los nodos con un costo alto. Para el caso en el que se desplegaron 1000 SN, tomando en cuenta sólo el mejor y el peor resultado, se demuestra en la tabla 5.14 el porcentaje de reducción en el uso de los nodos con un costo alto.

Tabla 5.14: Porcentaje de reducción en los reemplazos de nodos con costo alto y de aumento en los nodos con costo bajo; 1000 nodos desplegados en un campo a sensor generado con $\delta = 0$, $\gamma = 0.1$ y $\zeta = 0.9$.

Enrutamiento	C_r	
	1 - 5	6 - 10
$\phi = 0, \beta = 0$	1124	1106
$\phi = 7.5, \beta = 2.5$	1404	817
Diferencia	280	-289
%	24.91 %	-26.13 %

Al aplicar el algoritmo los reemplazos de nodos con un costo alto se reducen hasta en 289, lo que representa un 26 % menos respecto a la simulación en la que no se aplicó el algoritmo. Para compensar los nodos que no fueron reemplazados, se incrementó en casi un 25 % el reemplazo de nodos con un costo bajo.

5.2.5 SIMULACIONES REALIZADAS VARIANDO LA DURACIÓN DE LA CORRIDA

Se realizaron corridas en las que se duplicó el número de pasos respecto a las anteriores, es decir, la duración de la simulación fue de 9000 pasos.

En la figura 5.10 se muestran los resultados que arrojaron las simulaciones al desplegar una red de 1000 nodos sensores en un campo a sensor generado aleatoriamente, con una duración de la simulación de 9000 pasos. Los parámetros utilizados se presentan en la tabla B.8.

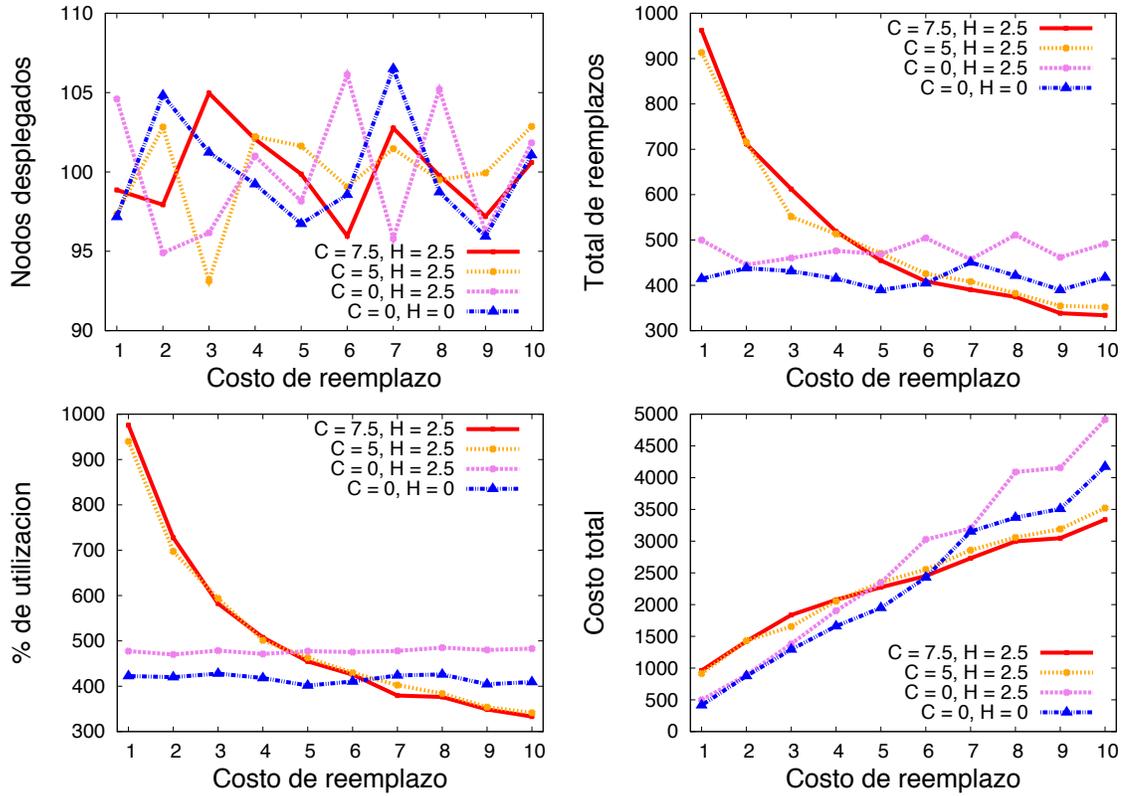


Figura 5.10: 1000 nodos desplegados en un campo a sensor generado, utilizando solamente el parámetro ζ , con una duración de 9000 pasos.

En la tabla 5.15 se muestran la sumatoria de costos totales ($\sum C_t$) de las simulaciones, además se calcula la diferencia entre implementar o no el algoritmo y el porcentaje de reducción o aumento en los costos.

Tabla 5.15: Diferencia de sumatorias costos totales ($\sum C_t$) y porcentaje de reducción de costos al implementar el algoritmo respecto a no implementarlo, desplegando 1000 SN en un campo a sensor generado aleatoriamente con una duración de 9000 pasos.

	$\phi = 0, \beta = 0$	$\phi = 0, \beta = 2.5$	$\phi = 5, \beta = 2.5$	$\phi = 7.5, \beta = 2.5$
$\sum C_t$	26780	26404	23584	23134
Diferencia	0	376	3196	3646
%	0	1.4 %	11.93 %	13.61 %

Mediante esta comparación se nota que el costo de reemplazo total al no implementar algún algoritmo -tomando en cuenta solamente la energía restante-, es mayor a cualquiera de los demás casos. El costo total al usar la combinación $\phi = 7.5$ y $\beta = 2.5$ se reduce en 3646 unidades, lo que representa casi un 14% de reducción de costos.

Además, el algoritmo cumplió con el objetivo específico de reducir el total de reemplazos de los nodos con un costo alto, tal como se muestra en la tabla 5.16

Tabla 5.16: Total de nodos reemplazados para cada zona, comparando la implementación del algoritmo con los casos en los que no fue implementado, desplegando 1000 SN en un campo a sensor generado aleatoriamente con una duración de 9000 pasos.

Enrutamiento	C_r									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\phi = 0, \beta = 0$	480	453	490	493	503	486	483	457	495	500
$\phi = 0, \beta = 2.5$	499	445	460	475	468	504	457	511	461	491
$\phi = 5, \beta = 2.5$	913	715	551	513	470	425	408	382	354	352
$\phi = 7.5, \beta = 2.5$	962	711	612	518	454	408	390	374	338	333

Tomando en cuenta solo el mejor y el peor resultado nuevamente, se presenta en la tabla 5.17 el porcentaje de reducción en el uso de los nodos con un costo alto.

Tabla 5.17: Porcentaje de reducción en los reemplazos de nodos con costo alto y de aumento en los nodos con costo bajo, 1000 nodos desplegados en un campo a sensor generado aleatoriamente con una duración de 9000 pasos.

Enrutamiento	C_r	
	1 - 5	6 - 10
$\phi = 0, \beta = 0$	2419	2421
$\phi = 7.5, \beta = 2.5$	3257	1843
Diferencia	838	-578
%	34.64 %	-23.87 %

En esta ocasión se logró, mediante la implementación del algoritmo, que los nodos con un costo de reemplazo bajo fueran utilizados hasta un 34% más, mientras que la utilización de los nodos con un costo alto se pudo reducir casi hasta un 24%.

La figura mostrada en 5.11 fue generada a partir de los parámetros en B.9, donde se utilizó un campo a sensar generado con los parámetros $\delta = 0$, $\gamma = 0.1$ y $\zeta = 0.9$ y una duración de 9000 pasos.

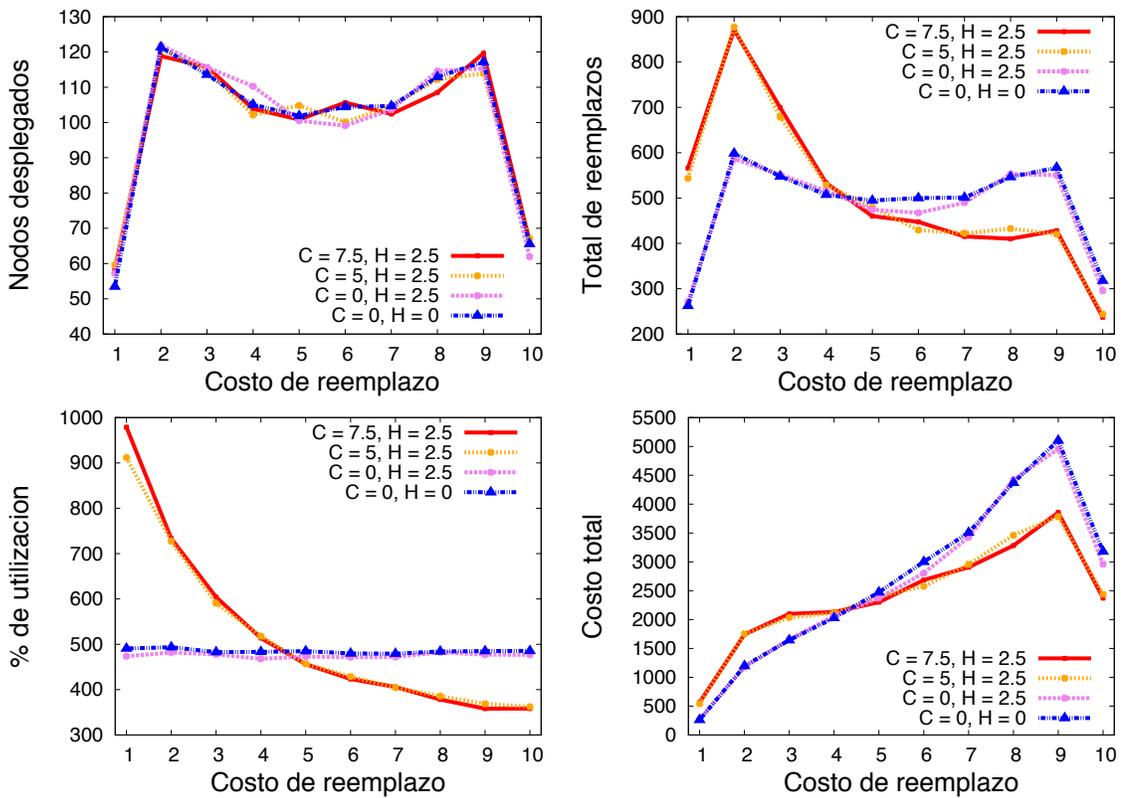


Figura 5.11: 1000 nodos desplegados en un campo a sensar generado, utilizando parámetros $\delta = 0$, $\gamma = 0.1$ y $\zeta = 0.9$.

En la tabla 5.18 se muestra la $\sum C_t$ y el porcentaje de reducción de costos al implementar el algoritmo.

Tabla 5.18: Diferencia de sumatorias costos totales ($\sum C_t$) y porcentaje de reducción de costos al implementar el algoritmo respecto a no implementarlo, desplegando 1000 SN en un campo a sensor generado con $\delta = 0$, $\gamma = 0.1$ y $\zeta = 0.9$ y una duración de 9000 pasos.

	$\phi = 0, \beta = 0$	$\phi = 0, \beta = 2.5$	$\phi = 5, \beta = 2.5$	$\phi = 7.5, \beta = 2.5$
$\sum C_t$	26765	26102	24060	23939
Diferencia	0	663	2705	2826
%	0	2.47 %	10.10 %	10.55 %

Según la tabla 5.18 se presenta una reducción de poco mas del 10 % implementando el algoritmo de costo de reemplazo, mientras que en la tabla 5.19 se refleja el total de reemplazos por zona para cada simulación realizada.

Tabla 5.19: Total de nodos reemplazados para cada zona, comparando la implementación del algoritmo con los casos en los que no fue implementado, desplegando 1000 SN en un campo a sensor generado con $\delta = 0$, $\gamma = 0.1$ y $\zeta = 0.9$ y una duración de 9000 pasos.

Enrutamiento	C_r									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\phi = 0, \beta = 0$	262	598	547	507	494	500	500	546	567	317
$\phi = 0, \beta = 2.5$	271	586	551	515	474	467	489	552	550	295
$\phi = 5, \beta = 2.5$	543	876	678	528	479	429	422	432	420	243
$\phi = 7.5, \beta = 2.5$	566	870	699	532	460	447	415	410	428	237

Los nodos con costo alto fueron claramente menos utilizados implementando el algoritmo, en la tabla 5.20 se compara el total de reemplazos de las simulaciones que tuvieron los mejores y peores resultados.

Tabla 5.20: Porcentaje de reducción en los reemplazos de nodos con costo alto y de aumento en los nodos con costo bajo, 1000 nodos desplegados en un campo a sensor generado con $\delta = 0$, $\gamma = 0.1$ y $\zeta = 0.9$ y una duración de 9000 pasos.

Enrutamiento	C_r	
	1 - 5	6 - 10
$\phi = 0, \beta = 0$	2408	2430
$\phi = 7.5, \beta = 2.5$	3127	1937
Diferencia	719	-493
%	29.85 %	-20.28 %

Implementando el algoritmo se logró reducir el total de reemplazos de los nodos con un costo alto en poco más de un 20 % -lo cual representa aproximadamente 500 reemplazos menos- y se utilizó casi un 30 % más los nodos con un costo bajo.

Las últimas simulaciones, con una duración de 150000 pasos, realizadas en esta sección tuvieron como objetivo analizar el incremento del costo de reemplazo con respecto al tiempo. Los parámetros y combinaciones utilizados para generar las redes se presentan en las tablas B.10 y B.11.

En la figura 5.12 se muestra el comportamiento del costo total con respecto al tiempo. Además, en la figura 5.13 se grafica el costo normalizado respecto al tiempo.

En los primeros 9000 pasos no se logra una estabilidad, principalmente al utilizar los coeficientes $\phi = 0, \beta = 0$ y $\phi = 0, \beta = 2.5$, mientras que en los demás gráficos se observa una mayor estabilidad en el crecimiento de los costos.

El mismo tipo de comportamiento oscilante en los primeros 9000 pasos, se observa más claramente en la figura 5.13, donde se grafica el costo total normalizado con respecto al tiempo.

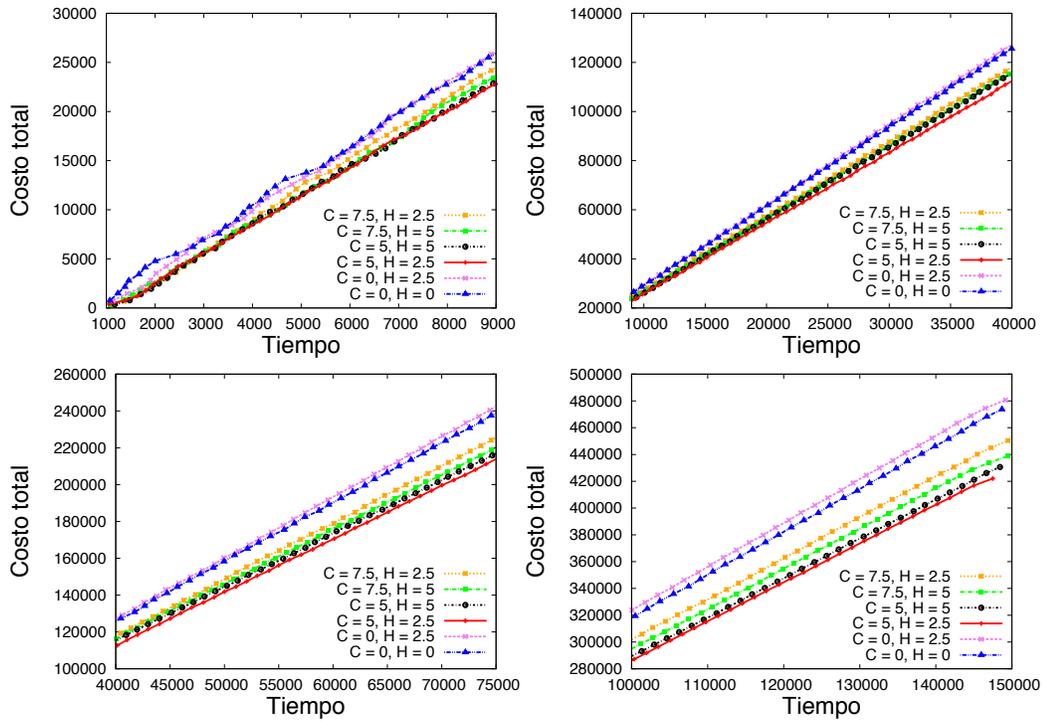


Figura 5.12: Costo de reemplazo respecto al tiempo, en una red con 1000 SN desplegados en un campo a sensar generado aleatoriamente.

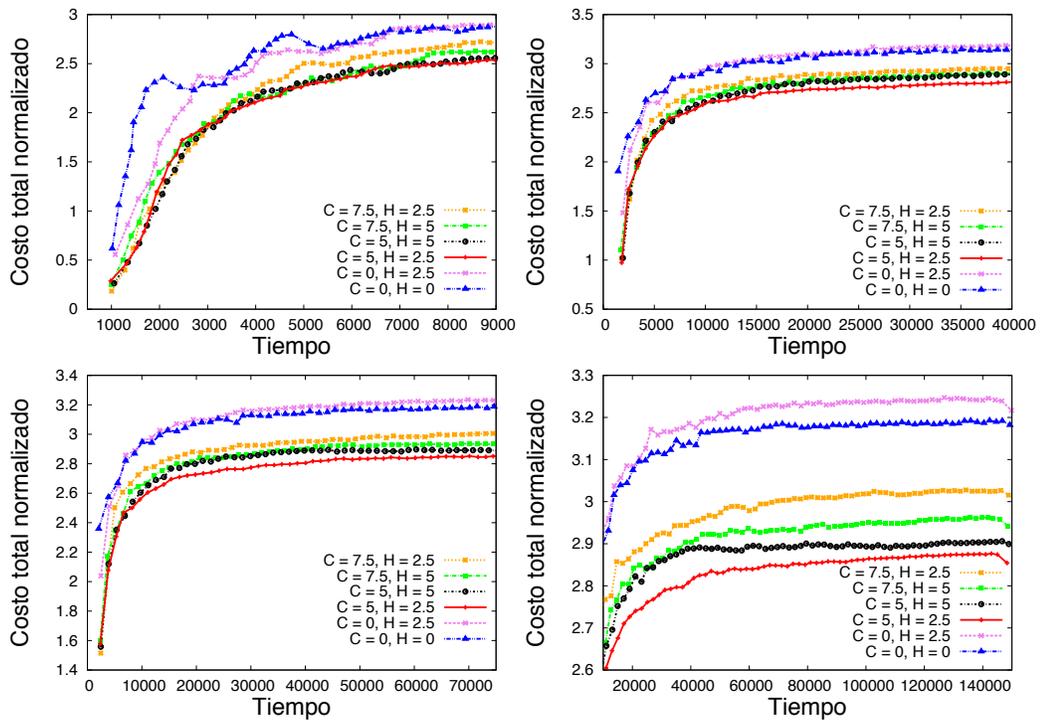


Figura 5.13: Costo de reemplazo normalizado respecto al tiempo, desplegando 1000 SN en un campo a sensar generado aleatoriamente.

En la tabla 5.21 se observan los costos para cada combinación a un cierto número de pasos. Se resaltan en color rojo los peores valores y en color verde los mejores.

Tabla 5.21: Costo total respecto al tiempo para cada combinación, desplegando 1000 SN en un campo a sensar generado aleatoriamente con una duración de la simulación de 150000 pasos.

$t_s \backslash \phi, \beta$	0, 0	0, 2.5	5, 2.5	5, 5	7.5, 2.5	7.5, 5
9000	25943	26106	22843	23026	24392	23679
40000	125641	127116	112214	115455	118041	116128
75000	238869	242425	213899	216801	225416	220276
150000	476606	482388	425750	434277	451427	439793

Para los tiempos analizados, la combinación $\phi = 5, \beta = 2.5$ obtuvo el costo más bajo, mientras que utilizando $\phi = 0, \beta = 2.5$ se presentaron los más altos. Los valores se tomaron a partir de que la simulación comenzó a estabilizarse. A simple vista pareciera que mientras avanza el tiempo de la simulación, los resultados se separan cada vez más. En la tabla 5.22 se calcula el porcentaje de separación entre el mejor y el peor resultado.

Tabla 5.22: Porcentaje de separación entre el mejor y peor valor de costo total, desplegando 1000 SN en un campo a sensar generado aleatoriamente con una duración de la simulación de 150000 pasos.

t_s	$\phi = 0, \beta = 2.5$	$\phi = 5, \beta = 2.5$	%
9000	26106	2284	12.49 %
40000	127116	112214	11.72 %
75000	242425	213899	11.76 %
150000	482388	425750	11.74 %

Una vez que se estabiliza la simulación, los resultados son más aproximados, por lo que se puede descartar la posibilidad de que los valores sigan creciendo a medida que el tiempo avanza.

5.2.6 SIMULACIONES REALIZADAS VARIANDO EL TAMAÑO DEL PAISAJE

Las siguientes simulaciones fueron realizadas variando el tamaño del paisaje generado, es decir, variando el número de filas y columnas en que se encuentra dividido el campo a sensar. Por ejemplo, un campo a sensar generado con un paisaje de tamaño cinco, significa que es de cinco filas por cinco columnas.

Se desplegaron 1000 nodos sensores en un campo a sensar generado, utilizando los parámetros $\delta = 0$, $\gamma = 0.1$ y $\zeta = 0.9$, variando la división del paisaje a 25 y 50. Los parámetros utilizados para la simulación se muestran en la tabla B.13 y los resultados gráficos se presentan en la figura 5.14.

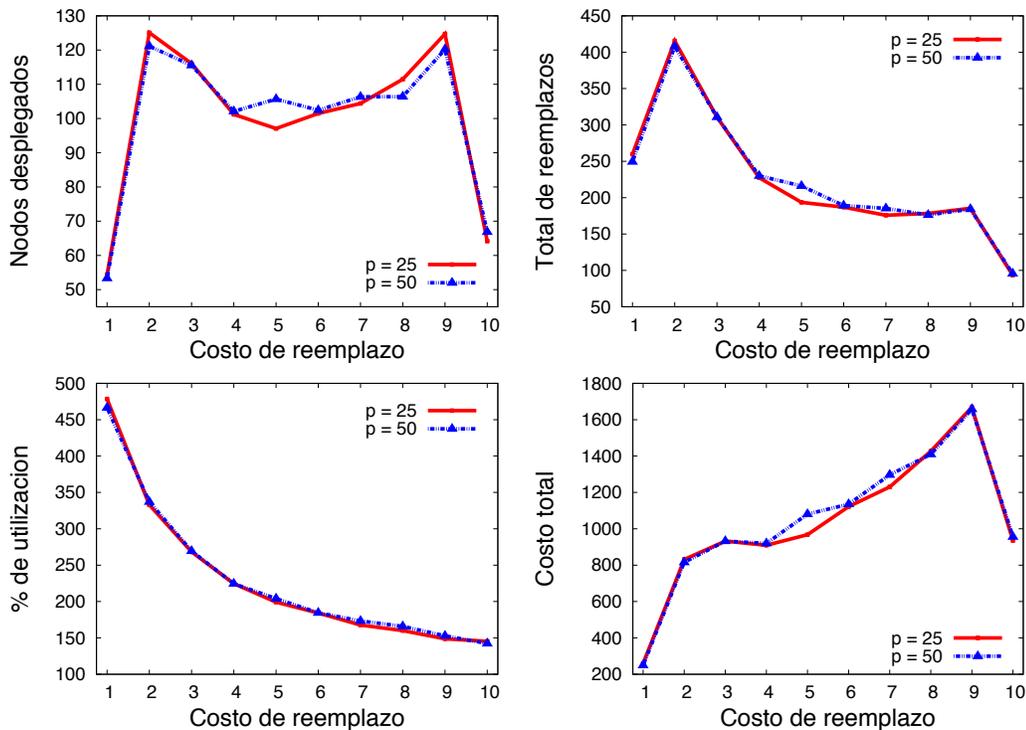


Figura 5.14: Comparación del desempeño en redes con 1000 SN desplegados en un campo a sensar generado, utilizando parámetros $\delta = 0$, $\gamma = 0.1$ y $\zeta = 0.9$, variando el tamaño del paisaje.

En la figura anterior, el comportamiento es prácticamente el mismo en ambos casos, para comprobar que la división del paisaje no afecta en los resultados, las

siguientes simulaciones fueron realizadas en campos a sensor con tamaños diferentes de división de paisaje, mostrados en la tabla B.12.

Los parámetros utilizados para realizar las simulaciones con que se obtuvieron los gráficos mostrados en la figura 5.15 se muestran en las tablas B.14 y B.12. Se desplegaron 1000 nodos sensores en un campo a sensor generado aleatoriamente, utilizando la combinación de $\phi = 7.5$, $\beta = 2.5$ en el algoritmo de enrutamiento y dividiendo el campo a sensor en paisajes de diferentes tamaños.

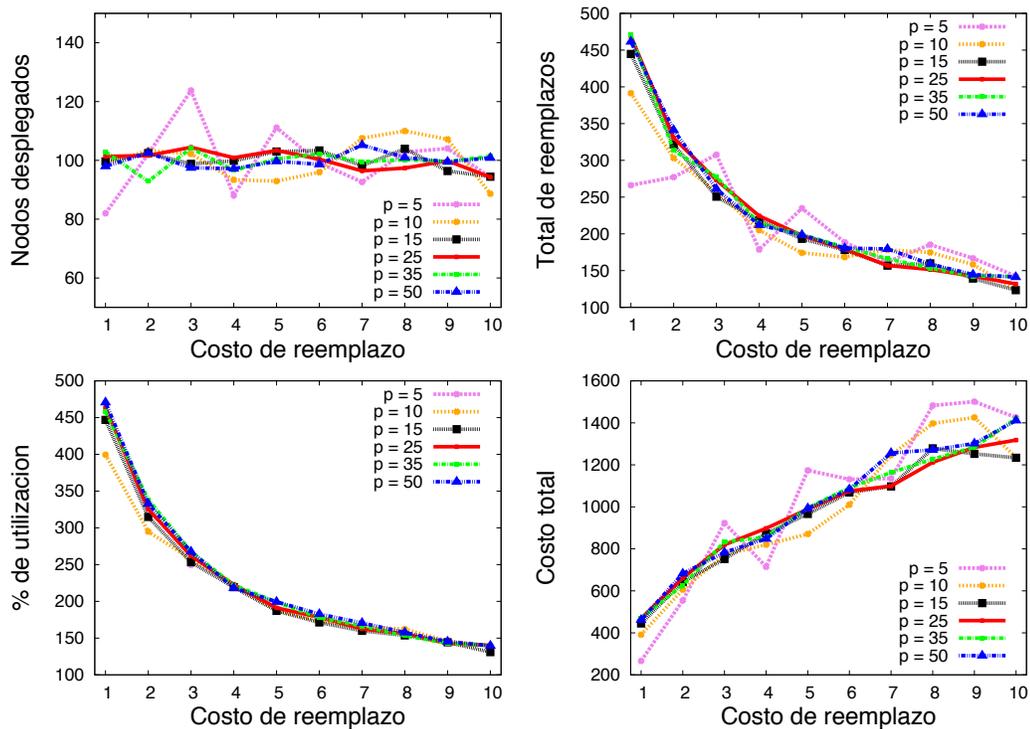


Figura 5.15: Comparación del desempeño de redes con 1000 SN desplegados en un campo a sensor generado aleatoriamente, variando el tamaño del paisaje.

Mientras más alta es la división del paisaje, se observa que los nodos quedan mejor distribuidos en cada zona, lo contrario sucede cuando la división es pequeña, como se puede ver en el caso en que el tamaño de la división fue de 5×5 . Observando el gráfico del %u se observa que el comportamiento es muy semejante, independientemente del tamaño de la división del paisaje. Es decir, los nodos sensores con un costo alto se siguen utilizando en menor medida con respecto a los de costo bajo.

CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

En el presente trabajo de tesis se desarrolló un algoritmo de enrutamiento para redes sensoras inalámbricas, dicho algoritmo toma en cuenta, además de parámetros los como el número de saltos y la energía restante, el costo de reemplazo del nodo sensor para elegir hacia dónde enviar la información.

Para simular el funcionamiento del algoritmo propuesto, se programó, en los lenguajes ANSI C y Java, un software generador de redes sensoras, en el que se realizaron una serie de experimentos con la finalidad de determinar el tipo de aplicaciones para las que es factible implementar el algoritmo desarrollado.

6.1 CONCLUSIONES

Se logró concluir que en las simulaciones realizadas en campos a sensar generados utilizando solamente el coeficiente δ , como el de la figura 4.17a, se contaba con una gran cantidad de zonas con costos intermedios, lo mismo sucedió en las que se realizaron en campos a sensar generados con los coeficientes $\delta = 0.12$, $\gamma = 0.19$ y $\zeta = 0.67$ como en la figura 5.1c, y las realizadas con $\delta = 0.15$, $\gamma = 0.54$ y $\zeta = 0.3$ como el de la figura 5.1b. A partir de estas combinaciones se obtuvo una casi nula mejora al implementar el algoritmo con respecto al no implementarlo.

Por el contrario, los mejores resultados se obtuvieron cuando el campo a sensor fue generado a partir de los coeficientes $\delta = 0$, $\gamma = 0.1$ y $\zeta = 0.9$ como el de la figura 5.1d, y al generar campos a sensor utilizando solamente el componente aleatorio (ζ), como el de la figura 5.1e.

Así pues, es preciso concluir que el éxito en la implementación del algoritmo en estos campos a sensor, se debe a que existe una mejor distribución de los nodos sensores, es decir, que existe aproximadamente la misma cantidad de nodos sensores desplegados en cada zona.

Al correr el mismo tipo de simulaciones, desplegando diferente cantidad de nodos sensores (100, 500 y 1000) y modificando los rangos de detección y de comunicación para tener aproximadamente la misma densidad en la red, el resultado es semejante independientemente de la cantidad de nodos sensores desplegados.

Las simulaciones realizadas simulaciones en las que variaba el tiempo de duración, para una duración de 4500 en promedio cada nodo sensor era reemplazado 3 veces, mientras que para una duración de 9000 pasos, cada nodo sensor era reemplazado en promedio 5.5 veces. En las simulaciones con una duración de 150000 pasos cada nodo sensor era reemplazado un promedio de 90 veces.

Variando entre 4500 y 9000 pasos se obtuvieron resultados positivos al implementar el algoritmo, ya que en ambos casos se lograba utilizar con menor frecuencia los nodos con un costo alto, lo que también significaba un ahorro en el costo total.

Al correr simulaciones con una duración mucho más grande, se observó que los mejores resultados, en cuanto al costo total de reemplazo, siguen siendo al implementar el algoritmo de enrutamiento. Los resultados de solo tomar el parámetro ϵ y de tomar en cuenta ϵ y β obtuvieron costos más altos.

Por último se corrieron simulaciones en las que se cambió el tamaño del paisaje, se pudo observar que lo que afecta los resultados vuelve a ser la distribución de los nodos sensores. Si existe aproximadamente la misma cantidad de nodos sensores desplegados en las zonas con costos de *uno* a *diez*, sin importar el tamaño de

la división del paisaje, ni el total de nodos desplegados, el algoritmo puede funcionar correctamente, utilizando con mayor frecuencia los nodos con un costo bajo e incrementando la vida útil de los nodos con un costo alto.

6.2 TRABAJO FUTURO

El software generador de redes sensoras es una herramienta que puede ser de gran utilidad para realizar más simulaciones. El trabajo futuro implicaría enfocarse al mejoramiento de los resultados obtenidos al implementar el costo de reemplazo del nodo sensor, variando los parámetros de entrada. Sin embargo, también se podría utilizar el software para realizar otro tipo de simulaciones, si se desea realizar otra aportación. Se recomienda trabajar en las siguientes líneas de investigación:

- Crear un algoritmo que genere zonas con diferentes costos de reemplazo en el cual la mayor parte de las zonas sean con valores *uno* y *diez*, para que exista una mayor cantidad de nodos desplegados con estos costos. El algoritmo de generación utilizado actualmente no permite generar campos con éstas características. Es posible que de esta manera mejoraría el desempeño del algoritmo de enrutamiento.
- Correr simulaciones en redes que no sean generadas aleatoriamente, sino que sean definidas por el usuario o en redes con una topología en malla, en anillo, etcétera.
- Variar los costos de recepción, comunicación, procesamiento, etcétera. Se podrían adaptar los costos de una marca específica de nodos sensores, para comparar su desempeño al implementar el algoritmo de enrutamiento.
- Encontrar la combinación de parámetros ϵ , ϕ y β que arroje los mejores resultados, dependiendo de la duración de la simulación.
- Implementar el algoritmo en una aplicación real.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Niels Aakvaag y Jan-Erik Frey. Redes sensoras inalámbricas: Nuevas soluciones de interconexión para la automatización industrial. *ABB*, 2:39–42, 2006.
- [2] Ian F. Akyildiz, Weilian Su, Yogesh Sankarasubramaniam y Erdal Cayirci. A survey on sensor networks. *IEEE Communication Magazine*, 40(8):102–114, 2002.
- [3] Ian F. Akyildiz, Weilian Su, Yogesh Sankarasubramaniam y Erdal Cayirci. Wireless sensor networks: a survey. *Computer Networks*, 38:393–422, 2002.
- [4] Jamal N. Al-Karaki y Ahmed E. Kamal. Routing techniques in wireless sensor networks: A survey. *IEEE Wireless Communications*, 11(6):6–28, 2002.
- [5] Jamal N. Al-Karaki y Ahmen E. Kamal. A taxonomy of routing techniques in wireless sensor networks. En *Handbook of Sensor Networks: Compact Wireless and Wired Systems*, capítulo 6, páginas 1–22. CRC Press, 2005.
- [6] Saeed A. Aldosari y José M. F. Moura. Topology of sensor networks in distributed detection. Technical report, ICASSP06, IEEE International Conference on Signal Processing, 2006.
- [7] Ramón Pallás Areny. *Sensores y Acondicionadores de Señal*. Marcombo, México, DF, 2007.
- [8] Omer Aziz, Benny Lo, Ara Darzi y Guang-Zhong Yang. Introduction. En *Body Sensor Networks*, capítulo 1, páginas 1–33. Springer, 2006.

- [9] Elizabeth Basha y Daniela Rus. Design of early warning flood detection systems for developing countries. En *Proceedings of the Conference on Information and Communication Technologies and Development*, Bangalore, India, Diciembre 2007.
- [10] David Abrahams Beman Dawes y Rene Rivera. Robotic-assisted surgery: Recent advances and potential cost savings. <http://www.expresshealthcaregmt.com/20020615/medtech2.shtml>.
- [11] Peter A. Boncz, Angela Bonifati, Joos-Hendrik Böse, Stefan Böttcher, Panos Kypros Chrysanthis, Le Gruenwald, Arantza Illarramendi, Peter Janacik, Birgitta König-Ries, Wolfgang May, Anirban Mondal, Sebastian Obermeier, Aris Ouksel y George Samaras. Working group summary: P2P, ad hoc and sensor networks all the different or all the same? En *Scalable Data Management in Evolving Networks*, número 06431 en Dagstuhl Seminar Proceedings, Dagstuhl, Alemania, 2007. Internationales Begegnungs- und Forschungszentrum für Informatik (IBFI).
- [12] Anantha P. Chandrakasan, Rex K. Min, Manish Bhardwaj, Seong-Hwan Cho y Alice Wang. Power aware wireless microsensor systems. En *Proceedings of the 22nd International Conference on Distributed Computing Systems*, páginas 575–578, Washington, DC, EE.UU., 2002. IEEE Computer Society.
- [13] Yu chee Tseng, Yen ning Chang y Bour hour Tzeng. Energy-efficient topology control for wireless ad hoc sensor networks. En *In Proceedings of the International Computer Symposium*, páginas 27–37, 2002.
- [14] Carlos de Morais Cordeiro y Dharma Prakash Agrawal. *Ad Hoc and Sensor Networks, Theory and Applications*. World Scientific, 2006.
- [15] Santpal Dhillon, Krishnendu Chakrabarty y Sitharama Iyengar. Sensor placement for grid coverage under imprecise detections. En *Proceedings of the Fifth International Conference of Information Fusion*, volumen 2, páginas 1581–1587, 2002.

-
- [16] Yi Ding. Wireless sensor networks: Concepts, development, and research challenges. En *Proceedings of the Seminar on Opportunistic Networks*, páginas 1–8, Helsinki, Finlandia, 2002.
- [17] Oscar Luis Vele Guallpa Edyson Lautaro Guillermo Velecela. Diseño y construcción de una mascota digital: Sistemas mecánico y sensorial. Tesis de maestría, Universidad Politécnica Salesiana, 2004.
- [18] Javier Espina, Thomas Falck y Oliver Mühlens. Network topologies, communication protocols, and standards. En *Body Sensor Networks*, capítulo 5, páginas 145–179. Springer, 2006.
- [19] Deborah Estrin, Ramesh Govindan, John Heidemann y Satish Kumar. Next century challenges: Scalable coordination in sensor networks. En Harel Kodesh, Victor Bahl, Tomasz Imielinski y Martha Steenstrup, editores, *MOBICOM'99: Proceedings of the Fifth Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking*, páginas 263–270, Nueva York, NY, EE.UU., Agosto 1999. ACM Press.
- [20] Deborah Estrin, Akbar Sayeed y Mani Srivastava. Tutorial "wireless sensor networks". En *MOBICOM 2002: Proceedings of the Eighth Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking*, Nueva York, NY, EE.UU., 2002. ACM Press.
- [21] Jessica Feng, Farinaz y Miodrag Potkonjak. Sensor network architecture. En *Handbook of Sensor Networks: Compact Wireless and Wired Systems*, capítulo 12, páginas 1–16. CRC Press, 2005.
- [22] Mario Gerla, Christoph Lindemann y Antony Rowstron. P2P MANET's - new research issues. En *Perspectives Workshop: Peer-to-Peer Mobile Ad Hoc Networks - New Research Issues*, número 05152 en Dagstuhl Seminar Proceedings, Dagstuhl, Alemania, 2005. Internationales Begegnungs- und Forschungszentrum für Informatik (IBFI).

-
- [23] James Gosling, Bill Joy, Guy Steele y Gilad Bracha. *The Java Language Specification*. Prentice Hall, tercera edición, 2005.
- [24] Alma Leticia Palacios Guerrero. Introducción a la programación en Java. <http://fcqi.tij.uabc.mx/docentes/palacios/Java1.pdf>.
- [25] Romain Guigon, Jean-Jacques Chaillout, Thomas Jager y Ghislain Despesse. Harvesting raindrop energy: experimental study. *Smart materials and structures*, 17:1–6, 2008.
- [26] Martin Haenggi. Opportunities and challenges in wireless sensor networks. En *Handbook of Sensor Networks: Compact Wireless and Wired Systems*, capítulo 1, páginas 1–14. CRC Press, 2005.
- [27] Uk-Pyo Han, Sang-Eon Park y Young-Jun Chung. An efficient energy aware routing protocol for wireless sensor networks. En *Proceedings of ICWN*, páginas 122–127, 2006.
- [28] Wendi B. Heinzelmann, Anantha P. Chandrakasan y Hari Balakrishnan. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 1(4):660–670, Octubre 2002.
- [29] Hannah Hickey. Electrical circuit runs entirely off power in trees, 2009. Disponible en <http://uwnews.org/article.asp?articleID=51869>.
- [30] Andreas Willing Holger Karl. *Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks*. John Wiley & Sons, Inc., 2007.
- [31] Esa Hyytiä y Jorma Virtamo. Random waypoint model in n -dimensional space. *Operations Research Letters*, páginas 567–571, 2005.
- [32] Philipp K. Janert. *Gnuplot in Action. Understanding Data with Graphs*. Manning Publications, 2009.
- [33] Brian W. Kernigham y Dennis M. Ritchie. *C Programming Language*. Prentice Hall, segunda edición, 1988.

-
- [34] Joseph Migga Kizza. *Computer Network Security*. Springer, 2005.
- [35] Farinaz Koushanfar, Miodrag Potkonjak y Alberto Sangiovanni-Vincentelli. Fault tolerance in wireless sensor networks. En *Handbook of Sensor Networks: Compact Wireless and Wired Systems*, capítulo 36, páginas 1–13. CRC Press, 2005.
- [36] Bhaskar Krishnamachari. *Networking Wireless Sensor*. Cambridge University Press, Nueva York, EE.UU., 2005.
- [37] Bruce S. Davie Larry R. Peterson. *Computer Networks. A Systems Approach*. Elsevier, cuarta edición, 2007.
- [38] Alexander Larsson, Lars Clausen y Hans Breuer. Dia homepage. <http://live.gnome.org/Dia>.
- [39] Alexander Larsson, Lars Clausen y Hans Breuer. Gnuplot homepage. <http://www.gnuplot.info>.
- [40] Leslie Lamport. L^AT_EX project. <http://www.latex-project.org/>.
- [41] Konrad Lorinez, David J. Malan, Thaddeus R.F. Fulford-Jones, Antony Clavel, Victor Shbayder, Goeffrey Mainland, Matt Welsh y Steve Moulton. Sensor networks for emergency response: Challenges and opportunities. *IEEE Pervasive Computings*, 3(4):16–23, 2004.
- [42] David Malan, Thadeus Fulford-Jones, Matt Welsh y Steve Moulton. Codeblue: An ad hoc sensor network infraestructure for emergengy medical care. En *Proceedings of the MobiSys 2004 Workshop on Applications of Mobile Embedded Systems, WAMES*, 2004.
- [43] Seapahn Meguerdichian, Farinaz Koushanfar, Gang Qu y Miodrag Potkonjak. Exposure in wireless ad-hoc sensor networks. En *MOBICOM'01: Proceedings of the 7th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking*, páginas 139–150, Nueva York, NY, EE.UU., 2001. ACM Press.

-
- [44] Randy Miller. Practical UML: A hands-on introduction for developers. <http://edn.embarcadero.com/article/31863>.
- [45] F. Mittelbach y M. Goossens. *The L^AT_EX Companion*. Addison–Wesley, segunda edición, 2004.
- [46] Mario Modesti. Tutorial de sensores. Technical report, Córdoba, Argentina, 2007.
- [47] Francisco J. Molina. *Redes de Área Local*. AlfaOmega, México, DF, 2006.
- [48] Inc. Object Management Group. Object management group - UML resource page. <http://www.uml.org>.
- [49] Symeon Papavassiliou y Jin Zhu. Architecture and modeling of dynamic wireless sensor networks. En *Handbook of Sensor Networks: Compact Wireless and Wired Systems*, capítulo 15, páginas 1–14. CRC Press, 2005.
- [50] Francisco Ramos Pascual. Redes de sensores inalámbricos. *Electrónica y Comunicaciones*, 217:39–42, 2007.
- [51] Akkana Peck. *Beginning GIMP: From Novice to Professional*. Apress, 2006.
- [52] Department of Electrical Peter Hiscocks and Ryerson Polytechnic University Computer Engineering. Using Xfig, 2001.
- [53] Antonio Barragán Piña. Sensores y actuadores. *Instrumentación y Control Industrial*, páginas 26–40, 1995.
- [54] Daniele Puccinelli y Martin Haenggi. Wireless sensor networks: Applications and challenges of ubiquitous sensing. *Circuits and Systems Magazine, IEEE*, 5:19–31, 2005.
- [55] Asfandyar Qureshi, Rick Weber, Hari Balakrishnan, John Gutttag y Bruce Maggs. Cutting the Electric Bill for Internet-Scale Systems. En *ACM SIGCOMM*, Barcelona, España, Agosto 2009.

- [56] Jan Rabaey, Josie Ammer, Julio da Silva Jr., Danny Patel y Shad Roundy. Picoradio supports ad hoc ultra-low power wireless networking. *Computer*, 33:42–48, 2000.
- [57] Vijay Raghunathan, Curt Schurgers, Sang Park y Mani B. Srivastava. Energy-aware wireless microsensor networks. *IEEE Signal Processing Magazine*, 19(2):40–50, Marzo 2002.
- [58] Christopher J. Rozell y Don H. Johnson. Power scheduling for wireless sensor and actuator networks. En *Proceedings of the 6th international conference on information processing in sensor networks*, páginas 470–478, Nueva York, NY, EE.UU., 2007. ACM Association for Computing Machinery.
- [59] Sanjay Saraf. Robotic assisted microsurgery (RAMS): Application in plastic surgery. En *Medical Robotics*, capítulo 27, páginas 363–373. I-Tech Education and Publishing, 2008.
- [60] Satu Elisa Schaeffer. Redes de sensores. Ponencia, Abril 2007.
- [61] Rahul C. Shah, Dragan Petrovic y Jan M. Rabaey. Energy-aware routing and data funneling in sensor networks. En *Handbook of Sensor Networks: Compact Wireless and Wired Systems*, capítulo 30, páginas 1–13. CRC Press, 2005.
- [62] Sasa Slijepcevic y Miodrah Potkonjak. Power efficient organization of wireless sensor networks. En *Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC 2001)*, páginas 472–476, 2001.
- [63] Antonio M. Vallejos Soto. *Sistemas microinformáticos y redes LAN*. marcombo, Barcelona, España, 2001.
- [64] SourceForge. Umbrello UML Modeller. <http://uml.sourceforge.net/>.
- [65] William Stallings. *Comunicaciones y Redes de Computadores*. Prentice Hall, séptima edición, 2004.

-
- [66] Weilian Su, Erdal Cayirci y Özgür B. Akan. Energy-aware routing and data funneling in sensor networks. En *Handbook of Sensor Networks: Compact Wireless and Wired Systems*, capítulo 30, páginas 1–13. CRC Press, 2005.
- [67] Sun Microsystems Inc. Learning the Java language. <http://java.sun.com/docs/books/tutorial/java/index.html>.
- [68] Supoj Sutanthavibul, Brian V. Smith y Paul King. Xfig homepage. <http://www.xfig.org/>.
- [69] The Gimp team. The GNU image manipulation program. <http://www.gimp.org/>.
- [70] Quanhong Wang y Hossam Hossanein. A comparative study of energy-efficient protocols for wireless sensor networks. En *Handbook of Sensor Networks: Compact Wireless and Wired Systems*, capítulo 18, páginas 1–16. CRC Press, 2005.
- [71] Quanhong Wang, Hossam Hossanein y Kenan Xu. A practical perspective on wireless sensor networks. En *Handbook of Sensor Networks: Compact Wireless and Wired Systems*, capítulo 9, páginas 1–23. CRC Press, 2005.
- [72] Brett Warneke. Miniaturizing sensor networks with mems. En *Handbook of Sensor Networks: Compact Wireless and Wired Systems*, capítulo 5, páginas 1–16. CRC Press, 2005.
- [73] Laurent Chalard; Didier Helal; Lucille Verbaere; Armin Wellig y Julien Zory. Wireless sensor network devices: overview, issues, state of the art and promising technologies. *ST Journal of Research*, 4(1):4–18, 2007.
- [74] Feng Xia. QoS challenges and opportunities in wireless sensor/actuator networks. *Sensors*, 8(2):1099–1110, 2008.
- [75] Feng Xia, Yu-Chu Tian, Yanjun Li y Youxian Sun. Wireless sensor/actuator network design for mobile control applications. *Sensors*, 7(10):2157–2173, 2007.

APÉNDICE A

RESULTADOS

A.1 SIMULACIONES REALIZADAS EN EL SOFTWARE PROGRAMADO EN ANSI C

Tabla A.1: Coordenadas y costo de reemplazo de los nodos desplegados.

Nodo	ID	x	y	C_i
n	1	0.733879	0.249306	4
n	2	0.593097	0.872402	6
n	3	0.179846	0.409558	3
n	4	0.764000	0.322794	4
n	5	0.881924	0.639576	7
n	6	0.077120	0.287179	2
n	7	0.386608	0.589496	3
n	8	0.786004	0.229347	4
n	9	0.296823	0.415876	3
n	10	0.932676	0.728019	7
n	11	0.495926	0.009919	3
n	12	0.805414	0.645589	7
n	13	0.611744	0.411603	6
n	14	0.620624	0.779504	5
n	15	0.064974	0.877712	5

Tabla A.2: Aristas formadas entre los nodos desplegados en la red. También se muestra la longitud de las aristas. Para ser reales, la longitud debe ser menor al rango de comunicación establecido (0.3).

Arista	Nodo inicio	Nodo Destino	Longitud
e	1	4	0.079422
e	1	8	0.055816
e	1	13	0.203119
e	2	14	0.096891
e	3	6	0.159778
e	3	7	0.274095
e	3	9	0.117148
e	4	8	0.096003
e	4	13	0.176264
e	5	10	0.101970
e	5	12	0.076746
e	5	14	0.296407
e	6	9	0.254621
e	7	9	0.195462
e	7	13	0.286935
e	8	13	0.252159
e	10	12	0.151626
e	12	14	0.228211

A.2 SIMULACIONES REALIZADAS EN EL SOFTWARE PROGRAMADO EN JAVA

En esta sección se presentan los resultados de las simulaciones realizadas para comparar el funcionamiento del generador de redes sensoras en la interfaz gráfica y la no gráfica.

A.2.1 SIMULACIÓN GRÁFICA

Tabla A.3: Resultados de las 30 simulaciones realizadas en la interfaz gráfica.

	A_n	A_u	T_r	$\sum C_t$	$\sum m_e$
1	381	7	174	958	211
2	391	6	160	837	144
3	393	4	179	969	179
4	354	8	151	832	213
5	373	9	173	942	162
6	342	6	169	896	199
7	398	5	158	824	237
8	404	10	165	868	239
9	391	6	161	873	206
10	342	10	166	910	143
11	371	7	171	898	170
12	353	8	162	845	195
13	400	8	155	811	119
14	422	7	183	1016	213
15	372	9	161	896	212
16	376	5	148	784	183
17	414	4	159	855	148
18	408	11	153	834	215
19	360	6	160	852	218
20	361	7	153	843	156
21	373	7	181	1014	97
22	362	11	176	940	85
23	390	4	169	911	154
24	351	6	157	897	100
25	409	5	149	841	198
26	380	4	171	946	112
27	411	8	159	813	320
28	421	9	179	983	250
29	384	6	174	908	297
30	361	9	164	818	275
\bar{x}_1	381.6	7.066	164.666	887.133	188.333

A.2.2 SIMULACIÓN NO GRÁFICA

Tabla A.4: Resultados de las 30 simulaciones realizadas en la interfaz no gráfica.

	A_n	A_u	T_r	$\sum C_t$	$\sum m_e$
1	349	9	167	945	175
2	405	7	166	927	181
3	404	7	146	763	307
4	444	4	163	912	140
5	379	7	149	819	148
6	374	5	178	964	82
7	372	6	171	960	72
8	388	6	159	826	266
9	419	11	170	887	214
10	394	8	164	904	188
11	394	6	145	777	301
12	412	6	159	772	268
13	390	6	148	778	199
14	403	7	183	1031	131
15	368	9	155	836	177
16	354	7	166	916	186
17	367	8	158	861	241
18	384	4	180	938	120
19	437	4	183	1011	92
20	400	7	179	994	205
21	404	7	170	912	269
22	390	9	144	771	210
23	439	1	191	988	76
24	339	12	160	903	167
25	367	7	148	774	281
26	396	6	165	912	93
27	411	7	160	882	241
28	414	6	183	984	259
29	358	11	155	808	256
30	404	7	169	911	155
\bar{x}_2	391.96	6.9	164.46	886.866	190

APÉNDICE B

PARÁMETROS UTILIZADOS EN LAS SIMULACIONES

B.1 SIMULACIONES CON 100 SN DESPLEGADOS

Tabla B.1: Parámetros utilizados en las primeras simulaciones, en las que desplegamos 100 SN.

$n = 100$		
$r_s = 0.1$	$r_c = 0.16$	$r_u = 0.3$
$\epsilon = 1$	$\phi = 0,5$	$\beta = 2.5$
$t_v = 20$		$to_v = 40$
$t_u = 20$		$to_u = 40$
$c_n = 0.1$	$c_d = 2$	$c_c = 2$
$c_p = 6$		$c_e = 2$
$p = 25$		
$t_s = 4500$		

B.2 SIMULACIONES EN CAMPOS A SENSOR GENERADOS A PARTIR DE LA DISTANCIA

Tabla B.2: Parámetros utilizados para simular una red con 500 nodos desplegados, en un campo a sensor generado tomando en cuenta sólo la distancia.

$n = 500$		
$r_s = 0.1$	$r_c = 0.07$	$r_u = 0.3$
$\epsilon = 1$	$\phi = 0, 5$	$\beta = 0, 2.5$
$t_v = 20$		$to_v = 40$
$t_u = 20$		$to_u = 40$
$c_n = 0.1$	$c_d = 2$	$c_c = 2$
$c_p = 6$		$c_e = 2$
$\delta = 1$	$\gamma = 0$	$\zeta = 0$
$p = 25$		
$t_s = 4500$		

Tabla B.3: Parámetros utilizados para simular una red con 1000 SN desplegados, en un campo a sensor generado tomando sólo con δ .

$n = 1000$		
$r_s = 0.1$	$r_c = 0.05$	$r_u = 0.15$
$\epsilon = 1$	$\phi = 0, 5$	$\beta = 0, 2.5$
$t_v = 20$		$to_v = 40$
$t_u = 20$		$to_u = 40$
$c_n = 0.1$	$c_d = 2$	$c_c = 2$
$c_p = 6$		$c_e = 2$
$\delta = 1$	$\gamma = 0$	$\zeta = 0$
$p = 25$		
$t_s = 4500$		

B.3 SIMULACIONES EN CAMPOS A SENSAR GENERADOS ALEATORIAMENTE

Tabla B.4: Parámetros utilizados para simular una red con 500 SN desplegados, en un campo a sensor generado a partir del coeficiente ζ .

$n = 500$		
$r_s = 0.1$	$r_c = 0.07$	$r_u = 0.3$
$\epsilon = 1$	$\phi = 0, 5$	$\beta = 0, 2.5$
$t_v = 20$		$to_v = 40$
$t_u = 20$		$to_u = 40$
$c_n = 0.1$	$c_d = 2$	$c_c = 2$
$c_p = 6$		$c_e = 2$
$\delta = 0$	$\gamma = 0$	$\zeta = 1$
$p = 25$		
$t_s = 4500$		

Tabla B.5: Parámetros utilizados para simular una red con 1000 SN desplegados, en un campo a sensor generado a partir del coeficiente ζ .

$n = 1000$		
$r_s = 0.1$	$r_c = 0.05$	$r_u = 0.15$
$\epsilon = 1$	$\phi = 0, 5, 7.5$	$\beta = 0, 2.5$
$t_v = 20$		$to_v = 40$
$t_u = 20$		$to_u = 40$
$c_n = 0.1$	$c_d = 2$	$c_c = 2$
$c_p = 6$		$c_e = 2$
$\delta = 0$	$\gamma = 0$	$\zeta = 1$
$p = 25$		
$t_s = 4500$		

B.4 SIMULACIONES EN CAMPOS A SENSAR GENERADOS CON LOS PARÁMETROS $\delta = 0$, $\gamma = 0.1$ Y $\zeta = 0.9$

Tabla B.6: Parámetros utilizados para simular una red con 500 SN desplegados, en un campo a sensar generado con $\delta = 0$, $\gamma = 0.1$ y $\zeta = 0.9$.

$n = 500$		
$r_s = 0.1$	$r_c = 0.07$	$r_u = 0.3$
$\epsilon = 1$	$\phi = 0, 5$	$\beta = 0, 2.5$
$t_v = 20$		$to_v = 40$
$t_u = 20$		$to_u = 40$
$c_n = 0.1$	$c_d = 2$	$c_c = 2$
$c_p = 6$		$c_e = 2$
$\delta = 0$	$\gamma = 0.1$	$\zeta = 0.9$
$p = 25$		
$t_s = 4500$		

Tabla B.7: Parámetros utilizados para simular una red con 1000 SN desplegados, en un campo a sensar generado con $\delta = 0$, $\gamma = 0.1$ y $\zeta = 0.9$.

$n = 1000$		
$r_s = 0.1$	$r_c = 0.05$	$r_u = 0.15$
$\epsilon = 1$	$\phi = 0, 5, 7.5$	$\beta = 0, 2.5$
$t_v = 20$		$to_v = 40$
$t_u = 20$		$to_u = 40$
$c_n = 0.1$	$c_d = 2$	$c_c = 2$
$c_p = 6$		$c_e = 2$
$\delta = 0$	$\gamma = 0.1$	$\zeta = 0.9$
$p = 25$		
$t_s = 4500$		

B.5 SIMULACIONES REALIZADAS VARIANDO LA DURACIÓN DE LA CORRIDA

Tabla B.8: Parámetros utilizados para simular una red con 1000 SN, en un campo a sensor generado aleatoriamente y una duración de 9000 pasos.

$n = 1000$		
$r_s = 0.1$	$r_c = 0.05$	$r_u = 0.15$
$\epsilon = 1$	$\phi = 0, 5, 7.5$	$\beta = 0, 2.5$
$t_v = 20$		$to_v = 40$
$t_u = 20$		$to_u = 40$
$c_n = 0.1$	$c_d = 2$	$c_c = 2$
$c_p = 6$		$c_e = 2$
$\delta = 0$	$\gamma = 0$	$\zeta = 1$
$p = 25$		
$t_s = 9000$		

Tabla B.9: Parámetros utilizados para simular una red con 1000 SN desplegados, en un campo a sensor generado con $\delta = 0$, $\gamma = 0.1$ y $\zeta = 0.9$, con una duración 9000 pasos.

$n = 1000$		
$r_s = 0.1$	$r_c = 0.05$	$r_u = 0.15$
$\epsilon = 1$	$\phi = 0, 5, 7.5$	$\beta = 0, 2.5$
$t_v = 20$		$to_v = 40$
$t_u = 20$		$to_u = 40$
$c_n = 0.1$	$c_d = 2$	$c_c = 2$
$c_p = 6$		$c_e = 2$
$\delta = 0$	$\gamma = 0.1$	$\zeta = 0.9$
$p = 25$		
$t_s = 9000$		

Tabla B.10: Parámetros utilizados para simular una red y observar el comportamiento del costo de reemplazo con respecto al tiempo, en un campo a sensor generado aleatoriamente.

$n = 1000$		
$r_s = 0.1$	$r_c = 0.05$	$r_u = 0.15$
$t_v = 20$		$to_v = 40$
$t_u = 20$		$to_u = 40$
$c_n = 0.1$	$c_d = 2$	$c_c = 2$
$c_p = 6$		$c_e = 2$
$\delta = 0$	$\gamma = 0$	$\zeta = 1$
$p = 25$		
$t_s = 150000$		

Tabla B.11: Combinaciones de parámetros utilizadas en las simulaciones, para observar el comportamiento del costo total con respecto al tiempo.

ϵ	1	1	1	1	1	1
ϕ	0	0	5	5	7.5	7.5
β	0	2.5	2.5	5	2.5	5

B.6 SIMULACIONES REALIZADAS VARIANDO LA DIVISIÓN DEL PAISAJE

Tabla B.12: Divisiones de paisaje utilizadas en las simulaciones.

p							
5	10	15	25	35	40	45	50

Tabla B.13: Parámetros utilizados para simular una red con 1000 SN desplegados, en un campo a sensor generado a partir de los coeficientes $\delta = 0$, $\gamma = 0.1$ y $\zeta = 0.9$, variando el tamaño de la división del paisaje.

$n = 1000$		
$r_s = 0.1$	$r_c = 0.05$	$r_u = 0.15$
$\epsilon = 1$	$\phi = 7.5$	$\beta = 2.5$
$t_v = 20$		$to_v = 40$
$t_u = 20$		$to_u = 40$
$c_n = 0.1$	$c_d = 2$	$c_c = 2$
$c_p = 6$		$c_e = 2$
$\delta = 0$	$\gamma = 0.1$	$\zeta = 0.9$
$p = 25, 50$		
$t_s = 4500$		

Tabla B.14: Parámetros utilizados para simular una red con 1000 SN desplegados, utilizando el coeficiente ζ para la generación del campo a sensor y variando el tamaño de la división del paisaje.

$n = 1000$		
$r_s = 0.1$	$r_c = 0.05$	$r_u = 0.15$
$\epsilon = 1$	$\phi = 7.5$	$\beta = 2.5$
$t_v = 20$		$to_v = 40$
$t_u = 20$		$to_u = 40$
$c_n = 0.1$	$c_d = 2$	$c_c = 2$
$c_p = 6$		$c_e = 2$
$\delta = 0$	$\gamma = 0$	$\zeta = 1$
$t_s = 4500$		

FICHA AUTOBIOGRÁFICA

Carlos Alberto Castillo Salazar

Candidato para el grado de Ingeniero Mecánico Electricista

Universidad Autónoma de Nuevo León

Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

Tesis:

OPTIMIZACIÓN DE COSTOS DE REEMPLAZO EN REDES SENSORAS INALÁMBRICAS

Nací el 19 de octubre de 1987 en la ciudad de Monterrey, Nuevo León, México. Gracias a Dios, soy el cuarto hijo de Luis Javier Castillo Granados y Rosa Laura Salazar Macías (†), hermano de Norma Laura, Claudia Judith y Luis Javier Castillo Salazar, e hijo adoptivo de Alma Ofelia Chávez Chávez. Empecé mis estudios universitarios en la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Autónoma de Nuevo León en agosto de 2004.

En enero de 2008 comencé a trabajar con la Dra. Elisa Schaeffer como becario del proyecto PROMEP por 12 meses, después solicité y me fué otorgada una ampliación a 24 meses. Durante la estancia de trabajo, realicé mis prácticas profesionales en el período comprendido entre enero y junio de 2008, desde entonces a la fecha continúé con la realización de mi trabajo de tesis con opción al título de Ingeniero Mecánico Electricista.