

Evaluación del desempeño del protocolo de enrutamiento RPL en redes LLN a través de Internet
en IoT-Lab

Alexander Luna Duitama

Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero de Sistemas

Director:

Pedro Javier Trujillo Tarazona

Mg. en Informática

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas

Escuela de Ingeniería de Sistemas

Bucaramanga

2021

Dedicatoria

A mi madre Ana Lucia Duitama Palomino Q.E.P.D.

Agradecimientos

Agradecimientos a mi Padre Mario Luna por la paciencia y apoyo que tuvo durante de realización de este pregrado.

A mi director de proyecto Pedro Javier Trujillo Tarazona por el apoyo y acompañamiento brindado para la realización de este trabajo de grado.

Contenido

	Pág.
Introducción	35
1. Objetivos	37
1.1 Objetivo General	37
1.2 Objetivos Específicos.....	37
2. Marco Conceptual.....	38
2.1 Internet de las cosas	38
2.2 Red de baja potencia y con pérdidas tipo IEEE 802.15.4.....	39
2.3 Estándar IEEE 802.15.14.....	39
2.3.1 Topologías de red del estándar IEEE 802.15.4.....	40
2.3.2 Arquitectura	42
2.3.3 Arquitectura TCP/IPv6 para redes IEEE 802.15.4	42
2.3.3.1 Capa de aplicación.	43
2.3.3.2 Capa de transporte.....	44
2.3.3.3 Capa de red.	44
2.3.3.3.1 6LoWPAN.	45
2.3.3.2 Capa física/enlace de datos.	45
2.4 RPL	46
2.4.1 Enrutamiento en RPL.....	47
2.4.2 Métodos de generación de topología RPL.....	48

2.5 Contiki.....	49
2.5.1 Contiki-NG	50
2.5.2 Simulador Cooja	51
2.5.3 Descripción del simulador Cooja.....	51
2.6 Infraestructura IoT-Lab.....	54
2.6.1 Arquitecturas	55
2.6.2 IoT-Lab M3.....	56
2.6.3 Descripción de los laboratorios de IoT-Lab utilizados	57
3. Metodología	60
3.1 Diseño de escenarios y experimentos	61
3.1.1 Escenarios	61
3.1.1.1 Descripción de los escenarios.	62
3.1.1.1.1 Primer escenario.....	63
3.1.1.1.2 Segundo escenario.	64
3.1.1.1.3 Tercer escenario.	66
3.1.1.1.4 Cuarto escenario.....	68
3.1.1.1.5 Quinto escenario.	70
3.1.1.1.6 Sexto escenario.	71
3.1.1.1.7 Séptimo escenario.	72
3.1.1.1.8 Octavo escenario.....	74
3.2 Desarrollo de los experimentos.....	75
3.2.1 Pasos para hacer una simulación.....	76
3.2.2 Pasos para enviar un experimento en la plataforma IoT-Lab	78

4. Resultados	80
4.1 Resultados de las simulaciones	80
4.2 Resultados de las pruebas en IoT-Lab	93
5. Análisis de resultados	187
6. Conclusiones	190
Referencias Bibliográficas	192

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 Pila de protocolos de TCP/IPv6 para redes IEEE 802.15.4.....	43
Tabla 2 Descripción del hardware IoT-Lab	55
Tabla 3 Variaciones de parámetros iniciales	62
Tabla 4 Tabla de posiciones de los nodos de red escenario primer escenario	63
Tabla 5 Tabla de posiciones de los nodos de red.....	67
Tabla 6 Tabla de posiciones de los nodos de red.....	69
Tabla 7 Tabla de posiciones de los nodos de red.....	71
Tabla 8 Tabla de posiciones de los nodos de red.....	72
Tabla 9 Tabla de posiciones de los nodos de red.....	73
Tabla 10 Tabla de posiciones de los nodos de red.....	75

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 Ejemplo de Topología en estrella y punto a punto IEEE 802.15.4	41
Figura 2 Arquitectura de un dispositivo de baja potencia IEEE802.15.4.....	42
Figura 3 Modelo de arquitectura del sistema operativo Contiki.....	49
Figura 4 Ejemplo de Time Line Simulador Cooja.....	51
Figura 5 Ejemplo de Mote Output Simulador Cooja.....	52
Figura 6 Ejemplo de Mote Output Simulador Cooja.....	52
Figura 7 Ejemplo de Simulator Scripts Editor Cooja	53
Figura 8 Ejemplo de Collect View.....	54
Figura 9 Ejemplo de placa nodo IoT-Lab M3	57
Figura 10 Sedes infraestructura IoT-Lab	58
Figura 11 Sede Grenoble	59
Figura 12 Sede Lille, sala exclusiva para el despliegue de los nodos IoT.....	59
Figura 13 Topología 1.....	63
Figura 14 Topología 2.....	65
Figura 15 Topología 3.....	67
Figura 16 Topología 4.....	69
Figura 17 Topología 5.....	70
Figura 18 Topología 6.....	72
Figura 19 Topología 7.....	73

Figura 20 Topología 8.....	74
Figura 21 Ventana Network.....	77
Figura 22 Simulación en ejecución.....	78
Figura 23 Resumen de mensaje en los experimentos para la topología 1 en las simulaciones en Cooja.....	80
Figura 24 Resumen de ETX y saltos para llegar al nodo raíz en los experimentos para la topología 1 en las simulaciones en Cooja.....	81
Figura 25 Resumen de tiempos entre paquetes en los experimentos para la topología 1 en las simulaciones en Cooja.....	81
Figura 26 Resumen de potencias para la topología 1 en las simulaciones en Cooja.....	82
Figura 27 Resumen de mensaje en los experimentos para la topología 3 en las simulaciones en Cooja.....	82
Figura 28 Resumen de ETX y saltos para llegar al nodo raíz en los experimentos para la topología 3 en las simulaciones en Cooja.....	83
Figura 29 Resumen de tiempos entre paquetes en los experimentos para la topología 3 en las simulaciones en Cooja.....	83
Figura 30 Resumen de potencias para la topología 3 en las simulaciones en Cooja.....	84
Figura 31 Resumen de mensaje en los experimentos para la topología 4 en las simulaciones en Cooja.....	84
Figura 32 Resumen de ETX y saltos para llegar al nodo raíz en los experimentos para la topología 4 en las simulaciones en Cooja.....	85
Figura 33 Resumen de tiempos entre paquetes en los experimentos para la topología 4 en las simulaciones en Cooja.....	85

Figura 34 Resumen de potencias para la topología 4 en las simulaciones en Cooja	86
Figura 35 Resumen de mensaje en los experimentos para la topología 5 en las simulaciones en Cooja.....	86
Figura 36 Resumen de ETX y saltos para llegar al nodo raíz en los experimentos para la topología 5 en las simulaciones en Cooja	87
Figura 37 Resumen de tiempos entre paquetes en los experimentos para la topología 5 en las simulaciones en Cooja	87
Figura 38 Resumen de potencias para la topología 5 en las simulaciones en Cooja	88
Figura 39 Resumen de mensaje en los experimentos para la topología 6 en las simulaciones en Cooja.....	88
Figura 40 Resumen de ETX y saltos para llegar al nodo raíz en los experimentos para la topología 6 en las simulaciones en Cooja	88
Figura 41 Resumen de tiempos entre paquetes en los experimentos para la topología 6 en las simulaciones en Cooja	89
Figura 42 Resumen de potencias para la topología 6 en las simulaciones en Cooja.....	89
Figura 43 Resumen de mensaje en los experimentos para la topología 7 en las simulaciones en Cooja.....	90
Figura 44 Resumen de ETX y saltos para llegar al nodo raíz en los experimentos para la topología 7 en las simulaciones en Cooja.....	90
Figura 45 Resumen de tiempos entre paquetes en los experimentos para la topología 7 en las simulaciones en Cooja	90
Figura 46 Resumen de potencias para la topología 7 en las simulaciones en Cooja	91

Figura 47 Resumen de mensaje en los experimentos para la topología 8 en las simulaciones en Cooja.....	91
Figura 48 Resumen de ETX y saltos para llegar al nodo raíz en los experimentos para la topología 8 en las simulaciones en Cooja.....	92
Figura 49 Resumen de tiempos entre paquetes en los experimentos para la topología 8 en las simulaciones en Cooja	92
Figura 50 Resumen de potencias para la topología 8 en las simulaciones en Cooja.....	93
Figura 51 Comportamiento promedio de la potencia para los nodos de la topología 1 en los experimentos para el escenario 1 en IoT-Lab.....	94
Figura 52 Comportamiento promedio de la potencia para los nodos de la topología 2 en los experimentos para el escenario 2 en IoT-Lab.....	94
Figura 53 Comportamiento promedio de la potencia para los nodos de la topología 3 en los experimentos para el escenario 3 en IoT-Lab.....	95
Figura 54 Comportamiento promedio de la potencia para los nodos de la topología 4 en los experimentos para el escenario 4 en IoT-Lab.....	95
Figura 55 Comportamiento promedio de la potencia para los nodos de la topología 5 en los experimentos para el escenario 5 en IoT-Lab.....	96
Figura 56 Comportamiento promedio de la potencia para los nodos de la topología 5 en los experimentos para el escenario 5 en IoT-Lab.....	96
Figura 57 Comportamiento promedio de la potencia para los nodos de la topología 7 en los experimentos para el escenario 7 en IoT-Lab.....	97
Figura 58 Comportamiento promedio de la potencia para los nodos de la topología 8 en los experimentos para el escenario 8 en IoT-Lab.....	97

Figura 59 Comportamiento promedio del voltaje para los nodos de la topología 1 en los experimentos para el escenario 1 en IoT-Lab	98
Figura 60 Comportamiento promedio del voltaje para los nodos de la topología 2 en los experimentos para el escenario 2 en IoT-Lab	98
Figura 61 Comportamiento promedio del voltaje para los nodos de la topología 3 en los experimentos para el escenario 3 en IoT-Lab	99
Figura 62 Comportamiento promedio del voltaje para los nodos de la topología 4 en los experimentos para el escenario 4 en IoT-Lab	99
Figura 63 Comportamiento promedio del voltaje para los nodos de la topología 5 en los experimentos para el escenario 5 en IoT-Lab	100
Figura 64 Comportamiento promedio del voltaje para los nodos de la topología 6 en los experimentos para el escenario 6 en IoT-Lab	100
Figura 65 Comportamiento promedio del voltaje para los nodos de la topología 7 en los experimentos para el escenario 7 en IoT-Lab	101
Figura 66 Comportamiento promedio del voltaje para los nodos de la topología 8 en los experimentos para el escenario 8 en IoT-Lab	101
Figura 67 Comportamiento promedio de la corriente para los nodos de la topología 1 en los experimentos para el escenario 1 en IoT-Lab	102
Figura 68 Comportamiento promedio de la corriente para los nodos de la topología 2 en los experimentos para el escenario 2 en IoT-Lab	102
Figura 69 Comportamiento promedio de la corriente para los nodos de la topología 3 en los experimentos para el escenario 3 en IoT-Lab	103

Figura 70 Comportamiento promedio de la corriente para los nodos de la topología 4 en los experimentos para el escenario 4 en IoT-Lab	103
Figura 71 Comportamiento promedio de la corriente para los nodos de la topología 5 en los experimentos para el escenario 5 en IoT-Lab	104
Figura 72 Comportamiento promedio de la corriente para los nodos de la topología 6 en los experimentos para el escenario 6 en IoT-Lab	104
Figura 73 Comportamiento promedio de la corriente para los nodos de la topología 7 en los experimentos para el escenario 7 en IoT-Lab	105
Figura 74 Comportamiento promedio de la corriente para los nodos de la topología 8 en los experimentos para el escenario 8 en IoT-Lab	105
Figura 75 Comportamiento promedio de la RSSI para los nodos de la topología 1 en los experimentos para el escenario 1 en IoT-Lab	106
Figura 76 Comportamiento promedio de la RSSI para los nodos de la topología 2 en los experimentos para el escenario 2 en IoT-Lab	106
Figura 77 Comportamiento promedio de la RSSI para los nodos de la topología 3 en los experimentos para el escenario 3 en IoT-Lab	107
Figura 78 Comportamiento promedio de la RSSI para los nodos de la topología 4 en los experimentos para el escenario 4 en IoT-Lab	107
Figura 79 Comportamiento promedio de la RSSI para los nodos de la topología 5 en los experimentos para el escenario 5 en IoT-Lab	107
Figura 80 Comportamiento promedio de la RSSI para los nodos de la topología 6 en los experimentos para el escenario 6 en IoT-Lab	108

Figura 81 Comportamiento promedio de la RSSI para los nodos de la topología 7 en los experimentos para el escenario 7 en IoT-Lab	108
Figura 82 Comportamiento promedio de la RSSI para los nodos de la topología 8 en los experimentos para el escenario 8 en IoT-Lab	108
Figura 83 Comportamiento promedio del LQI para los nodos de la topología 1 en los experimentos para el escenario 1 en IoT-Lab.....	109
Figura 84 Comportamiento promedio del LQI para los nodos de la topología 2 en los experimentos para el escenario 2 en IoT-Lab.....	109
Figura 85 Comportamiento promedio de la LQI para los nodos de la topología 3 en los experimentos para el escenario 3 en IoT-Lab	110
Figura 86 Comportamiento promedio del LQI para los nodos de la topología 4 en los experimentos para el escenario 4 en IoT-Lab.....	110
Figura 87 Comportamiento promedio del LQI para los nodos de la topología 5 en los experimentos para el escenario 5 en IoT-Lab.....	110
Figura 88 Comportamiento promedio del LQI para los nodos de la topología 6 en los experimentos para el escenario 6 en IoT-Lab.....	111
Figura 89 Comportamiento promedio de LQI para los nodos de la topología 7 en los experimentos para el escenario 7 en IoT-Lab.....	111
Figura 90 Comportamiento promedio de LQI para los nodos de la topología 8 en los experimentos para el escenario 8 en IoT-Lab.....	112
Figura 91 Comparación de la potencia entre los nodos de la topología 1 en los experimentos para el escenario 1.....	113

Figura 92 Comparación de la potencia entre los nodos de la topología 2 en los experimentos para el escenario 2.....	114
Figura 93 Comparación de la potencia entre los nodos de la topología 3 en los experimentos para el escenario 3.....	115
Figura 94 Comparación de la potencia entre los nodos de la topología 4 en los experimentos para el escenario 4.....	116
Figura 95 Comparación de la potencia entre los nodos de la topología 5 en los experimentos para el escenario 5.....	116
Figura 96 Comparación de la potencia entre los nodos de la topología 6 en los experimentos para el escenario 6.....	117
Figura 97 Comparación de la potencia entre los nodos de la topología 7 en los experimentos para el escenario 7.....	117
Figura 98 Comparación de la potencia entre los nodos de la topología 8 en los experimentos para el escenario 8.....	118
Figura 99 Comparación del voltaje entre los nodos de la topología 1 en los experimentos para el escenario 1	119
Figura 100 Comparación del voltaje entre los nodos de la topología 2 en los experimentos para el escenario 2	120
Figura 101 Comparación del voltaje entre los nodos de la topología 2 en los experimentos para el escenario 2	121
Figura 102 Comparación del voltaje entre los nodos de la topología 3 en los experimentos para el escenario 3	122

Figura 103 Comparación del voltaje entre los nodos de la topología 4 en los experimentos para el escenario 4	123
Figura 104 Comparación del voltaje entre los nodos de la topología 5 en los experimentos para el escenario 5	123
Figura 105 Comparación del voltaje entre los nodos de la topología 6 en los experimentos para el escenario 6	124
Figura 106 Comparación del voltaje entre los nodos de la topología 7 en los experimentos para el escenario 7	124
Figura 107 Comparación del voltaje entre los nodos de la topología 8 en los experimentos para el escenario 8	125
Figura 108 Comparación de la corriente entre los nodos de la topología 1 en los experimentos para el escenario 1.....	126
Figura 109 Comparación de la corriente entre los nodos de la topología 2 en los experimentos para el escenario 2.....	127
Figura 110 Comparación de la corriente entre los nodos de la topología 3 en los experimentos para el escenario 3.....	128
Figura 111 Comparación de la corriente entre los nodos de la topología 4 en los experimentos para el escenario 4.....	129
Figura 112 Comparación de la corriente entre los nodos de la topología 5 en los experimentos para el escenario 5.....	129
Figura 113 Comparación de la corriente entre los nodos de la topología 6 en los experimentos para el escenario 6.....	130

Figura 114 Comparación de la corriente entre los nodos de la topología 8 en los experimentos para el escenario 8.....	130
Figura 115 Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 1 (Escenario 1).	131
Figura 116 Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 1 (Escenario 2).	131
Figura 117 Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 1 (Escenario 3).	132
Figura 118 Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 1 (Escenario 4).	132
Figura 119 Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 1 (Escenario 5).	133
Figura 120 Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 1 (Escenario 6)	133
Figura 121 Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 1 (Escenario 7).	134
Figura 122 Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 1 (Escenario 8).	134
Figura 123 Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 1 (Escenario 9).	135
Figura 124 Comparación entre escenarios 1, 4 y 7 para los mensajes enviados y el estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 1.....	135

Figura 125 Comparación entre escenarios 2, 5 y 8 para los mensajes enviados y el estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 1.....	136
Figura 126 Comparación entre escenarios 3, 6 y 9 para los mensajes enviados y el estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 1.....	136
Figura 127 Resumen de los datos de los mensajes para los experimentos de la Topología 1 en IoT-Lab.	137
Figura 128 Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 2 (Escenario 1).	138
Figura 129 Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 2 (Escenario 2).	138
Figura 130 Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 2 (Escenario 3).	139
Figura 131 Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 2 (Escenario 4).	139
Figura 132 Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 2 (Escenario 5).	140
Figura 133 Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 2 (Escenario 6).	140
Figura 134 Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 2 (Escenario 7).	141
Figura 135 Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 2 (Escenario 8).	141

Figura 136 Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 2 (Escenario 9).	142
Figura 137 Comparación entre escenarios 1, 4 y 7 para los mensajes enviados y el estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 2.....	142
Figura 138 Comparación entre escenarios 2, 5 y 8 para los mensajes enviados y el estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 2.....	143
Figura 139 Comparación entre escenarios 3, 6 y 9 para los mensajes enviados y el estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 2.....	143
Figura 140 Resumen de los datos de los mensajes para los experimentos de la topología 2 en IoT-Lab.	144
Figura 141 Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 3 (Escenario 1).	145
Figura 142 Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 3 (Escenario 2).	145
Figura 143 Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 3 (Escenario 3).	146
Figura 144 Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 3 (Escenario 4).	146
Figura 145 Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 3 (Escenario 5).	147
Figura 146 Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 3 (Escenario 6).	147

Figura 147 Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 3 (Escenario 8).	148
Figura 148 Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 3 (Escenario 8).	148
Figura 149 Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 3 (Escenario 9).	149
Figura 150 Comparación entre escenarios 1, 4 y 7 para los mensajes enviados y el estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 3.....	149
Figura 151 Comparación entre escenarios 2, 5 y 8 para los mensajes enviados y el estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 3.....	150
Figura 152 Comparación entre escenarios 3, 6 y 9 para los mensajes enviados y el estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 3.....	150
Figura 153 Resumen de los datos de los mensajes para los experimentos de la topología 3 en IoT-Lab.	151
Figura 154 Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 4 (Escenario 1).	152
Figura 155 Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 4 (Escenario 2).	152
Figura 156 Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 4 (Escenario 3).	152
Figura 157 Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 4 (Escenario 4).	153

Figura 158 Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 4 (Escenario 5).	153
Figura 159 Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 4 (Escenario 6).	153
Figura 160 Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 4 (Escenario 7).	154
Figura 161 Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 4 (Escenario 8).	154
Figura 162 Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 4 (Escenario 9).	154
Figura 163 Comparación entre escenarios 1, 4 y 7 para los mensajes enviados y el estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 4.	155
Figura 164 Comparación entre escenarios 2, 5 y 8 para los mensajes enviados y el estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 4.	155
Figura 165 Comparación entre escenarios 3, 6 y 9 para los mensajes enviados y el estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 4.	156
Figura 166 Resumen de los datos de los mensajes para los experimentos en IoT-Lab para la Topología 4.	157
Figura 167 Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 5 (Escenario 1).	157
Figura 168 Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 5 (Escenario 2).	158

Figura 169 Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 5 (Escenario 3).	158
Figura 170 Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 5 (Escenario 4).	159
Figura 171 Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 5 (Escenario 5).	159
Figura 172 Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 5 (Escenario 6).	160
Figura 173 Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 5 (Escenario 7).	160
Figura 174 Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 5 (Escenario 8).	161
Figura 175 Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 5 (Escenario 9).	161
Figura 176 Comparación entre escenarios 1, 4 y 7 para los mensajes enviados y el estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 5.	162
Figura 177 Comparación entre escenarios 3, 6 y 9 para los mensajes enviados y el estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 5.	162
Figura 178 Resumen de los datos de los mensajes para los experimentos de la Topología 5 en IoT-Lab.	163
Figura 179 Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 6 (Escenario 1).	164

Figura 180 Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 6 (Escenario 2).	164
Figura 181 Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 6 (Escenario 3).	164
Figura 182 Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 6 (Escenario 4).	165
Figura 183 Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 6 (Escenario 5).	165
Figura 184 Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 6 (Escenario 6).	166
Figura 185 Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 6 (Escenario 7).	166
Figura 186 Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 6 (Escenario 8).	167
Figura 187 Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 6 (Escenario 9).	167
Figura 188: Comparación entre escenarios 1, 4 y 7 para los mensajes enviados y el estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 6.....	168
Figura 189 Comparación entre escenarios 2, 5 y 8 para los mensajes enviados y el estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 6.....	168
Figura 190 Comparación entre escenarios 3, 6 y 9 para los mensajes enviados y el estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 6.....	169

Figura 191: Resumen de los datos de los mensajes para los experimentos de la topología 6 en IoT-Lab.	169
Figura 192 Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 6 (Escenario 1).	170
Figura 193 Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 6 (Escenario 2).	170
Figura 194 Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 6 (Escenario 3).	171
Figura 195 Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 6 (Escenario 4).	171
Figura 196 Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 6 (Escenario 5).	171
Figura 197 Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 6 (Escenario 6).	172
Figura 198 Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 6 (Escenario 7).	172
Figura 199 Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 6 (Escenario 8).	172
Figura 200 Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 6 (Escenario 9).	173
Figura 201 Comparación entre escenarios 1, 4 y 7 para los mensajes enviados y el estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 6.	173

Figura 202 Comparación entre escenarios 2, 5 y 8 para los mensajes enviados y el estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 6.....	174
Figura 203 Comparación entre escenarios 3, 6 y 9 para los mensajes enviados y el estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 6.....	174
Figura 204 Resumen de los datos de los mensajes para los experimentos de la Topología 6 en IoT-Lab.	175
Figura 205 Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 7 (Escenario 1).	175
Figura 206 Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 7 (Escenario 2).	176
Figura 207 Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 7 (Escenario 3).	176
Figura 208 Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 7 (Escenario 4).	176
Figura 209 Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 7 (Escenario 5).	177
Figura 210 Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 7 (Escenario 6).	177
Figura 211 Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 7 (Escenario 7). ^{o1}	177
Figura 212 Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 7 (Escenario 8).	178

Figura 213 Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 7 (Escenario 9).	178
Figura 214 Comparación entre escenarios 1, 4 y 7 para los mensajes enviados y el estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 7.).....	179
Figura 215 Comparación entre escenarios 2, 5 y 8 para los mensajes enviados y el estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 7.....	179
Figura 216 Comparación entre escenarios 3, 6 y 9 para los mensajes enviados y el estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 7.....	180
Figura 217 Resumen de los datos de los mensajes para los experimentos de la Topología 7 en IoT-Lab.	180
Figura 218 Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 8 (Escenario 1).	181
Figura 219 Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 8 (Escenario 2).	181
Figura 220 Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes 3recibidos por los nodos en la topología 8 (Escenario 3).	182
Figura 221 Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 8 (Escenario 4).	182
Figura 222 Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 8 (Escenario 5).	182
Figura 223 Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 8 (Escenario 6).	183

Figura 224 Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 8 (Escenario 7).	183
Figura 225 Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 8 (Escenario 8).	184
Figura 226 Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 8 (Escenario 9).	184
Figura 227 Comparación entre escenarios 1, 4 y 7 para los mensajes enviados y el estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 8.....	185
Figura 228 Comparación entre escenarios 2, 5 y 8 para los mensajes enviados y el estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 8.....	185
Figura 229 Comparación entre escenarios 3, 6 y 9 para los mensajes enviados y el estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 8.....	186
Figura 230 Resumen de los datos de los mensajes para los experimentos de la Topología 8 en IoT-Lab.	187

Lista de Apéndices

Ver apéndices adjuntos y pueden ser consultados en la base de datos de la Biblioteca UIS.

Apéndice A. Resultados de la experimentación en la infraestructura IoT-Lab.

Apéndice B. Tablas de resumen de la experimentación en la infraestructura IoT-Lab.

Apéndice C. Resultados de la experimentación en el simulador Cooja del sistema operativo para IoT Contiki.

Apéndice D. Tablas de resumen de la experimentación en simulador Cooja del sistema operativo para IoT Contiki.

Apéndice E. Procedimiento para experimentación en Cooja.

Apéndice F. Procedimiento para experimentación en IoT-Lab.

Lista de Siglas

- DAG:** *Directed Acyclic Graph*
- DAO:** *Destination Advertisement Object*
- DIO:** *DODAG Information Object*
- DIS:** *DODAG Information Solicitation*
- DODAG:** *Destinationm Oriented Directed Acyclic Graph*
- ETX:** *Expected Transmision count*
- FFD:** *Full Function Device*
- IoT:** *Internet of Things.*
- IPv6:** *Internet Protocol version six.*
- LLN:** *Low-power and Lossy Network*
- MAC:** *Medium Access Control*
- MCU:** *Micro Controller Unit*
- OF:** *Objective Function*
- PHY:** *Physical layer*
- RAM:** *Random Access Memory*
- RF:** *Radio Frecuency*
- RFD:** *Reduced Function Device*
- ROM:** *Read Only Memory*
- RPL:** *Routing Protocol for Low-power and Lossy Networks*
- SUN:** *Smart Utility Networks*

TCP: *Transmission Control Protocol*

WPAN: *Wireless Personal Area Network*

Glosario

DAG: es un grafo sin bucles, formado por un conjunto de nodos y vértices donde cada nodo se conecta con otro por medio de un vértice.

DAO: objeto de anuncio de destino, tipo de mensaje que propaga la información de un nodo de hacia los ancestros en un DODAG.

DIO: objeto de información DODAG, son mensajes que se usan para la construcción de la ruta ascendentes en el protocolo RPL, mensajes que son transmitidos por el nodo raíz para la interconexión de la red.

DIS: mensaje de solicitud de información DODAG.

DODAG: grafo dirigido orientado al destino, que se origina en un nodo inicial llamado nodo raíz, hace las veces de puente con la red de Internet u otra red externa.

ETX: recuento de transmisión esperado, es una métrica de la calidad de una ruta entre dos nodos en una red inalámbrica.

FFD: en redes IEEE 802.15.4 son dispositivos de función completa, capaces de cumplir funciones de coordinadores de red y enrutador.

Firmware: es un programa de informático de bajo nivel diseñado para controlar dispositivos electrónicos teniendo directa comunicación con el hardware del dispositivo, en general establece la lógica de control del dispositivo electrónico.

Kernel: es el núcleo de un sistema operativo el cual es el encargado de permitir el acceso al hardware por parte del *software*.

MCU: es un circuito integrado para la ejecución y control de ordenes de un dispositivo electrónico.

RFD: son dispositivos que cumplen con tareas sencillas de recolección y envío de datos, funciones para las cuales no es necesario que cuente con grandes recursos de cómputo.

Resumen

Título: Evaluación del desempeño del protocolo de enrutamiento RPL en redes LLN a través de Internet en IoT-Lab*

Autor: Alexander Luna Duitama **

Palabras Clave: : IEEE 802.15.4, Redes, RPL, IoT-Lab, evaluación, LLN, Contiki, Cooja.

Descripción:

Las redes de baja potencia y con pérdidas (*LLNs, Low power and Lossy Networks*), están orientadas hacia su aplicación en el monitoreo y control de propiedades físicas de objetos. Entre los objetivos fundamentales de estas redes es que operen con una limitada cantidad de recursos energéticos y de cómputo para que sean de bajo costo y consumo energético.

RPL o “Protocolo de enrutamiento en IPv6 para redes de baja potencia y con pérdidas” RPL es un protocolo de enrutamiento para redes de bajo consumo energético y susceptible a pérdidas de paquetes que es aplicable en el enrutamiento en redes inalámbricas que operan siguiendo el estándar IEEE 802.15.4.

En este reporte se evalúa el protocolo RPL, se hace una revisión conceptual de temas relevantes para realizar la evaluación del protocolo, se diseñan una serie de 8 escenarios con 8 topologías de red distintas. Se realizan pruebas de estos escenarios en la infraestructura de internet de las cosas IoT-Lab en conjunto con el sistema operativo *Contiki*, las simulaciones fueron realizadas con el simulador *Cooja* el cual hace parte de *Contiki*. Posteriormente luego de realizadas las pruebas con los datos obtenidos se grafican y se concluye acerca de las métricas ETX, RSSI y LQI.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería de Sistemas e Informática. Director: Pedro Javier Trujillo Tarazona. Mg en Informática

Abstract

Title: Performance evaluation of the RPL routing protocol in LLN networks over the Internet in IoT-Lab*

Author(s): Alexander Luna Duitama**

Key Words: IEEE 802.15.4, Networking, RPL, IoT-Lab, Performance, LLN, Contiki, Cooja.

Description:

Low power and lossy networks (LLNs) are oriented towards their application in the monitoring and control of physical properties of objects. Among the fundamental objectives of these networks is that they operate with a limited amount of energy and computing resources so that they are of low cost and energy consumption.

RPL or "IPv6 routing protocol for low power and lossy networks" RPL is a routing protocol for networks with low energy consumption and susceptible to packet loss that is applicable in routing in wireless networks that operate following the IEEE standard. 802.15.4.

In this report the RPL protocol is evaluated, a conceptual review of relevant issues is made to carry out the evaluation of the protocol, a series of 8 scenarios with 8 different red topologies are designed. Tests of these scenarios are carried out in the Internet of Things infrastructure IoT-Lab in conjunction with the Contiki operating system, the simulations were carried out with the Cooja simulator which is part of Contiki. Later, after carrying out the tests with the data obtained, they are plotted and it is concluded about the ETX, RSSI and LQI metrics.

* Degree Work

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería de Sistemas e Informática. Director: Pedro Javier Trujillo Tarazona. Mg en Informática

Introducción

Las redes de baja potencia y con pérdidas (*LLNs, Low power and Lossy Networks*), están orientadas hacia su aplicación en el monitoreo y control de propiedades físicas de objetos. Este tipo de redes puede transmitir gran cantidad de datos en un instante de tiempo y enfrentar diversas eventualidades (por ejemplo: interferencia, baja disponibilidad del canal y elevada utilización del canal), uno de los objetivos fundamentales es que operen con una limitada cantidad de recursos energéticos y de cómputo para que sea sen de bajo costo y consumo energético.

RPL o “Protocolo de enrutamiento en IPv6 para redes de baja potencia y con pérdidas” (“*IPv6 Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks*”) es un protocolo de enrutamiento para redes de bajo consumo energético y susceptible a pérdidas de paquetes (LLN) que es aplicable en el enrutamiento en redes inalámbricas que operan siguiendo el estándar IEEE 802.15.4.

Se presentan aquí los resultados obtenidos en el estudio de la influencia de RPL en el desempeño de los enlaces en las redes inalámbricas LLN tipo IEEE 802.15.4, particularmente respecto a la calidad de enlace y consumo de energía de los nodos. Para hacer esta evaluación se utilizó el laboratorio de Internet de las cosas IoT-Lab. IoT-Lab (Adjih C., Baccelli E., Fleury E., Harter G., Mitton N., Noel T., Pissard-Gibollet R., Saint-Marcel F., Schreiner G., Vandaele G., 2015) es una infraestructura, accesible para la comunidad académica mundial a través de Internet, de recursos de cómputo y comunicaciones a gran escala de dispositivos de sensores y objetos comunicados.

Para determinar la influencia del protocolo RPL en el comportamiento de los enlaces en las redes LLN inalámbricas IEEE 802.15.4 se realizaron experimentos en IoT-Lab y simulaciones

en *Cooja*, simulador que forma parte del sistema operativo para IoT denominado *Contiki* (A Dunkels et al., 2006).

También se presenta aquí un marco teórico, la descripción metodología de cómo se desarrolló el trabajo, los resultados obtenidos, un análisis de resultados y las conclusiones. Dentro del marco teórico se abordan las redes LLN inalámbricas IEEE 802.15.4, la arquitectura de protocolos TCP/IPv6 para estas redes LLN, el protocolo de enrutamiento en IPv6 para las redes LLN denominado RPL, Contiki, Cooja y detalles de la infraestructura de acceso en línea a recursos para la experimentación IoT-Lab.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Evaluar el desempeño del protocolo de enrutamiento RPL en su influencia en el comportamiento de los enlaces de redes LLN a través de la infraestructura IoT-Lab.

1.2 Objetivos Especificos

1. Diseñar escenarios y experimentos de evaluación del desempeño del protocolo para ser realizados en Contiki y en IoT-Lab.

2. Realizar los experimentos de evaluación del protocolo mediante Contiki y su simulador *Cooja*.

3. Realizar los experimentos de evaluación del protocolo en la infraestructura IoT-Lab por medio del sistema operativo Contiki.

4. Evaluar el desempeño del protocolo a partir de los resultados de los experimentos en *Cooja* y en IoT-Lab.

2. Marco Conceptual

El trabajo desarrollado forma parte del dominio de Internet de las cosas, que junto con los siguientes temas, serán brevemente descritos en este capítulo: las redes de baja potencia y con pérdidas tipo IEEE 802.15.4, el estándar IEEE 802.15.4, el protocolo de enrutamiento para redes de baja potencia y con pérdidas RPL, el sistema operativo Contiki y la infraestructura para Internet de las cosas IoT-Lab.

2.1 Internet de las cosas

El Internet de las cosas o IoT por sus siglas en inglés, es la conexión de objetos por medio del uso de Internet, dichos objetos pueden ser cosas de uso doméstico como lo son refrigeradores, luminarias, aires acondicionados; hasta equipos médicos o industriales para su administración o autogestión. El termino fue usado por primera vez por Kevin Ashton en 1999 el cual para esa época era el director ejecutivo en el *Auto-ID Center del Massachusetts Institute of Technology MIT*.

Desde esa época a la actualidad el IoT ha evolucionado en distintos tipos, caracterizado por sus aplicaciones, es el caso del internet de las cosas aplicado a la industria conocido como Internet Industrial de las cosas o IIoT, para el control, comunicación y recopilación de datos con mayor precisión en los procesos de una empresa o como el internet del todo que interconecta objetos, personas y lugares; para la implementación del internet de las cosas los dispositivos que se usan suelen tener recursos limitados de memoria, procesamiento y consumo de energía, para así ser de dispositivos de bajo costo, debido a las condiciones de recursos limitados se ha definido una clase

de red IoT llamada red de baja potencia y con pérdidas LLN (*Low Power and Lossy Network*) (Buyya & Dastjerdi, 2016).

2.2 Red de baja potencia y con pérdidas tipo IEEE 802.15.4

Una red LLN o red de baja potencia con pérdidas (LLN, *Low Power and Lossy Network*), es una red compuesta por dispositivos IoT los cuales en general cuentan con grandes limitantes en sus características de memoria, procesamiento, alcance de radio y dependiendo de su aplicación el consumo de energía; debido a estos limitantes en este tipo de redes tienen una alta tasa de pérdida de datos y son de conexiones inestables. Un ejemplo de una red LLN son las redes de sensores inalámbricos WSN por sus siglas en inglés; que se usan en la industria para automatización industria, en hogares y ciudades inteligentes entre otras. (Sobral et al., 2019)

Una red LLN tipo IEEE 802.15.4 es una red de baja potencia y con pérdidas que opera bajo el estándar de la IEEE 802.15.4 el cual es un estándar desarrollado por instituto de ingenieros eléctricos y electrónicos conocido como IEEE (por sus siglas en inglés *Institute of Electrical and Electronics Engineers*).

2.3 Estándar IEEE 802.15.14

Es un estándar desarrollado en su primera versión en 2003 para redes de baja potencia, que establece las características que debe cumplir un protocolo de interconexión de dispositivos de radio frecuencia RF de baja potencia, capacidad de procesamiento, alcance y complejidad para redes inalámbricas de área personal (WPAN por sus siglas en inglés); este estándar establece la

capa física (PHY) y las características de la subcapa de control de acceso al medio (MAC) para la conexión en redes inalámbricas de baja potencia. (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2010).

El IEEE 802.15.4 establece múltiples capas físicas PHY que operan en distintas bandas de frecuencia de radio, operando en tres rangos frecuencia los cuales son 868 MHz, 915 MHz y 2.4 GHz, el tamaño de la trama es de un máximo de 127 bytes, aunque a partir de versión IEEE 802.15.4g incorporada en la versión completa del año 2015 se permite un tamaño máximo de 2047 bytes en redes denominadas SUN (*Smart Utility Networks*). En la banda de 2.4 GHz la velocidad de transmisión de datos es de 250 kbps; mientras que en las otras bandas hay una gama de menores y mayores velocidades. , adicional a esto establece dos tipos de dispositivos que conforman la red, tales dispositivos son los de función completa (FFD por sus siglas en inglés) y los de función reducida (RFD por sus siglas en inglés); el FFD cumple con funciones de coordinador y el RFD no realiza tareas de coordinación debido que sus características son aún menores que las de los FFD, puesto que su uso está dedicado a tareas sencillas tales como operar un interrupto o un sensor de manera que no necesita de grandes recursos lo que disminuye el costo de fabricación La capa MAC está a cargo del acceso al canal, manteniendo un enlace confiable entre dispositivos, sincronizando, asociando y desasociando dispositivos e implementando protocolos para el control de acceso al medio.(Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2010).

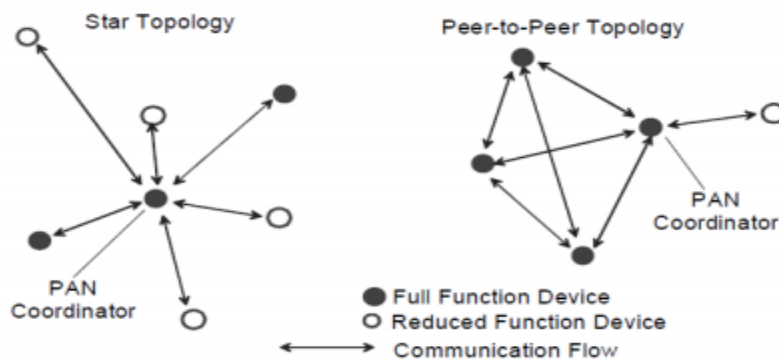
2.3.1 Topologías de red del estándar IEEE 802.15.4

El estándar IEEE 802.15.14 establece dos tipos de topologías para redes de baja potencia y son la topología en estrella donde un dispositivo es el administrador de la red y los demás

dispositivos establecen comunicación con el administrador , cualquier dispositivo perteneciente a la red cuenta con direcciones únicas que son llamadas direcciones extendidas pero adicional a ello cuentan con la posibilidad de asignar una dirección corta, direcciones que se usan para realizar la comunicación dentro de la red, el otro tipo de topología es llamada peer to peer, punto a punto o red de pares donde hay un dispositivo administrador de red pero a diferencia de la topología en estrella, este tipo de red cualquier dispositivos pueden comunicarse con cualquier otro que este a su alcance permitiendo redes de mayor complejidad como la topología en malla, este tipo de red son ideales en aplicaciones industriales , redes de sensores inalámbricos, agricultura, inventarios entre otras aplicaciones (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2010).

Figura 1.

Ejemplo de Topología en estrella y punto a punto IEEE 802.15.4



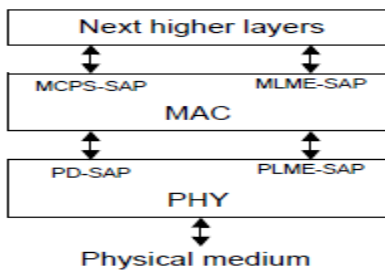
Nota: Ejemplo de Topología en estrella y punto a punto IEEE 802.15.4 extraída de IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks figura 5-1. (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2010)

2.3.2 Arquitectura

La arquitectura de un dispositivo de baja potencia para el estándar IEEE 802.15.4 se define en capas, donde cada capa administra una parte del estándar y a su vez ofrece servicios a las capas superiores. Un dispositivo básico que opera bajo el estándar IEEE 802.15.4 está compuesto por una capa física PHY, la cual contiene en su estructura un transceptor de radio frecuencia RF; un mecanismo de control de bajo nivel y una subcapa de control de acceso al medio MAC para la transferencia de datos dichas capas se ilustran en la Figura 2.

Figura 2

Arquitectura de un dispositivo de baja potencia IEEE802.15.4



Nota: Arquitectura de un dispositivo de baja potencia IEEE 802.15.4 extraída de IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks figura 5-4 (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2010)

2.3.3 Arquitectura TCP/IPv6 para redes IEEE 802.15.4

Para las redes del tipo IEEE 802.15.4 fue necesario la adaptación de las tecnologías de Internet con el fin que sean usadas por dispositivos de baja potencia, los cuales sufren de restricciones de capacidad de procesamiento, transmisión de datos, memoria y uso consumo de energía, debido a que estas tecnologías cuentan con gran popularidad y difusión en todo el mundo

y se consideran robustas y ampliamente estudiadas. Una de esas tecnologías es el protocolo de internet versión 6 conocido como IPv6 y la arquitectura de la pila de protocolos de TCP/IPv6 para redes IEEE 802.15.4, la que está definida en distintas capas, dichas capas son las responsables de ciertas tareas que en conjunto hace posible la comunicación en redes LLN. A continuación, en la Tabla 1 se presenta la pila de protocolos de TCP/IPv6 para redes IEEE 802.15.4. (Pinto et al., 2012)

Tabla 1.

Pila de protocolos de TCP/IPv6 para redes IEEE 802.15.4

CAPA O NIVEL	PROTOCOLOS O TECNOLOGÍA
Aplicación	CoAP, MQTTT, AMQP, HTTP/2 y WebSocket
Transporte	UDP, TCP
Red	IPv6, RPL
Adaptación	6LoWPAN (capa de adaptación para IPv6)
Enlace de datos/Física	IEEE 80215.4

Nota: Pila de protocolos de TCP/IPv6 para redes IEEE 802.15.4, V. Tsiatsis, S. Karnouskos, J. Höller, D. Boyle, and C. Mulligan, Internet of Things. 2018. Adaptación a partir de la figura 7.2

2.3.3.1 Capa de aplicación. La capa de aplicación es la encargada de proporcionar los servicios que garantizan que la comunicación efectiva entre dispositivos de bajo costo y bajo consumo energético de IoT. Los protocolos de capa de aplicación que se observan en la anterior figura No.1 permiten que se implementen en distintos servicios e industrias como lo son la domótica, las ciudades inteligentes, logística de transporte de bienes, comercio, medio ambiente, redes eléctricas inteligentes y de seguridad de acceso a perímetros o lugares. Esta capa se encarga

de las acciones, monitoreo, decisiones de control, seguridad y administración de aplicaciones. (Cama & Cama, 2012)

2.3.3.2 Capa de transporte. Esta capa es la encargada de transportar la información de origen a destino en la red, de manera eficiente y transparente para los usuarios; para ello divide el mensaje en pequeños segmentos (TCP) o datagramas (UDP) que son enviados a través de la red. Esta capa realiza el control y detección de errores por medio de los protocolos TCP (en el encabezado y los datos) o UDP (en el encabezado). (González García, 2017)

El protocolo de control de transmisión TCP por sus siglas en inglés, controla el tráfico y la entrega de paquetes, garantizando la llegada a destino, es el protocolo más usado para el transporte en internet. TCP por sus características de ser un protocolo orientado a la conexión necesita de una conexión entre dispositivos de larga duración lo cual no es ideal para dispositivo IoT que generalmente trabajan con batería y deben estar el mayor tiempo posible desconectados para ahorrar energía. El protocolo para datagramas de usuario UDP (*User Datagram Protocol*, por sus siglas en inglés), es un protocolo de transporte que no es orientado a la conexión, es un protocolo para las comunicaciones ágiles sin requerir del establecimiento de una conexión previa entre los extremos que no proporciona garantía entrega de mensaje y protección contra datagramas duplicados. Un dispositivo envía datagramas sin anunciar y establecer una conexión con el receptor, el protocolo no da garantía de la integridad de los datos, pero debido a su simplicidad en cuanto a su implementación lo hace mejor opción que TCP para su uso en IoT. (González García, 2017).

2.3.3.3 Capa de red. La capa de red es la encargada de fragmentar la información en segmentos denominados paquetes los cuales el emisor se encarga de la segmentación y el receptor

efectúa el ensamble de los segmentos, también es responsable de encaminar los paquetes a través de la red por medio de algoritmos para la elección de la ruta óptima en cada instante permitiendo que los paquetes lleguen a destino previene la congestión de la red cuando hay alto tráfico en la red. (González García, 2017).

El protocolo de internet o IP, en su versión IPv6, es diseñado para su uso en ordenadores personales portátiles y servidores, pero no es útil para su uso en IoT debido a que estos dispositivos cuentan con restricciones como por ejemplo capacidad de procesamiento; para ello se ha desarrollado un nuevo protocolo basado en IPv6 llamado 6LoWPAN o IPv6 para redes de baja potencia. (González García, 2017).

2.3.3.3.1 6LoWPAN. El protocolo IPv6 para redes inalámbricas de bajo consumo de área personal, es un estándar que permite la comunicación de redes de baja potencia con redes convencionales de internet. Es la adaptación del protocolo de internet versión 6 a redes de bajo consumo IEEE802.15.4. La WPAN en las que se efectúan la mayoría de las redes IoT. (Antonio Jesús González García (2017) IoT: Dispositivos, tecnologías de transporte y aplicaciones.) Las principales características de 6LoWPAN son: cuenta con tramas de 127 bytes y capacidad de carga útil de 102 bytes, permite varios modos de direccionamiento al usar direcciones de 64 y 16 bits, tiene ancho de banda bajo que opera en a velocidades de 250, 40 y 20 kbps para las frecuencias 2.4GHz, 915MHz, y 20MHz respectivamente y adicional a esto permite diversas topologías en las que se incluyen las topologías de malla y estrella. (Cama & Cama, 2012).

2.3.3.2 Capa física/enlace de datos. Esta es la capa hardware que en una red IEEE 802.15.4 está compuesta por dispositivos de baja potencia y pérdida LLN cuya función es la

recopilación de información y convertirla en señales para transmitirla por las redes, además la capa de enlace de datos es la encargada de manejar y realizar el tratamiento de los datos leídos por la capa física y conformar los mensajes a transmitir y a su vez se encarga de arreglar los errores de transmisión (Cobos, 2016).

2.4 RPL

Es un protocolo de enrutamiento para redes de baja potencia y con pérdidas, que implementa en la capa de red el protocolo IPv6, RPL usa una topología de red en forma de árbol donde crea un grafo acíclico dirigidos al destino DODAG que origina un nodo inicial llamado nodo raíz, que hace las veces de puente con el internet convencional. La información de las rutas es distribuida por la red a través de balizas de transmisión de manera periódica. La topología de red es construida por medio de una función objetivo y de acuerdo con el objetivo de esta. La función objetivo se puede minimizar, disminuyendo el recuento de transmisión estimado ETX en la ruta desde el nodo raíz. RPL admite diferentes direcciones de tráfico las cuales son el enrutamiento ascendente desde cualquier nodo al nodo raíz, el enrutamiento descendente desde el nodo raíz hacia cualquier nodo y el enrutamiento desde cualquier nodo a cualquier nodo donde el tráfico va desde un nodo al nodo raíz en el DODAG y luego al otro nodo que sería el destino. (González García, 2017).

2.4.1 Enrutamiento en RPL

RPL es un protocolo que usa el vector distancia para llevar a cabo el enrutamiento. La topología se generará mediante la construcción de gráficos acíclicos dirigidos orientados al destino (DODAG). Los gráficos acíclicos dirigidos (DAG) cuentan con forma de árbol. Sin embargo, un DAG no es un árbol común en el que un nodo puede tener varios nodos principales. El DODAG junto al nodo receptor o nodo raíz permiten el enrutamiento a Internet como haciendo las veces de puerta de enlace predeterminada el nodo raíz. La construcción de la topología de red es controlada mediante mensajes de control los cuales son: el Objeto de Información DODAG (DIO por sus siglas en inglés), el Objeto de Anuncio de Destino (DAO por sus siglas en inglés) y el Mensaje de solicitud de información DODAG (DIS por sus siglas en inglés). El mensaje DIO se utiliza para el enrutamiento ascendente, el cual es el más importante para establecer la comunicación desde nodos hoja al nodo raíz conocido como modo multipunto a punto (MP2P) y es el más usado en las aplicaciones RPL. Para iniciar el nodo raíz transmite los DIO y los nodos que reciben el DIO directamente del nodo raíz se convierten en vecinos del nodo raíz. los nodos vecinos al configurar el nodo raíz como su nodo principal, los nuevos nodos vecinos retransmitirán DIO a otros nodos así de manera similar se repete el proceso de tal manera que la topología DODAG se construye mediante la transmisión y retransmisión de mensajes DIO.

El mensaje DAO se usa para la construcción de enrutamiento descendente (punto a punto y punto a multipunto). Existen dos modos de enrutamiento descendente, modo de almacenamiento y de no almacenamiento, que indican si información de la tabla de enrutamiento se almacena en los nodos no. El mensaje DIS se utiliza para solicitar el envío de DIO con el objetivo de dar respuesta a una falla de red como una pérdida de conexión. para la selección de los vecinos de un

nodo se usa la función objetiva (OF por sus siglas en inglés) la cual define los parámetros de selección de vecinos y nodos principales por medio del cálculo del rango. La OF utiliza métricas de enrutamiento relacionadas con las propiedades del enlace o del nodo para determinar el enrutamiento. (Sun et al., 2018).

2.4.2 Métodos de generación de topología RPL

RPL genera la topología de red con base en las métricas en las cuales se basa la función objetivo OF, para ello existen varios tipos de métricas a usar para determinar la topología DODAG, A continuación, se resume varias de las métricas usadas para el cálculo de la OF en RPL:

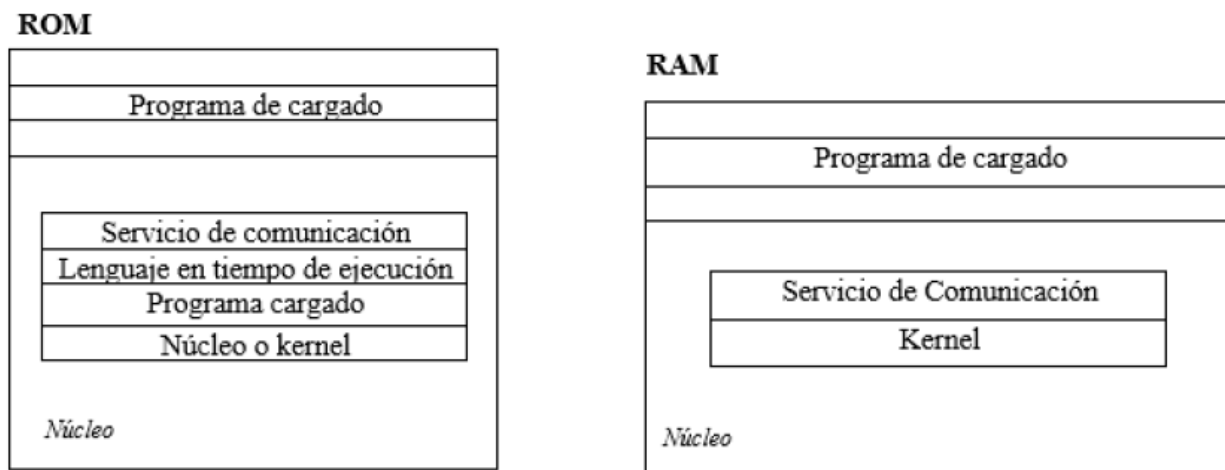
- **Conteo de saltos:** Como su nombre lo indica conteo de saltos se refiere a la cantidad de nodos que debe atravesar un paquete para llegar a la red de destino. El conteo de saltos es la métrica de más utilizada como métrica de la OF.
- **Conteo de transmisión esperado:** El conteo de transmisión esperado (ETX) es una métrica de la calidad de una ruta entre dos nodos, en la cual se mide la cantidad de transmisiones necesarias para realizar la entrega de un paquete a destino, donde a mayor valor peor calidad del enlace.
- **Per-Hop ETX:** es la combinación y mejoramiento de las dos métricas anteriores donde se integra el conteo de saltos y el conteo de transmisión esperado para generar un mejor cálculo de la ruta y mayor tasa de entrega de paquetes. (Sun et al., 2018)

2.5 Contiki

Contiki es un sistema operativo para dispositivos IoT de baja potencia. Contiki fue creado por Adam Dunkels en 2002. Ahora, el proyecto Contiki involucra tanto empresas como colaboradores. Contiki es un sistema operativo (SO) de código abierto para su uso en microcontroladores de baja potencia de procesamiento, bajo consumo energético y bajo costo para el campo de Internet de las cosas, diseñado para que cree y administre redes inalámbricas. Contiki utiliza un modelo de programación con arquitectura multihilo y basado en eventos, el esquema general de su arquitectura puede verse en la Figura 3 (Kurniawan, 2018).

Figura 3.

Modelo de arquitectura del sistema operativo Contiki



Nota: Arquitectura general de Contiki Basada en la figura 1-3 del libro Practical Contiki-NG (Kurniawan, 2018)

El kernel, el programa de cargado, el lenguaje en tiempo de ejecución y el servicio de comunicación son módulos estáticos dentro de la ROM de Contiki OS. Todos los programas de usuario se cargarán en el programa cargado. Solo el kernel y el servicio de comunicación serán

utilizados por la RAM de Contiki OS. Contiki cumple con el estándar IEEE 802.15.4 y es compatible con los protocolos de Internet con IPv4 e IPv6. Las aplicaciones de Contiki son escritas en el lenguaje de programación C estándar lo que permite desarrollo de nuevas aplicaciones para este SO. Admite protocolos de enrutamiento para redes de baja potencia LLN con 6lowpan y el protocolo de enrutamiento para redes de baja potencia RPL. Implementa el simulador de redes *Cooja* diseñado para simular redes de dispositivos de baja potencia IoT, permitiendo la prueba y el desarrollo nuevas de aplicaciones en Contiki.(Kurniawan, 2018).

2.5.1 Contiki-NG

Contiki-NG es la nueva versión del sistema operativo (SO) Contiki que fue creada en el año 2017, es un SO código abierto para uso en dispositivos IoT que cuentan con recursos limitados como: baja potencia de procesamiento, bajo consumo energético. Contiki-NG cumple con el estándar de la IEEE 802.15.4 y es compatible con los protocolos 6LoWPAN, RPL y CoAP. El sistema tiene soporte para arquitecturas como lo son ARM Cortex-M3 / M4 y Texas Instruments MSP430 diseñadas con el propósito de buscar la mejor eficiencia energética, a diferencia de Contiki, Contiki-NG es solo compatible con el protocolo de Internet IPv6 para dar un mejor soporte a IPv6, a las más recientes plataformas, a dispositivos IoT y a simplificar la creación de aplicaciones para desarrolladores. Al igual que Contiki, Contiki-NG cuenta con el simulador Cooja y permite la simulación de redes de baja potencia inalámbricas.(Adam Dunkels et al., 2004).

2.5.2 *Simulador Cooja*

Es un simulador de redes desarrollado en java que permite la ejecución del SO Contiki mediante la simulación de redes de dispositivos IoT, las simulaciones realizadas con Cooja permiten la ejecución de las capas MAC CSMA y TSCH, Cooja solo funciona en sistemas operativos de 32 bit y para poder ejecutarlo en sistemas de 64 bits hay que hacerlo por medio de una máquina virtual, en la web oficial de Contiki-ng se encuentra la opción de descargar una imagen Docker el cual es una herramienta de virtualización.(Kurniawan, 2018).

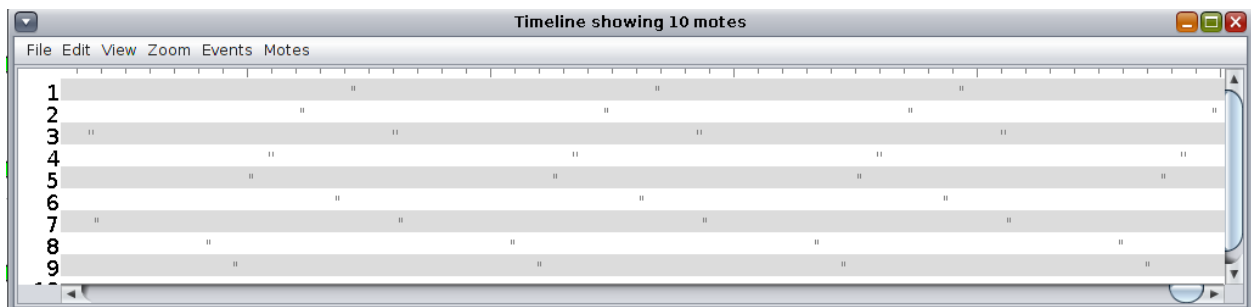
2.5.3 *Descripción del simulador Cooja*

Cooja cuenta con herramientas que posibilitan el análisis de las redes simuladas, las cuales se ejecutan al momento de realizar una simulación.

Time Line que es una línea de tiempo que registra y muestra de manera grafica los eventos de radio que ocurren durante toda la duración de la simulación.

Figura 4.

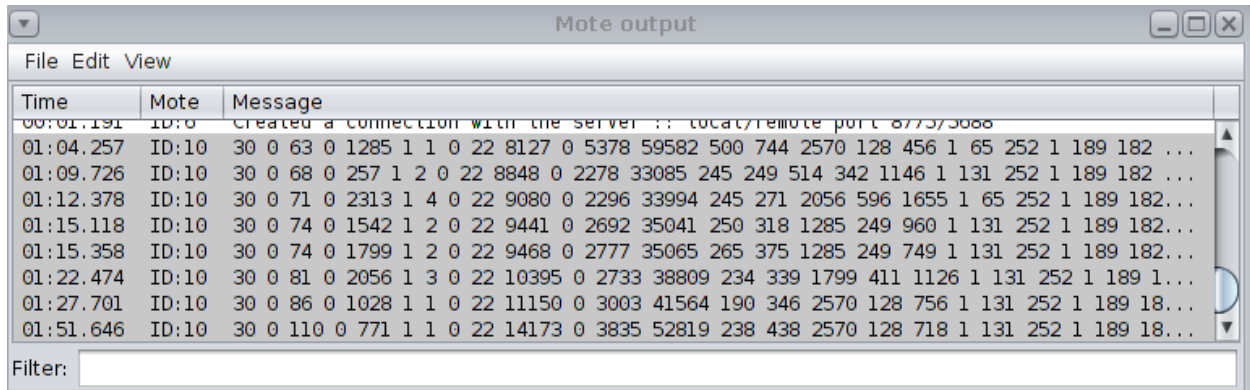
Ejemplo de Time Line Simulador Cooja



Mote Output que registra las salidas de mensajes de cada una de las motas que se simulan en la red simulada.

Figura 5.

Ejemplo de Mote Output Simulador Cooja

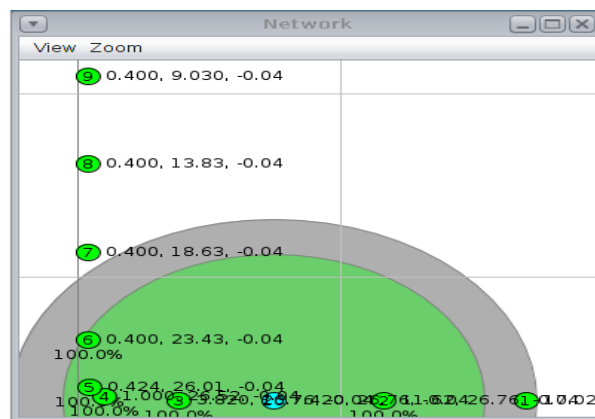


Time	Mote	Message
00:01.191	ID:0	Created a connection with the server !! local/remote port 8775/3088
01:04.257	ID:10	30 0 63 0 1285 1 1 0 22 8127 0 5378 59582 500 744 2570 128 456 1 65 252 1 189 182 ...
01:09.726	ID:10	30 0 68 0 257 1 2 0 22 8848 0 2278 33085 245 249 514 342 1146 1 131 252 1 189 182 ...
01:12.378	ID:10	30 0 71 0 2313 1 4 0 22 9080 0 2296 33994 245 271 2056 596 1655 1 65 252 1 189 182...
01:15.118	ID:10	30 0 74 0 1542 1 2 0 22 9441 0 2692 35041 250 318 1285 249 960 1 131 252 1 189 182...
01:15.358	ID:10	30 0 74 0 1799 1 2 0 22 9468 0 2777 35065 265 375 1285 249 749 1 131 252 1 189 182...
01:22.474	ID:10	30 0 81 0 2056 1 3 0 22 10395 0 2733 38809 234 339 1799 411 1126 1 131 252 1 189 1...
01:27.701	ID:10	30 0 86 0 1028 1 1 0 22 11150 0 3003 41564 190 346 2570 128 756 1 131 252 1 189 18...
01:51.646	ID:10	30 0 110 0 771 1 1 0 22 14173 0 3835 52819 238 438 2570 128 718 1 131 252 1 189 18...

Network muestra de manera gráfica la red simulada y tiene opciones para representar la posición, la IP, el alcance de radio, el tipo de mota, el tráfico de radio y las conexiones que se establecen entre las motas.

Figura 6.

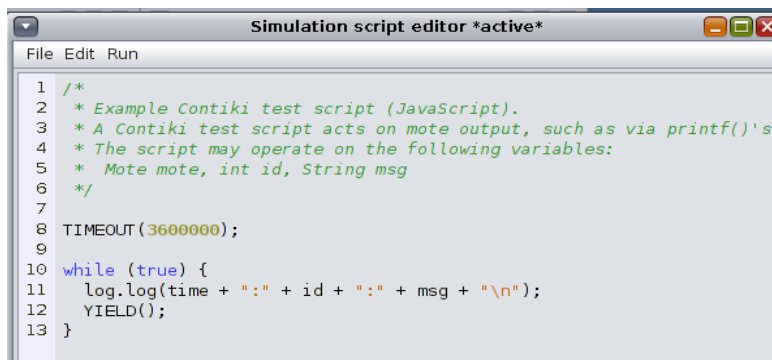
Ejemplo de Mote Output Simulador Cooja



Además, cuenta con un editor de scripts llamado Simulator Scripts Editor con cual se pueden automatizar las simulaciones, trae ejemplos de algunas funciones ya predeterminadas de las cuales una es útil para configurar la duración exacta de una simulación, la función se llama TIMEOUT() y dentro de los paréntesis se debe escribir la duración deseada del experimento en milisegundos.

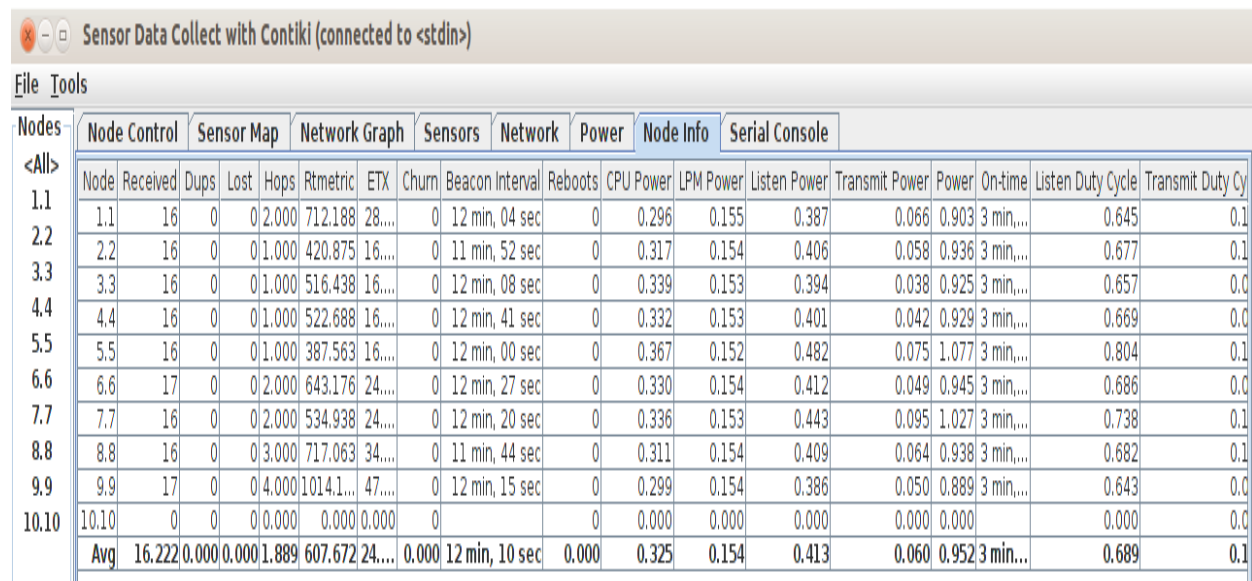
Figura 7.

Ejemplo de Simulator Scripts Editor Cooja

The image shows a window titled "Simulation script editor *active*" with a menu bar containing "File", "Edit", and "Run". The main area contains a JavaScript script with the following code:

```
1 /*
2  * Example Contiki test script (JavaScript).
3  * A Contiki test script acts on mote output, such as via printf()'s
4  * The script may operate on the following variables:
5  * Mote mote, int id, String msg
6  */
7
8 TIMEOUT(3600000);
9
10 while (true) {
11     log.log(time + ":" + id + ":" + msg + "\n");
12     YIELD();
13 }
```

Y por último *Cooja* cuenta con un aplicativo llamado *Collect View*, aplicación con la cual se puede monitorear el consumo de energía de los nodos de la red, el conteo de saltos, el tiempo entre mensajes, la métrica de calidad de enlace ETX, el número de mensajes perdidos, el ciclo de trabajo de la transmisión entre otras métricas.

Figura 8.*Ejemplo de Collect View*


The screenshot shows a window titled "Sensor Data Collect with Contiki (connected to <stdin>)" with a menu bar containing "File" and "Tools". Below the menu bar is a table with columns for "Node Control", "Sensor Map", "Network Graph", "Sensors", "Network", "Power", "Node Info", and "Serial Console". The table lists data for nodes 1.1 through 10.10, with an "Avg" row at the bottom. The columns under "Node Info" include: Node, Received, Dups, Lost, Hops, Rtmtrc, ETX, Churn, Beacon Interval, Reboots, CPU Power, LPM Power, Listen Power, Transmit Power, Power, On-time, Listen Duty Cycle, and Transmit Duty Cycle.

Node	Received	Dups	Lost	Hops	Rtmtrc	ETX	Churn	Beacon Interval	Reboots	CPU Power	LPM Power	Listen Power	Transmit Power	Power	On-time	Listen Duty Cycle	Transmit Duty Cy
1.1	16	0	0	2.000	712.188	28....	0	12 min, 04 sec	0	0.296	0.155	0.387	0.066	0.903	3 min,...	0.645	0.1
2.2	16	0	0	1.000	420.875	16....	0	11 min, 52 sec	0	0.317	0.154	0.406	0.058	0.936	3 min,...	0.677	0.1
3.3	16	0	0	1.000	516.438	16....	0	12 min, 08 sec	0	0.339	0.153	0.394	0.038	0.925	3 min,...	0.657	0.0
4.4	16	0	0	1.000	522.688	16....	0	12 min, 41 sec	0	0.332	0.153	0.401	0.042	0.929	3 min,...	0.669	0.0
5.5	16	0	0	1.000	387.563	16....	0	12 min, 00 sec	0	0.367	0.152	0.482	0.075	1.077	3 min,...	0.804	0.1
6.6	17	0	0	2.000	643.176	24....	0	12 min, 27 sec	0	0.330	0.154	0.412	0.049	0.945	3 min,...	0.686	0.0
7.7	16	0	0	2.000	534.938	24....	0	12 min, 20 sec	0	0.336	0.153	0.443	0.095	1.027	3 min,...	0.738	0.1
8.8	16	0	0	3.000	717.063	34....	0	11 min, 44 sec	0	0.311	0.154	0.409	0.064	0.938	3 min,...	0.682	0.1
9.9	17	0	0	4.000	1014.1...	47....	0	12 min, 15 sec	0	0.299	0.154	0.386	0.050	0.889	3 min,...	0.643	0.0
10.10	0	0	0	0.000	0.000	0.000	0		0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000		0.000	0.0
Avg	16.222	0.000	0.000	1.889	607.672	24....	0.000	12 min, 10 sec	0.000	0.325	0.154	0.413	0.060	0.952	3 min,...	0.689	0.1

2.6 Infraestructura IoT-Lab

IoT-Lab es un banco de pruebas que ofrece una gran infraestructura para la realización de pruebas en dispositivos de sensores inalámbricos y objetos de comunicación. Tal infraestructura ofrece acceso a dichos dispositivos o nodos en los cuales se puede monitorear características como lo son el consumo energético, retardo de envío de mensajes entre nodos, rendimiento, intensidad de la señal y permitiendo recuperar los resultados. A su vez cuenta con distintos tipos de nodos, topologías y condiciones iniciales para experimentación lo que permite un amplio espectro de posibles escenarios de pruebas. Dichos nodos se encuentran repartidos en distintos laboratorios ubicados en diferentes ciudades de Francia, permitiendo el mediante conexión SSH o por medio de la aplicación web propia del laboratorio. (Adjih C., Baccelli E., Fleury E., Harter G., Mitton N., Noel T., Pissard-Gibollet R., Saint-Marcel F., Schreiner G., Vandaele G., 2015).

2.6.1 Arquitecturas

El banco de pruebas IoT-Lab posee con sus propios desarrollos e implementaciones de hardware y cuenta a su vez con placas de desarrollo comerciales, como se muestra en la Tabla 2.

Los nodos descritos en la Tabla 2 cuentan con la posibilidad de trabajar con distintos sistemas operativos para los cuales IoT-Lab cuenta con soporte y documentación como lo son el Contiki OS, Contiki-NG, RIOT, Free RTOS entre otros; todo esto es accesible mediante su aplicación web previo registró y también mediante acceso SSH. (Adjih C., Baccelli E., Fleury E., Harter G., Mitton N., Noel T., Pissard-Gibollet R., Saint-Marcel F., Schreiner G., Vandaele G., 2015).

Tabla 2.

Descripción del hardware IoT-Lab

Modelo del dispositivo	Descripción
WSN430 Node	Basado en el MCU MSP430F1611 y comunicación con una capa PHY 802.15.4 (800 MHz o 2.4 GHz)
Nodo M3	Basado en STM32F103REY MCU y comunicación con una capa PHY 802.15.4 (2.4 GHz)
Nodo A8	Basado en TI SITARA AM3505 (ARM Cortex A8) permite ejecutar Linux. Este nodo incluye también un nodo M3 con IEEE 802.15.4.
Atmel SAM R21	Basado en ARM Cortex M0 y comunicación con una interfaz de radio IEEE 802.15.4 Atmel a 2.4 GHz
Zolertia Firefly	Basado en el CC2538 ARM Cortex M3 y la comunicación con un radio IEEE 802.15.4 de 2,4 GHz con un transceptor de RF CC1200 868/915 MHz

Modelo del dispositivo	Descripción
B-L072Z-LRWAN1-kit LoRa	MCU integrados de la serie STM32L072CZ de potencia ultra baja, basados en ARM Cortex -M0 +
nRF52DK	Basado en el nRF52832 ARM Cortex M4 MCU de Nordic y en la radio BLE de 2.4GHz.
nRF52840DK	Basado en el nórdico nRF52840 ARM Cortex M4 MCU y en la producción de radio BLE + IEEE 802.15.4 a 2,4 GHz.

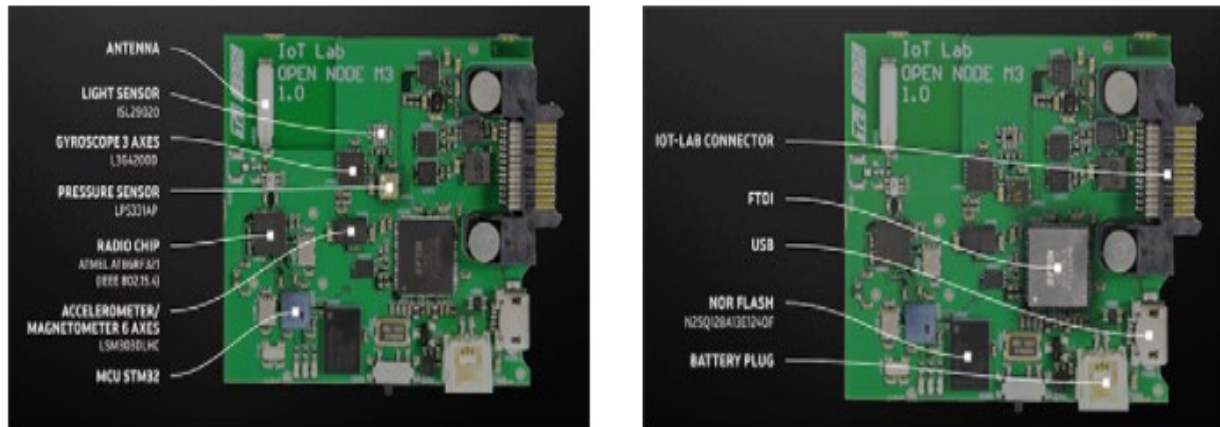
Nota: Basado en el listado de dispositivos de IoT-Lab.info (Adjih C., Baccelli E., Fleury E., Harter G., Mitton N., Noel T., Pissard-Gibollet R., Saint-Marcel F., Schreiner G., Vandaele G., 2015)

2.6.2 IoT-Lab M3

Para las pruebas realizadas en la evaluación del protocolo RPL se usa la placa IoT-Lab M3 diseñada por el banco de pruebas IoT-Lab. Se basa en un microcontrolador STM32 (ARM Cortex M3) con interfaz de radio ATMEL de 2,4 GHz y 4 sensores. Tiene unas dimensiones de 4 cm de ancho y 5 cm de largo. La placa usa como CPU M3 fabricada ARM de 32 bits con una velocidad de 72 MHz, 64 Kb de RAM y 256KB de ROM. El chip de radio es manufacturado por Atmel y opera en el ancho de banda ISM 2.4 GHz, con un ancho de banda máximo de 256 Kbits/s, alcance de entre 40, y 50 metros en interiores y 100 metros en exteriores, un consumo de 14 mA a máxima potencia. (Adjih C., Baccelli E., Fleury E., Harter G., Mitton N., Noel T., Pissard-Gibollet R., Saint-Marcel F., Schreiner G., Vandaele G., 2015).

Figura 9.

Ejemplo de placa nodo IoT-Lab M3



Nota: Imagen tomada de la web de la plataforma <https://www.iot-lab.info/docs/boards/iot-lab-m3/>

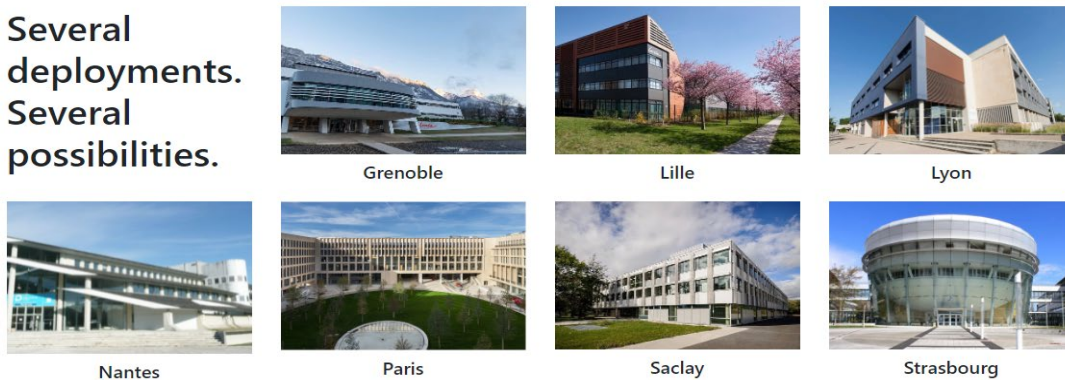
2.6.3 Descripción de los laboratorios de IoT-Lab utilizados

IoT-Lab está compuesto por seis sedes en distintas partes de Francia, tales sedes son Grenoble Lille, Lyon, Nantes, París, Saclay y Estrasburgo.

Figura 10.

Sedes infraestructura IoT-Lab

Several
deployments.
Several
possibilities.

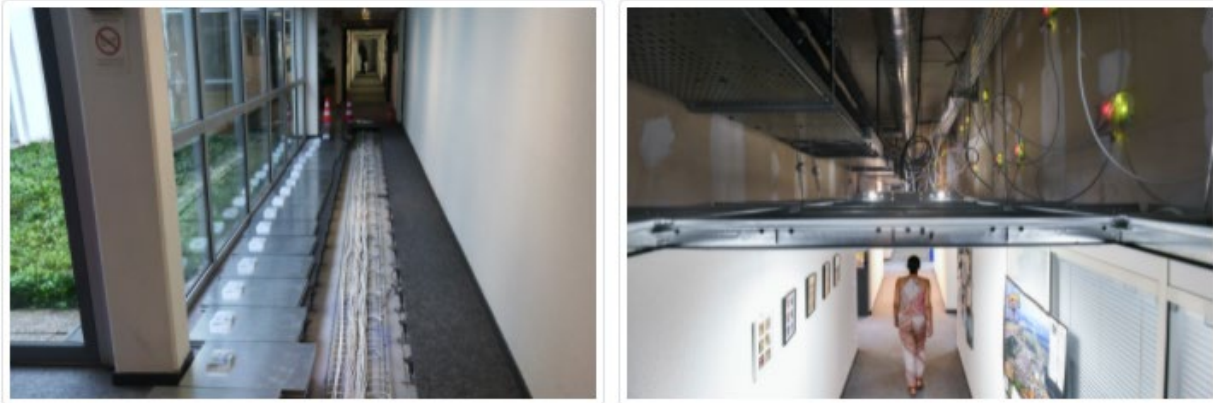


Nota: Imagen tomada de <https://www.iot-lab.info/>

Para la realización de este proyecto se usaron dos de estas sedes, Grenoble y Lille. Grenoble está ubicada en la ciudad de Grenoble, Francia en las instalaciones del Instituto Nacional de Investigación en Informática y Automática INRIA (*Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique*) el cual es un centro de investigación de ciencia y tecnología. La infraestructura de red se despliega dentro del edificio de la INRIA en el primer piso en cielo raso y el suelo de los corredores (Adjih C., Baccelli E., Fleury E., Harter G., Mitton N., Noel T., Pissard-Gibollet R., Saint-Marcel F., Schreiner G., Vandaele G., 2015).

Figura 11.

Sede Grenoble



Nota: Imagen tomada de <https://www.iot-lab.info/docs/deployment/grenoble/>

La sede Lille está ubicada en la ciudad Lille, Francia en las instalaciones de la INRIA de esta ciudad, la infraestructura de red está desplegada en los tres pisos del edificio en los pasillos, oficinas, salas de juntas, bodegas y una sala dedicada exclusiva.

Figura 12.

Sede Lille, sala exclusiva para el despliegue de los nodos IoT



Nota: Imagen tomada de <https://www.iot-lab.info/docs/deployment/lille>

3. Metodología

Para la realización de este proyecto de grado se dividió en dos partes, una la constituye el trabajo realizado en IoT-Lab y la otra, el trabajo realizado mediante *Cooja*.

Para realizar la evaluación del desempeño del protocolo de enrutamiento RPL en su influencia en el comportamiento de los enlaces de redes LLN se diseñó una serie de escenarios en IoT-Lab, posteriormente recreados de manera simulada en *Cooja*.

Para cada uno de los ocho escenarios se desplegó una topología de red. Cada topología tiene una distribución espacial definida por configuración física en la infraestructura de IoT-Lab. Para cada topología se realizaron cinco simulaciones y se recolectaron distintos datos del comportamiento de la red simulada con el aplicativo *Collect View*, el cual acopia métricas tales como el número de saltos para llegar al nodo raíz, la potencia promedio de cada nodo, el conteo de mensajes recibidos de cada nodo y la métrica ETX.

Posteriormente se realizaron las pruebas en la infraestructura IoT-Lab. Allí se configuraron y ejecutaron ocho escenarios de prueba. En cada escenario se configuró una topología distinta; y se realizaron nueve pruebas. El intervalo de tiempo entre los envíos de mensajes por parte de los nodos remitentes y el uso de la carga útil con diferentes tamaños de mensaje, les dieron variabilidad a las pruebas. Se capturaron datos de la potencia, el voltaje, la corriente, la calidad del enlace de radio LQI y el indicador de fuerza de la señal RSSI en cada uno de los nodos.

Una vez recolectados los datos tanto de las simulaciones y de la infraestructura se analizan para llegar así a una conclusión acerca del desempeño del protocolo de enrutamiento RPL en su influencia en el comportamiento de los enlaces de redes LLN.

3.1 Diseño de escenarios y experimentos

3.1.1 Escenarios

Para evaluar RPL en una red LLN usando Contiki e IoT-Lab se usaron las siguientes configuraciones iniciales para los escenarios descritos en numeral 3.1.1.1. Un escenario esencialmente es una topología de nodos IEEE 802.15.4 que se comunican mediante datagramas IPv6 y con RPL como protocolo de enrutamiento, un tamaño de los mensajes a enviar por parte de los nodos, el intervalo de tiempo entre envíos de mensajes y el tiempo de la experimentación o simulación.

Los nodos de la red inalámbrica LLN IEEE 802.15.4 tanto en *IoT-Lab* como en *Contiki* tienen un *firmware* que permite la comunicación de los nodos mediante IPv6 y RPL. En IoT-Lab se ajustaron parámetros de la aplicación *unicast-sender-count.c* para cambiar el tiempo entre envíos de mensajes y la tamaño del mensaje nodos remitentes, y para el nodo raíz se usó la aplicación *unicast-receiver.c* del SO Contiki 2.7. Así mismo, para las pruebas de cada escenario se compilaba el firmware ajustado para luego instalarlo en los nodos. En IoT-Lab el monitoreo de la red se realizó con las herramientas *consumption monitoring*, para monitorear el consumo de energía en los nodos y *radio monitoring*, para monitorear los enlaces.

Para las simulaciones, en *Contiki* se desplegaba y configuraba la topología mediante el entorno gráfico del sistema operativo corriendo sobre una máquina virtual. Para ello compilaba y se aplicó a los nodos de la red, el firmware *udp-sender.c* para los nodos remitentes y *udp-sink.c* para el nodo raíz. De otra parte, para la captura de datos se utilizó el aplicativo *Collect View*.

La siguiente tabla presenta los datos del tamaño de los mensajes, el intervalo de tiempo entre envíos de mensajes y el tiempo de la experimentación para los experimento en IoT-Lab. En el simulador se trabajó con los mismos intervalos de tiempos entre envió de mensajes y tiempo de experimentación.

Tabla 3.

Variaciones de parámetros iniciales

Tamaño de la carga útil del mensaje (Bytes)	Tiempo entre mensajes (s)	Duración (minutos)
20	10	60
100	10	60
191	10	60
20	30	60
100	30	60
191	30	60
20	60	60
100	60	60
191	60	60

3.1.1.1 Descripción de los escenarios. A continuación, se describen los distintos escenarios para *IoT-Lab* y *Cooja*. En las figuras de las topologías el nodo resaltado en amarillo es el nodo raíz. La distribución de los nodos en las topologías se escoge para que el espacio entre nodos sea homogéneo y diverso, y por la distribución física de la infraestructura de los laboratorios de IoT-Lab.

3.1.1.1.1 Primer escenario. El primer escenario corresponde a una red LLN comprendida por 15 nodos repartidos por un área de 20X20 metros distribuidos espacialmente como se muestra a continuación. En la Tabla 3 variaciones de parámetros iniciales se observa las variaciones de tiempo, carga útil y duración de la prueba y en la Tabla 4 esta descrita la distribución espacial de cada nodo, el nodo receptor o nodo raíz resaltado en amarillo.

Figura 13.

Topología 1

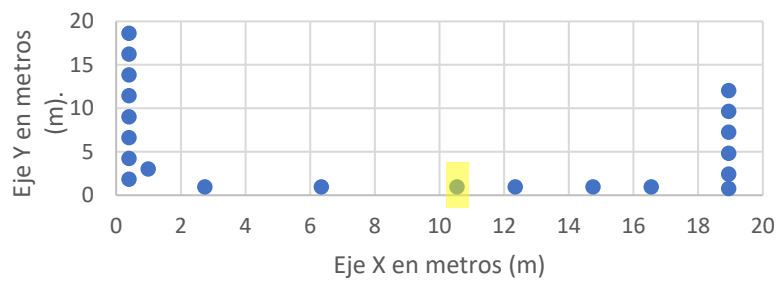


Tabla 4.

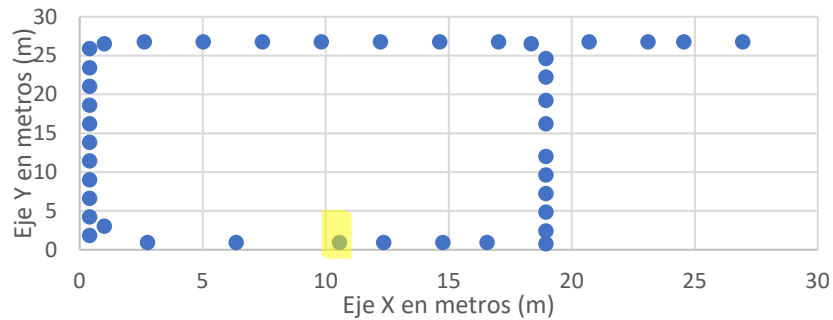
Tabla de posiciones de los nodos de red escenario primer escenario

Nombre del nodo	Lugar	Eje X(m)	Eje Y(m)	Eje Z(m)
m3-121.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	0.4	18.63	-0.04
m3-129.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	0.4	16.23	-0.04
m3-137.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	0.4	13.83	-0.04
m3-145.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	0.4	11.43	-0.04
m3-153.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	0.4	9.03	-0.04
m3-161.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	0.4	6.63	-0.04
m3-169.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	0.4	4.23	-0.04
m3-174.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	1	3.03	-0.04
m3-177.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	0.4	1.85	-0.04

Nombre del nodo	Lugar	Eje X(m)	Eje Y(m)	Eje Z(m)
m3-179.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	2.75	0.94	-0.04
m3-185.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	6.35	0.94	-0.04
m3-192.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	10.55	0.94	-0.04
m3-195.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	12.35	0.94	-0.04
m3-199.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	14.75	0.94	-0.04
m3-202.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	16.55	0.94	-0.04
m3-204.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	18.95	0.75	-0.04
m3-208.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	18.95	2.43	-0.04
m3-216.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	18.95	4.83	-0.04
m3-224.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	18.95	7.23	-0.04
m3-232.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	18.95	9.63	-0.04
m3-240.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	18.95	12.03	-0.04

Nota: La celda sombreada en amarillo corresponde al nodo receptor de la red

3.1.1.1.2 Segundo escenario. El segundo escenario corresponde a una red LLN comprendida por 41 nodos repartidos por un área de 30 x 30 metros distribuidos espacialmente como se ve a continuación. En la Tabla 3 variaciones de parámetros iniciales se observa las variaciones de tiempo, carga útil y duración de la prueba y en la Tabla 4 esta descrita la distribución espacial de cada nodo, el nodo receptor o nodo raíz resaltado en amarillo.

Figura 14.*Topología 2***Tabla 5.***Tabla de posiciones de los nodos de red.*

Nombre del nodo	Lugar	Eje X(m)	Eje Y(m)	Eje Z(m)
m3-2.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	20.7	26.76	-0.04
m3-6.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	23.1	26.76	-0.04
m3-7.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	24.55	26.76	-0.04
m3-11.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	26.95	26.76	-0.04
m3-70.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	17.02	26.76	-0.04
m3-74.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	14.62	26.76	-0.04
m3-78.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	12.22	26.76	-0.04
m3-82.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	9.82	26.76	-0.04
m3-86.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	7.42	26.76	-0.04
m3-90.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	5.02	26.76	-0.04
m3-94.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	2.62	26.76	-0.04
m3-96.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	1	26.52	-0.04
m3-97.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	0.4	25.92	-0.04
m3-105.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	0.4	23.43	-0.04
m3-113.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	0.4	21.03	-0.04
m3-121.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	0.4	18.63	-0.04
m3-129.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	0.4	16.23	-0.04

Nombre del nodo	Lugar	Eje X(m)	Eje Y(m)	Eje Z(m)
m3-137.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	0.4	13.83	-0.04
m3-145.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	0.4	11.43	-0.04
m3-153.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	0.4	9.03	-0.04
m3-161.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	0.4	6.63	-0.04
m3-169.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	0.4	4.23	-0.04
m3-174.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	1	3.03	-0.04
m3-177.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	0.4	1.85	-0.04
m3-179.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	2.75	0.94	-0.04
m3-185.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	6.35	0.94	-0.04
m3-192.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	10.55	0.94	-0.04
m3-195.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	12.35	0.94	-0.04
m3-199.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	14.75	0.94	-0.04
m3-202.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	16.55	0.94	-0.04
m3-204.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	18.95	0.75	-0.04
m3-208.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	18.95	2.43	-0.04
m3-216.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	18.95	4.83	-0.04
m3-224.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	18.95	7.23	-0.04
m3-232.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	18.95	9.63	-0.04
m3-240.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	18.95	12.03	-0.04
m3-254.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	18.95	16.23	-0.04
m3-264.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	18.95	19.23	-0.04
m3-274.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	18.95	22.23	-0.04
m3-282.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	18.95	24.63	-0.04
m3-289.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	18.35	26.52	-0.04

Nota: La celda sombreada en amarillo corresponde al nodo receptor de la red

3.1.1.1.3 Tercer escenario. El tercer escenario corresponde a una red LLN comprendida por 25 nodos repartidos por un área de 20 x 30 metros distribuidos espacialmente como se muestra a continuación. En la Tabla 3 variaciones de parámetros iniciales se observa las variaciones de

tiempo, carga útil y duración de la prueba y en la Tabla 5 esta descrita la distribución espacial de cada nodo, el nodo receptor o nodo raíz resaltado en amarillo.

Figura 15.

Topología 3

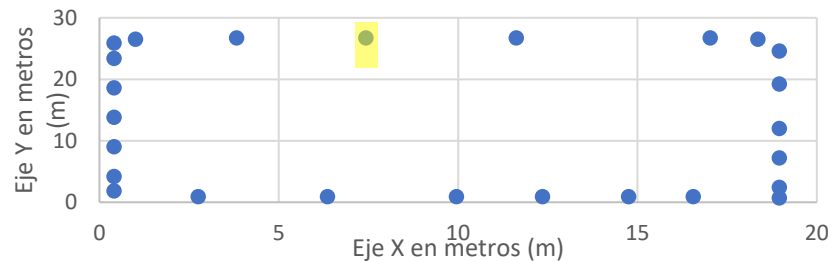


Tabla 6.

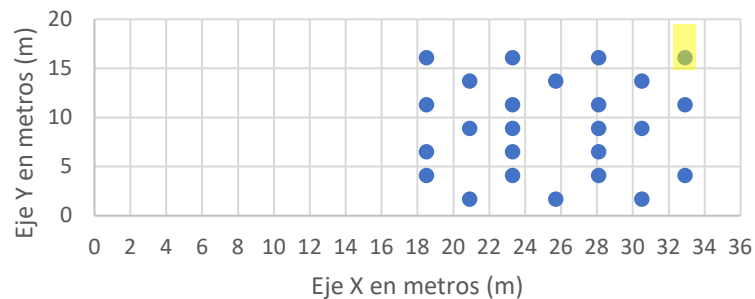
Tabla de posiciones de los nodos de red

Nombre del nodo	Lugar	Eje X(m)	Eje Y(m)	Eje Z(m)
m3-70.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	17.02	26.76	-0.04
m3-79.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	11.62	26.76	-0.04
m3-86.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	7.42	26.76	-0.04
m3-92.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	3.82	26.76	-0.04
m3-96.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	1	26.52	-0.04
m3-97.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	0.4	25.92	-0.04
m3-105.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	0.4	23.43	-0.04
m3-121.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	0.4	18.63	-0.04
m3-137.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	0.4	13.83	-0.04
m3-153.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	0.4	9.03	-0.04
m3-169.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	0.4	4.23	-0.04
m3-177.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	0.4	1.85	-0.04
m3-179.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	2.75	0.94	-0.04

Nombre del nodo	Lugar	Eje X(m)	Eje Y(m)	Eje Z(m)
m3-185.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	6.35	0.94	-0.04
m3-191.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	9.95	0.94	-0.04
m3-195.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	12.35	0.94	-0.04
m3-199.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	14.75	0.94	-0.04
m3-202.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	16.55	0.94	-0.04
m3-204.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	18.95	0.75	-0.04
m3-208.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	18.95	2.43	-0.04
m3-224.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	18.95	7.23	-0.04
m3-240.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	18.95	12.03	-0.04
m3-264.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	18.95	19.23	-0.04
m3-282.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	18.95	24.63	-0.04
m3-289.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	18.35	26.52	-0.04

Nota 1: La celda sombreada en amarillo corresponde al nodo receptor de la red

3.1.1.1.4 Cuarto escenario. El cuarto escenario corresponde a una red LLN comprendida por 25 nodos repartidos por un área de 15 x 15 metros distribuidos espacialmente como se muestra a continuación. En la Tabla 3 variaciones de parámetros iniciales se observa las variaciones de tiempo, carga útil y duración de la prueba y en la Tabla 6 esta descrita la distribución espacial de cada nodo, el nodo receptor o nodo raíz resaltado en amarillo.

Figura 16.*Topología 4***Tabla 7.***Tabla de posiciones de los nodos de red*

Nombre del nodo	Lugar	Eje X(m)	Eje Y(m)	Eje Z(m)
m3-153.lille.iot-lab.info	Lille	20.91	1.7	9.6
m3-155.lille.iot-lab.info	Lille	25.71	1.7	9.6
m3-157.lille.iot-lab.info	Lille	30.51	1.7	9.6
m3-169.lille.iot-lab.info	Lille	18.51	4.1	9.6
m3-171.lille.iot-lab.info	Lille	23.31	4.1	9.6
m3-173.lille.iot-lab.info	Lille	28.11	4.1	9.6
m3-175.lille.iot-lab.info	Lille	32.91	4.1	9.6
m3-191.lille.iot-lab.info	Lille	18.51	6.5	9.6
m3-193.lille.iot-lab.info	Lille	23.31	6.5	9.6
m3-195.lille.iot-lab.info	Lille	28.11	6.5	9.6
m3-206.lille.iot-lab.info	Lille	20.91	8.9	9.6
m3-207.lille.iot-lab.info	Lille	23.31	8.9	9.6
m3-209.lille.iot-lab.info	Lille	28.11	8.9	9.6
m3-210.lille.iot-lab.info	Lille	30.51	8.9	9.6
m3-225.lille.iot-lab.info	Lille	18.51	11.3	9.6
m3-227.lille.iot-lab.info	Lille	23.31	11.3	9.6
m3-229.lille.iot-lab.info	Lille	28.11	11.3	9.6

Nombre del nodo	Lugar	Eje X(m)	Eje Y(m)	Eje Z(m)
m3-231.lille.iot-lab.info	Lille	32.91	11.3	9.6
m3-239.lille.iot-lab.info	Lille	20.91	13.7	9.6
m3-241.lille.iot-lab.info	Lille	25.71	13.7	9.6
m3-243.lille.iot-lab.info	Lille	30.51	13.7	9.6
m3-250.lille.iot-lab.info	Lille	18.51	16.1	9.6
m3-252.lille.iot-lab.info	Lille	23.31	16.1	9.6
m3-254.lille.iot-lab.info	Lille	28.11	16.1	9.6
m3-256.lille.iot-lab.info	Lille	32.91	16.1	9.6

Nota: La celda sombreada en amarillo corresponde al nodo receptor de la red

3.1.1.1.5 Quinto escenario. El quinto escenario corresponde a una red LLN comprendida por 10 nodos repartidos por un área de 30 x 20 metros distribuidos espacialmente como se muestra a continuación. En la Tabla 3 variaciones de parámetros iniciales se observa las variaciones de tiempo, carga útil y duración de la prueba y en la Tabla 7 esta descrita la distribución espacial de cada nodo, el nodo receptor o nodo raíz resaltado en amarillo.

Figura 17.

Topología 5

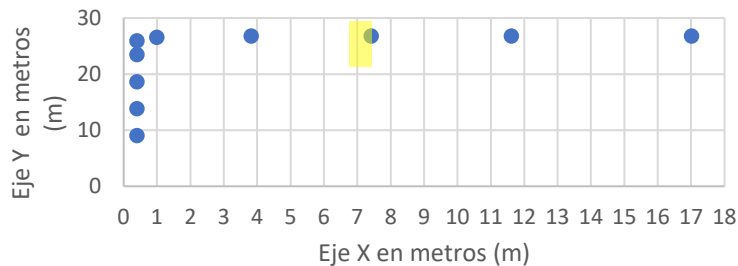
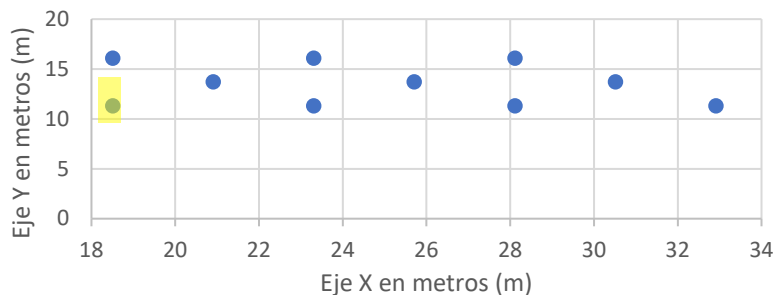


Tabla 8.*Tabla de posiciones de los nodos de red*

Nombre del nodo	Lugar	Eje X(m)	Eje Y(m)	Eje Z(m)
m3-70.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	17.02	26.76	-0.04
m3-79.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	11.62	26.76	-0.04
m3-86.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	7.42	26.76	-0.04
m3-92.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	3.82	26.76	-0.04
m3-96.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	1	26.52	-0.04
m3-97.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	0.4	25.92	-0.04
m3-105.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	0.4	23.43	-0.04
m3-121.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	0.4	18.63	-0.04
m3-137.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	0.4	13.83	-0.04
m3-153.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	0.4	9.03	-0.04

Nota: La celda sombreada en amarillo corresponde al nodo receptor de la red

3.1.1.1.6 Sexto escenario. El sexto escenario corresponde a una red LLN comprendida por 10 nodos repartidos por un área de 16 x 18 metros distribuidos espacialmente como se muestra a continuación. En la Tabla 3 variaciones de parámetros iniciales se observa las variaciones de tiempo, carga útil y duración de la prueba y en la Tabla 8 esta descrita la distribución espacial de cada nodo, el nodo receptor o nodo raíz resaltado en amarillo.

Figura 18.*Topología 6***Tabla 9.***Tabla de posiciones de los nodos de red*

Nombre del nodo	Lugar	Eje X(m)	Eje Y(m)	Eje Z(m)
m3-225.lille.iot-lab.info	Lille	18.51	11.3	9.6
m3-227.lille.iot-lab.info	Lille	23.31	11.3	9.6
m3-229.lille.iot-lab.info	Lille	28.11	11.3	9.6
m3-231.lille.iot-lab.info	Lille	32.91	11.3	9.6
m3-239.lille.iot-lab.info	Lille	20.91	13.7	9.6
m3-241.lille.iot-lab.info	Lille	25.71	13.7	9.6
m3-243.lille.iot-lab.info	Lille	30.51	13.7	9.6
m3-250.lille.iot-lab.info	Lille	18.51	16.1	9.6
m3-252.lille.iot-lab.info	Lille	23.31	16.1	9.6
m3-254.lille.iot-lab.info	Lille	28.11	16.1	9.6

Nota 2: La celda sombreada en amarillo corresponde al nodo receptor de la red

3.1.1.1.7 Séptimo escenario. El segundo escenario corresponde a una red LLN comprendida por 20 nodos repartidos por un área de 27x25 metros distribuidos espacialmente como se muestra en la Figura 19. En la Tabla 3 variaciones de parámetros iniciales se observa las

variaciones de tiempo, carga útil y duración de la prueba y en la Tabla 9 esta descrita la distribución espacial de cada nodo, el nodo receptor o nodo raíz resaltado en amarillo.

Figura 19.

Topología 7

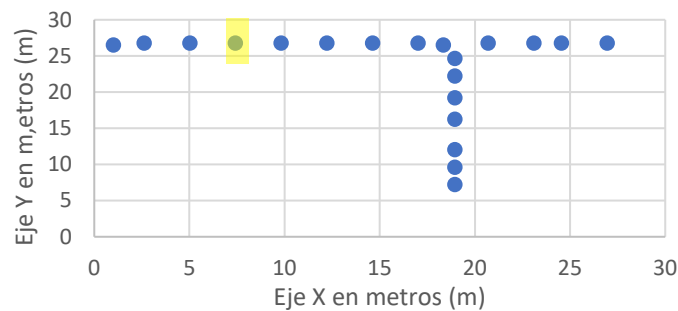


Tabla 10.

Tabla de posiciones de los nodos de red

Nombre del nodo	Lugar	Eje X(m)	Eje Y(m)	Eje Z(m)
m3-2.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	20.7	26.76	-0.04
m3-6.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	23.1	26.76	-0.04
m3-7.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	24.55	26.76	-0.04
m3-11.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	26.95	26.76	-0.04
m3-70.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	17.02	26.76	-0.04
m3-74.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	14.62	26.76	-0.04
m3-78.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	12.22	26.76	-0.04
m3-82.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	9.82	26.76	-0.04
m3-86.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	7.42	26.76	-0.04
m3-90.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	5.02	26.76	-0.04
m3-94.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	2.62	26.76	-0.04
m3-96.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	1	26.52	-0.04

Nombre del nodo	Lugar	Eje X(m)	Eje Y(m)	Eje Z(m)
m3-224.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	18.95	7.23	-0.04
m3-232.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	18.95	9.63	-0.04
m3-240.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	18.95	12.03	-0.04
m3-254.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	18.95	16.23	-0.04
m3-264.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	18.95	19.23	-0.04
m3-274.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	18.95	22.23	-0.04
m3-282.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	18.95	24.63	-0.04
m3-289.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	18.35	26.52	-0.04

Nota: La celda sombreada en amarillo corresponde al nodo receptor de la red

3.1.1.1.8 Octavo escenario. El segundo escenario corresponde a una red LLN comprendida por 16 nodos repartidos por un área de 15x 20 metros distribuidos espacialmente como se muestra en la Figura 20. En la Tabla 3 variaciones de parámetros iniciales se observa las variaciones de tiempo, carga útil y duración de la prueba y en la Tabla 10 esta descrita la distribución espacial de cada nodo, el nodo receptor o nodo raíz resaltado en amarillo.

Figura 20.

Topología 8

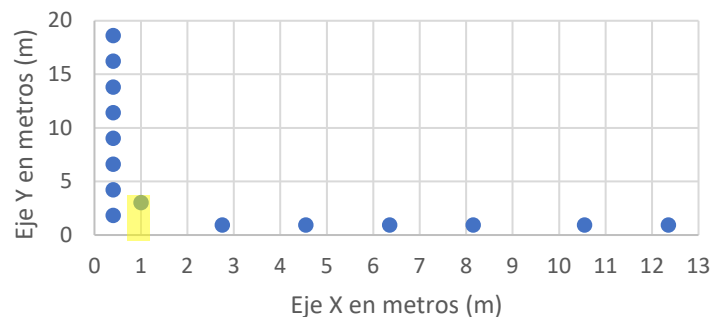


Tabla 11.*Tabla de posiciones de los nodos de red*

Nombre del nodo	Lugar	Eje X(m)	Eje Y(m)	Eje Z(m)
m3-121.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	0.4	18.63	-0.04
m3-129.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	0.4	16.23	-0.04
m3-137.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	0.4	13.83	-0.04
m3-145.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	0.4	11.43	-0.04
m3-153.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	0.4	9.03	-0.04
m3-161.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	0.4	6.63	-0.04
m3-169.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	0.4	4.23	-0.04
m3-174.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	1	3.03	-0.04
m3-177.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	0.4	1.85	-0.04
m3-179.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	2.75	0.94	-0.04
m3-182.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	4.55	0.94	-0.04
m3-188.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	8.15	0.94	-0.04
m3-185.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	6.35	0.94	-0.04
m3-192.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	10.55	0.94	-0.04
m3-195.grenoble.iot-lab.info	Grenoble	12.35	0.94	-0.04

Nota 3: La celda sombreada en amarillo corresponde al nodo receptor de la red

3.2 Desarrollo de los experimentos

En esta parte se describe como fue la realización de las simulaciones en el simulador Cooja del sistema operativo Contiki y los experimentos en la infraestructura IoT-Lab, esto se hará mediante la descripción de los pasos e imágenes de cómo se hacía una de las pruebas a realizadas en Cooja y en la infraestructura IoT-Lab.

3.2.1 Pasos para hacer una simulación

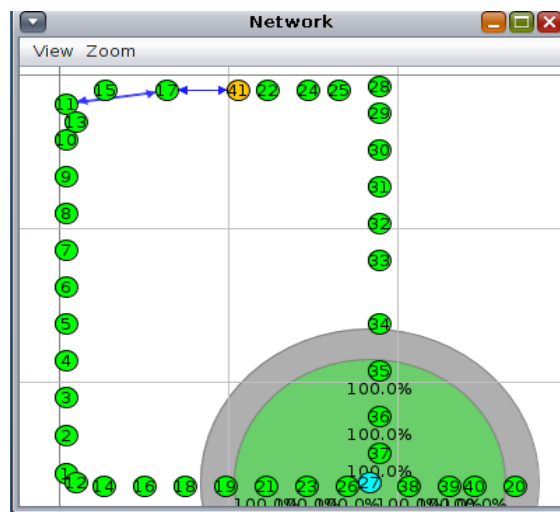
Para realizar una simulación y monitorear las métricas de esta se usa el aplicativo del sistema operativo *Collect View*, como firmware se usará a la aplicación *rpl collect* que está diseñada para recolectar las métricas de la red simulada y pasarlas al aplicativo *Collect View*, dicha simulación

cuenta con dos tipos de nodos, nodo raíz y nodo remitente, los nodos remitentes envían mensajes al nodo receptor que es el nodo raíz.

Los pasos para ejecutar una simulación en Cooja se describen con detalle en el Apéndice E “Procedimiento para experimentación en Cooja”, y se listan brevemente a continuación:

1. Instalar una máquina virtual VMware, ejecutar el sistema operativo Contiki y luego correr el simulador Cooja .
2. En la barra de menús de Cooja inicializar una nueva simulación mediante la opción *Create*.
3. En la ventana *Network* se despliegan los nodos de la red comenzando por el nodo coordinador. Al terminar la creación de la red, cuyo detalle se muestra en el anexo E, la red aparecerá de forma similar a lo que aparece en la siguiente figura.

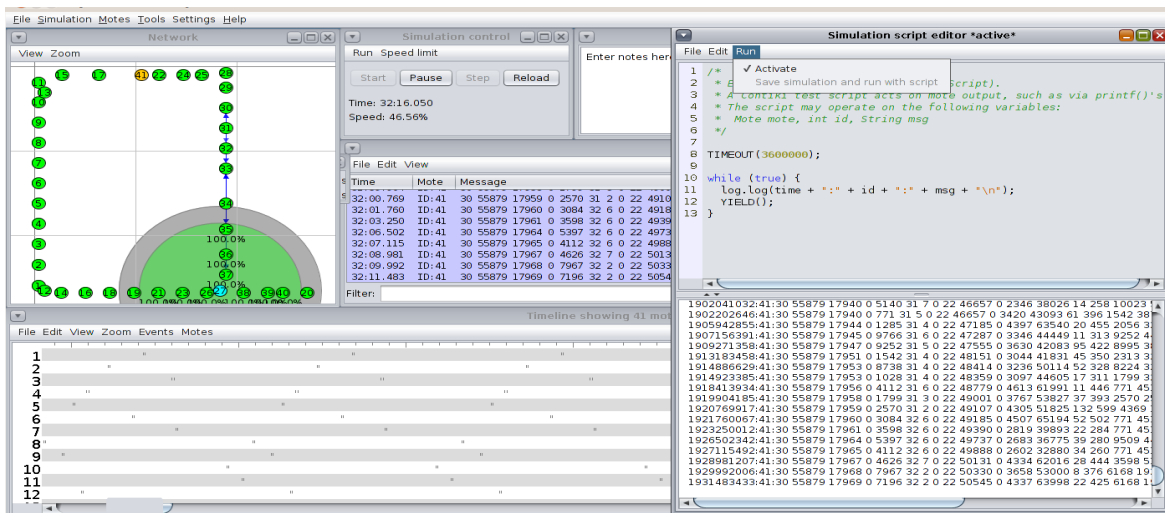
“título provisional, ejemplo de una red desplegada en el simulador Cooja ”

Figura 21.*Ventana Network*

4. En la ventana *Collect View* se configuran las opciones para la captura de datos de la simulación.
5. Luego mediante la ventana *Simulation Script Editor* se definen parámetros para la automatización de la ejecución de la simulación mediante un *script*. Aquí se define el tiempo de duración el tiempo de duración de la simulación.
6. Se ejecuta la simulación mediante la ventana *Simulation Control*. La siguiente figura ilustra una simulación en ejecución.

Figura 22.

Simulación en ejecución



7. Mediante la ventana *Collect View*, al terminar la ejecución, se tendrá acceso a los resultados de la simulación.

3.2.2 Pasos para enviar un experimento en la plataforma IoT-Lab

Para poder ingresar de manera remota por conexión SSH la infraestructura IoT-Lab se debe configurar previamente el acceso remoto, configuración que es descrita en los tutoriales que dicha plataforma ofrece en la sección de *Learn* y que están disponibles en su aplicativo web. (Adjih C., Baccelli E., Fleury E., Harter G., Mitton N., Noel T., Pissard-Gibollet R., Saint-Marcel F., Schreiner G., Vandaele G., 2015).

A continuación, se resume el procedimiento para la configuración y la ejecución de experimentos en IoT-Lab. Una descripción con más detalle se presenta en el Apéndice F “Procedimiento para experimentación en IoT-Lab”.

1. Establecer una conexión SSH, preferiblemente en Linux, con el “NombreDeUsuario” registrado en el sitio de experimentación seleccionado (Grenoble, Lille, u otro) @”sitio”.iotlab.info.
2. Se accede al fichero donde se encuentra el SO Contiki mediante la siguiente ruta `$ cd /senslab/users/luna/iot-lab/parts/Contiki`, donde “Luna” es el nombre de usuario de la plataforma IoT-Lab.
3. Luego ir al fichero donde se encuentra el firmware a ejecutar, para este ejemplo se usa la siguiente ruta: `cd examples/ipv6/simple-udp-rpl`.
4. Seleccionar el código que va a ser el firmware del experimento, para este un ejemplo se usa los códigos `unicast-receiver.c` para el nodo receptor de los mensajes y el `unicast-sender.c` para el nodo emisor.
5. Entrar con el editor nano al archivo Makefile usando el comando `nano Makefile`. En la primera línea del código donde dice “all:” escribir el nombre del archivo del cual se va a crear el firmware para los nodos, para este ejemplo se escribe `unicast-sender` y `unicast-receiver` separados por un espacio. Guardar la edición.
6. Compilar el código para los nodos m3 con el comando “`make TARGET=iotlab-m3`”. Con el comando “`ls -a`” puede observar que se crearon los firmwares de nombre `unicast-receiver.iotlab-m3` y `unicast-sender.iotlab-m3` correspondientes a los códigos que se compilaron.
7. Ordenar la ejecución del experimento una vez creado el firmware usar un comando similar a: `iotlab-experiment submit -d 61 -l grenoble, m3, 90+92, unicast-sender-count.iotlab-m3, TrabajoGrado -l grenoble, m3, 86, unicast-receiver-count.iotlab-m3, TrabajoGrado`. Donde -d es la duración del experimento en minutos, -l es el lugar donde se va a hacer la prueba, m3 es el tipo de nodo en el que se carga el firmware; luego se escriben el numero asignado por IoT-Lab para el

experimento y ¿www? separados por signos más “+”; después se escribe el nombre de firmware que se desea que usen los nodos.

4. Resultados

Para los escenarios propuestos se realizaron simulaciones en *Cooja* y pruebas en la infraestructura IoT-Lab, para las simulaciones se realizaron cinco pruebas con cada una de las topologías de los escenarios propuestos, por otro parte las pruebas en IoT-Lab se realizaron nueve pruebas por cada escenario.

4.1 Resultados de las simulaciones

A continuación, se presenta de manera gráfica el resumen de los resultados obtenidos para cada una de las topologías propuestas en los distintos escenarios en las simulaciones en *Cooja*.

Figura 23.

Resumen de mensaje en los experimentos para la topología 1 en las simulaciones en Cooja

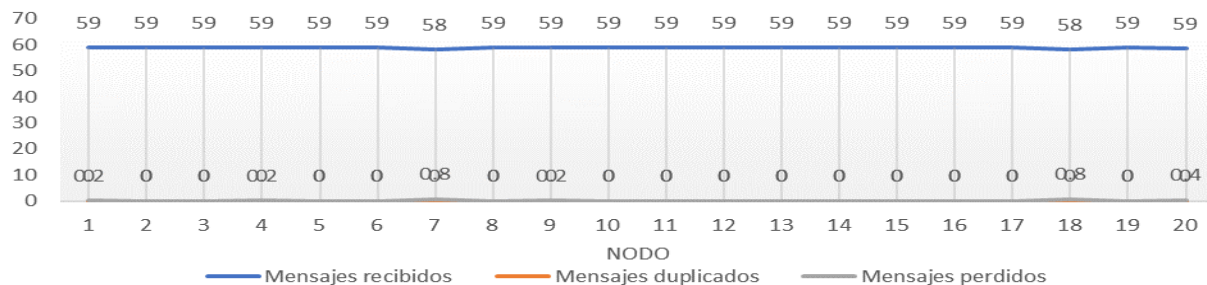


Figura 24.

Resumen de ETX y saltos para llegar al nodo raíz en los experimentos para la topología 1 en las simulaciones en Cooja

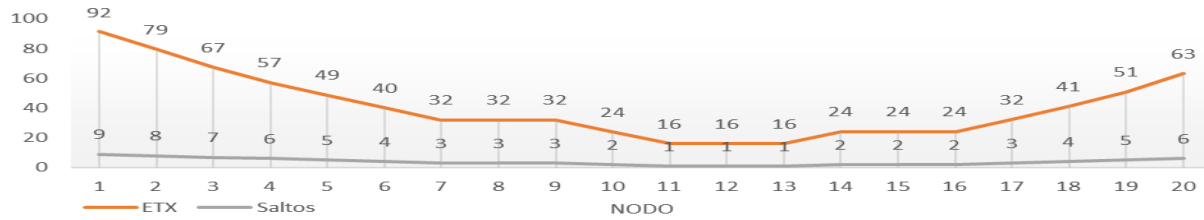


Figura 25.

Resumen de tiempos entre paquetes en los experimentos para la topología 1 en las simulaciones en Cooja

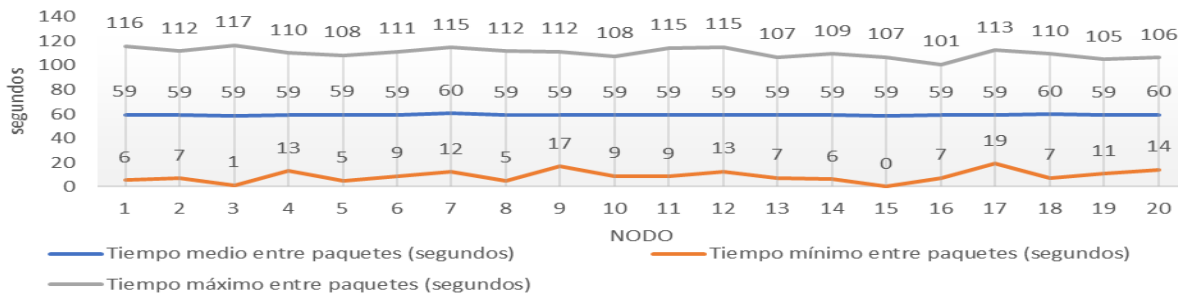


Figura 26.

Resumen de potencias para la topología 1 en las simulaciones en Cooja

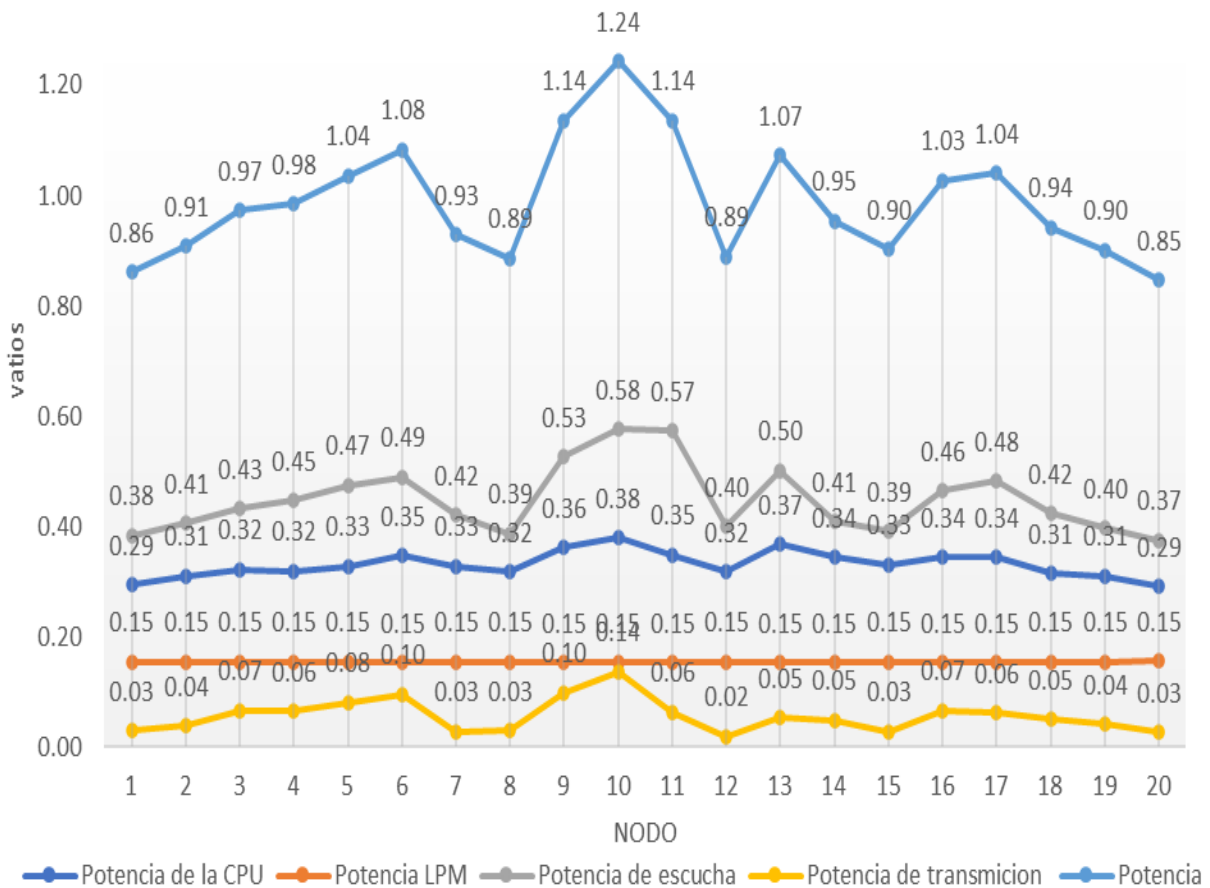


Figura 27.

Resumen de mensaje en los experimentos para la topología 3 en las simulaciones en Cooja

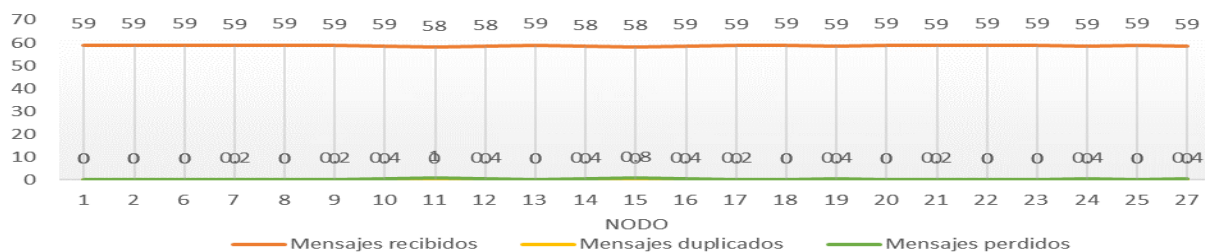


Figura 28.

Resumen de ETX y saltos para llegar al nodo raíz en los experimentos para la topología 3 en las simulaciones en Cooja

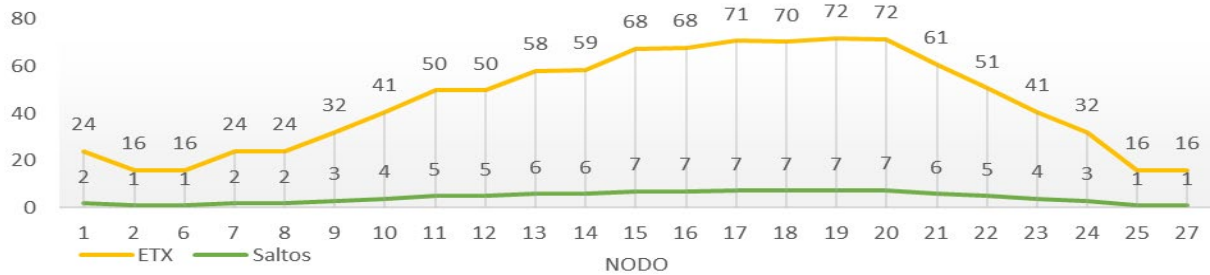


Figura 29.

Resumen de tiempos entre paquetes en los experimentos para la topología 3 en las simulaciones en Cooja

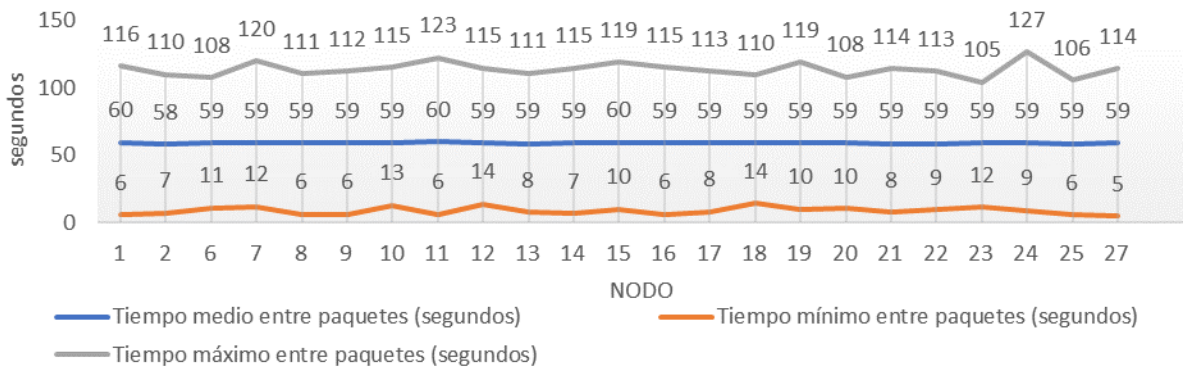


Figura 30.

Resumen de potencias para la topología 3 en las simulaciones en Cooja

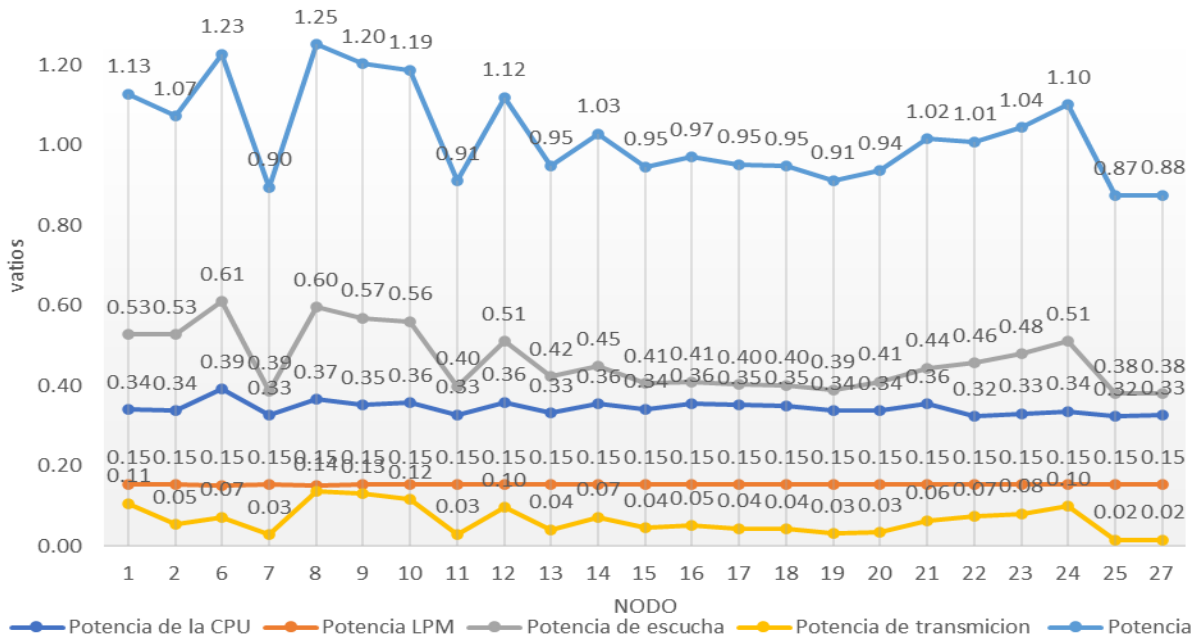


Figura 31.

Resumen de mensaje en los experimentos para la topología 4 en las simulaciones en Cooja

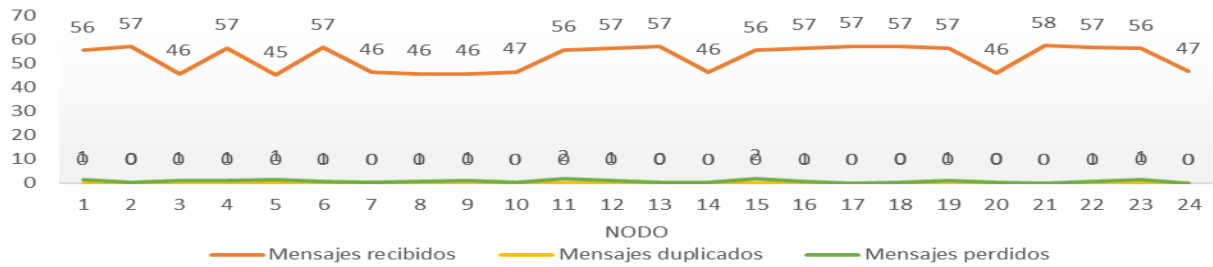


Figura 32.

Resumen de ETX y saltos para llegar al nodo raíz en los experimentos para la topología 4 en las simulaciones en Cooja

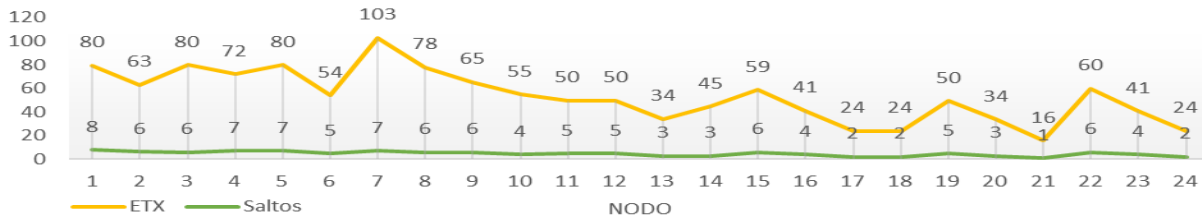


Figura 33.

Resumen de tiempos entre paquetes en los experimentos para la topología 4 en las simulaciones en Cooja

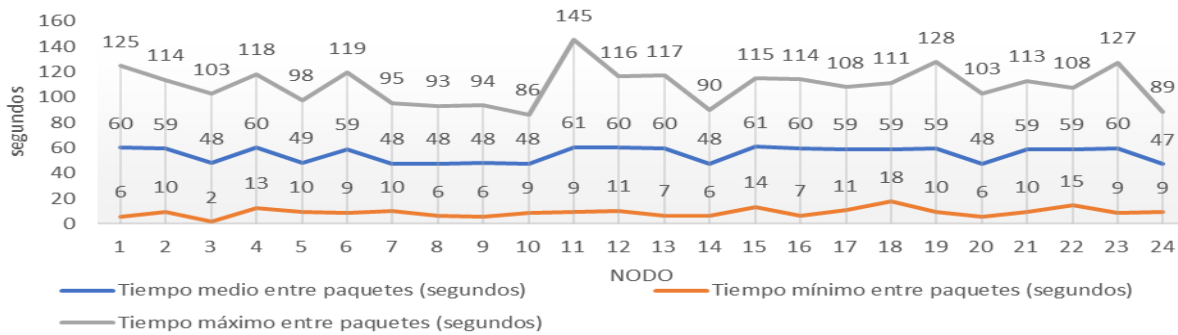


Figura 34.

Resumen de potencias para la topología 4 en las simulaciones en Cooja

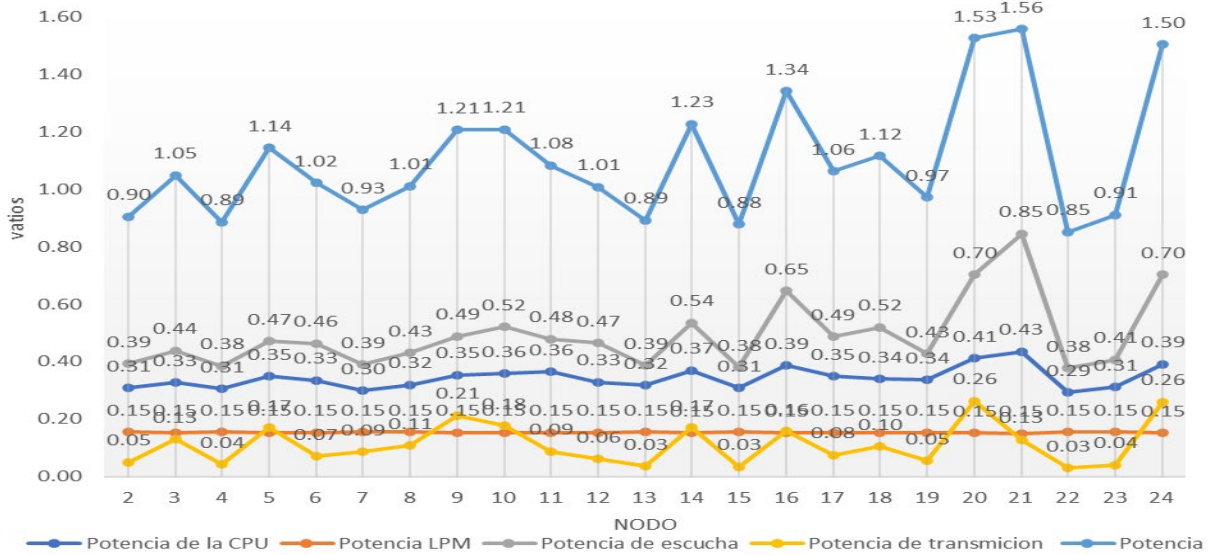


Figura 35.

Resumen de mensaje en los experimentos para la topología 5 en las simulaciones en Cooja

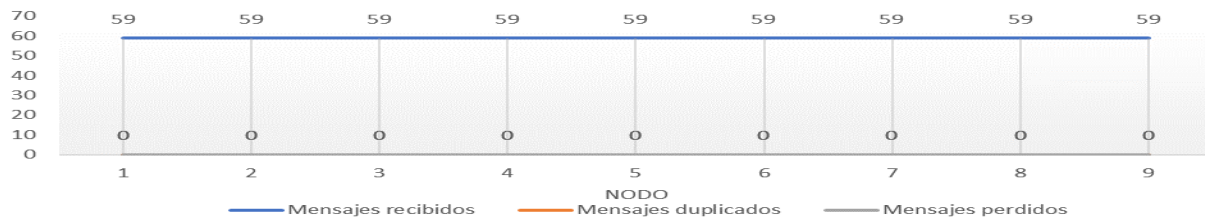
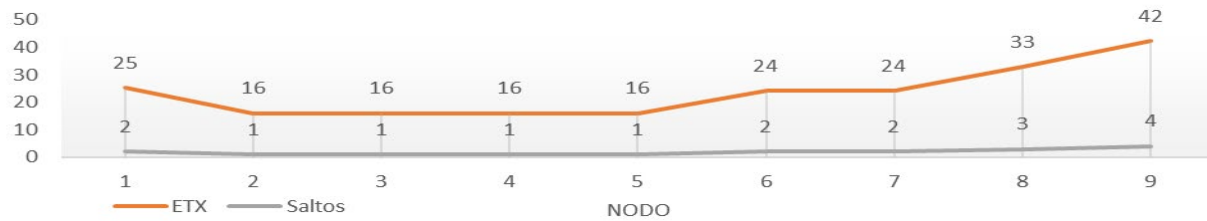


Figura 36.

Resumen de ETX y saltos para llegar al nodo raíz en los experimentos para la topología 5 en las simulaciones en Cooja

**Figura 37.**

Resumen de tiempos entre paquetes en los experimentos para la topología 5 en las simulaciones en Cooja

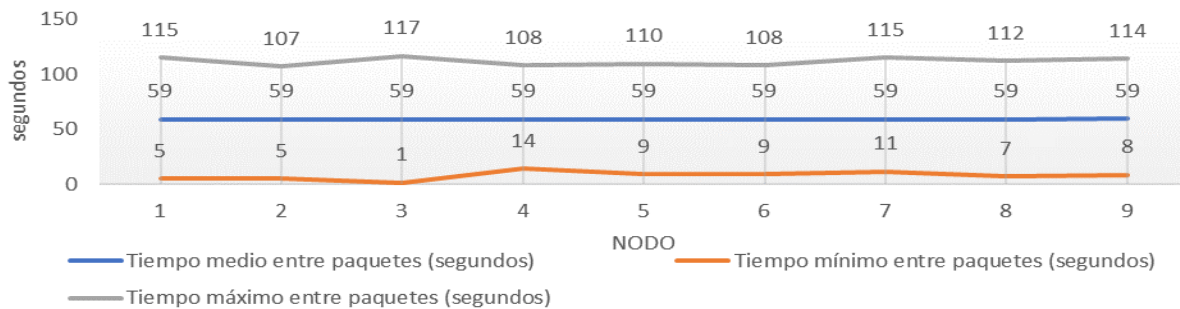


Figura 38.

Resumen de potencias para la topología 5 en las simulaciones en Cooja

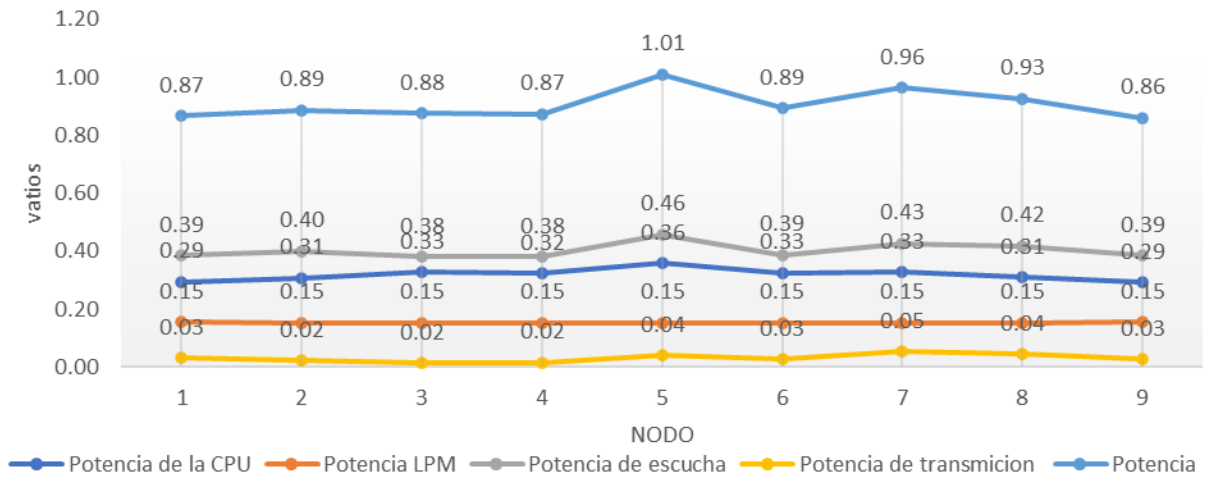


Figura 39.

Resumen de mensaje en los experimentos para la topología 6 en las simulaciones en Cooja

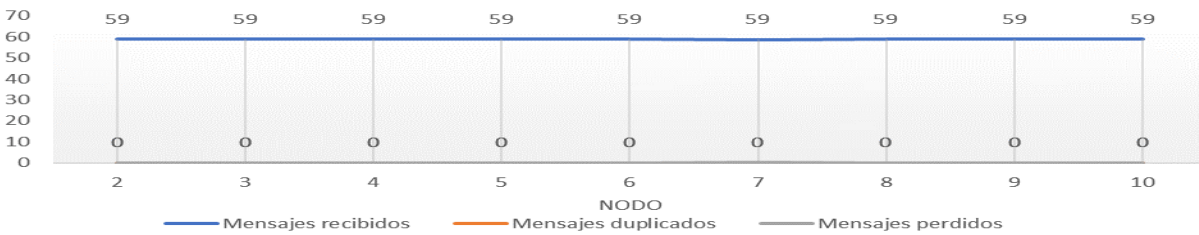


Figura 40.

Resumen de ETX y saltos para llegar al nodo raíz en los experimentos para la topología 6 en las simulaciones en Cooja

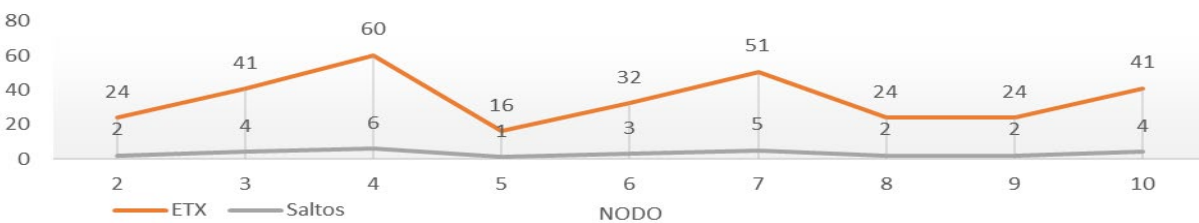


Figura 41.

Resumen de tiempos entre paquetes en los experimentos para la topología 6 en las simulaciones en Cooja

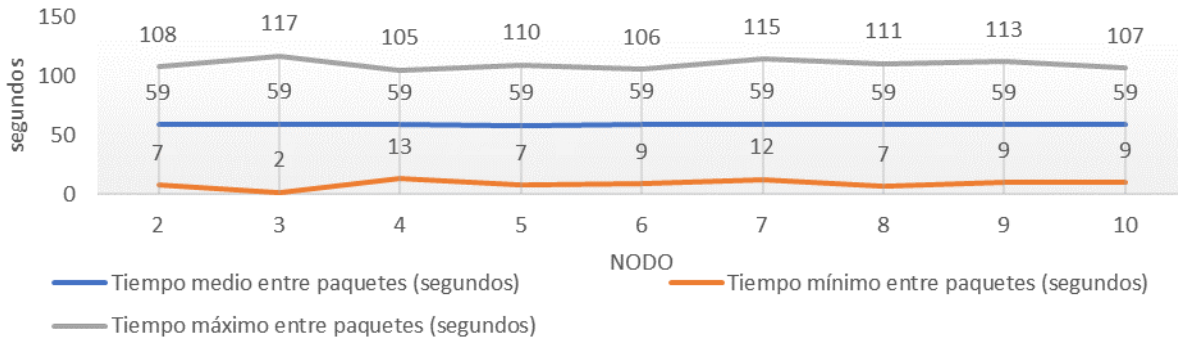


Figura 42.

Resumen de potencias para la topología 6 en las simulaciones en Cooja

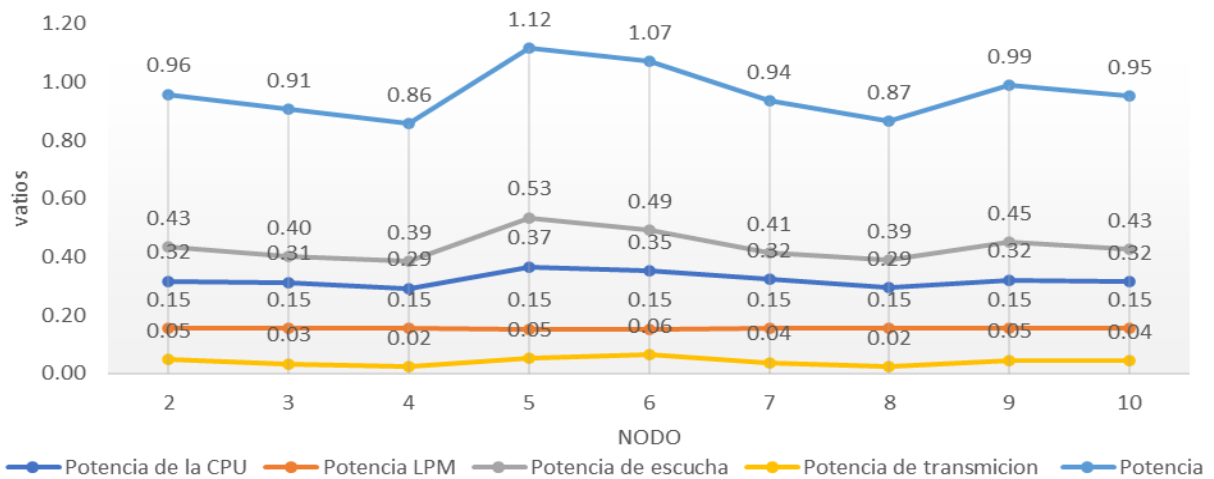


Figura 43.

Resumen de mensaje en los experimentos para la topología 7 en las simulaciones en Cooja

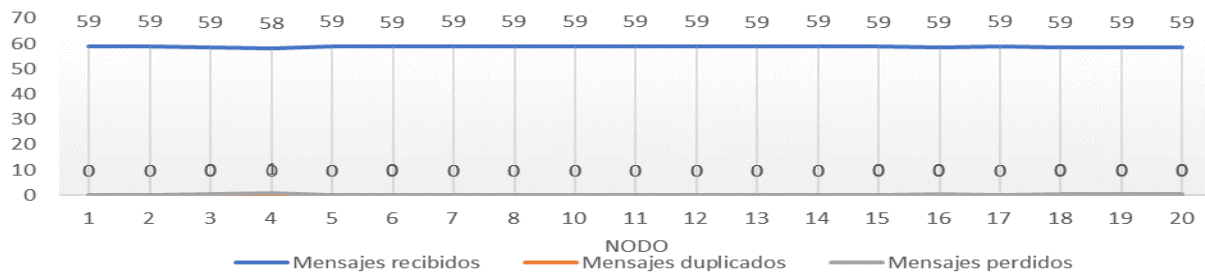


Figura 44.

Resumen de ETX y saltos para llegar al nodo raíz en los experimentos para la topología 7 en las simulaciones en Cooja

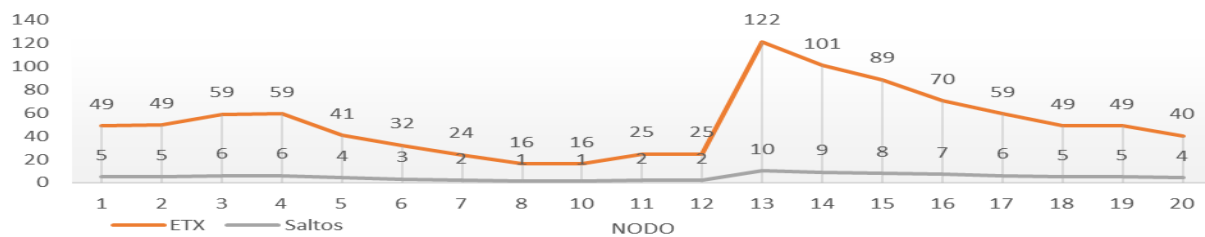


Figura 45.

Resumen de tiempos entre paquetes en los experimentos para la topología 7 en las simulaciones en Cooja

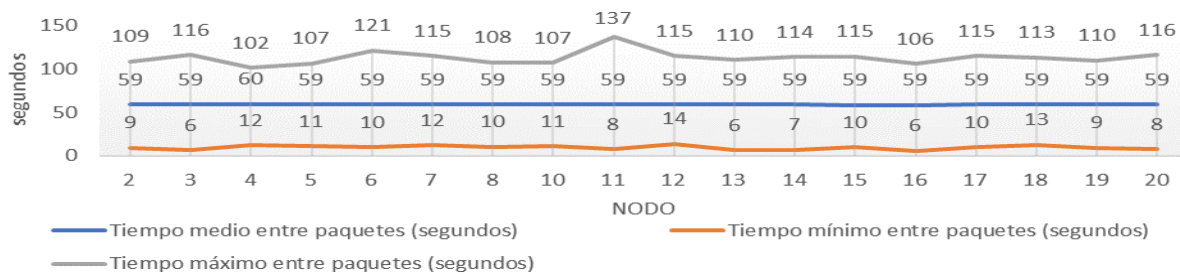


Figura 46.

Resumen de potencias para la topología 7 en las simulaciones en Cooja

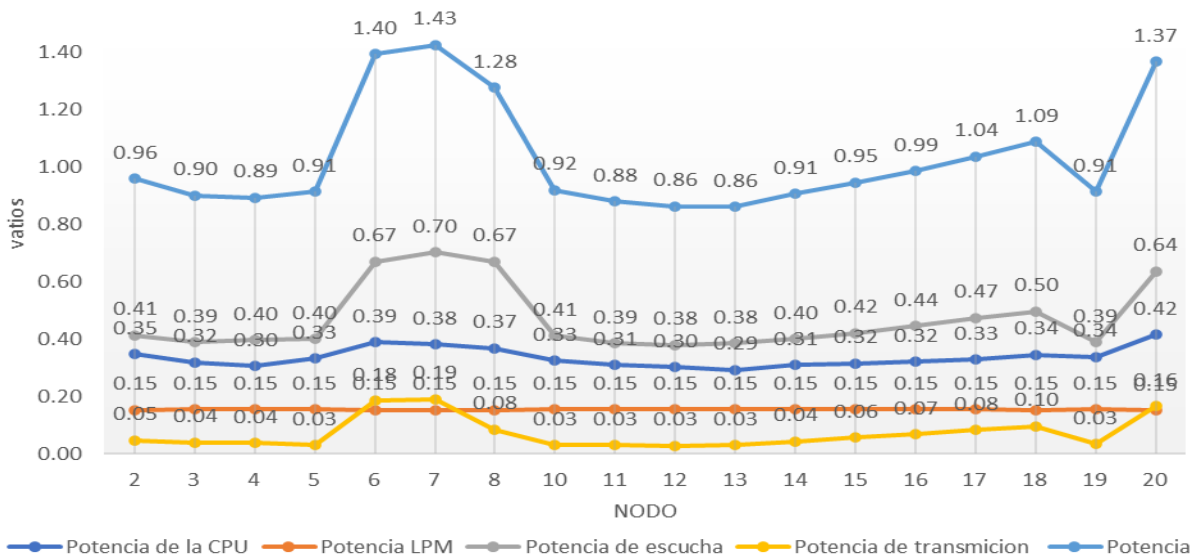


Figura 47.

Resumen de mensaje en los experimentos para la topología 8 en las simulaciones en Cooja

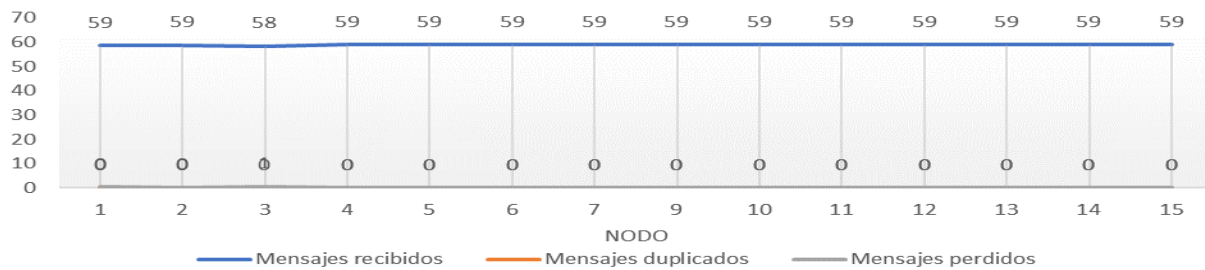
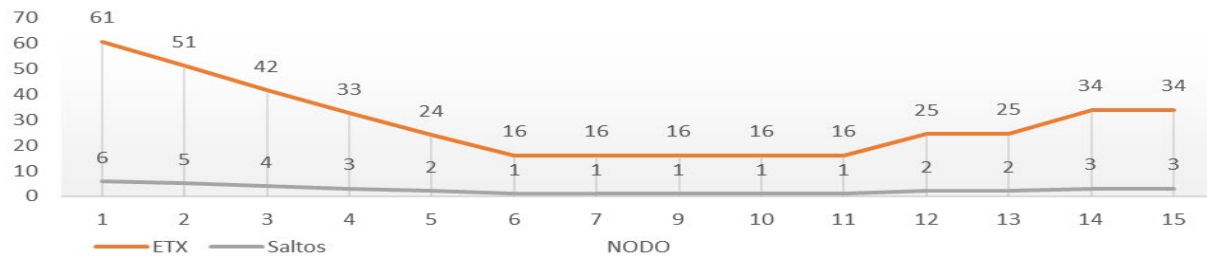


Figura 48.

Resumen de ETX y saltos para llegar al nodo raíz en los experimentos para la topología 8 en las simulaciones en Cooja

**Figura 49.**

Resumen de tiempos entre paquetes en los experimentos para la topología 8 en las simulaciones en Cooja

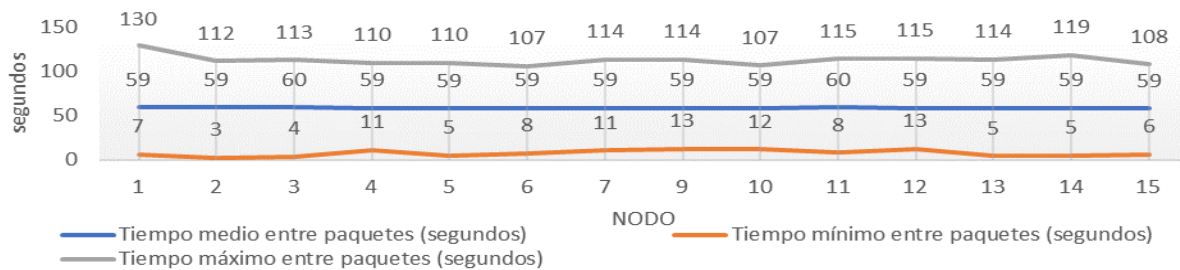
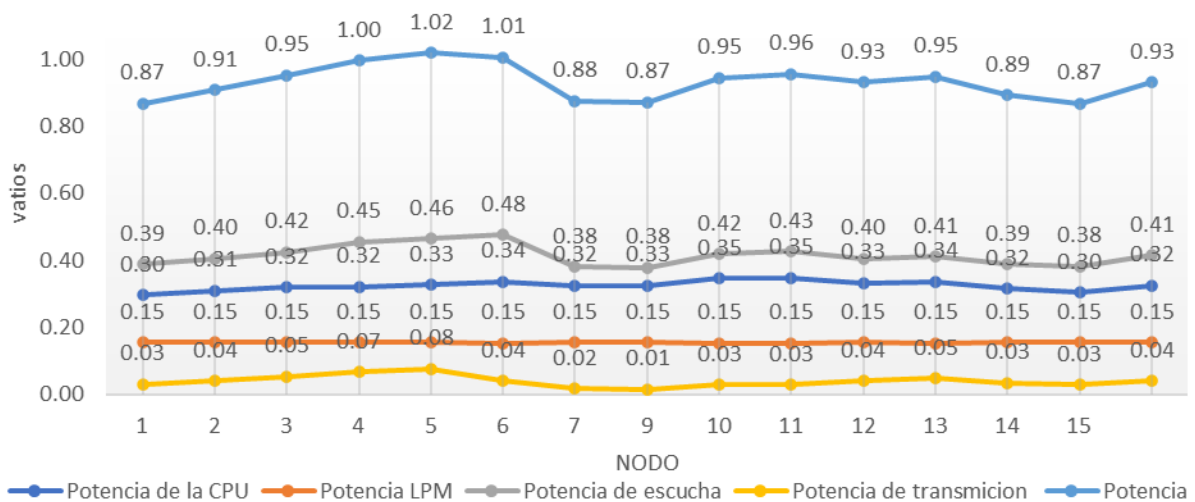


Figura 50.

Resumen de potencias para la topología 8 en las simulaciones en Cooja

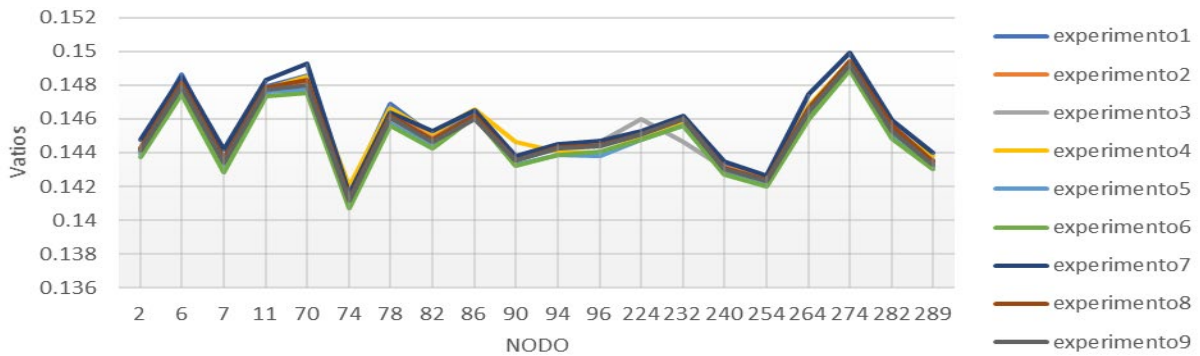


4.2 Resultados de las pruebas en IoT-Lab

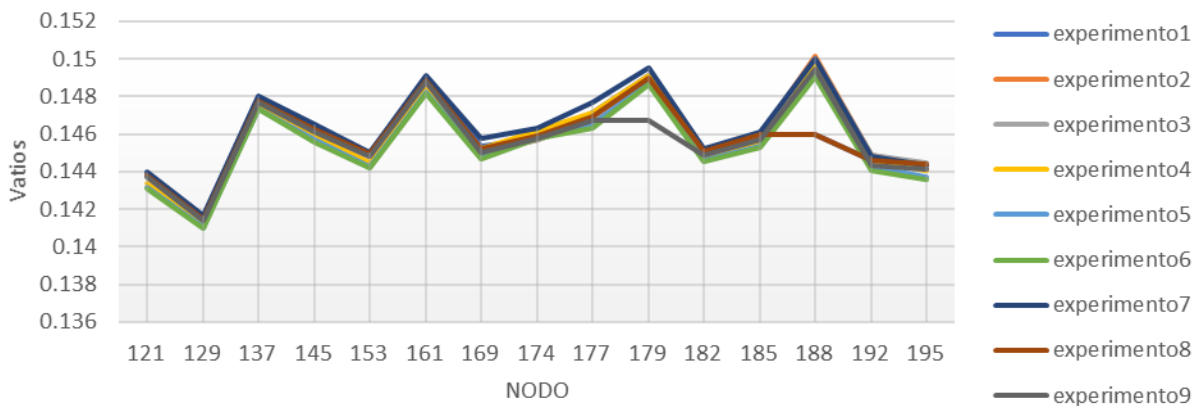
Las pruebas realizadas en la infraestructura IoT-Lab en la cuales se monitoreó en cada uno de los nodos la potencia y la calidad del enlace. A continuación, se presentan las gráficas de los comportamientos promedios de la potencia en cada uno de los escenarios propuestos.

Figura 57.

Comportamiento promedio de la potencia para los nodos de la topología 7 en los experimentos para el escenario 7 en IoT-Lab

**Figura 58.**

Comportamiento promedio de la potencia para los nodos de la topología 8 en los experimentos para el escenario 8 en IoT-Lab



Las siguientes son las gráficas de los comportamientos promedios del voltaje en cada uno de los escenarios propuestos.

Figura 61.

Comportamiento promedio del voltaje para los nodos de la topología 3 en los experimentos para el escenario 3 en IoT-Lab

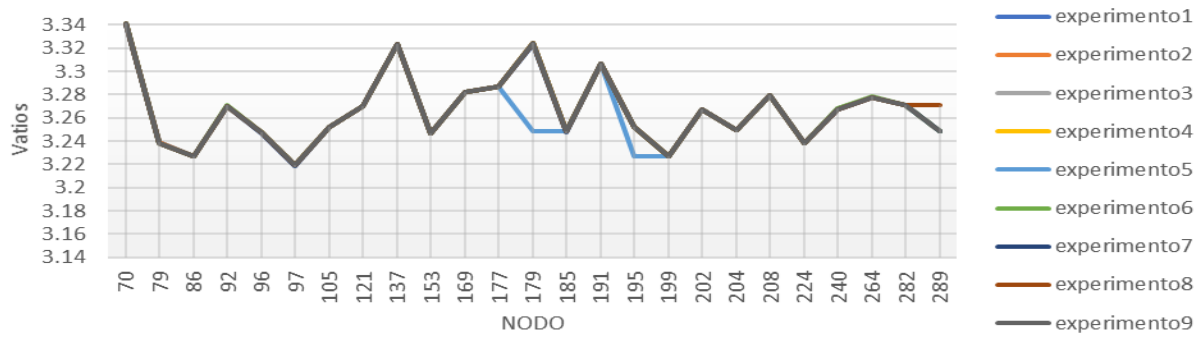


Figura 62.

Comportamiento promedio del voltaje para los nodos de la topología 4 en los experimentos para el escenario 4 en IoT-Lab

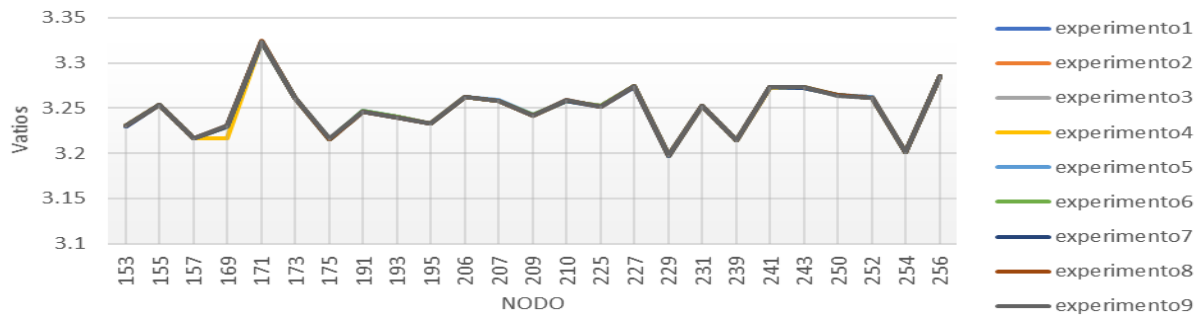


Figura 63.

Comportamiento promedio del voltaje para los nodos de la topología 5 en los experimentos para el escenario 5 en IoT-Lab

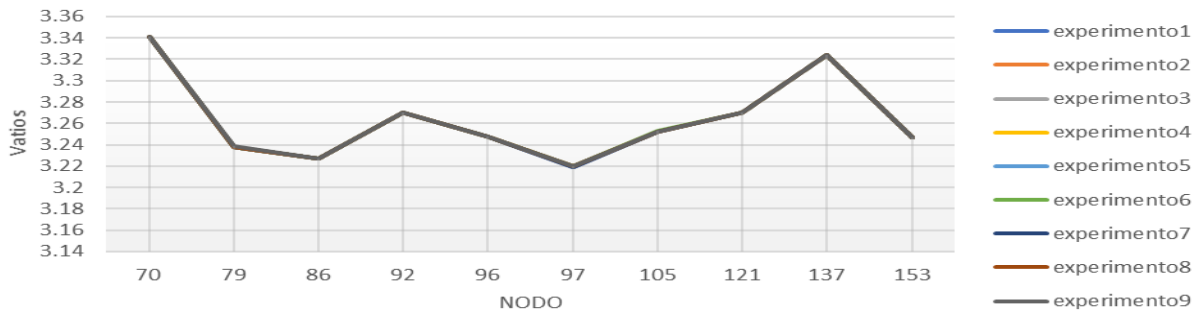


Figura 64.

Comportamiento promedio del voltaje para los nodos de la topología 6 en los experimentos para el escenario 6 en IoT-Lab

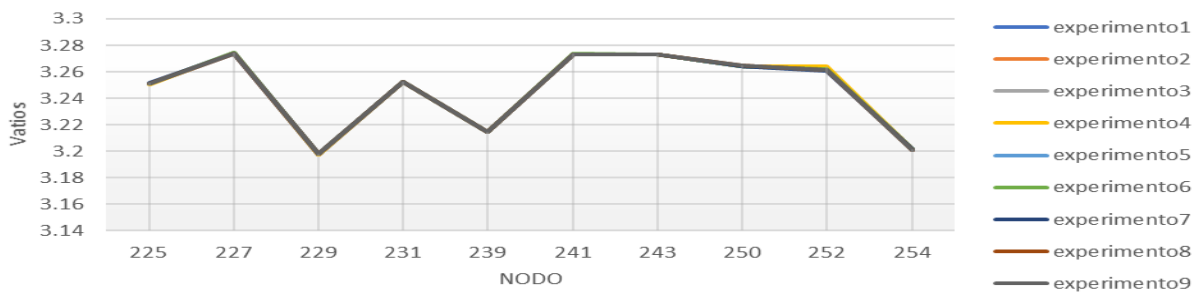
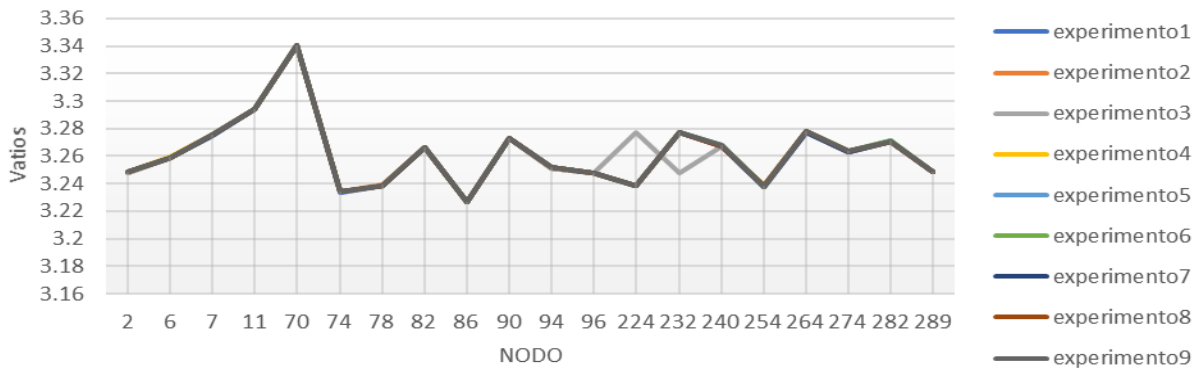
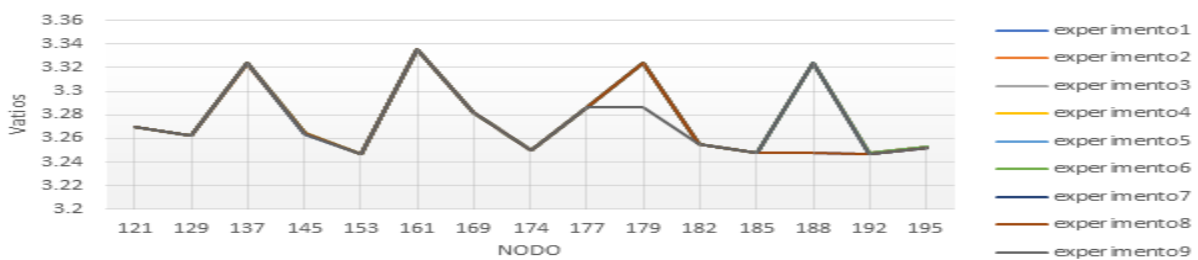


Figura 65.

Comportamiento promedio del voltaje para los nodos de la topología 7 en los experimentos para el escenario 7 en IoT-Lab

**Figura 66.**

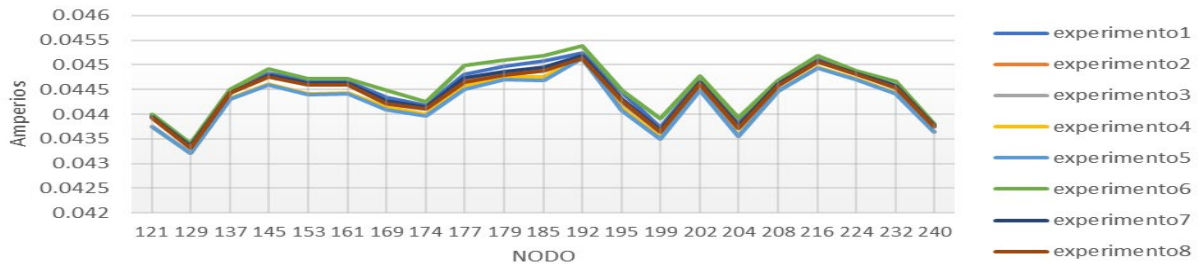
Comportamiento promedio del voltaje para los nodos de la topología 8 en los experimentos para el escenario 8 en IoT-Lab



Las siguientes son las gráficas de los comportamientos promedios de corriente en cada uno de los escenarios propuestos, en las gráficas se puede observar cada una de las pruebas que se realizaron.

Figura 67.

Comportamiento promedio de la corriente para los nodos de la topología 1 en los experimentos para el escenario 1 en IoT-Lab

**Figura 68.**

Comportamiento promedio de la corriente para los nodos de la topología 2 en los experimentos para el escenario 2 en IoT-Lab

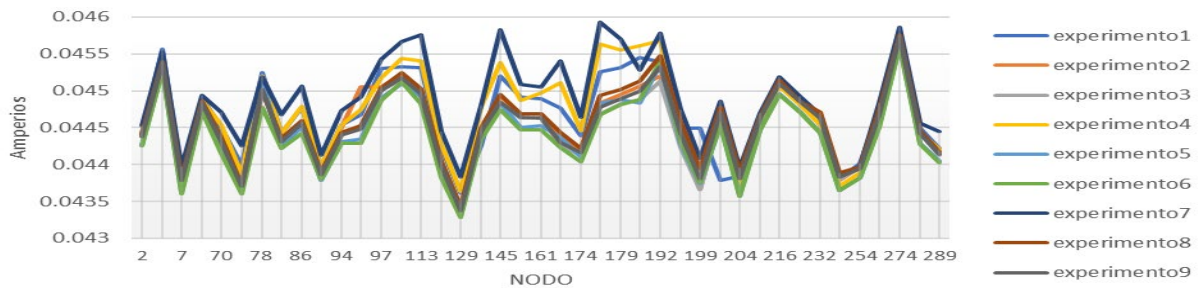
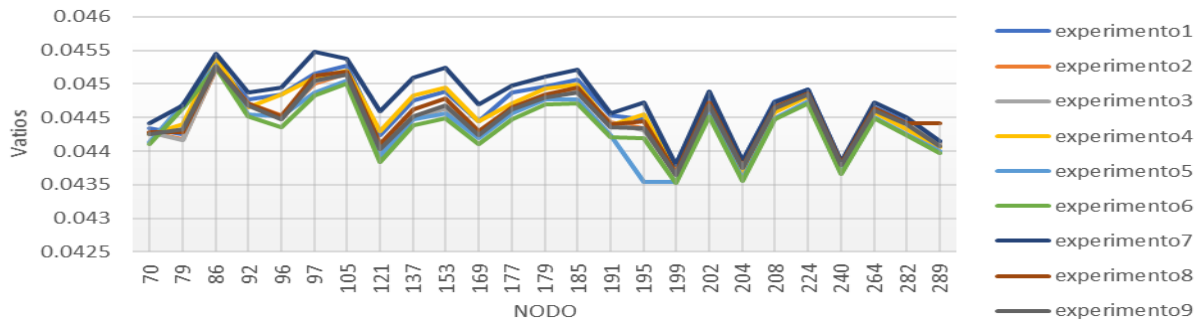


Figura 69.

Comportamiento promedio de la corriente para los nodos de la topología 3 en los experimentos para el escenario 3 en IoT-Lab

**Figura 70.**

Comportamiento promedio de la corriente para los nodos de la topología 4 en los experimentos para el escenario 4 en IoT-Lab

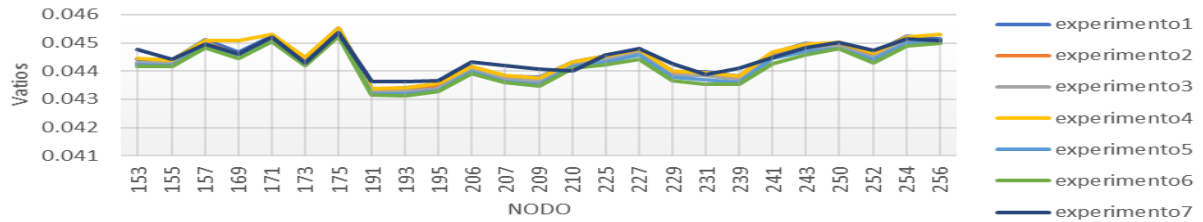
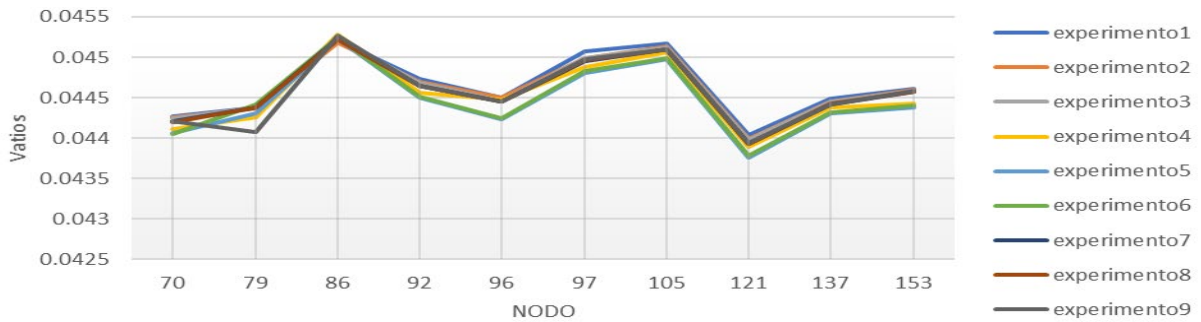


Figura 71.

Comportamiento promedio de la corriente para los nodos de la topología 5 en los experimentos para el escenario 5 en IoT-Lab

**Figura 72.**

Comportamiento promedio de la corriente para los nodos de la topología 6 en los experimentos para el escenario 6 en IoT-Lab

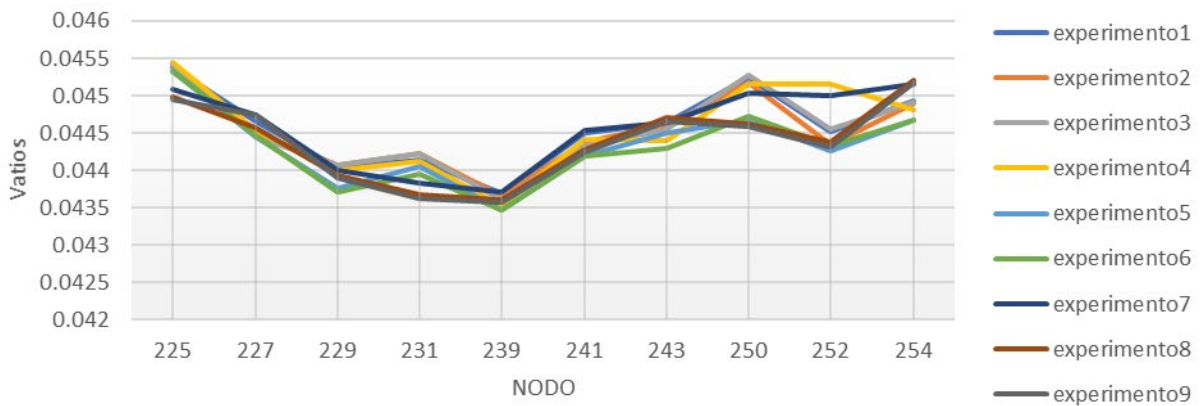
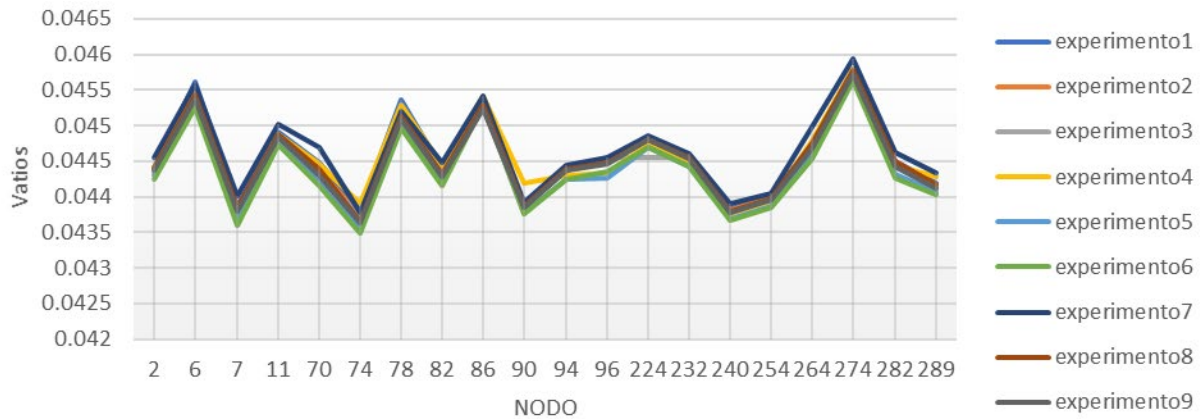
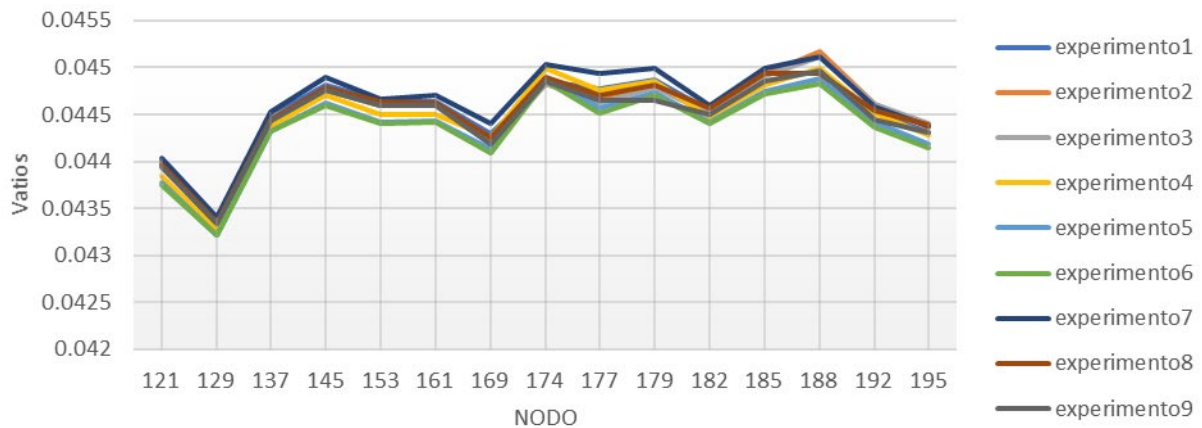


Figura 73.

Comportamiento promedio de la corriente para los nodos de la topología 7 en los experimentos para el escenario 7 en IoT-Lab

**Figura 74.**

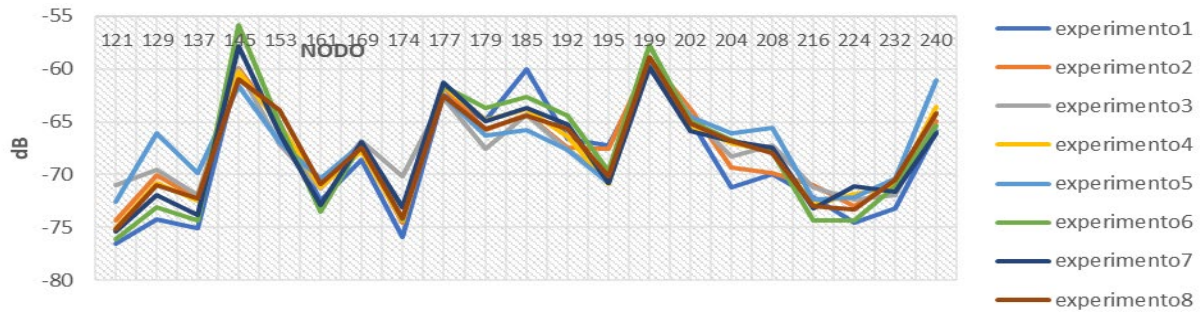
Comportamiento promedio de la corriente para los nodos de la topología 8 en los experimentos para el escenario 8 en IoT-Lab



Las siguientes son las gráficas de los comportamientos promedios de la RSSI en cada uno de los escenarios propuestos.

Figura 75.

Comportamiento promedio de la RSSI para los nodos de la topología 1 en los experimentos para el escenario 1 en IoT-Lab

**Figura 76.**

Comportamiento promedio de la RSSI para los nodos de la topología 2 en los experimentos para el escenario 2 en IoT-Lab

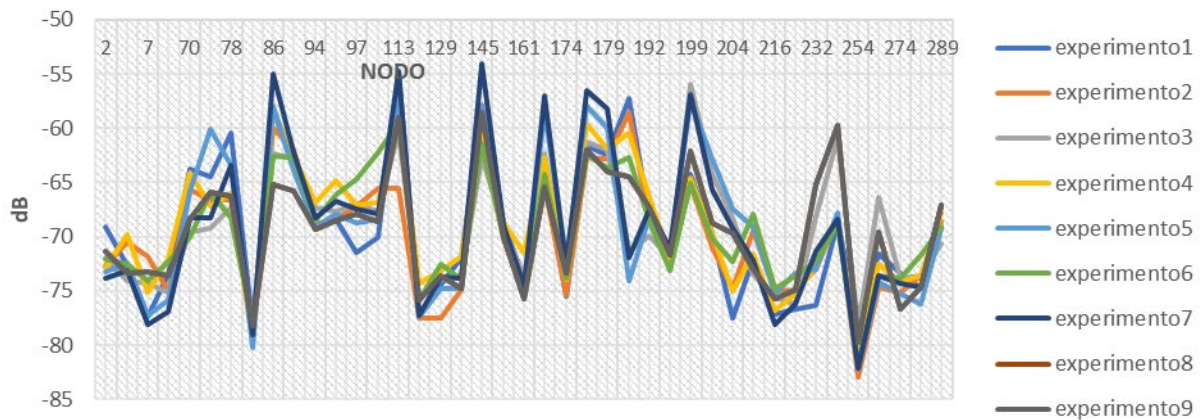
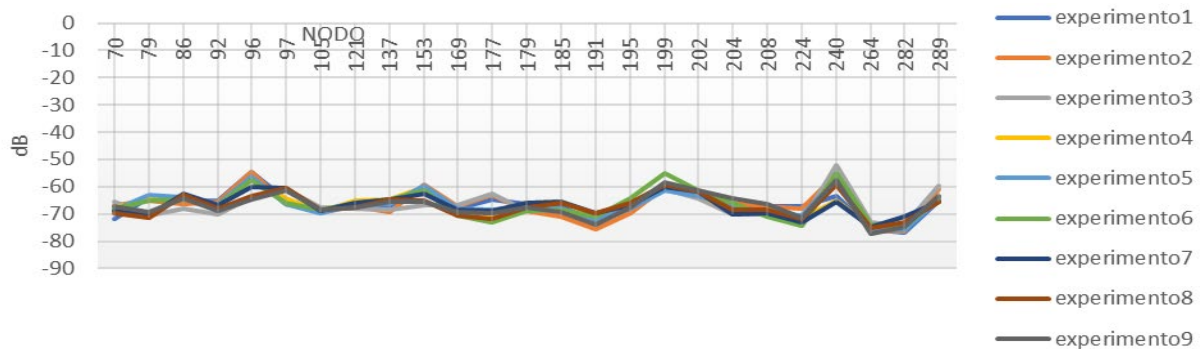
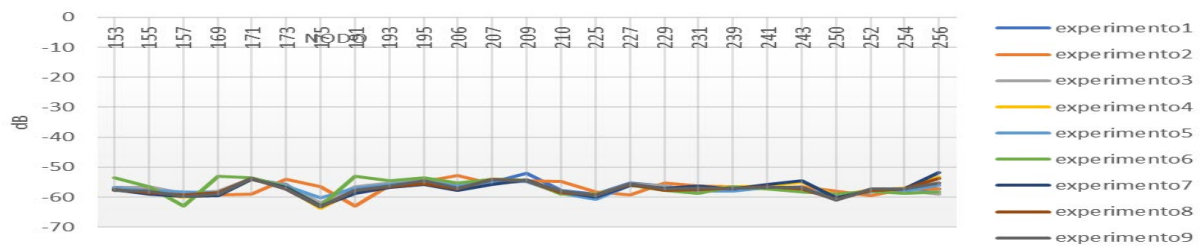


Figura 77.

Comportamiento promedio de la RSSI para los nodos de la topología 3 en los experimentos para el escenario 3 en IoT-Lab

**Figura 78.**

Comportamiento promedio de la RSSI para los nodos de la topología 4 en los experimentos para el escenario 4 en IoT-Lab

**Figura 79.**

Comportamiento promedio de la RSSI para los nodos de la topología 5 en los experimentos para el escenario 5 en IoT-Lab

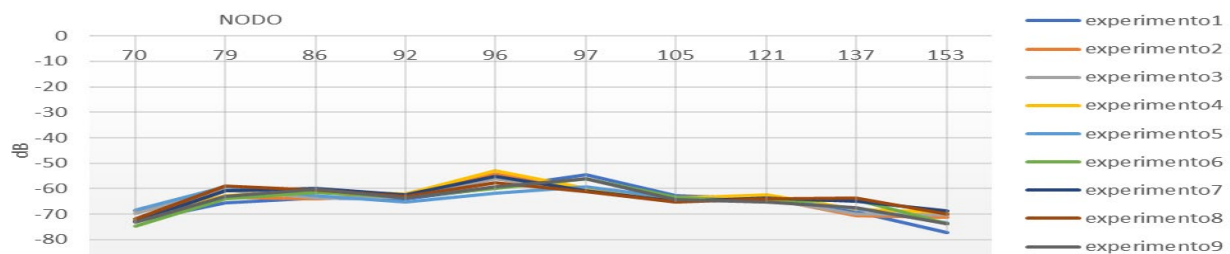
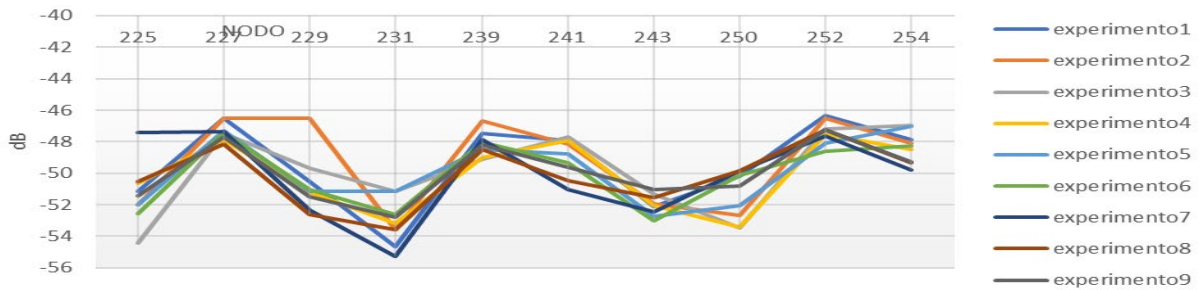
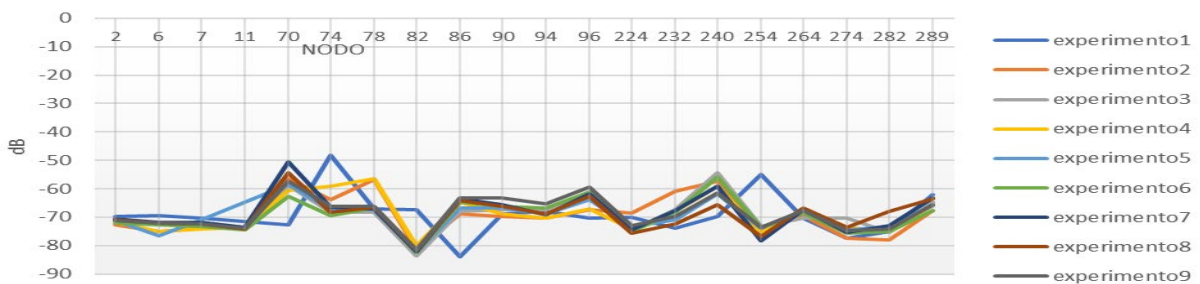


Figura 80.

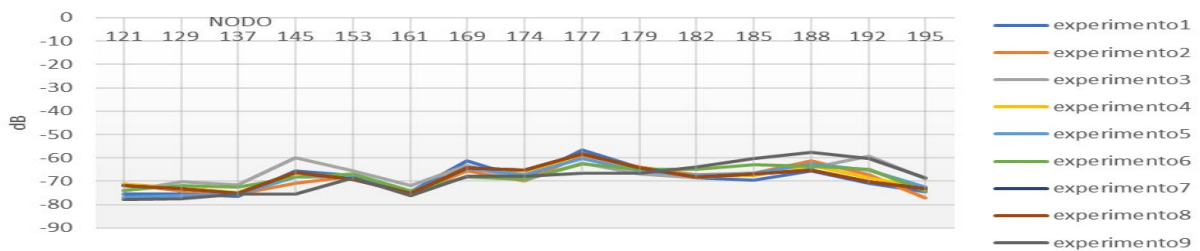
Comportamiento promedio de la RSSI para los nodos de la topología 6 en los experimentos para el escenario 6 en IoT-Lab

**Figura 81.**

Comportamiento promedio de la RSSI para los nodos de la topología 7 en los experimentos para el escenario 7 en IoT-Lab

**Figura 82.**

Comportamiento promedio de la RSSI para los nodos de la topología 8 en los experimentos para el escenario 8 en IoT-Lab



Las siguientes son las gráficas de los comportamientos promedios del LQI en cada uno de los escenarios propuestos.

Figura 83.

Comportamiento promedio del LQI para los nodos de la topología 1 en los experimentos para el escenario 1 en IoT-Lab

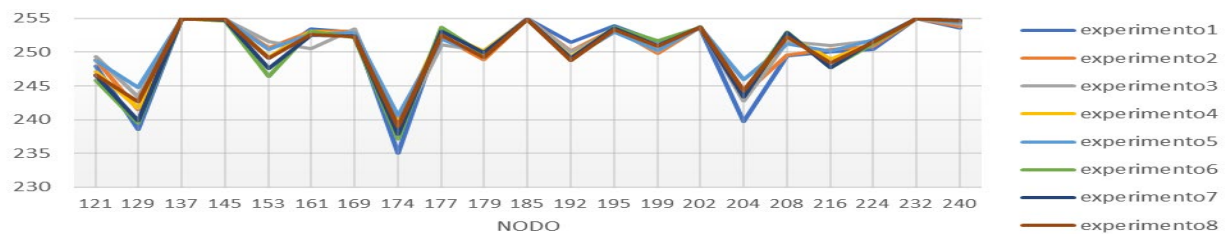


Figura 84.

Comportamiento promedio del LQI para los nodos de la topología 2 en los experimentos para el escenario 2 en IoT-Lab

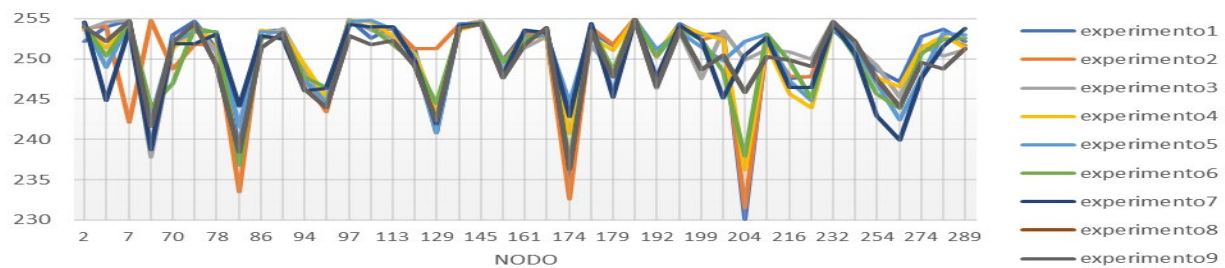
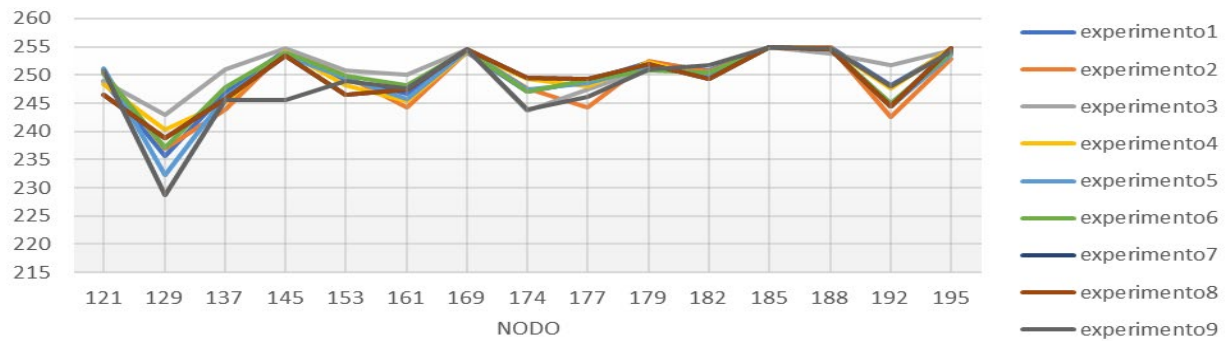


Figura 90.

Comportamiento promedio de LQI para los nodos de la topología 8 en los experimentos para el escenario 8 en IoT-Lab



Las siguientes son las gráficas de los comportamientos promedios de potencia en cada nodo.

Figura 91.

Comparación de la potencia entre los nodos de la topología 1 en los experimentos para el escenario 1

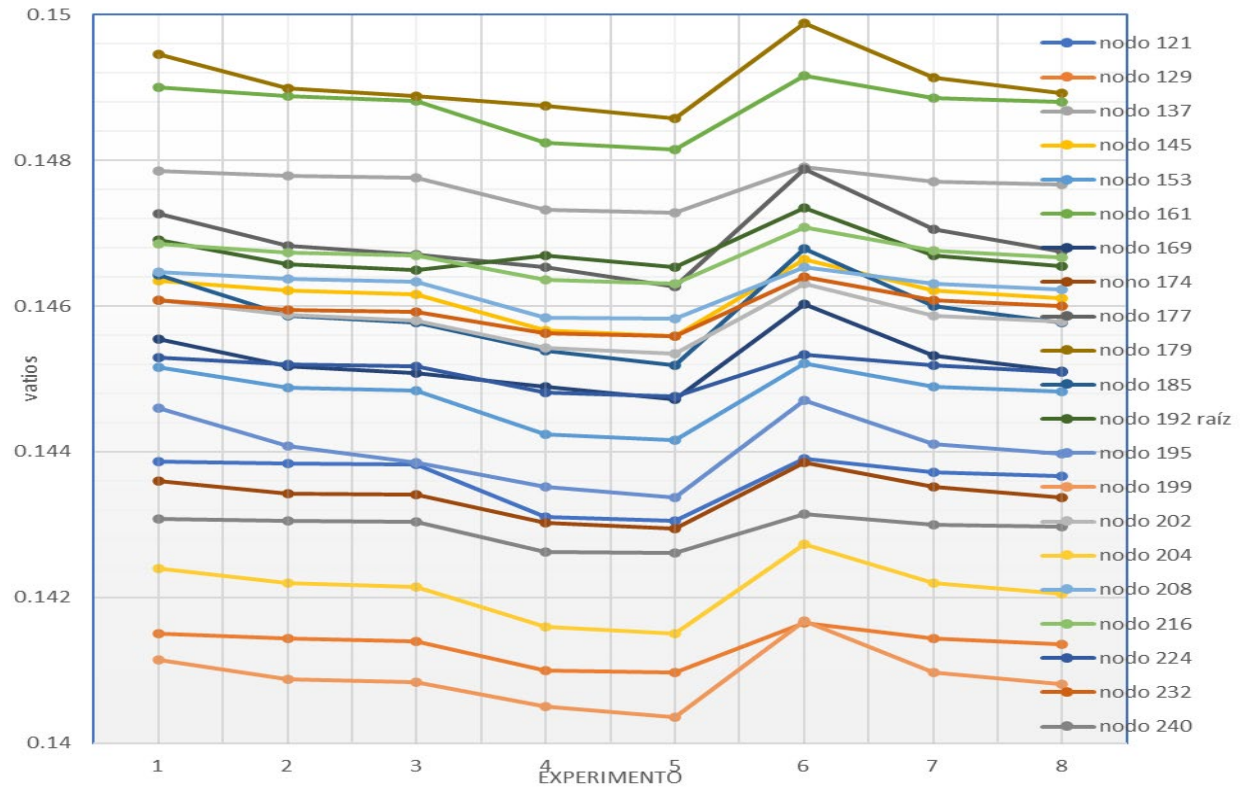


Figura 92.

Comparación de la potencia entre los nodos de la topología 2 en los experimentos para el escenario 2

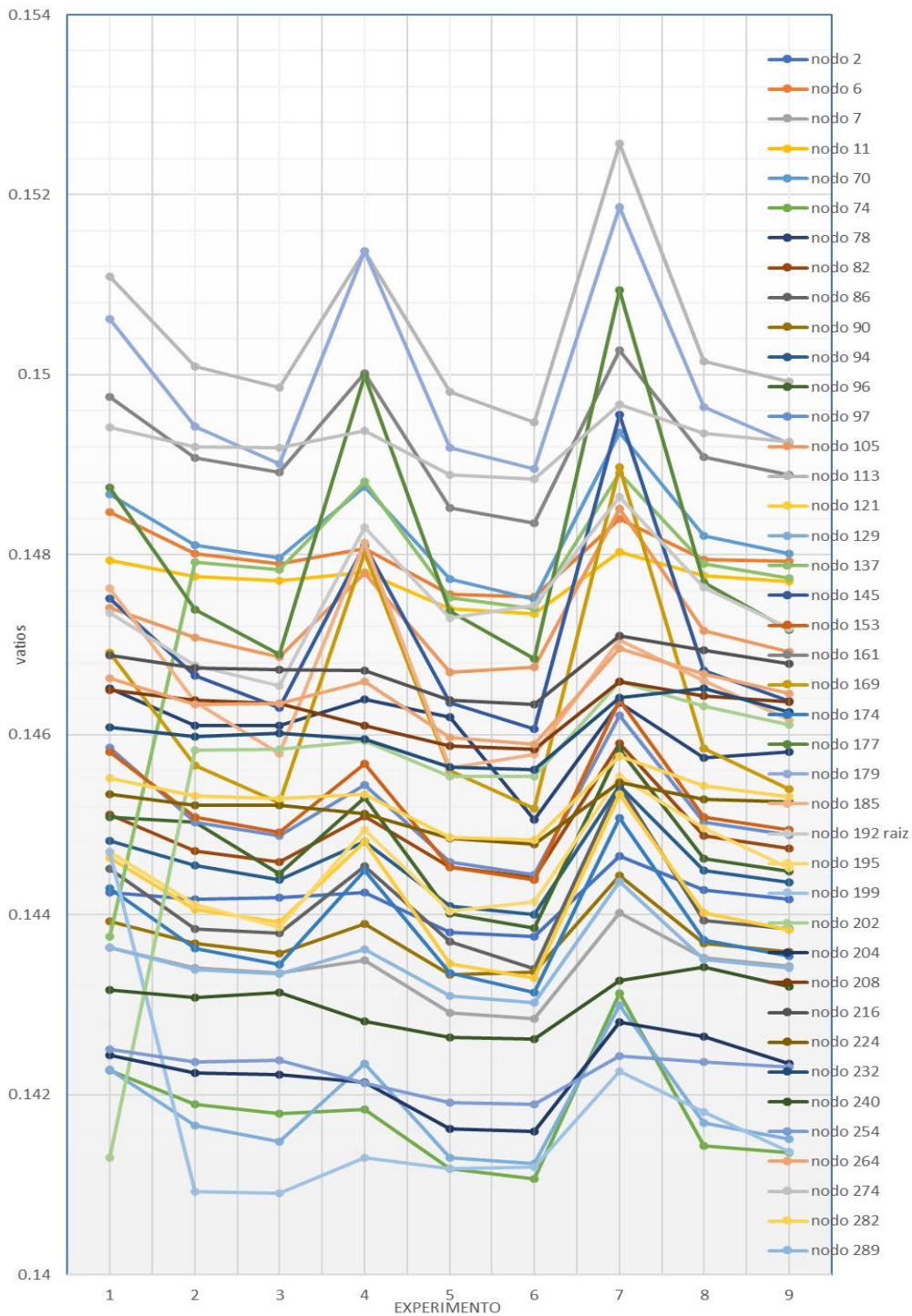


Figura 93.

Comparación de la potencia entre los nodos de la topología 3 en los experimentos para el escenario 3

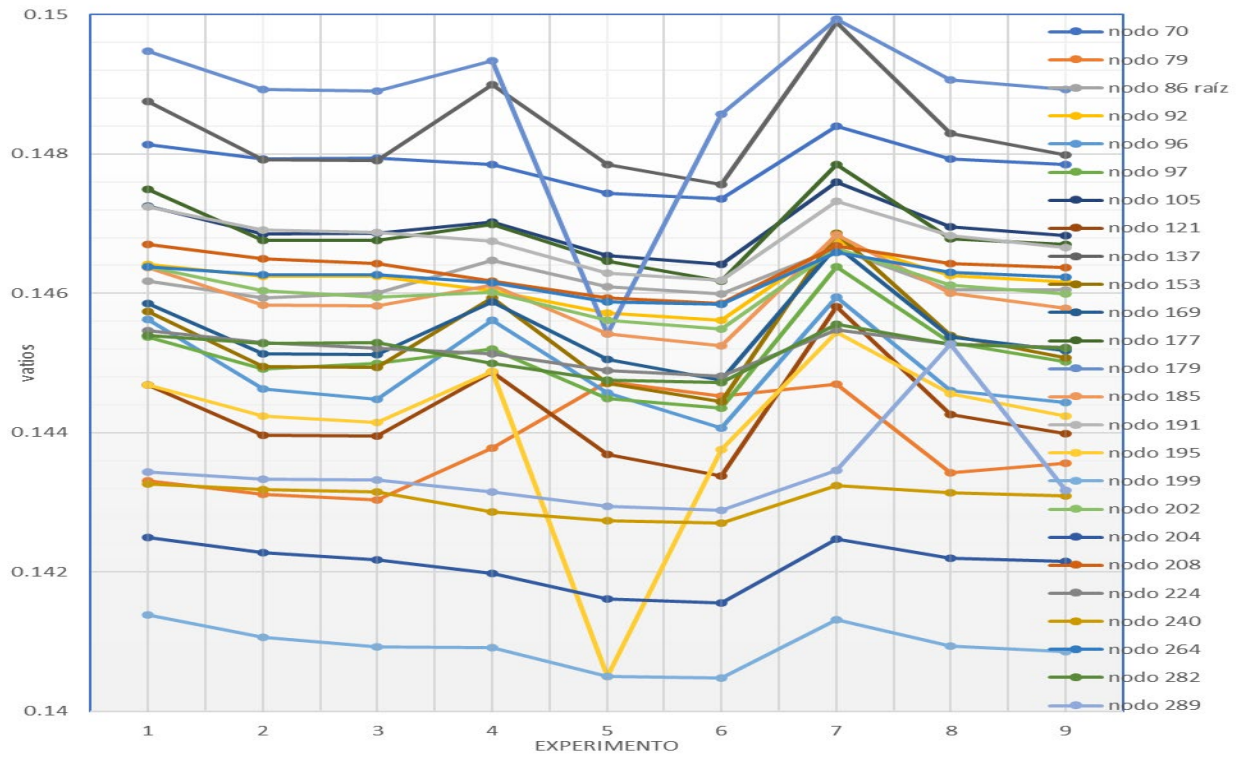


Figura 94.

Comparación de la potencia entre los nodos de la topología 4 en los experimentos para el escenario 4

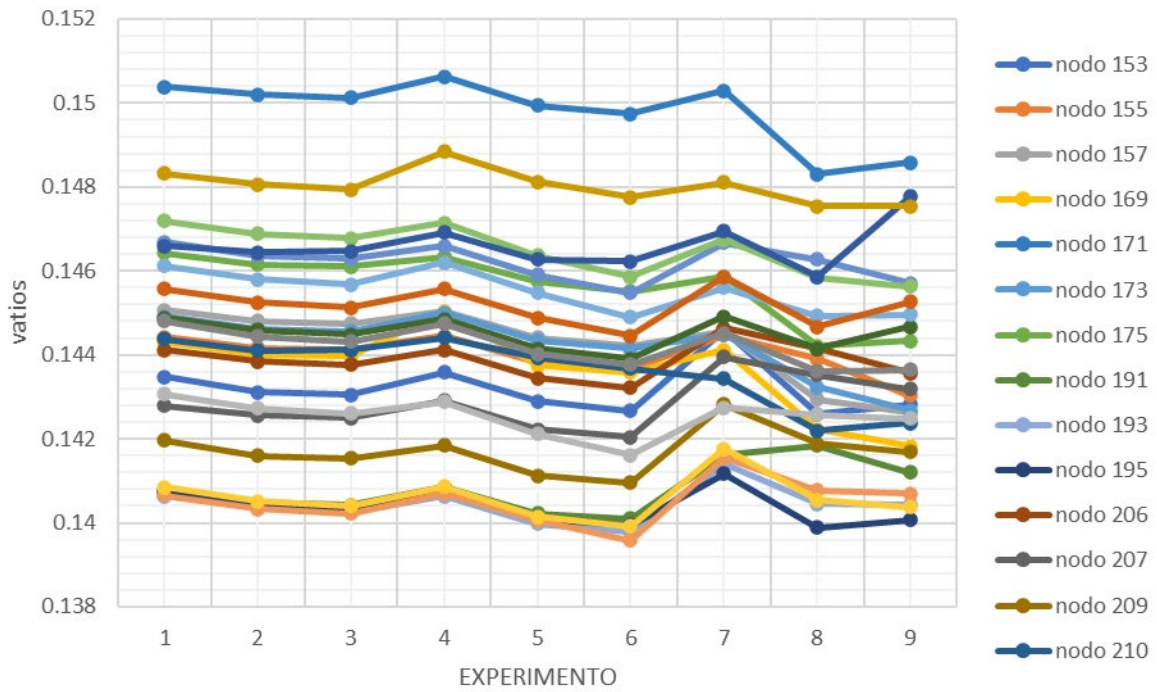


Figura 95.

Comparación de la potencia entre los nodos de la topología 5 en los experimentos para el escenario 5

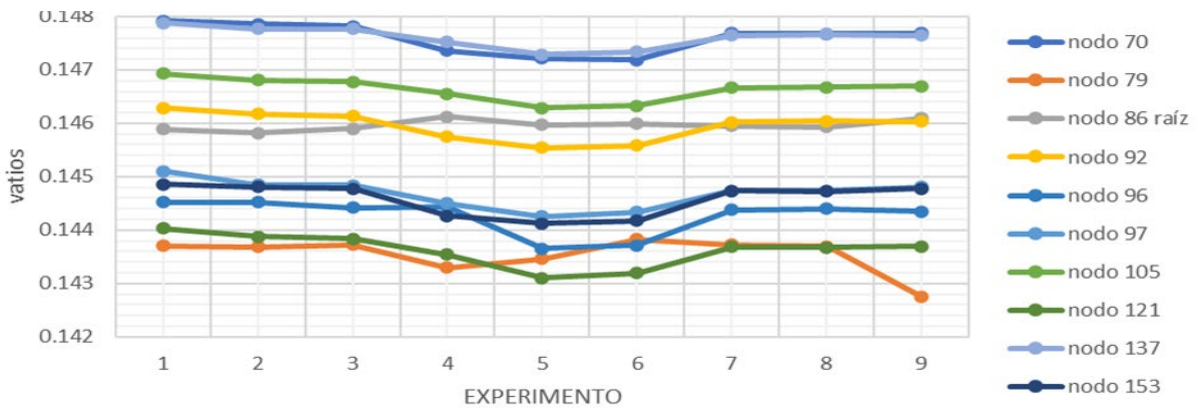


Figura 96.

Comparación de la potencia entre los nodos de la topología 6 en los experimentos para el escenario 6

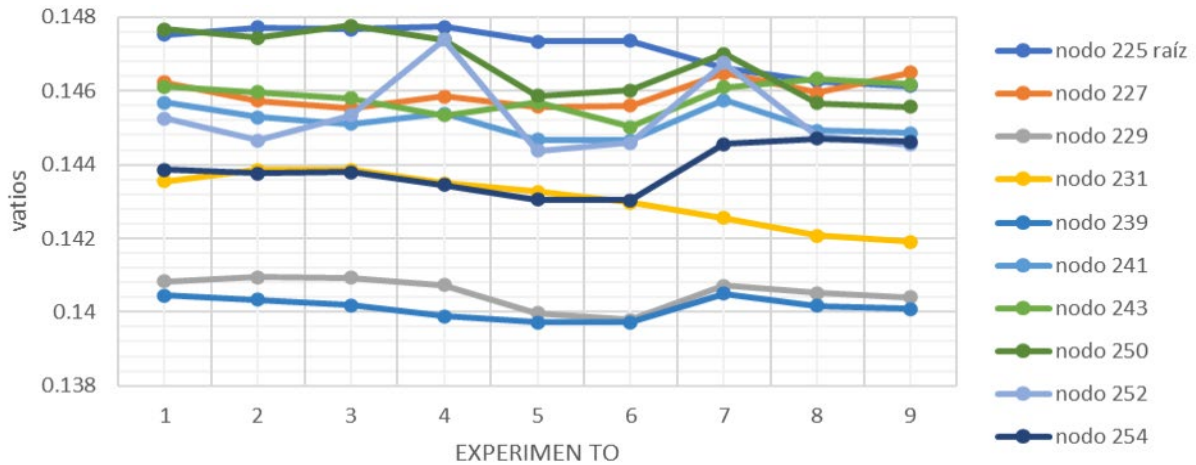


Figura 97.

Comparación de la potencia entre los nodos de la topología 7 en los experimentos para el escenario 7

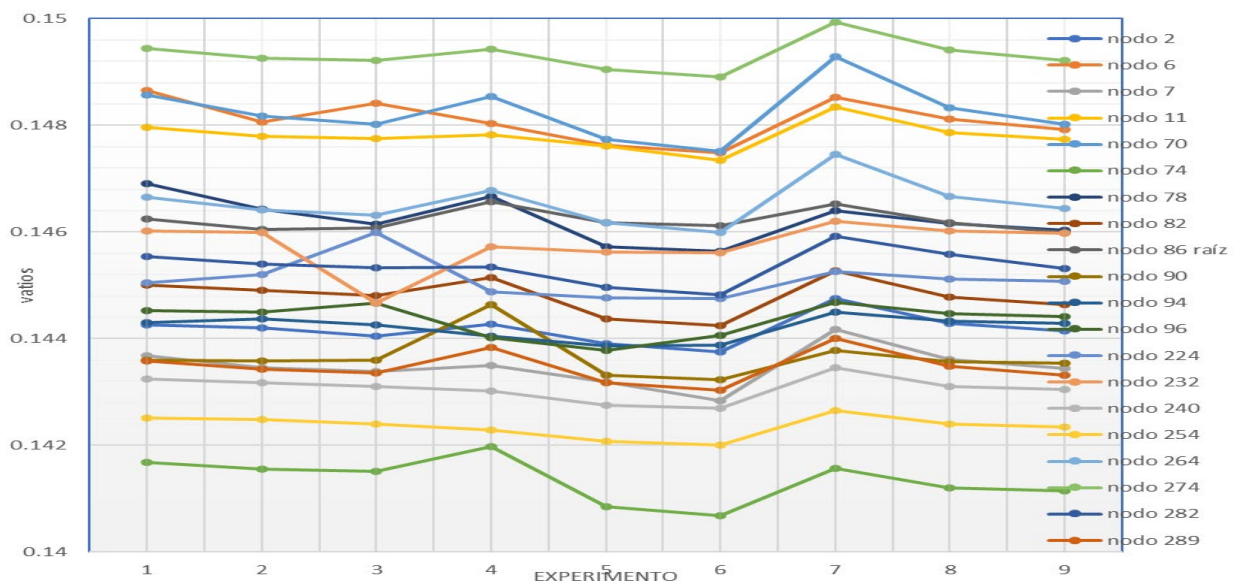
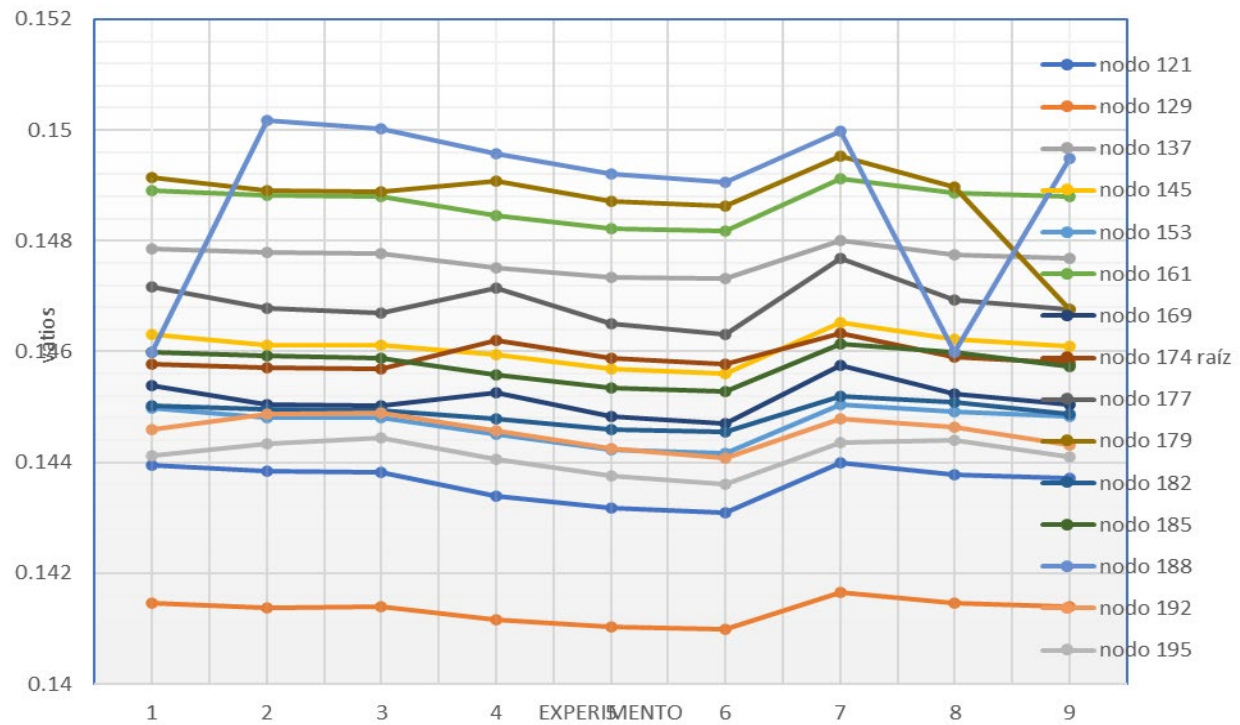


Figura 98.

Comparación de la potencia entre los nodos de la topología 8 en los experimentos para el escenario 8



Las siguientes son las gráficas de los comportamientos promedios del voltaje en cada nodo.

Figura 99.

Comparación del voltaje entre los nodos de la topología 1 en los experimentos para el escenario

1

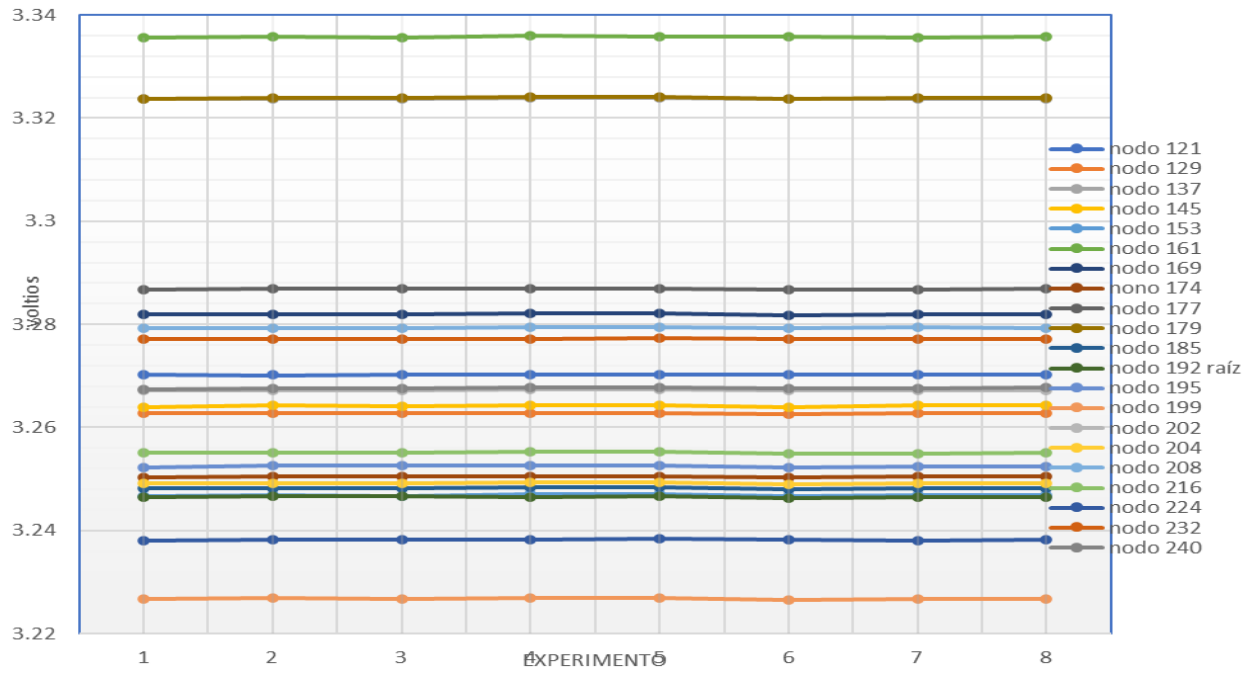


Figura 102.

Comparación del voltaje entre los nodos de la topología 3 en los experimentos para el escenario

3

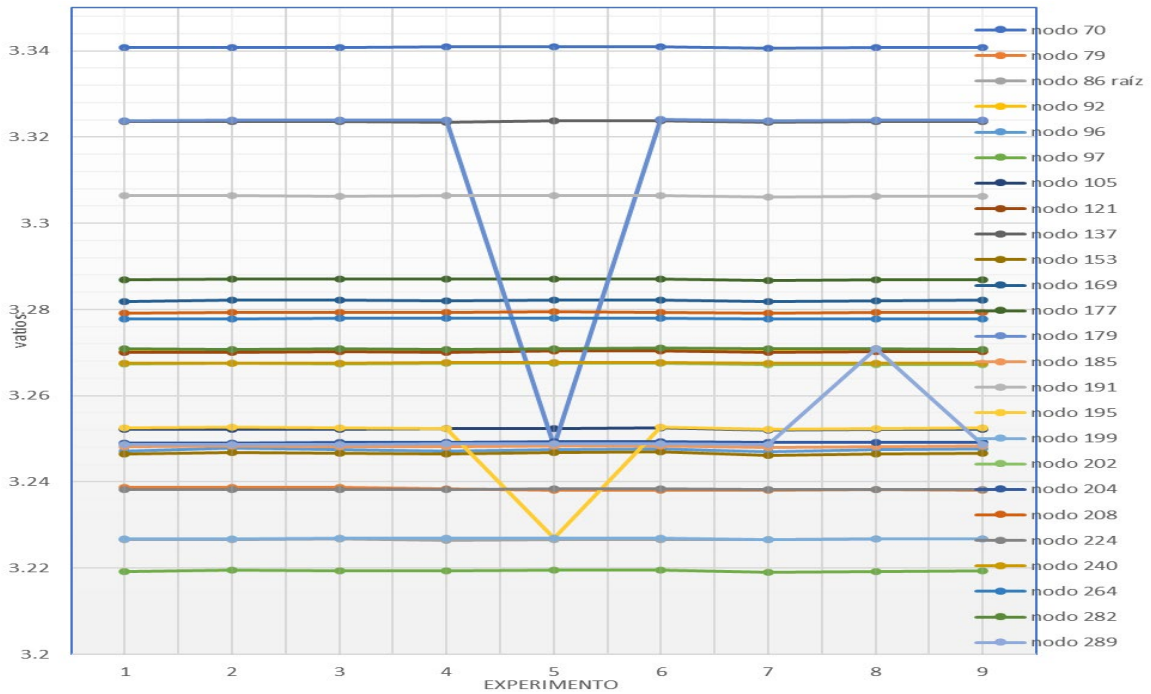


Figura 103.

Comparación del voltaje entre los nodos de la topología 4 en los experimentos para el escenario

4

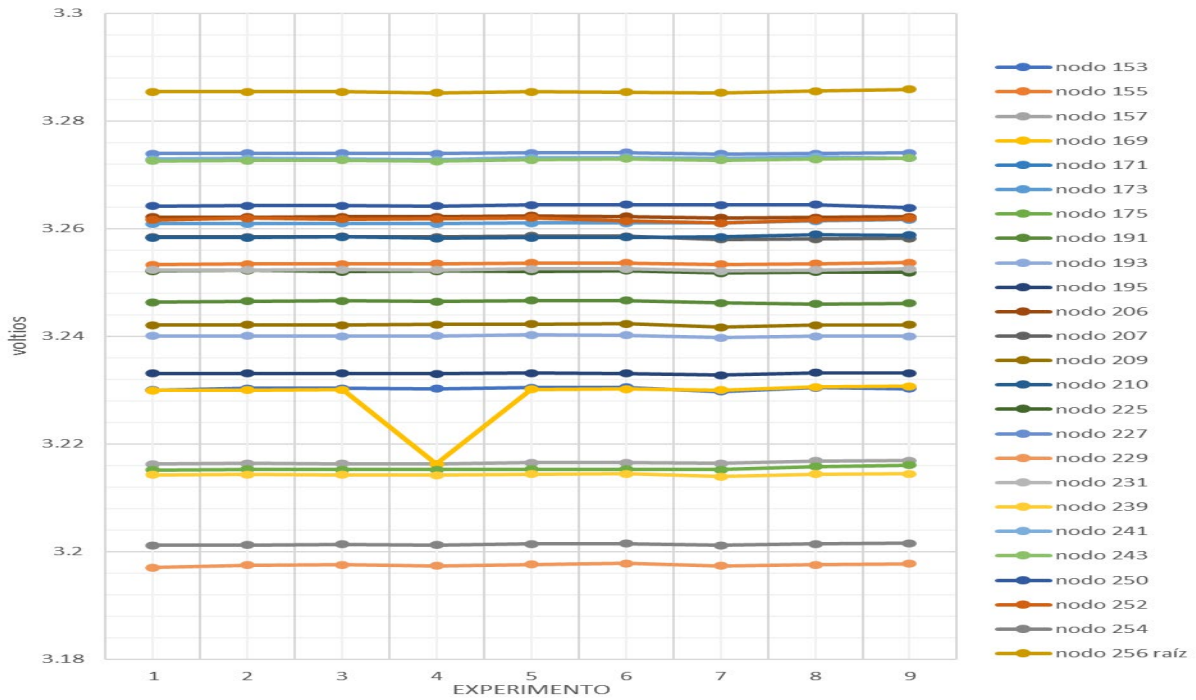


Figura 104.

Comparación del voltaje entre los nodos de la topología 5 en los experimentos para el escenario

5

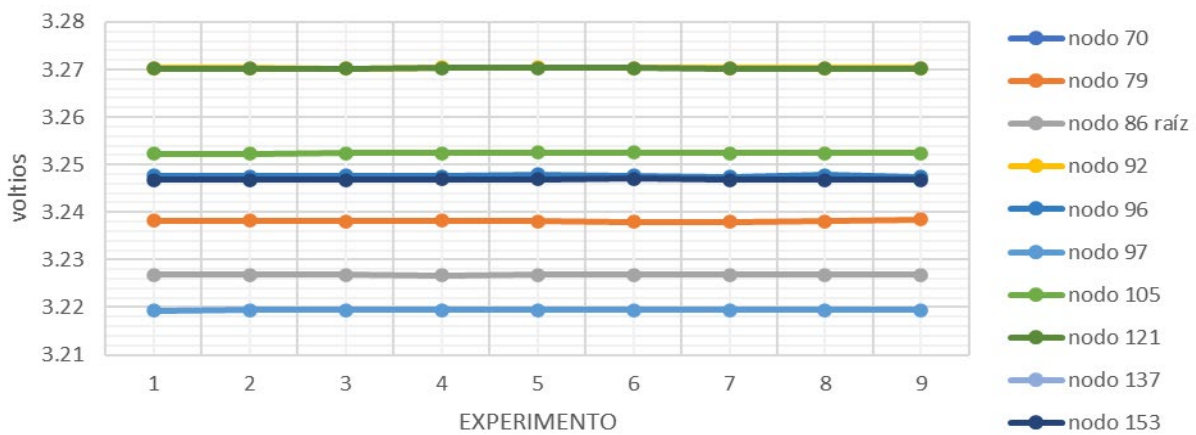


Figura 105.

Comparación del voltaje entre los nodos de la topología 6 en los experimentos para el escenario

6

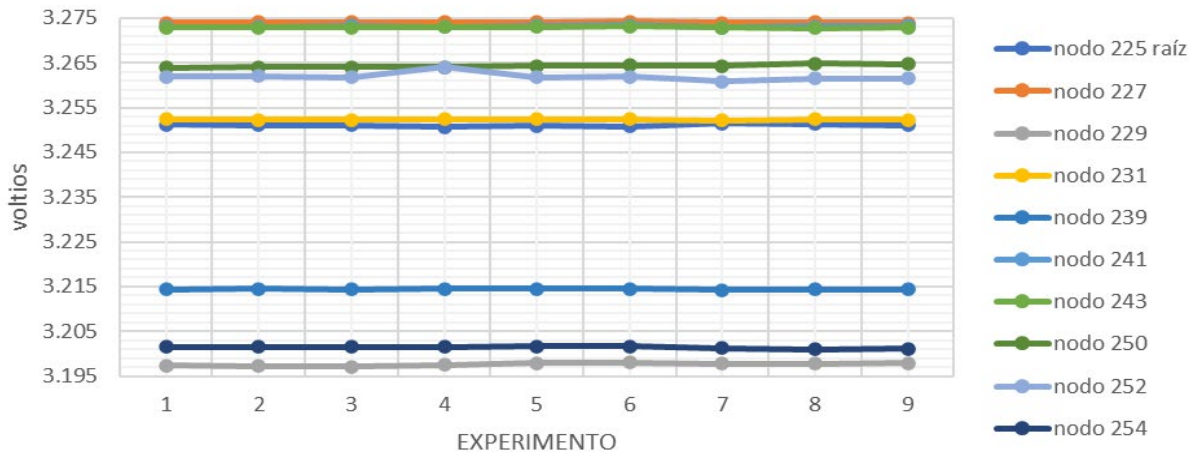


Figura 106.

Comparación del voltaje entre los nodos de la topología 7 en los experimentos para el escenario

7

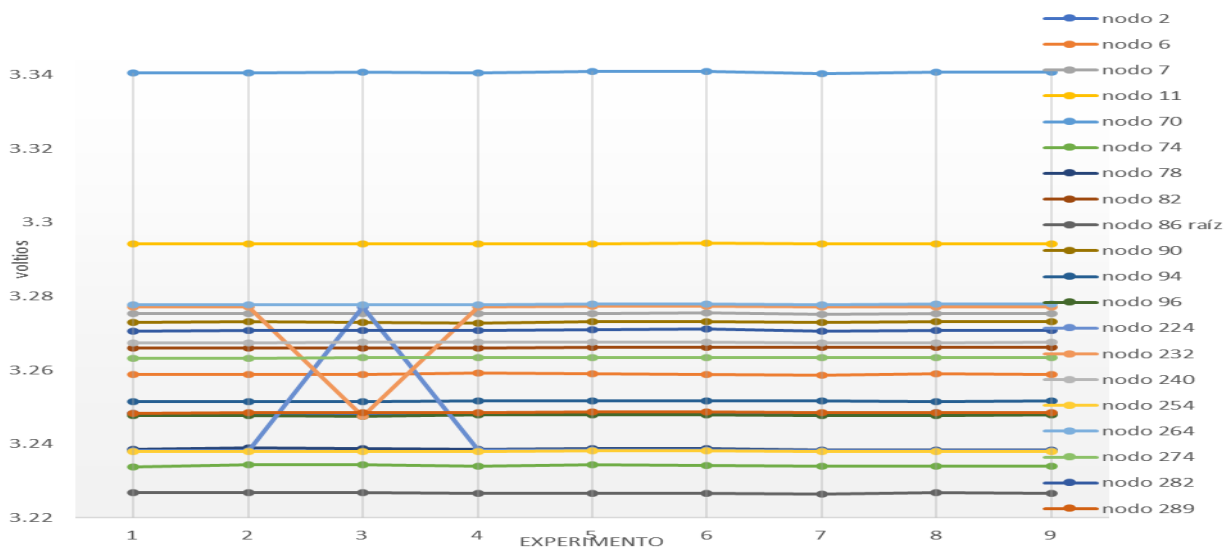
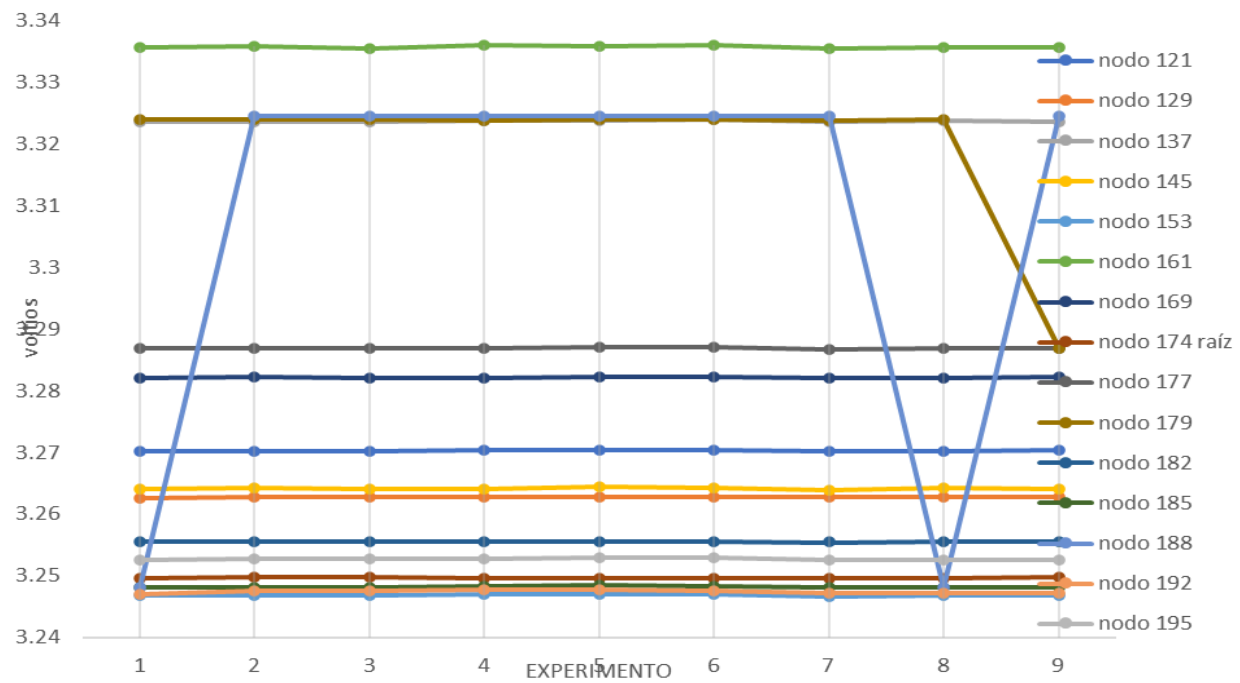


Figura 107.

Comparación del voltaje entre los nodos de la topología 8 en los experimentos para el escenario

8



Las siguientes son las gráficas de los comportamientos promedios de la corriente en cada nodo.

Figura 108.

Comparación de la corriente entre los nodos de la topología 1 en los experimentos para el escenario 1

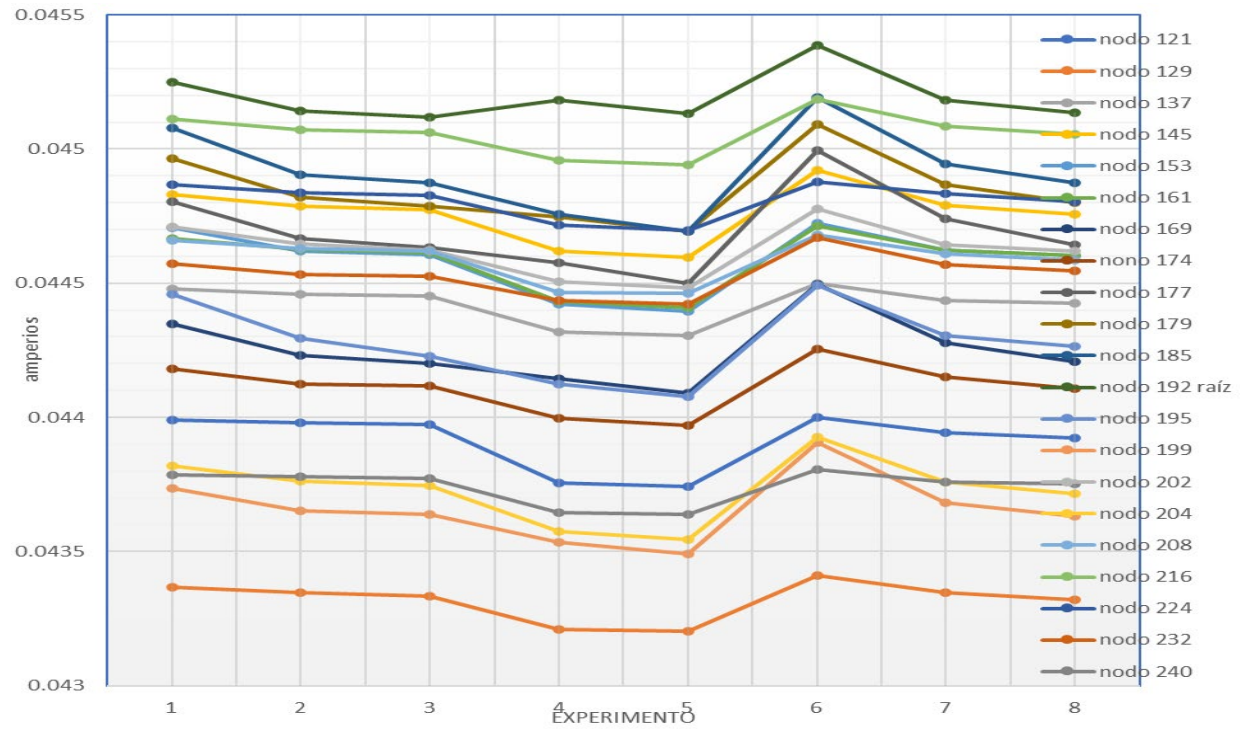


Figura 109.

Comparación de la corriente entre los nodos de la topología 2 en los experimentos para el escenario 2

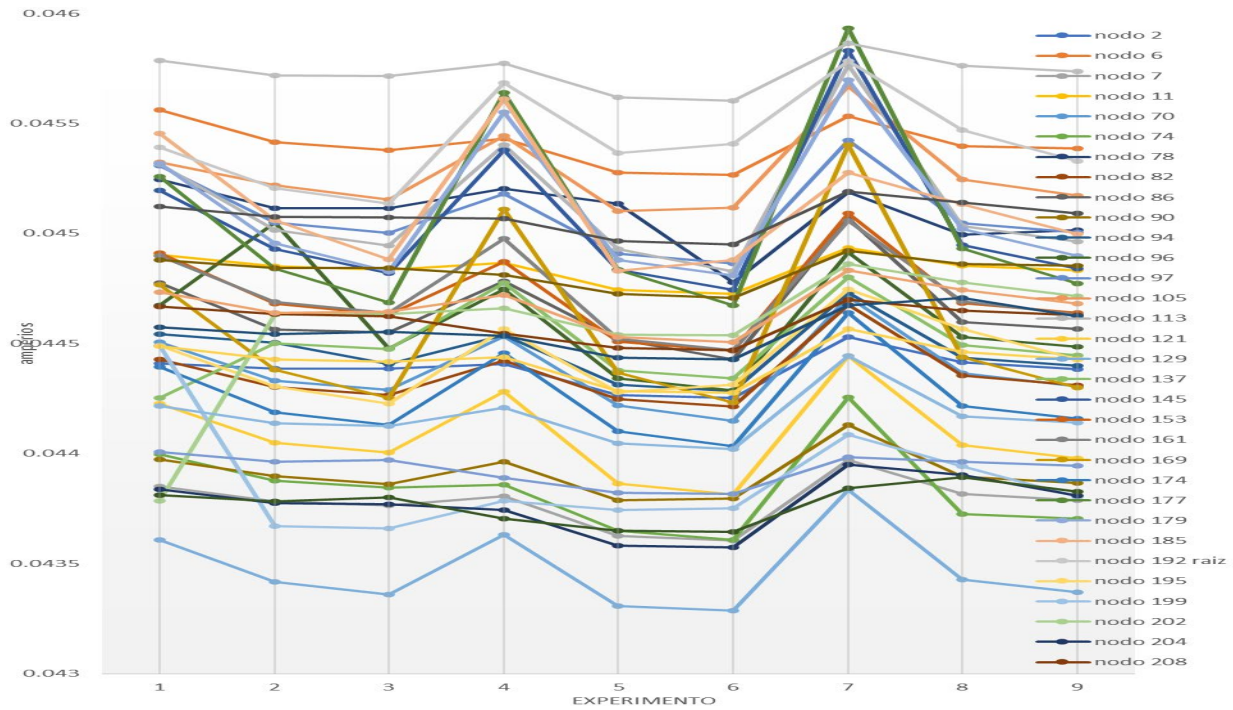


Figura 110.

Comparación de la corriente entre los nodos de la topología 3 en los experimentos para el escenario 3

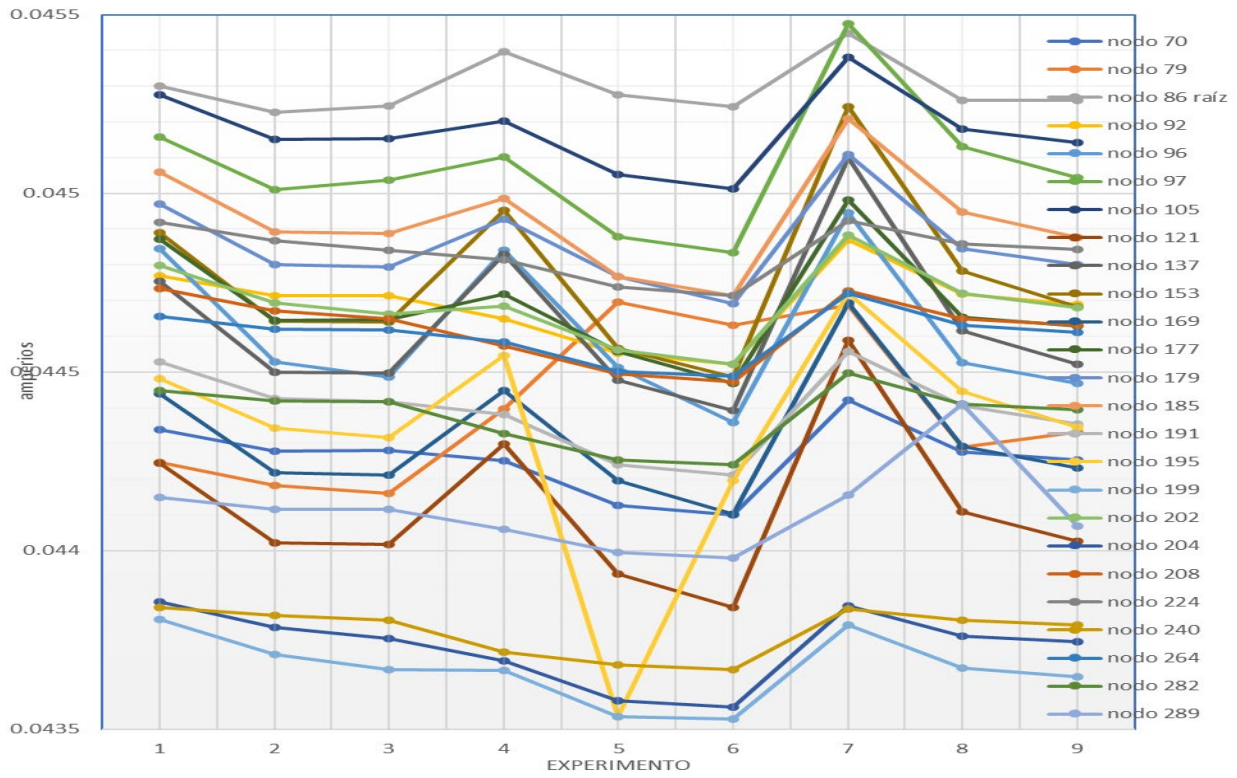
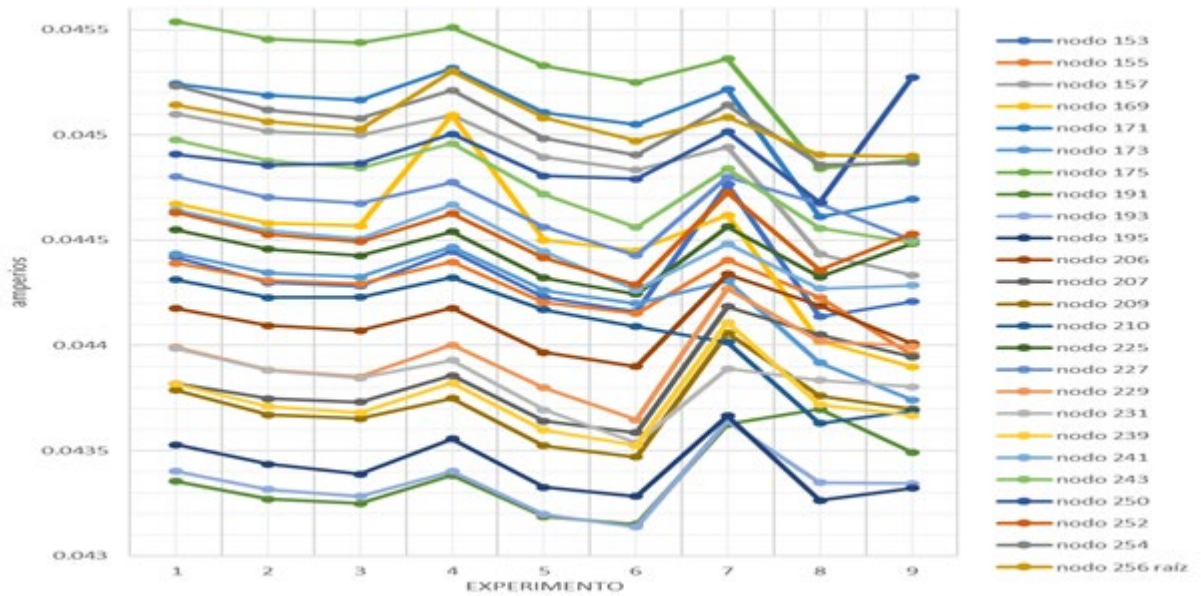


Figura 111.

Comparación de la corriente entre los nodos de la topología 4 en los experimentos para el escenario 4

**Figura 112.**

Comparación de la corriente entre los nodos de la topología 5 en los experimentos para el escenario 5

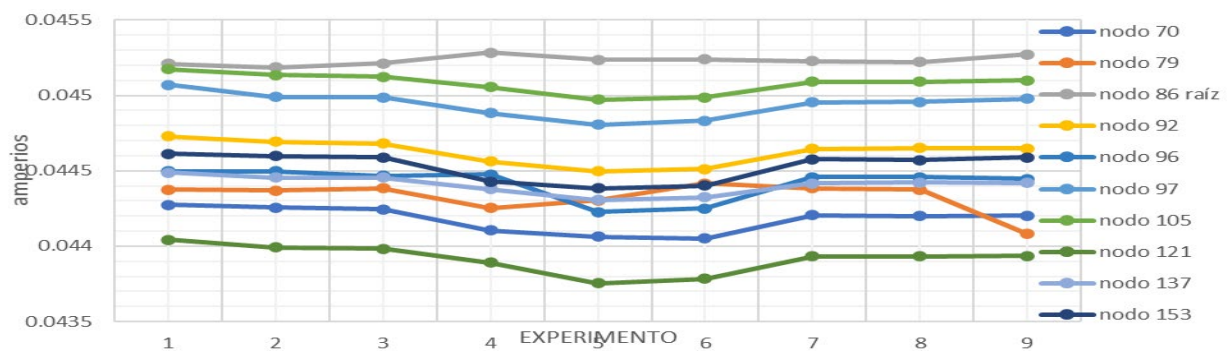


Figura 113.

Comparación de la corriente entre los nodos de la topología 6 en los experimentos para el escenario 6.

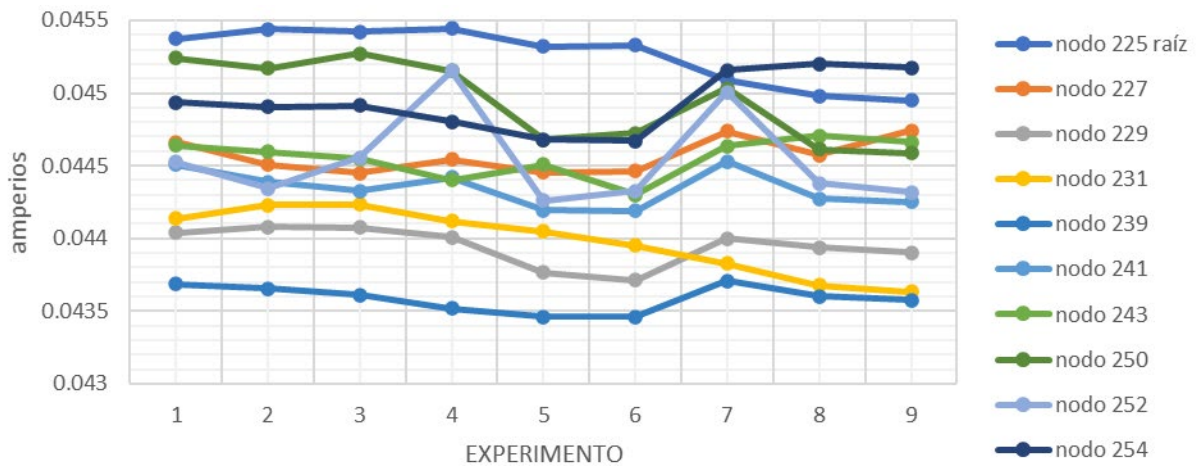
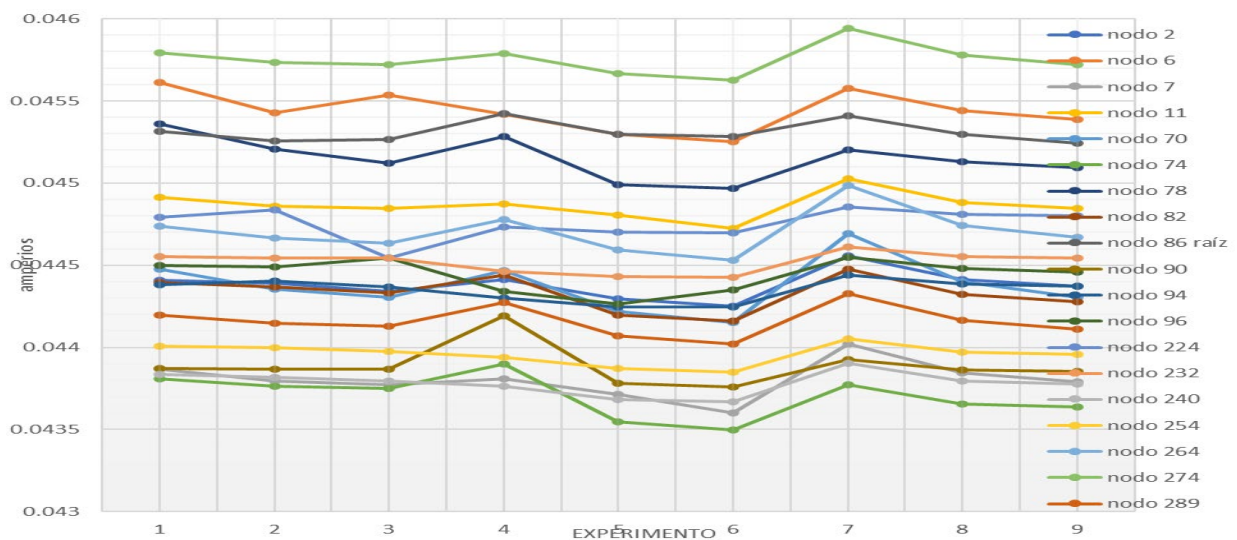


Figura 114.

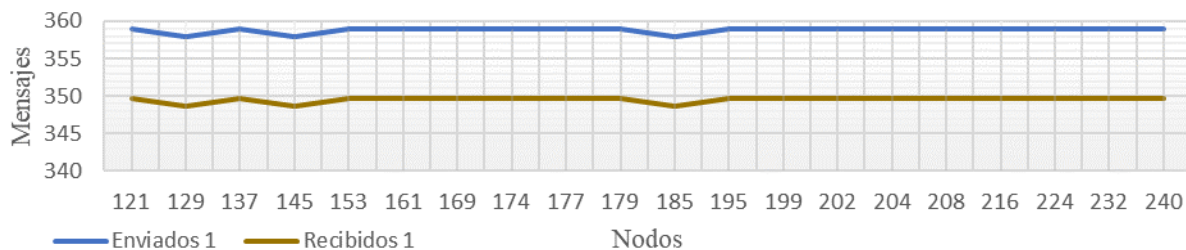
Comparación de la corriente entre los nodos de la topología 8 en los experimentos para el escenario 8



Las siguientes son las gráficas de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos, para la topología 1.

Figura 115.

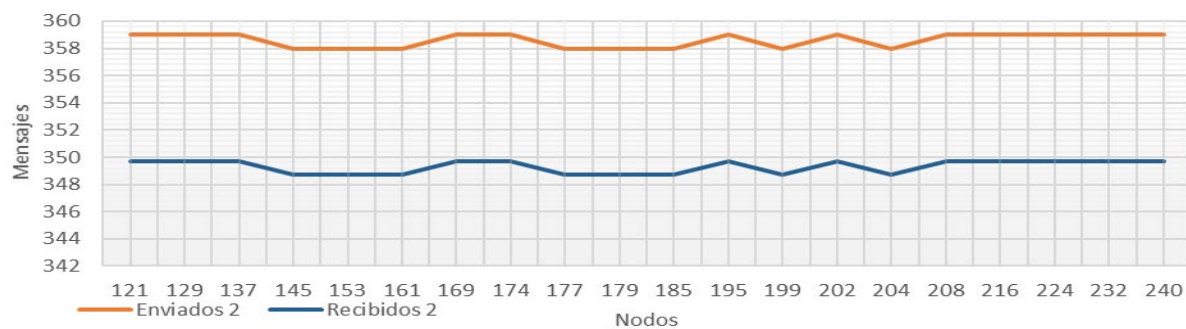
Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 1 (Escenario 1).



Nota: Tamaño del mensaje 20 bytes, tiempo entre mensajes 10 segundos, cantidad de nodos 21, y tiempo del experimento 1 hora. Porcentaje mensajes recibidos: 97.4%.

Figura 116.

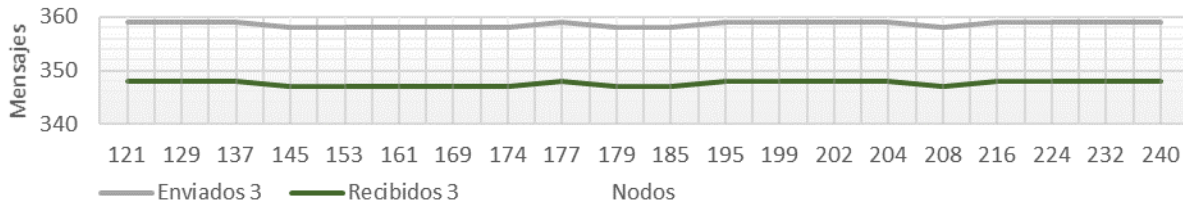
Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 1 (Escenario 2).



Nota: Tamaño del mensaje 100 bytes, tiempo entre mensajes 10 segundos, cantidad de nodos 21, y tiempo del experimento 1 hora. Porcentaje mensajes recibidos: 97.4%.

Figura 117.

Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 1 (Escenario 3).



Nota: Tamaño del mensaje 191 bytes, tiempo entre mensajes 10 segundos, cantidad de nodos 21, y tiempo del experimento 1 hora. Porcentaje mensajes recibidos: 96.9%.

Figura 118.

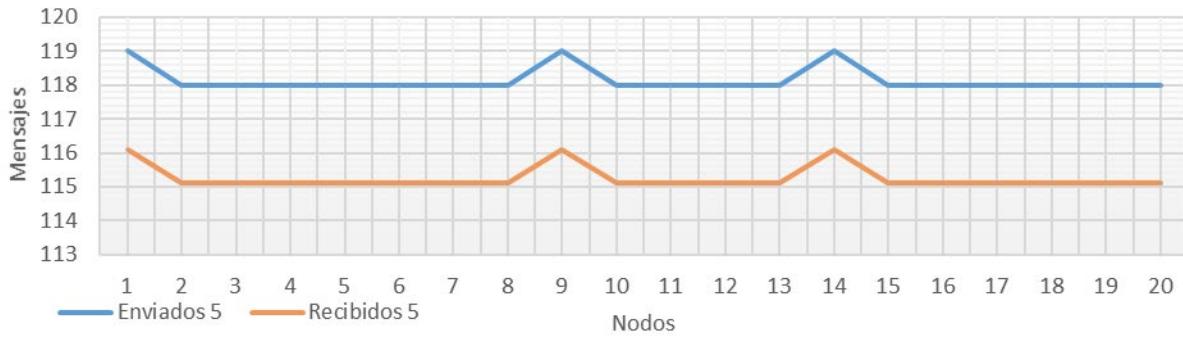
Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 1 (Escenario 4).



Nota: Tamaño del mensaje 20 bytes, tiempo entre mensajes 30 segundos, cantidad de nodos 21, y tiempo del experimento 1 hora. Porcentaje mensajes recibidos: 98.1%

Figura 119.

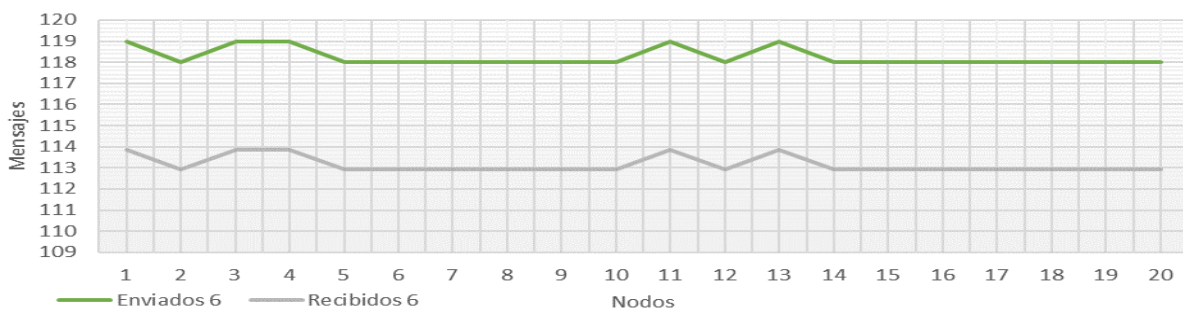
Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 1 (Escenario 5).



Nota: Tamaño del mensaje 100 bytes, tiempo entre mensajes 30 segundos, cantidad de nodos 21, y tiempo del experimento 1 hora. Porcentaje mensajes recibidos: 97.6%.

Figura 120.

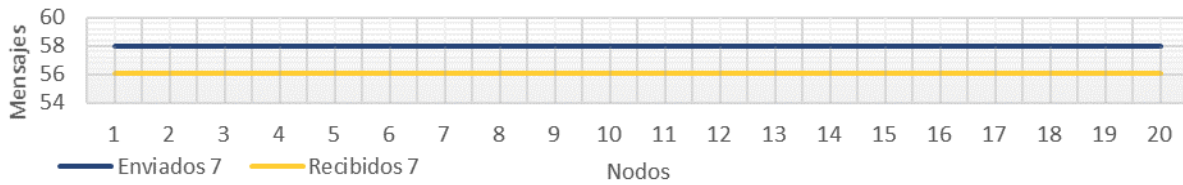
Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 1 (Escenario 6)



Nota: Tamaño del mensaje 191 bytes, tiempo entre mensajes 30 segundos, cantidad de nodos 21, y tiempo del experimento 1 hora. Porcentaje mensajes recibidos: 95.7%.

Figura 121

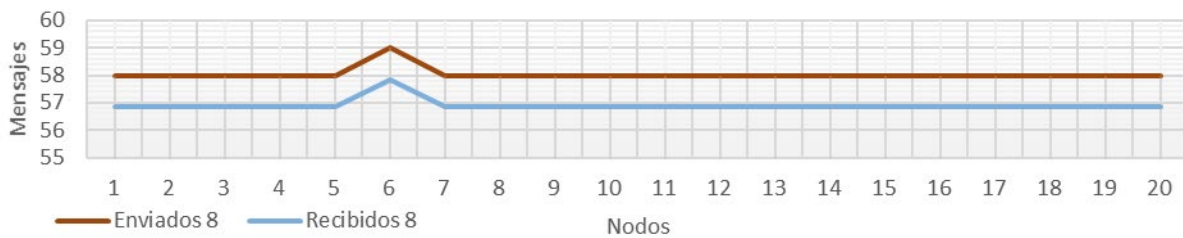
Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 1 (Escenario 7).



Nota: Tamaño del mensaje 20 bytes, tiempo entre mensajes 60 segundos, cantidad de nodos 21, y tiempo del experimento 1 hora. Porcentaje mensajes recibidos: 96.7%.

Figura 122.

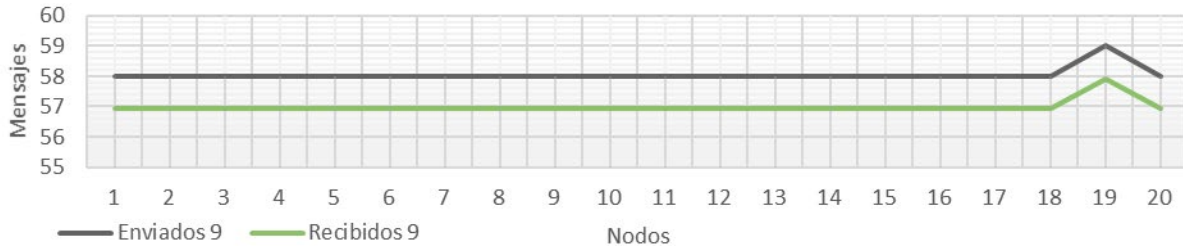
Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 1 (Escenario 8).



Nota: Tamaño del mensaje 100 bytes, tiempo entre mensajes 60 segundos, cantidad de nodos 21, y tiempo del experimento 1 hora. Porcentaje mensajes recibidos: 98.1%.

Figura 123

Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 1 (Escenario 9).

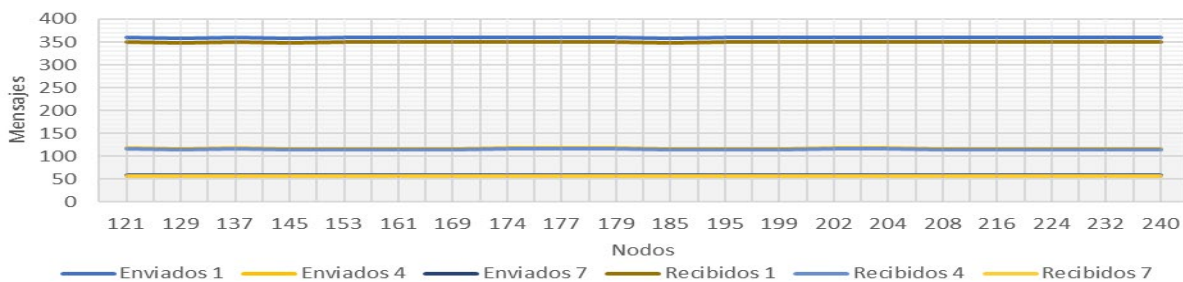


Nota: Tamaño del mensaje 191 bytes, tiempo entre mensajes 60 segundos, cantidad de nodos 21, y tiempo del experimento 1 hora. Porcentaje mensajes recibidos: 98.1%.

Las siguientes son las gráficas de comparativas de escenarios para los mensajes enviados y el estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 1.

Figura 124.

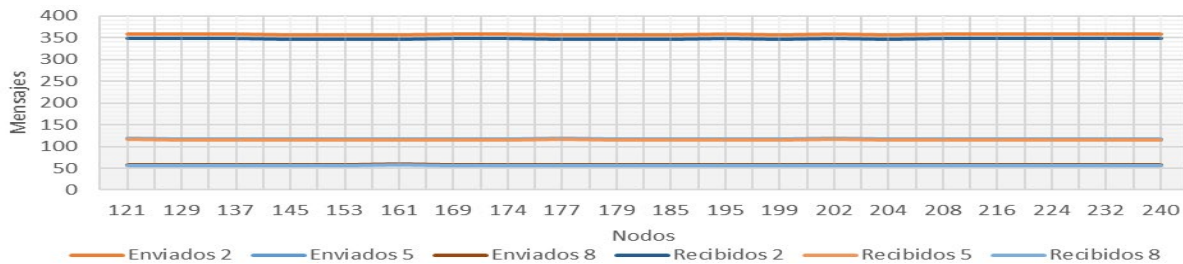
Comparación entre escenarios 1, 4 y 7 para los mensajes enviados y el estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 1.



Nota: Tamaño del mensaje 20 bytes. Cantidad de nodos 21. Tiempo del experimento 1 hora. Escenario 1: tiempo entre mensajes 10 segundos. Porcentaje mensajes recibidos: 97.4%. Escenario 4: tiempo entre mensajes 30 segundos. Porcentaje mensajes recibidos: 98.1%. Escenario 7: tiempo entre mensajes 60 segundos. Porcentaje mensajes recibidos: 96.7%.

Figura 125.

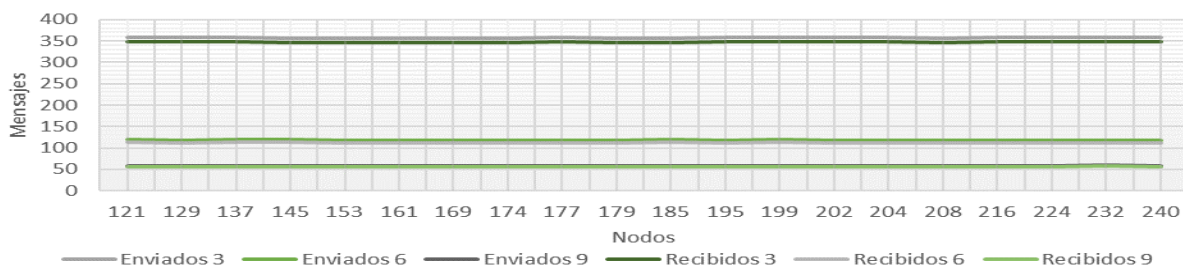
Comparación entre escenarios 2, 5 y 8 para los mensajes enviados y el estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 1.



Nota: Tamaño del mensaje 100 bytes. Cantidad de nodos 21. Tiempo del experimento 1 hora. Escenario 2: tiempo entre mensajes 10 segundos. Porcentaje mensajes recibidos: 97.4%. Escenario 5: tiempo entre mensajes 30 segundos. Porcentaje mensajes recibidos: 97.6%. Escenario 8: tiempo entre mensajes 60 segundos. Porcentaje mensajes recibidos: 98.1%.

Figura 126.

Comparación entre escenarios 3, 6 y 9 para los mensajes enviados y el estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 1.

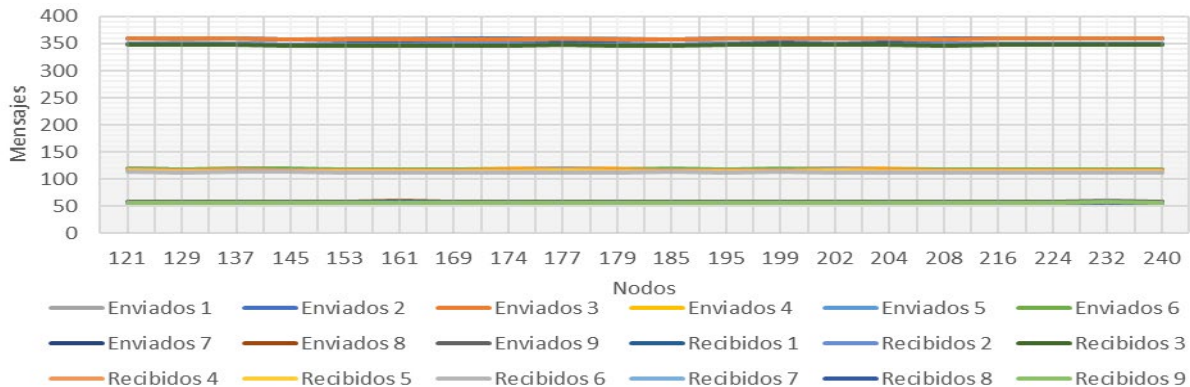


Nota: Tamaño del mensaje 191 bytes. Cantidad de nodos 21. Tiempo del experimento 1 hora. Escenario 3: tiempo entre mensajes 10 segundos. Porcentaje mensajes recibidos: 96.9%. Escenario 6: tiempo entre mensajes 30 segundos. Porcentaje mensajes recibidos: 95.7%. Escenario 9: tiempo entre mensajes 60 segundos. Porcentaje mensajes recibidos: 98.1%.

La siguiente es la gráficas de Resumen de los datos de los mensajes para los experimentos en IoT-Lab para la Topología 1.

Figura 127.

Resumen de los datos de los mensajes para los experimentos de la Topología 1 en IoT-Lab.

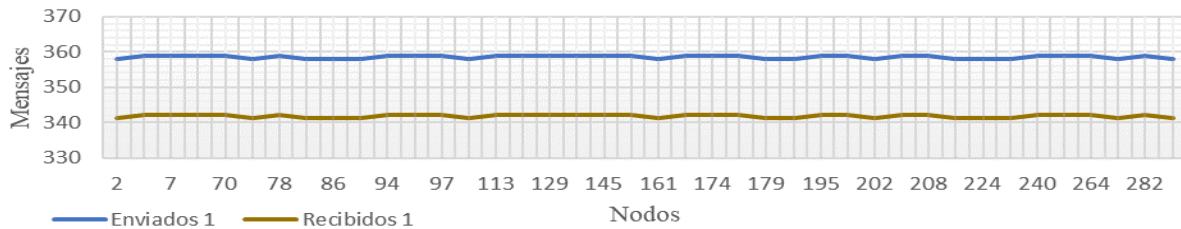


Nota: Cantidad de nodos 21. Tiempo de cada experimento: 1 hora. Tiempo entre mensajes: 10 s. Porcentaje mensajes recibidos:97.4% (escenario 1: 20 bytes), 97.4% (escenario 2: 100 bytes), 96.9% (escenario 3: 191 bytes). Tiempo entre mensajes: 30 s. Porcentaje mensajes recibidos:98.1% (escenario 4: 20 bytes), 97.6% (escenario 5: 100 bytes), 95.7% (escenario 6: 192 bytes). Tiempo entre mensajes: 60 s. Porcentaje mensajes recibidos:96.7% (escenario 7: 20 bytes), 98.1% (escenario 8: 100 bytes), 98.1% (escenario 9: 192 bytes).

Las siguientes son las gráficas de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 2 para los diversos escenarios.

Figura 128.

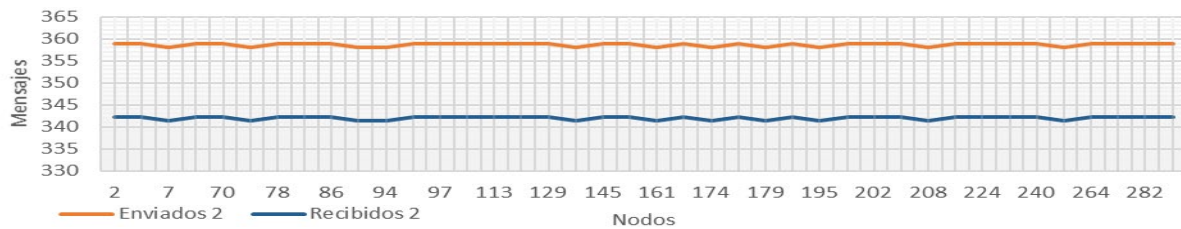
Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 2 (Escenario 1).



Nota: Tamaño del mensaje 20 bytes, tiempo entre mensajes 10 segundos, cantidad de nodos 41, y tiempo del experimento 1 hora. Porcentaje mensajes recibidos: 97.4%.

Figura 129.

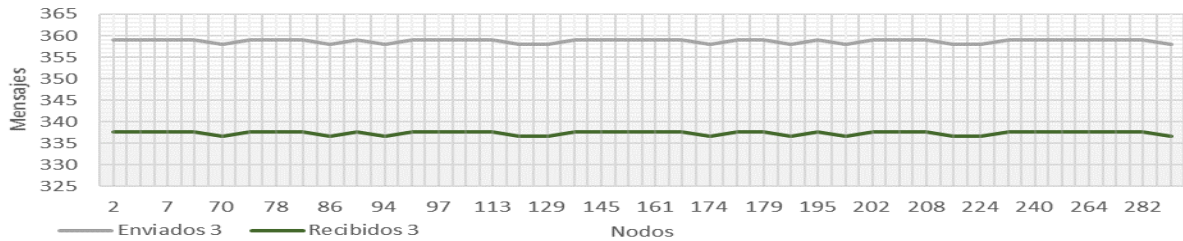
Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 2 (Escenario 2).



Nota: Tamaño del mensaje 100 bytes, tiempo entre mensajes 10 segundos, cantidad de nodos 41, y tiempo del experimento 1 hora. Porcentaje mensajes recibidos: 97.4%.

Figura 130.

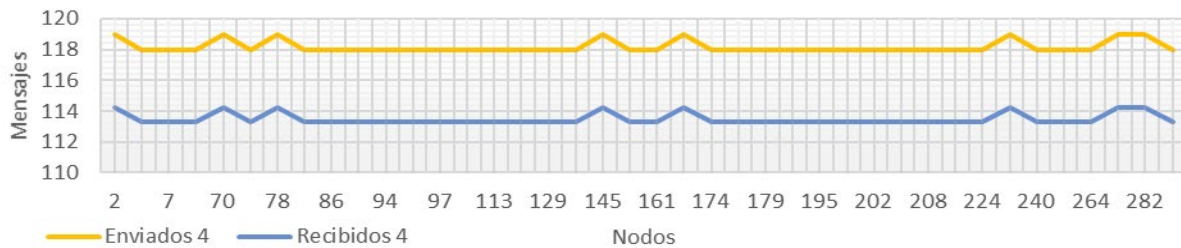
Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 2 (Escenario 3).



Nota: Tamaño del mensaje 191 bytes, tiempo entre mensajes 10 segundos, cantidad de nodos 41, y tiempo del experimento 1 hora. Porcentaje mensajes recibidos: 96.9%

Figura 131.

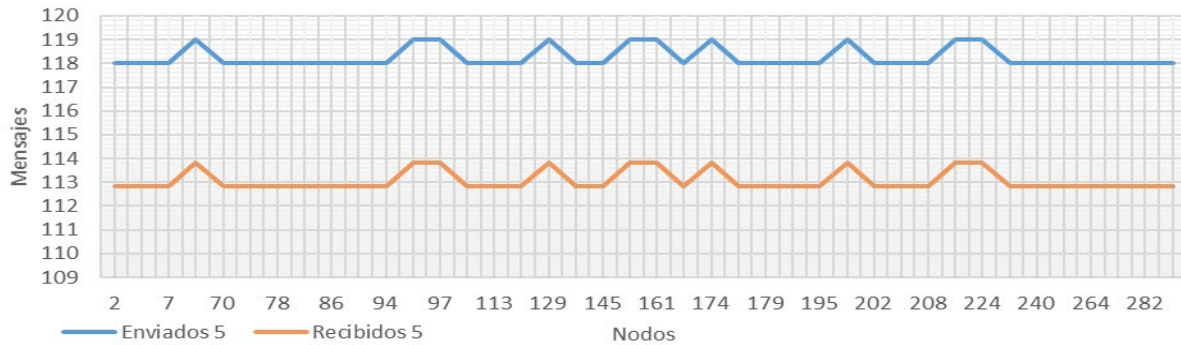
Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 2 (Escenario 4).



Nota: Tamaño del mensaje 20 bytes, tiempo entre mensajes 30 segundos, cantidad de nodos 41, y tiempo del experimento 1 hora. Porcentaje mensajes recibidos: 98.1%

Figura 132.

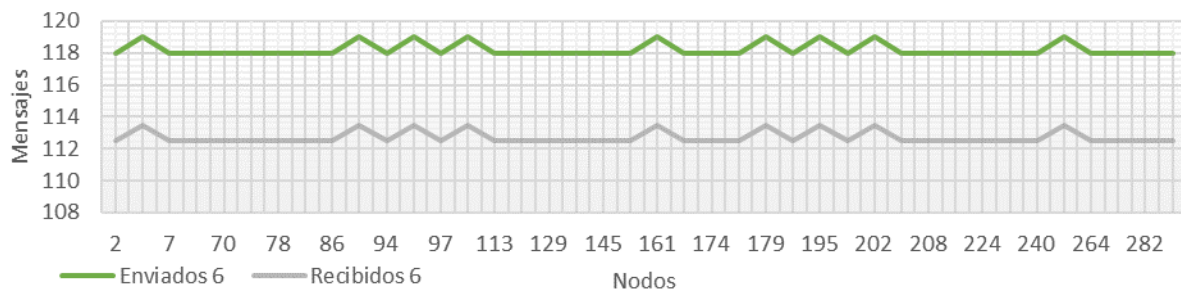
Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 2 (Escenario 5).



Nota: Tamaño del mensaje 100 bytes, tiempo entre mensajes 30 segundos, cantidad de nodos 41, y tiempo del experimento 1 hora. Porcentaje mensajes recibidos: 97.6%

Figura 133.

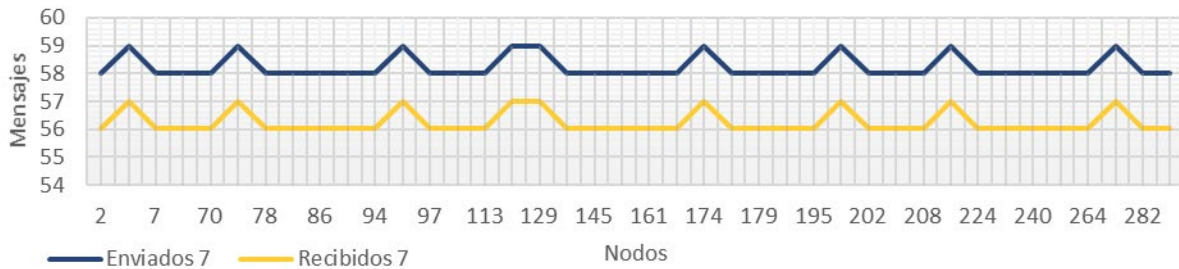
Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 2 (Escenario 6).



Nota: Tamaño del mensaje 191 bytes, tiempo entre mensajes 30 segundos, cantidad de nodos 41, y tiempo del experimento 1 hora. Porcentaje mensajes recibidos: 95.7%

Figura 134.

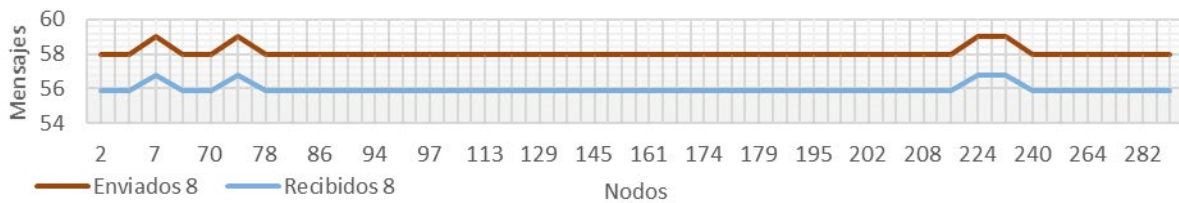
Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 2 (Escenario 7).



Nota: Tamaño del mensaje 20 bytes, tiempo entre mensajes 60 segundos, cantidad de nodos 41, y tiempo del experimento 1 hora. Porcentaje mensajes recibidos: 96.7%

Figura 135.

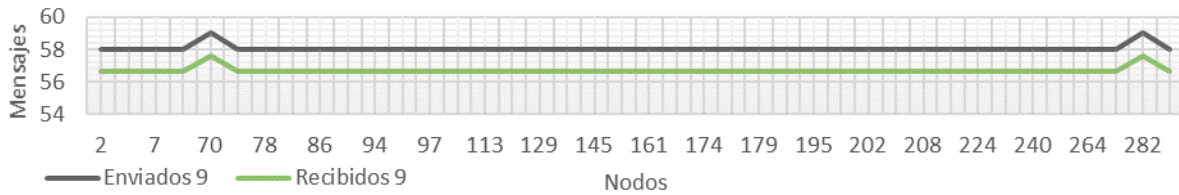
Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 2 (Escenario 8).



Nota: Tamaño del mensaje 100 bytes, tiempo entre mensajes 60 segundos, cantidad de nodos 41, y tiempo del experimento 1 hora. Porcentaje mensajes recibidos: 98.1%.

Figura 136.

Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 2 (Escenario 9).

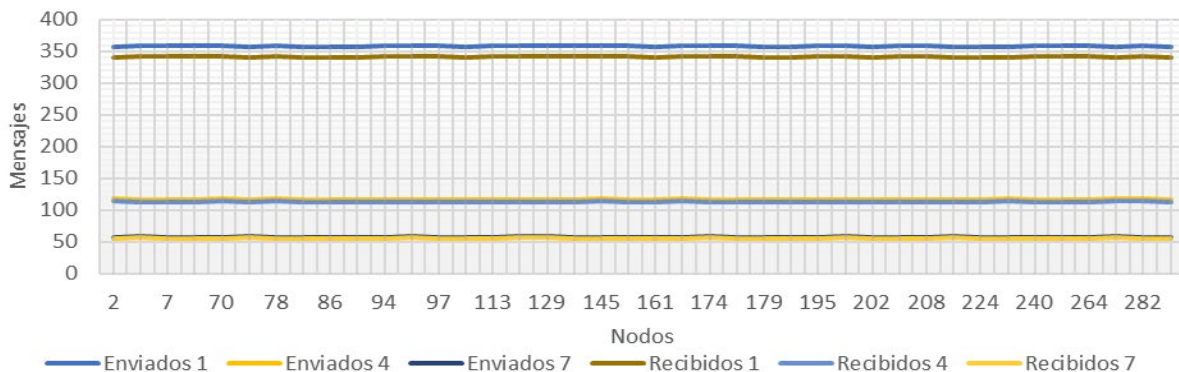


Nota: Tamaño del mensaje 191 bytes, tiempo entre mensajes 60 segundos, cantidad de nodos 41, y tiempo del experimento 1 hora. Porcentaje mensajes recibidos: 98.1%.

Las siguientes son las gráficas de comparativas de escenarios para los mensajes enviados y el estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 2.

Figura 137.

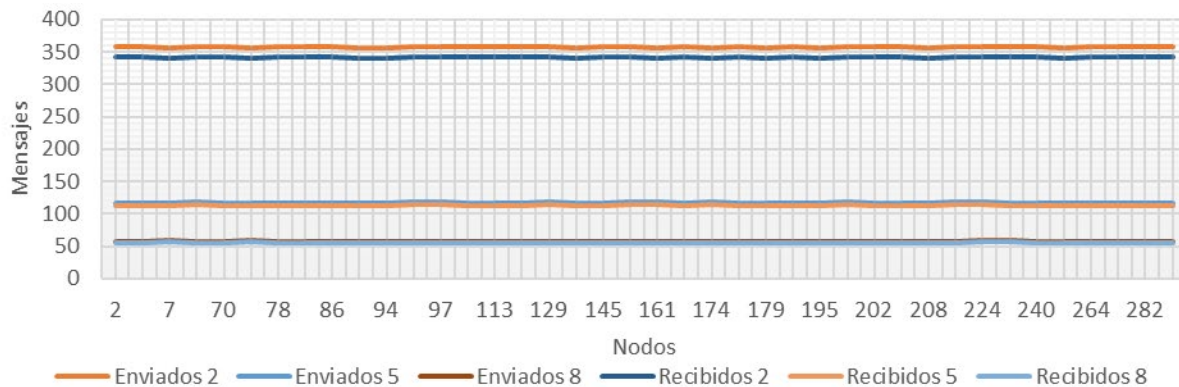
Comparación entre escenarios 1, 4 y 7 para los mensajes enviados y el estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 2.



Nota: Tamaño del mensaje 20 bytes. Cantidad de nodos 41. Tiempo del experimento 1 hora. Escenario 1: tiempo entre mensajes 10 segundos. Porcentaje mensajes recibidos: 97.4%. Escenario 4: tiempo entre mensajes 30 segundos. Porcentaje mensajes recibidos: 98.1%. Escenario 7: tiempo entre mensajes 60 segundos. Porcentaje mensajes recibidos: 96.7%.

Figura 138.

Comparación entre escenarios 2, 5 y 8 para los mensajes enviados y el estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 2.



Nota: Tamaño del mensaje 100 bytes. Cantidad de nodos 41. Tiempo del experimento 1 hora. Escenario 2: tiempo entre mensajes 10 segundos. Porcentaje mensajes recibidos: 97.4%. Escenario 5: tiempo entre mensajes 30 segundos. Porcentaje mensajes recibidos: 97.6%. Escenario 8: tiempo entre mensajes 60 segundos. Porcentaje mensajes recibidos: 98.1%.

Figura 139.

Comparación entre escenarios 3, 6 y 9 para los mensajes enviados y el estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 2.

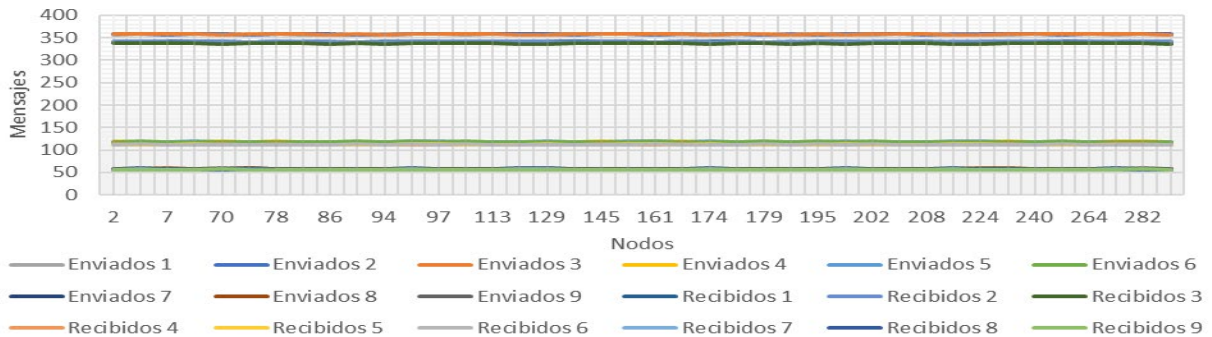


Nota: Tamaño del mensaje 191 bytes. Cantidad de nodos 41. Tiempo del experimento 1 hora. Escenario 3: tiempo entre mensajes 10 segundos. Porcentaje mensajes recibidos: 96.9%. Escenario 6: tiempo entre mensajes 30 segundos. Porcentaje mensajes recibidos: 95.7%. Escenario 9: tiempo entre mensajes 60 segundos. Porcentaje mensajes recibidos: 98.1%.

La siguiente es la gráfica de Resumen de los datos de los mensajes para los experimentos en IoT-Lab para la Topología 2.

Figura 140.

Resumen de los datos de los mensajes para los experimentos de la topología 2 en IoT-Lab.

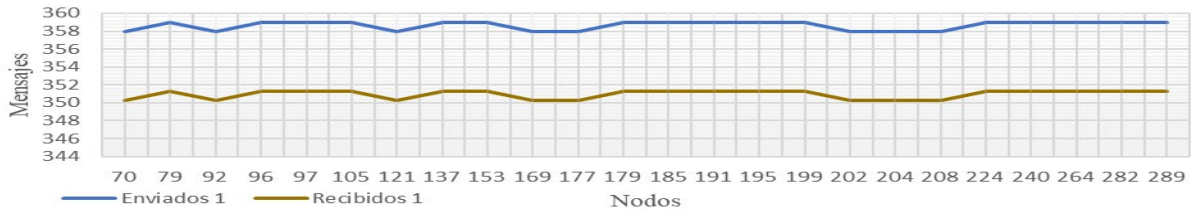


Nota: Cantidad de nodos 41. Tiempo de cada experimento: 1 hora. Tiempo entre mensajes: 10 s. Porcentaje mensajes recibidos: 97.4% (escenario 1: 20 bytes), 97.4% (escenario 2: 100 bytes), 96.9% (escenario 3: 191 bytes). Tiempo entre mensajes: 30 s. Porcentaje mensajes recibidos: 98.1% (escenario 4: 20 bytes), 97.6% (escenario 5: 100 bytes), 95.7% (escenario 6: 192 bytes). Tiempo entre mensajes: 60 s. Porcentaje mensajes recibidos: 96.7% (escenario 7: 20 bytes), 98.1% (escenario 8: 100 bytes), 98.1% (escenario 9: 192 bytes).

Las siguientes son las gráficas de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos, en las gráficas se puede observar cada una de las pruebas que se realizaron en la topología 3.

Figura 141.

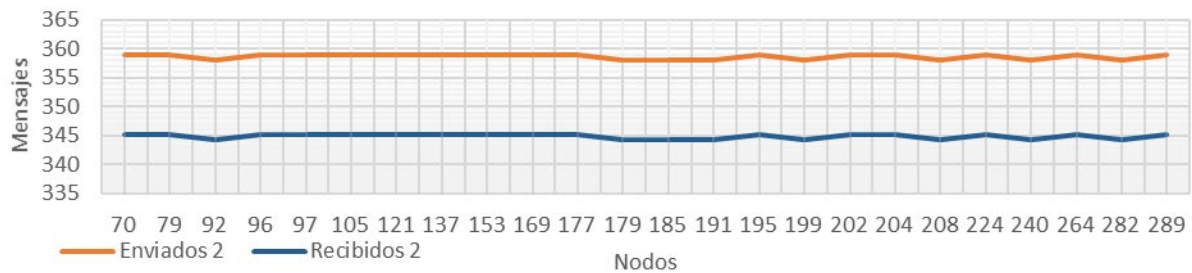
Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 3 (Escenario 1).



Nota: Tamaño del mensaje 20 bytes, tiempo entre mensajes 10 segundos, cantidad de nodos 25, y tiempo del experimento 1 hora. Porcentaje mensajes recibidos: 97.4%.

Figura 142.

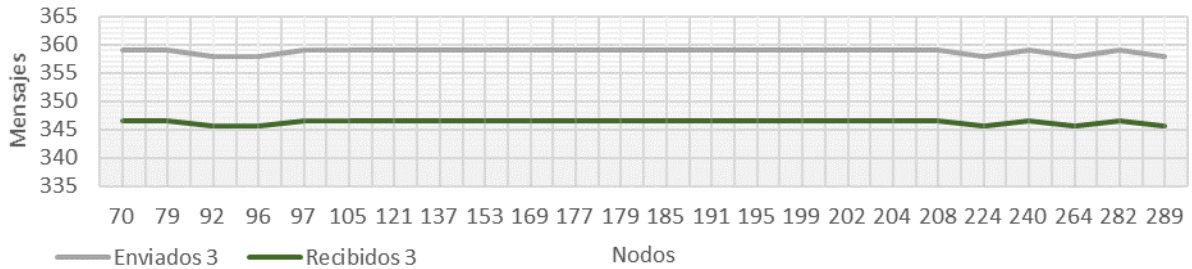
Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 3 (Escenario 2).



Nota: Tamaño del mensaje 100 bytes, tiempo entre mensajes 10 segundos, cantidad de nodos 25, y tiempo del experimento 1 hora. Porcentaje mensajes recibidos: 97.4%.

Figura 143.

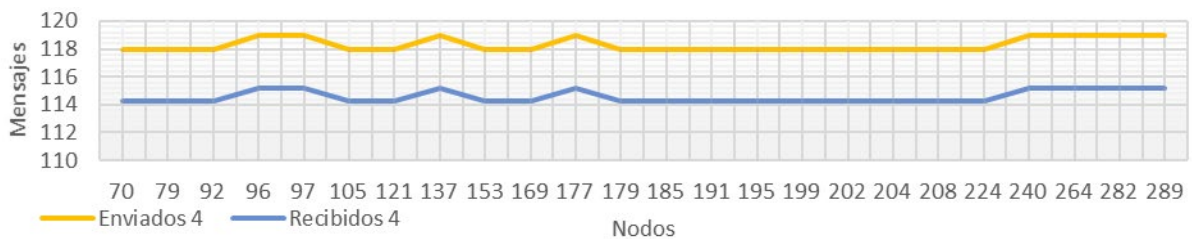
Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 3 (Escenario 3).



Nota: Tamaño del mensaje 191 bytes, tiempo entre mensajes 10 segundos, cantidad de nodos 25, y tiempo del experimento 1 hora. Porcentaje mensajes recibidos: 96.9%

Figura 144.

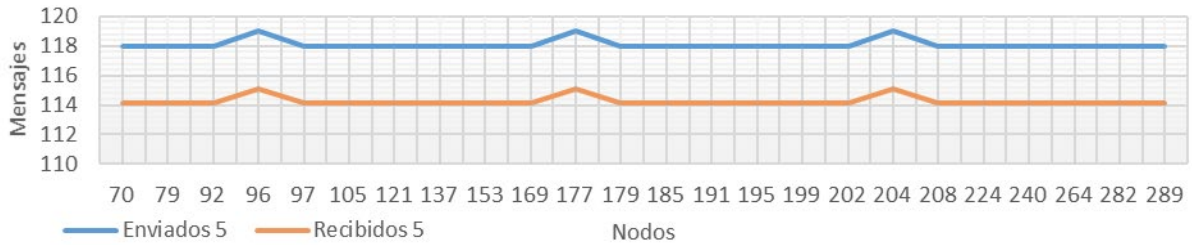
Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 3 (Escenario 4).



Nota: Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 3 (Escenario 4).

Figura 145.

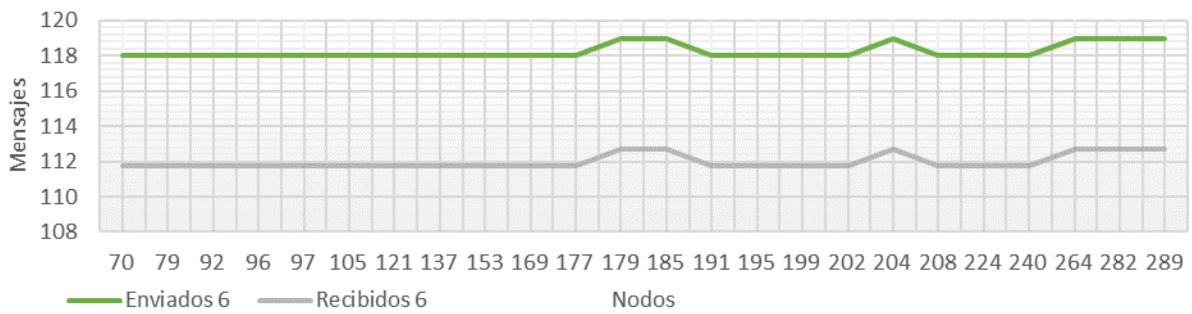
Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 3 (Escenario 5).



Nota: Tamaño del mensaje 100 bytes, tiempo entre mensajes 30 segundos, cantidad de nodos 25, y tiempo del experimento 1 hora. Porcentaje mensajes recibidos: 97.6%

Figura 146.

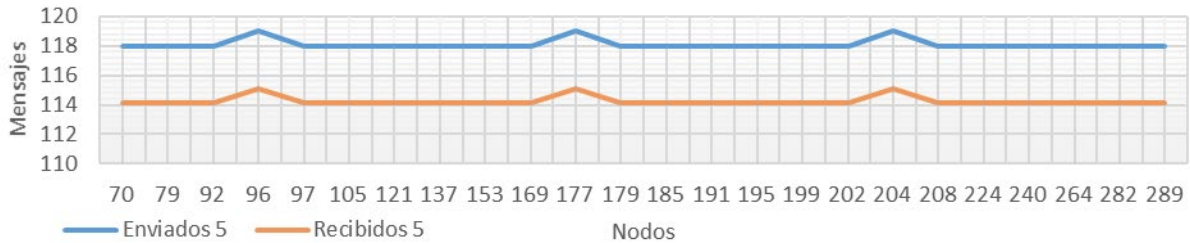
Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 3 (Escenario 6).



Nota: Tamaño del mensaje 191 bytes, tiempo entre mensajes 30 segundos, cantidad de nodos 25, y tiempo del experimento 1 hora. Porcentaje mensajes recibidos: 95.7%

Figura 147.

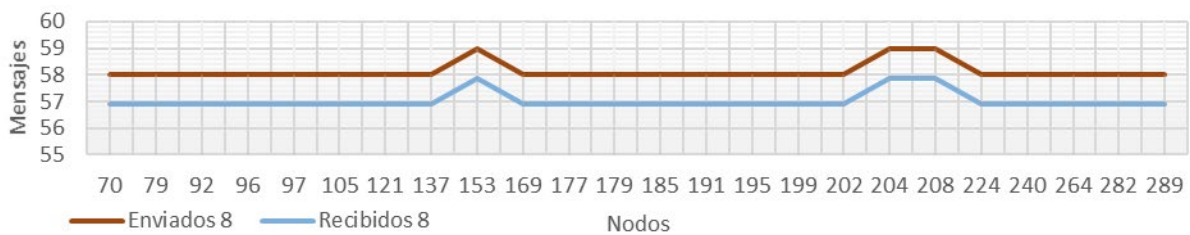
Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 3 (Escenario 8).



Nota: Tamaño del mensaje 100 bytes, tiempo entre mensajes 60 segundos, cantidad de nodos 25, y tiempo del experimento 1 hora. Porcentaje mensajes recibidos: 98.1%.

Figura 148.

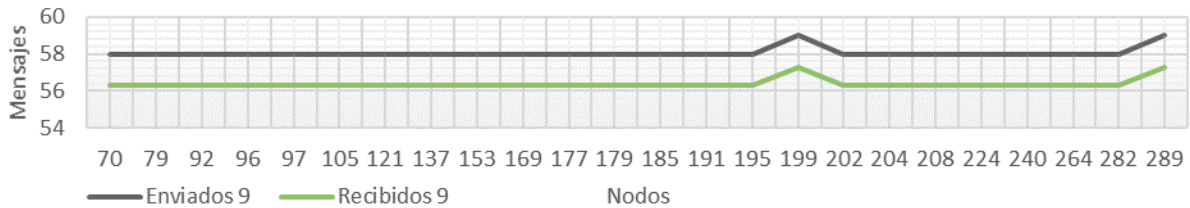
Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 3 (Escenario 8).



Nota: Tamaño del mensaje 100 bytes, tiempo entre mensajes 60 segundos, cantidad de nodos 25, y tiempo del experimento 1 hora. Porcentaje mensajes recibidos: 98.1%.

Figura 149.

Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 3 (Escenario 9).

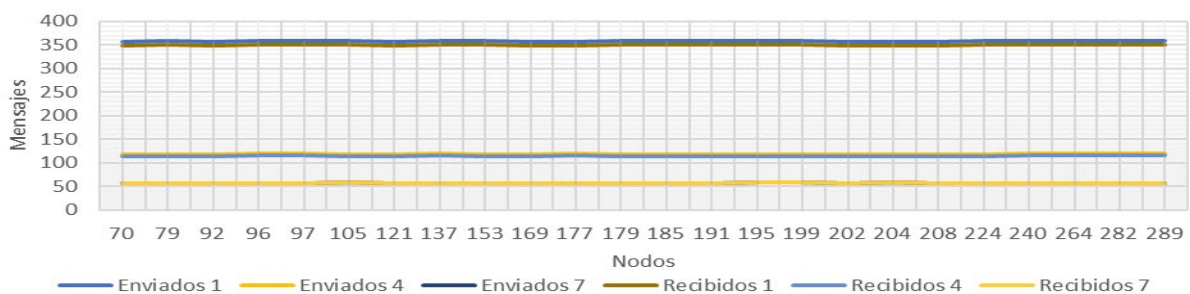


Nota: Tamaño del mensaje 191 bytes, tiempo entre mensajes 60 segundos, cantidad de nodos 25, y tiempo del experimento 1 hora. Porcentaje mensajes recibidos: 98.1%.

Las siguientes son las gráficas de comparativas de escenarios para los mensajes enviados y el estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 1.

Figura 150.

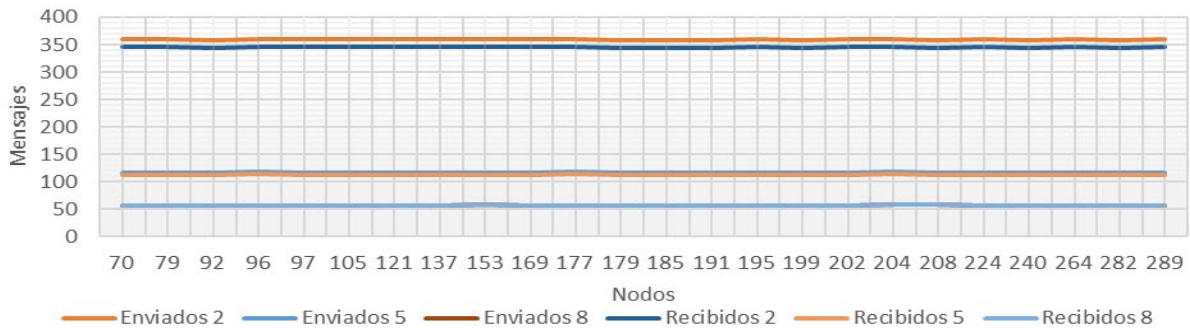
Comparación entre escenarios 1, 4 y 7 para los mensajes enviados y el estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 3.



Nota: Tamaño del mensaje 20 bytes. Cantidad de nodos 25. Tiempo del experimento 1 hora. Escenario 1: tiempo entre mensajes 10 segundos. Porcentaje mensajes recibidos: 97.4%. Escenario 4: tiempo entre mensajes 30 segundos. Porcentaje mensajes recibidos: 98.1%. Escenario 7: tiempo entre mensajes 60 segundos. Porcentaje mensajes recibidos: 96.7%.

Figura 151.

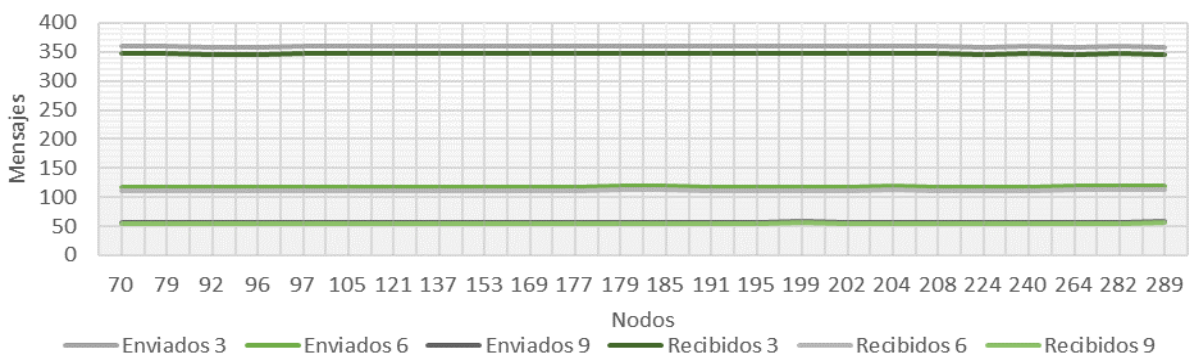
Comparación entre escenarios 2, 5 y 8 para los mensajes enviados y el estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 3.



Nota: Tamaño del mensaje 100 bytes. Cantidad de nodos 25. Tiempo del experimento 1 hora. Escenario 2: tiempo entre mensajes 10 segundos. Porcentaje mensajes recibidos: 97.4%. Escenario 5: tiempo entre mensajes 30 segundos. Porcentaje mensajes recibidos: 97.6%. Escenario 8: tiempo entre mensajes 60 segundos. Porcentaje mensajes recibidos: 98.1%.

Figura 152.

Comparación entre escenarios 3, 6 y 9 para los mensajes enviados y el estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 3.

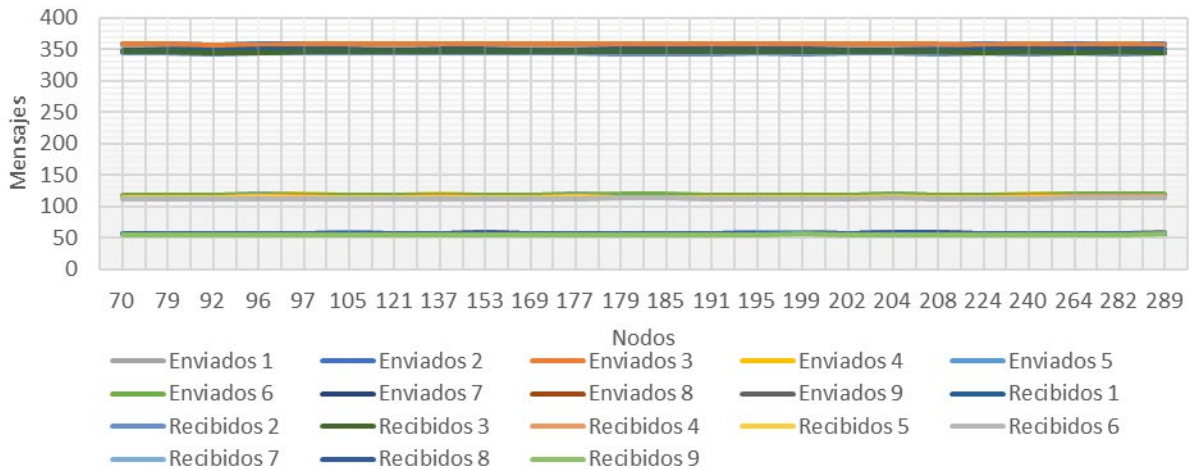


Nota: Tamaño del mensaje 191 bytes. Cantidad de nodos 25. Tiempo del experimento 1 hora. Escenario 3: tiempo entre mensajes 10 segundos. Porcentaje mensajes recibidos: 96.9%. Escenario 6: tiempo entre mensajes 30 segundos. Porcentaje mensajes recibidos: 95.7%. Escenario 9: tiempo entre mensajes 60 segundos. Porcentaje mensajes recibidos: 98.1%.

La siguiente es la gráfica de Resumen de los datos de los mensajes para los experimentos en IoT-Lab para la Topología 3.

Figura 153.

Resumen de los datos de los mensajes para los experimentos de la topología 3 en IoT-Lab.

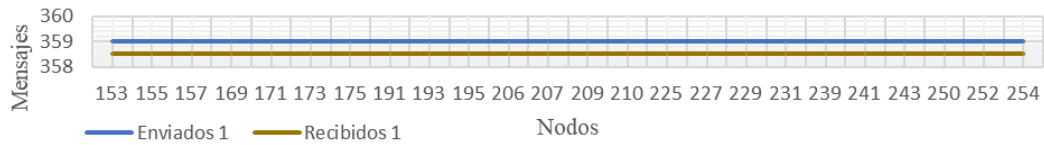


Nota: Cantidad de nodos 25. Tiempo de cada experimento: 1 hora. Tiempo entre mensajes: 10 s. Porcentaje mensajes recibidos: 97.4% (escenario 1: 20 bytes), 97.4% (escenario 2: 100 bytes), 96.9% (escenario 3: 191 bytes). Tiempo entre mensajes: 30 s. Porcentaje mensajes recibidos: 98.1% (escenario 4: 20 bytes), 97.6% (escenario 5: 100 bytes), 95.7% (escenario 6: 192 bytes). Tiempo entre mensajes: 60 s. Porcentaje mensajes recibidos: 96.7% (escenario 7: 20 bytes), 98.1% (escenario 8: 100 bytes), 98.1% (escenario 9: 192 bytes).

Las siguientes son las gráficas de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 4.

Figura 154.

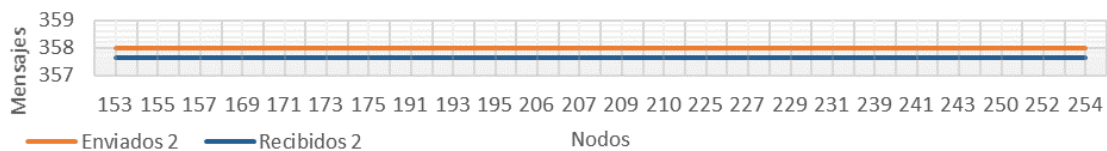
Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 4 (Escenario 1).



Nota: Tamaño del mensaje 20 bytes, tiempo entre mensajes 10 segundos, cantidad de nodos 25, y tiempo del experimento 1 hora. Porcentaje mensajes recibidos: 97.4%.

Figura 155.

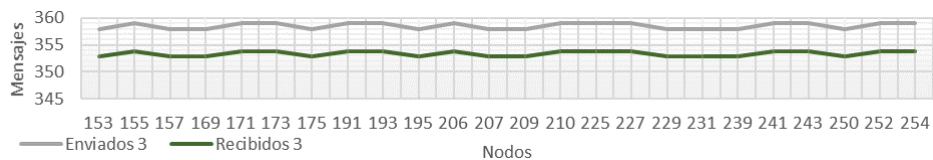
Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 4 (Escenario 2).



Nota: Tamaño del mensaje 100 bytes, tiempo entre mensajes 10 segundos, cantidad de nodos 25, y tiempo del experimento 1 hora. Porcentaje mensajes recibidos: 97.4%.

Figura 156.

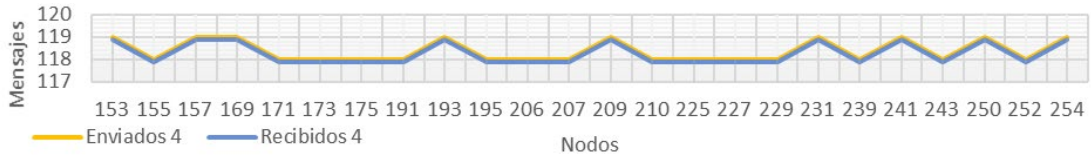
Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 4 (Escenario 3).



Nota: Tamaño del mensaje 191 bytes, tiempo entre mensajes 10 segundos, cantidad de nodos 25, y tiempo del experimento 1 hora. Porcentaje mensajes recibidos: 96.9%

Figura 157.

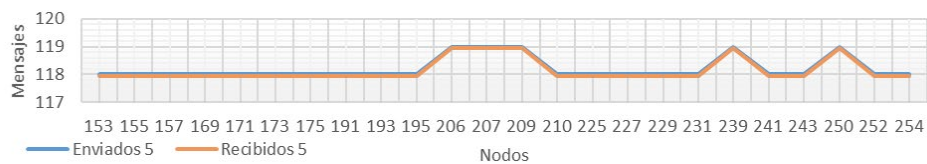
Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 4 (Escenario 4).



Nota: Tamaño del mensaje 20 bytes, tiempo entre mensajes 30 segundos, cantidad de nodos 25, y tiempo del experimento 1 hora. Porcentaje mensajes recibidos: 98.1%

Figura 158.

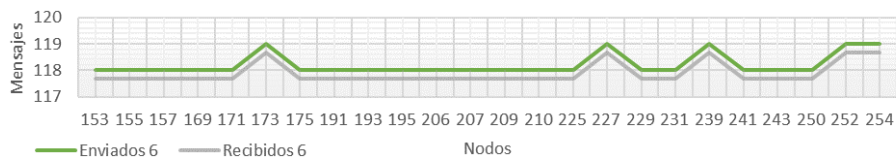
Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 4 (Escenario 5).



Nota: Tamaño del mensaje 100 bytes, tiempo entre mensajes 30 segundos, cantidad de nodos 25, y tiempo del experimento 1 hora. Porcentaje mensajes recibidos: 97.6%

Figura 159.

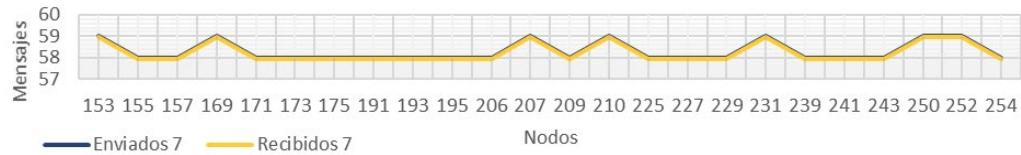
Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 4 (Escenario 6).



Nota: Tamaño del mensaje 191 bytes, tiempo entre mensajes 30 segundos, cantidad de nodos 25, y tiempo del experimento 1 hora. Porcentaje mensajes recibidos: 95.7%

Figura 160.

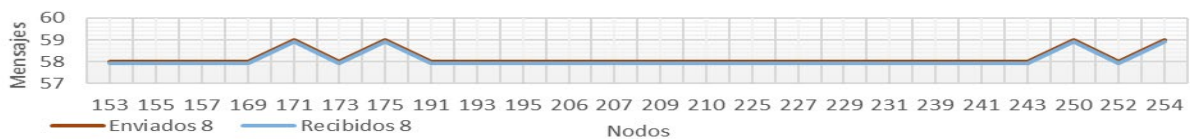
Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 4 (Escenario 7).



Nota: Tamaño del mensaje 20 bytes, tiempo entre mensajes 60 segundos, cantidad de nodos 25, y tiempo del experimento 1 hora. Porcentaje mensajes recibidos: 96.7%

Figura 161.

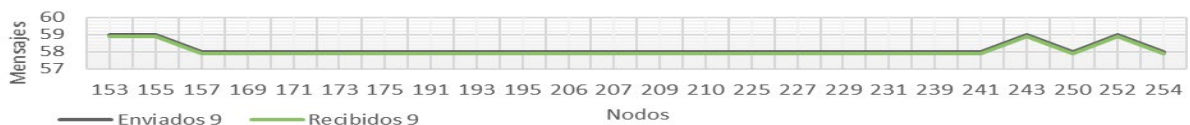
Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 4 (Escenario 8).



Nota: Tamaño del mensaje 100 bytes, tiempo entre mensajes 60 segundos, cantidad de nodos 25, y tiempo del experimento 1 hora. Porcentaje mensajes recibidos: 98.1%.

Figura 162.

Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 4 (Escenario 9).

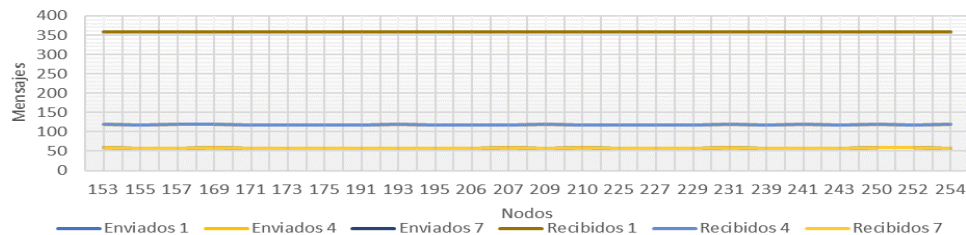


Nota: Tamaño del mensaje 191 bytes, tiempo entre mensajes 60 segundos, cantidad de nodos 25, y tiempo del experimento 1 hora. Porcentaje mensajes recibidos: 98.1%.

Las siguientes son las gráficas de comparativas de escenarios para los mensajes enviados y el estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 4.

Figura 163.

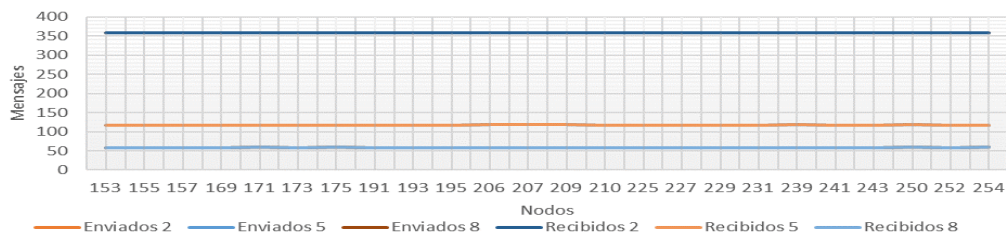
Comparación entre escenarios 1, 4 y 7 para los mensajes enviados y el estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 4.



Nota: Tamaño del mensaje 20 bytes. Cantidad de nodos 25. Tiempo del experimento 1 hora. Escenario 1: tiempo entre mensajes 10 segundos. Porcentaje mensajes recibidos: 97.4%. Escenario 4: tiempo entre mensajes 30 segundos. Porcentaje mensajes recibidos: 98.1%. Escenario 7: tiempo entre mensajes 60 segundos. Porcentaje mensajes recibidos: 96.7%.

Figura 164.

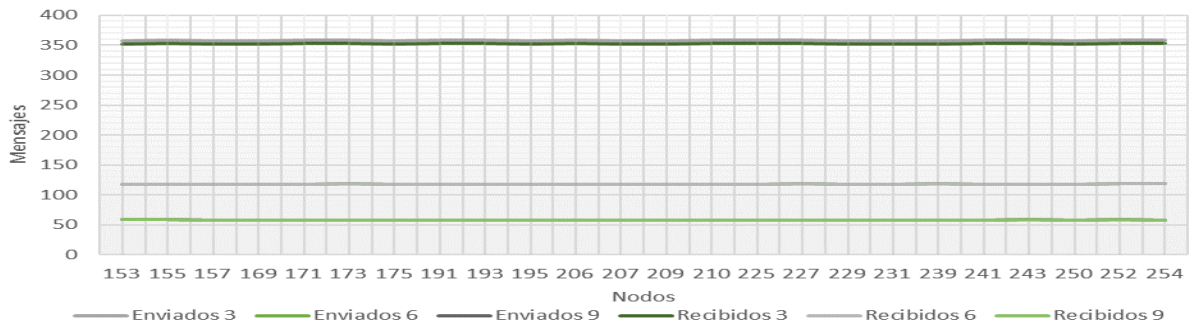
Comparación entre escenarios 2, 5 y 8 para los mensajes enviados y el estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 4.



Nota: Tamaño del mensaje 20 bytes. Cantidad de nodos 25. Tiempo del experimento 1 hora. Escenario 1: tiempo entre mensajes 10 segundos. Porcentaje mensajes recibidos: 97.4%. Escenario 4: tiempo entre mensajes 30 segundos. Porcentaje mensajes recibidos: 98.1%. Escenario 7: tiempo entre mensajes 60 segundos. Porcentaje mensajes recibidos: 96.7%.

Figura 165.

Comparación entre escenarios 3, 6 y 9 para los mensajes enviados y el estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 4.

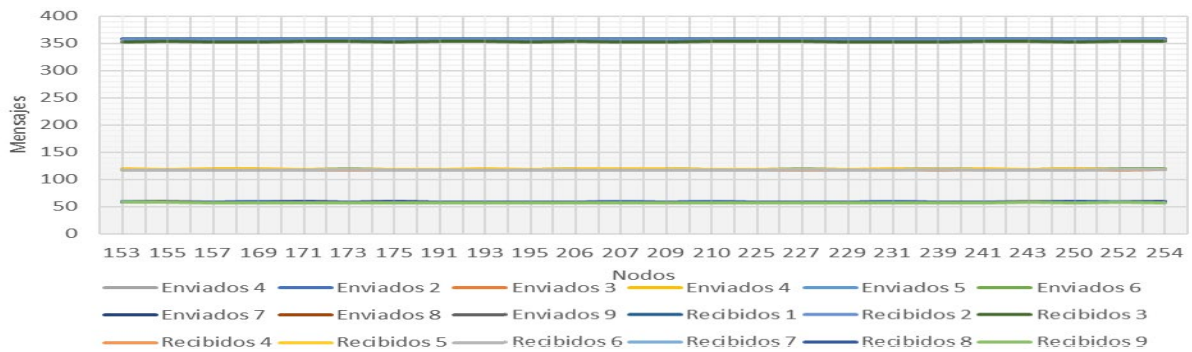


Nota: Tamaño del mensaje 191 bytes. Cantidad de nodos 25. Tiempo del experimento 1 hora. Escenario 3: tiempo entre mensajes 10 segundos. Porcentaje mensajes recibidos: 96.9%. Escenario 6: tiempo entre mensajes 30 segundos. Porcentaje mensajes recibidos: 95.7%. Escenario 9: tiempo entre mensajes 60 segundos. Porcentaje mensajes recibidos: 98.1%.

La siguiente es la gráfica de resumen de los datos de los mensajes para los experimentos en IoT-Lab para la Topología 4.

Figura 166.

Resumen de los datos de los mensajes para los experimentos en IoT-Lab para la Topología 4.

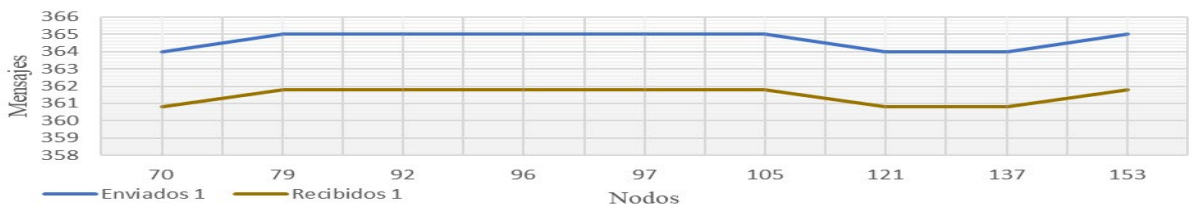


Nota: Cantidad de nodos 25. Tiempo de cada experimento: 1 hora. Tiempo entre mensajes: 10 s. Porcentaje mensajes recibidos: 97.4% (escenario 1: 20 bytes), 97.4% (escenario 2: 100 bytes), 96.9% (escenario 3: 191 bytes). Tiempo entre mensajes: 30 s. Porcentaje mensajes recibidos: 98.1% (escenario 4: 20 bytes), 97.6% (escenario 5: 100 bytes), 95.7% (escenario 6: 192 bytes). Tiempo entre mensajes: 60 s. Porcentaje mensajes recibidos: 96.7% (escenario 7: 20 bytes), 98.1% (escenario 8: 100 bytes), 98.1% (escenario 9: 192 bytes).

Las siguientes son las gráficas de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 5.

Figura 167.

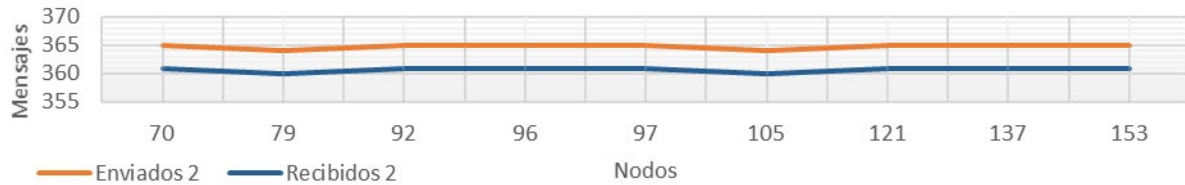
Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 5 (Escenario 1).



Nota: Tamaño del mensaje 20 bytes, tiempo entre mensajes 10 segundos, cantidad de nodos 10, y tiempo del experimento 1 hora. Porcentaje mensajes recibidos: 99.9%

Figura 168.

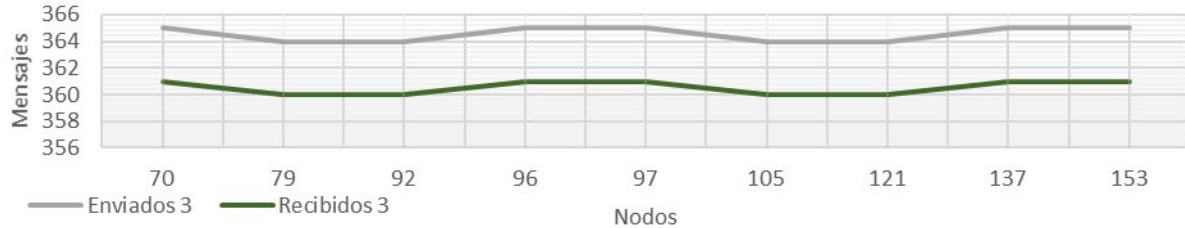
Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 5 (Escenario 2).



Nota: Tamaño del mensaje 100 bytes, tiempo entre mensajes 10 segundos, cantidad de nodos 10, y tiempo del experimento 1 hora. Porcentaje mensajes recibidos: 99.9%

Figura 169.

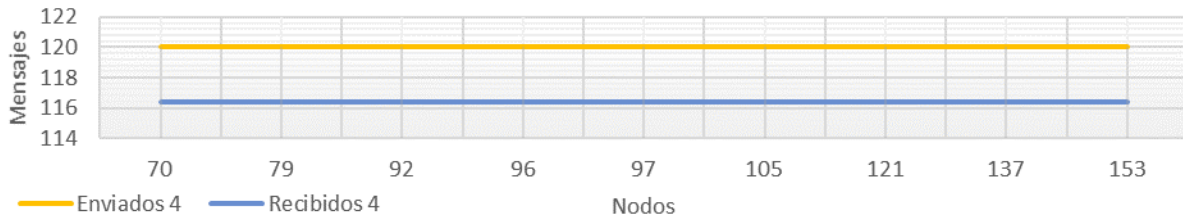
Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 5 (Escenario 3).



Nota: Tamaño del mensaje 191 bytes, tiempo entre mensajes 10 segundos, cantidad de nodos 10, y tiempo del experimento 1 hora. Porcentaje mensajes recibidos: 98.6%

Figura 170.

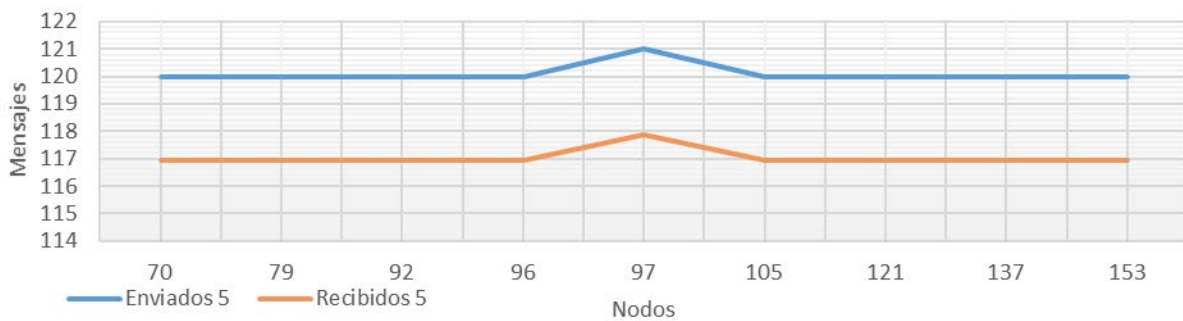
Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 5 (Escenario 4).



Nota: Tamaño del mensaje 20 bytes, tiempo entre mensajes 30 segundos, cantidad de nodos 10, y tiempo del experimento 1 hora. Porcentaje mensajes recibidos: 99.9%.

Figura 171.

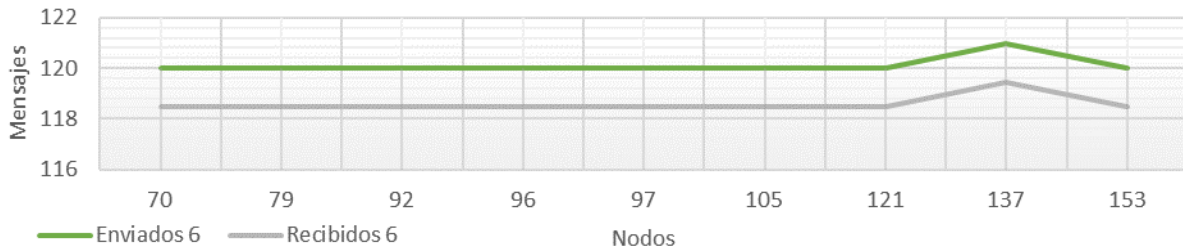
Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 5 (Escenario 5).



Nota: Tamaño del mensaje 100 bytes, tiempo entre mensajes 30 segundos, cantidad de nodos 10, y tiempo del experimento 1 hora. Porcentaje mensajes recibidos: 100%

Figura 172.

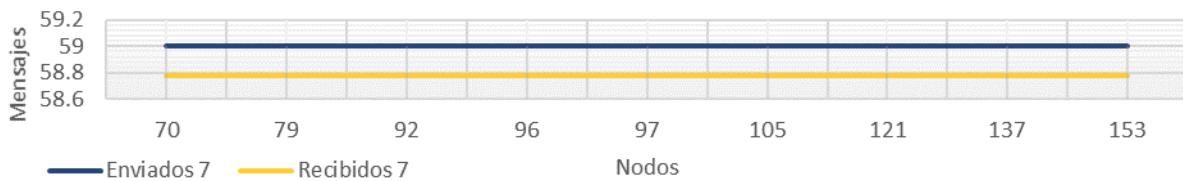
Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 5 (Escenario 6).



Nota: Tamaño del mensaje 191 bytes, tiempo entre mensajes 30 segundos, cantidad de nodos 10, y tiempo del experimento 1 hora. Porcentaje mensajes recibidos: 99.7%.

Figura 173.

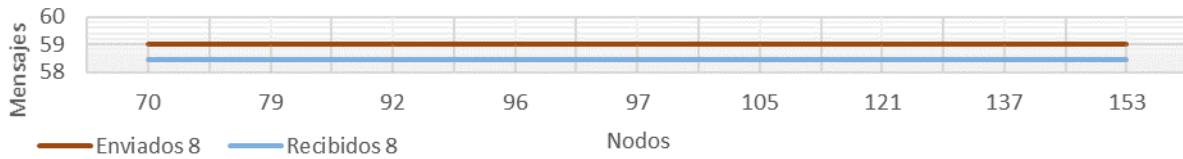
Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 5 (Escenario 7).



Nota: Tamaño del mensaje 20 bytes, tiempo entre mensajes 60 segundos, cantidad de nodos 10, y tiempo del experimento 1 hora. Porcentaje mensajes recibidos: 99.9%.

Figura 174.

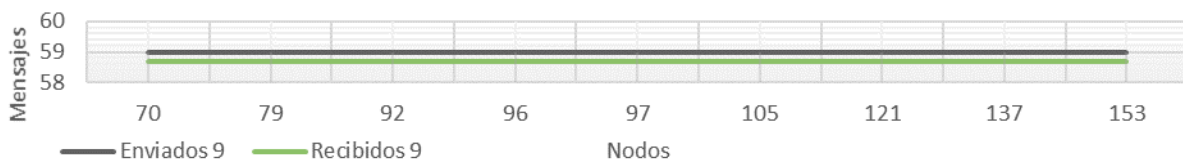
Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 5 (Escenario 8).



Nota: Tamaño del mensaje 100 bytes, tiempo entre mensajes 60 segundos, cantidad de nodos 10, y tiempo del experimento 1 hora. Porcentaje mensajes recibidos: 99.9%.

Figura 175.

Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 5 (Escenario 9).

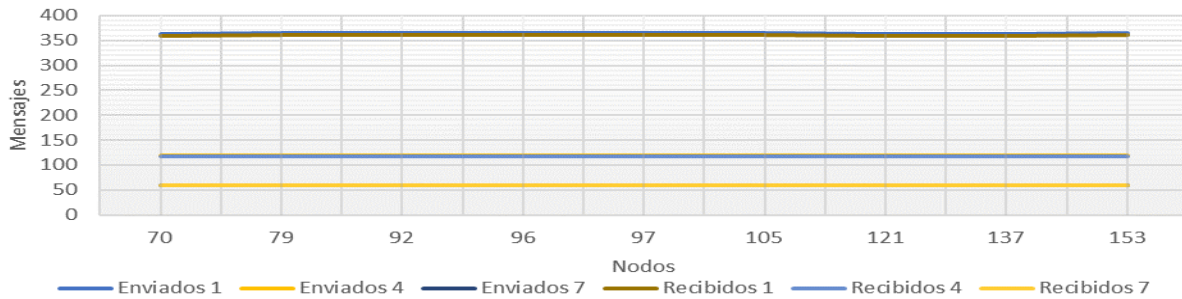


Nota: Tamaño del mensaje 191 bytes, tiempo entre mensajes 60 segundos, cantidad de nodos 10, y tiempo del experimento 1 hora. Porcentaje mensajes recibidos: 99.8%.

Las siguientes son las gráficas de comparativas de escenarios para los mensajes enviados y el estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 5.

Figura 176.

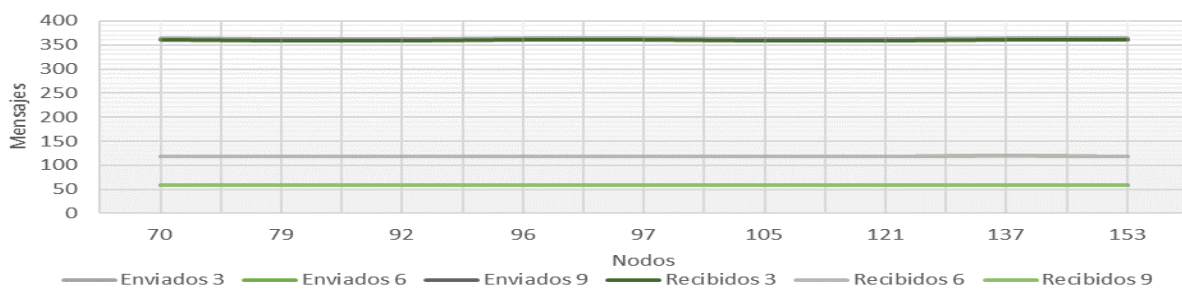
Comparación entre escenarios 1, 4 y 7 para los mensajes enviados y el estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 5.



Nota: Tamaño del mensaje 20 bytes. Cantidad de nodos 10. Tiempo del experimento 1 hora. Escenario 1: tiempo entre mensajes 10 segundos. Porcentaje mensajes recibidos: 99.9%. Escenario 4: tiempo entre mensajes 30 segundos. Porcentaje mensajes recibidos: 99.9%. Escenario 7: tiempo entre mensajes 60 segundos. Porcentaje mensajes recibidos: 99.9%.

Figura 177.

Comparación entre escenarios 3, 6 y 9 para los mensajes enviados y el estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 5.

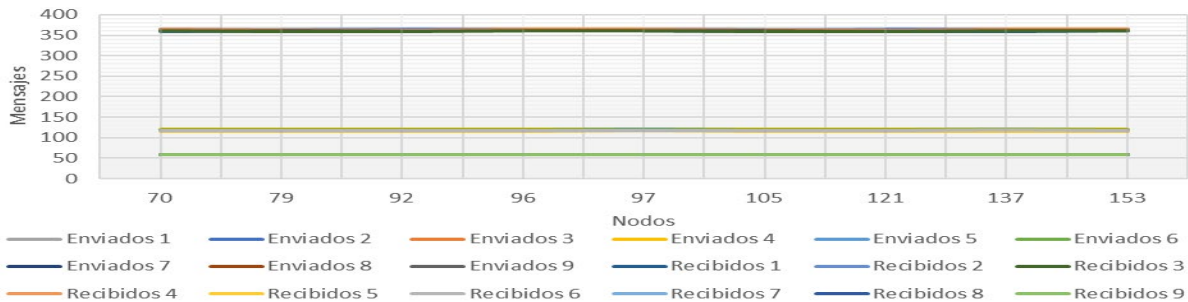


Nota: Tamaño del mensaje 191 bytes. Cantidad de nodos 10. Tiempo del experimento 1 hora. Escenario 3: tiempo entre mensajes 10 segundos. Porcentaje mensajes recibidos: 98.6%. Escenario 6: tiempo entre mensajes 30 segundos. Porcentaje mensajes recibidos: 99.7%. Escenario 9: tiempo entre mensajes 60 segundos. Porcentaje mensajes recibidos: 99.8%.

La siguiente es la gráficas de Resumen de los datos de los mensajes para los experimentos en IoT-Lab para la Topología 5.

Figura 178.

Resumen de los datos de los mensajes para los experimentos de la Topología 5 en IoT-Lab.

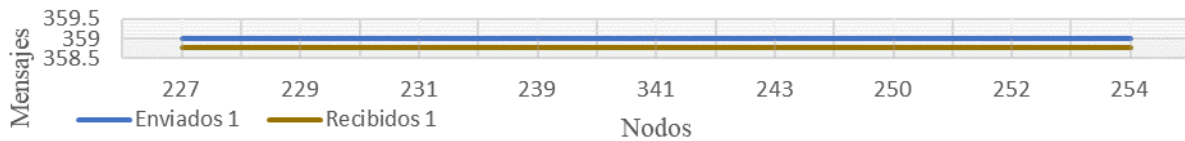


Nota: Cantidad de nodos 10. Tiempo de cada experimento: 1 hora. Tiempo entre mensajes: 10 s. Porcentaje mensajes recibidos: 99.9% (escenario 1: 20 bytes), 99.9% (escenario 2: 100 bytes), 98.6% (escenario 3: 191 bytes). Tiempo entre mensajes: 30 s. Porcentaje mensajes recibidos: 99.9% (escenario 4: 20 bytes), 100% (escenario 5: 100 bytes), 99.7% (escenario 6: 192 bytes). Tiempo entre mensajes: 60 s. Porcentaje mensajes recibidos: 99.9% (escenario 7: 20 bytes), 99.9% (escenario 8: 100 bytes), 99.8% (escenario 9: 192 bytes).

Las siguientes son las gráficas de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos, en las gráficas se puede observar el resumen de resultados de las pruebas que se realizaron en la topología 6.

Figura 179.

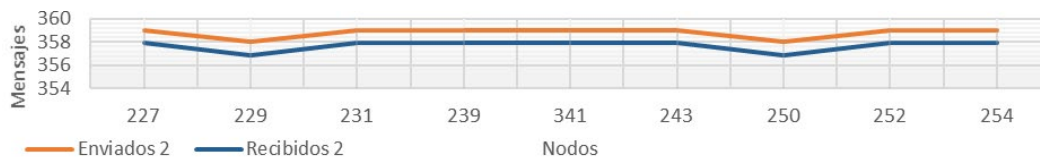
Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 6 (Escenario 1).



Nota: Tamaño del mensaje 20 bytes, tiempo entre mensajes 10 segundos, cantidad de nodos 10, y tiempo del experimento 1 hora. Porcentaje mensajes recibidos: 97.4%.

Figura 180.

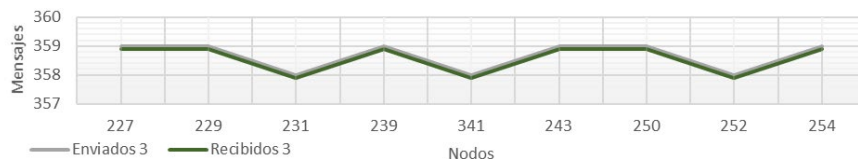
Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 6 (Escenario 2).



Nota: Tamaño del mensaje 100 bytes, tiempo entre mensajes 10 segundos, cantidad de nodos 10, y tiempo del experimento 1 hora. Porcentaje mensajes recibidos: 97.4%.

Figura 181.

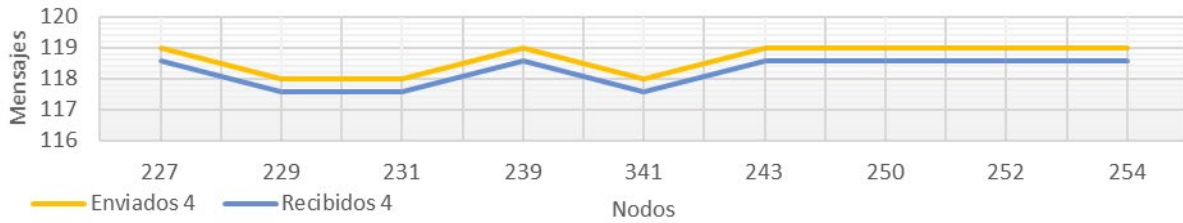
Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 6 (Escenario 3).



Nota: Tamaño del mensaje 191 bytes, tiempo entre mensajes 10 segundos, cantidad de nodos 10, y tiempo del experimento 1 hora. Porcentaje mensajes recibidos: 96.9%

Figura 182.

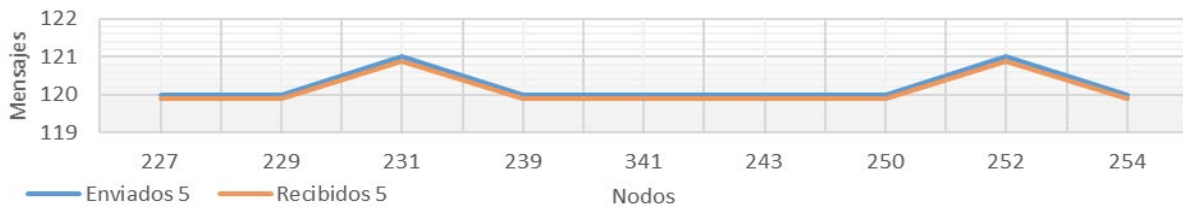
Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 6 (Escenario 4).



Nota: Tamaño del mensaje 20 bytes, tiempo entre mensajes 30 segundos, cantidad de nodos 10, y tiempo del experimento 1 hora. Porcentaje mensajes recibidos: 98.1%

Figura 183.

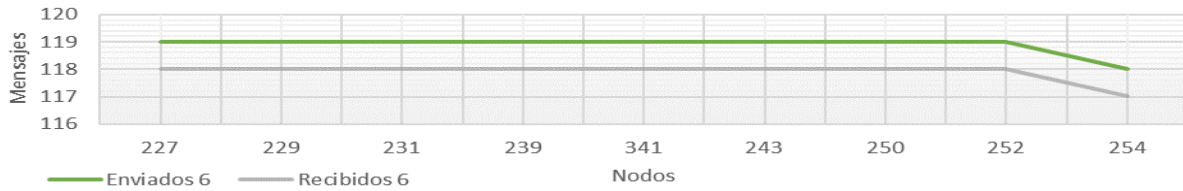
Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 6 (Escenario 5).



Nota: Tamaño del mensaje 100 bytes, tiempo entre mensajes 30 segundos, cantidad de nodos 10, y tiempo del experimento 1 hora. Porcentaje mensajes recibidos: 97.6%

Figura 184.

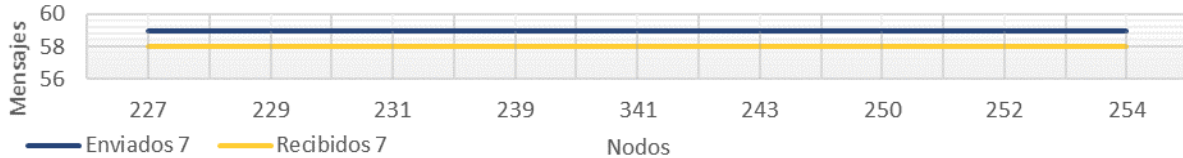
Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 6 (Escenario 6).



Nota: Tamaño del mensaje 191 bytes, tiempo entre mensajes 30 segundos, cantidad de nodos 10, y tiempo del experimento 1 hora. Porcentaje mensajes recibidos: 95.7%

Figura 185.

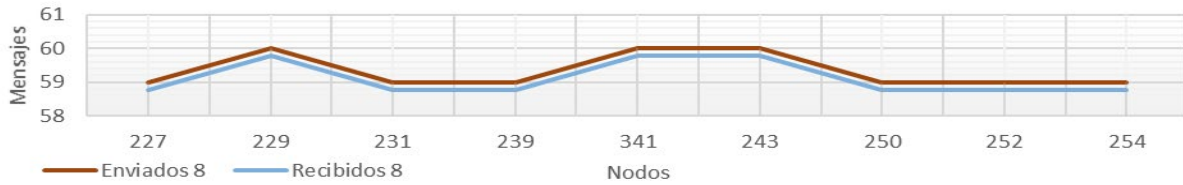
Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 6 (Escenario 7).



Nota: Tamaño del mensaje 20 bytes, tiempo entre mensajes 60 segundos, cantidad de nodos 10, y tiempo del experimento 1 hora. Porcentaje mensajes recibidos: 96.7%

Figura 186.

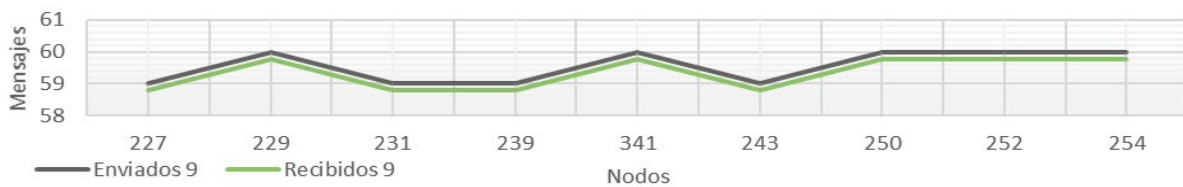
Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 6 (Escenario 8).



Nota: Tamaño del mensaje 100 bytes, tiempo entre mensajes 60 segundos, cantidad de nodos 10, y tiempo del experimento 1 hora. Porcentaje mensajes recibidos: 98.1%.

Figura 187.

Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 6 (Escenario 9).

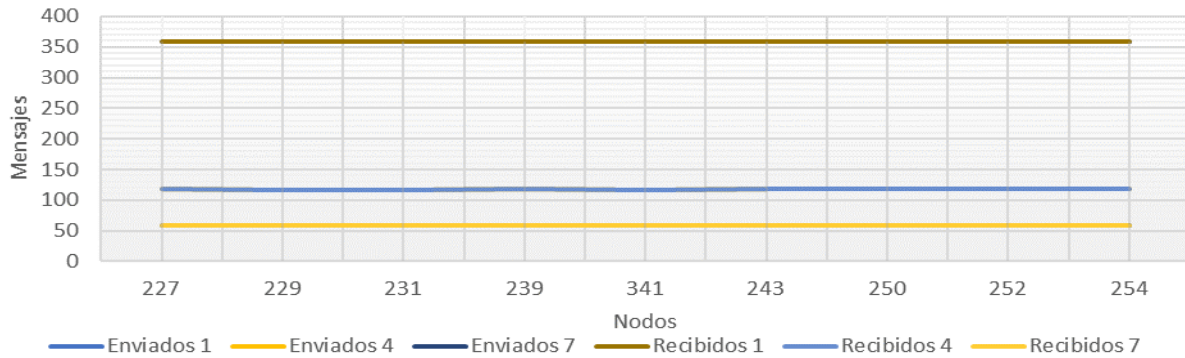


Nota: Tamaño del mensaje 191 bytes, tiempo entre mensajes 60 segundos, cantidad de nodos 10, y tiempo del experimento 1 hora. Porcentaje mensajes recibidos: 98.1%.

Las siguientes son las gráficas de comparativas de escenarios para los mensajes enviados y el estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 6.

Figura 188.

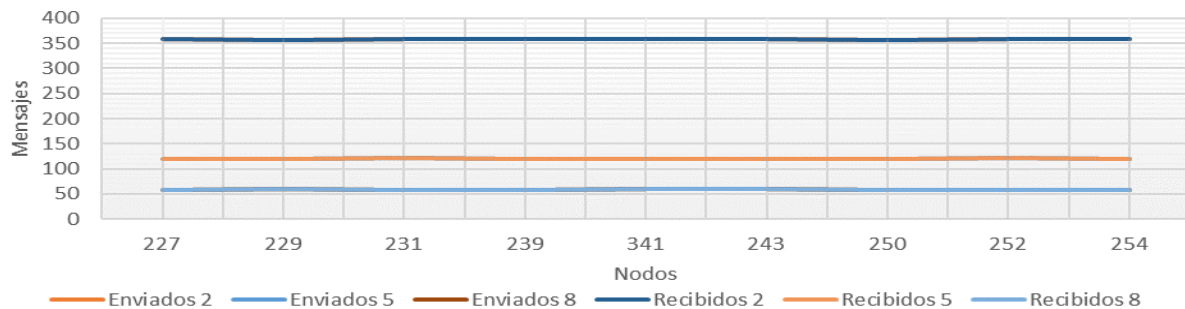
Comparación entre escenarios 1, 4 y 7 para los mensajes enviados y el estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 6.



Nota: Tamaño del mensaje 20 bytes. Cantidad de nodos 10. Tiempo del experimento 1 hora. Escenario 1: tiempo entre mensajes 10 segundos. Porcentaje mensajes recibidos: 97.4%. Escenario 4: tiempo entre mensajes 30 segundos. Porcentaje mensajes recibidos: 98.1%. Escenario 7: tiempo entre mensajes 60 segundos. Porcentaje mensajes recibidos: 96.7%.

Figura 189.

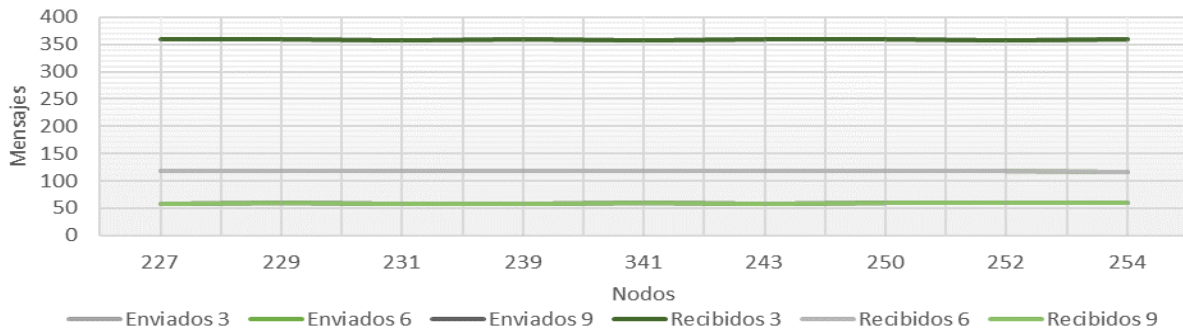
Comparación entre escenarios 2, 5 y 8 para los mensajes enviados y el estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 6.



Nota: Tamaño del mensaje 100 bytes. Cantidad de nodos 10. Tiempo del experimento 1 hora. Escenario 2: tiempo entre mensajes 10 segundos. Porcentaje mensajes recibidos: 97.4%. Escenario 5: tiempo entre mensajes 30 segundos. Porcentaje mensajes recibidos: 97.6%. Escenario 8: tiempo entre mensajes 60 segundos. Porcentaje mensajes recibidos: 98.1%.

Figura 190.

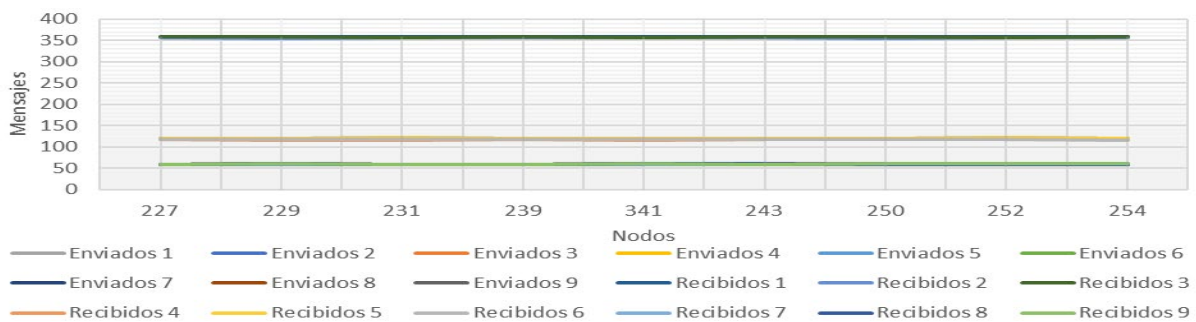
Comparación entre escenarios 3, 6 y 9 para los mensajes enviados y el estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 6.



La siguiente es la gráficas de Resumen de los datos de los mensajes para los experimentos en IoT-Lab para la Topología 6.

Figura 191.

Resumen de los datos de los mensajes para los experimentos de la topología 6 en IoT-Lab.

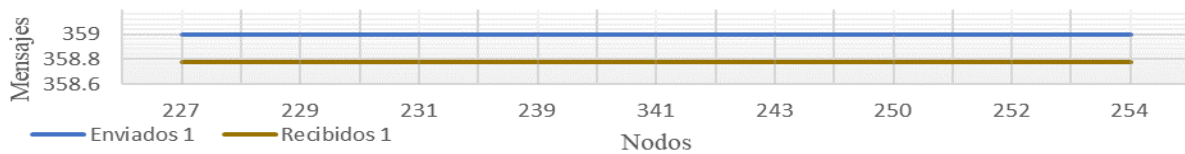


Nota: Cantidad de nodos 10. Tiempo de cada experimento: 1 hora. Tiempo entre mensajes: 10 s. Porcentaje mensajes recibidos: 97.4% (escenario 1: 20 bytes), 97.4% (escenario 2: 100 bytes), 96.9% (escenario 3: 191 bytes). Tiempo entre mensajes: 30 s. Porcentaje mensajes recibidos: 98.1% (escenario 4: 20 bytes), 97.6% (escenario 5: 100 bytes), 95.7% (escenario 6: 192 bytes). Tiempo entre mensajes: 60 s. Porcentaje mensajes recibidos: 96.7% (escenario 7: 20 bytes), 98.1% (escenario 8: 100 bytes), 98.1% (escenario 9: 192 bytes).

Las siguientes son las gráficas de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 6.

Figura 192.

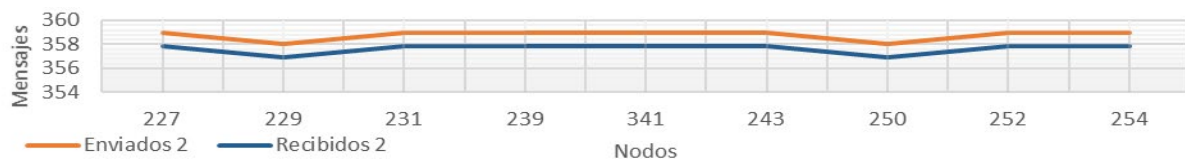
Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 6 (Escenario 1).



Nota: Tamaño del mensaje 20 bytes, tiempo entre mensajes 10 segundos, cantidad de nodos 10, y tiempo del experimento 1 hora. Porcentaje mensajes recibidos: 99.9%

Figura 193.

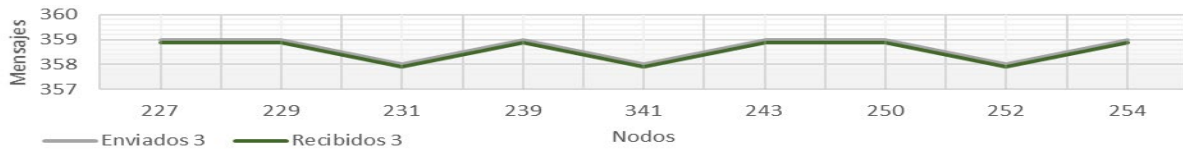
Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 6 (Escenario 2).



Nota: Tamaño del mensaje 100 bytes, tiempo entre mensajes 10 segundos, cantidad de nodos 10, y tiempo del experimento 1 hora. Porcentaje mensajes recibidos: 99.7%.

Figura 194.

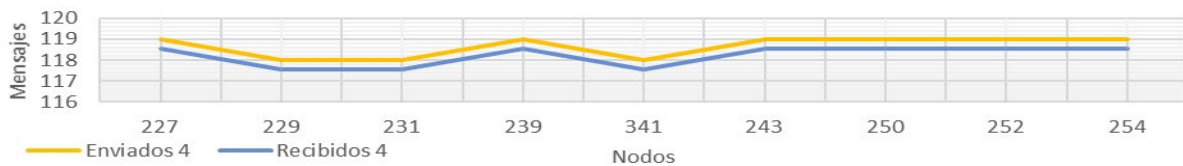
Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 6 (Escenario 3).



Nota: Tamaño del mensaje 191 bytes, tiempo entre mensajes 10 segundos, cantidad de nodos 10, y tiempo del experimento 1 hora. Porcentaje mensajes recibidos: 100%.

Figura 195.

Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 6 (Escenario 4).



Nota: Tamaño del mensaje 20 bytes, tiempo entre mensajes 30 segundos, cantidad de nodos 10, y tiempo del experimento 1 hora. Porcentaje mensajes recibidos: 99.6%.

Figura 196.

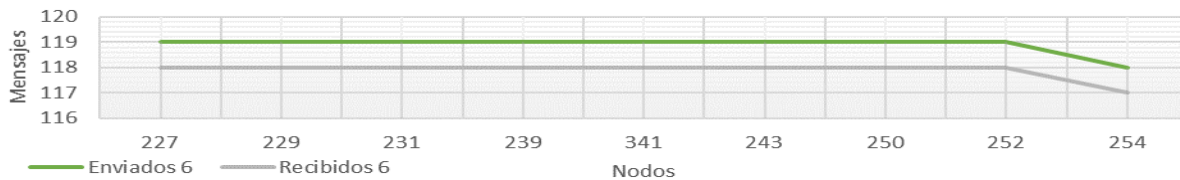
Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 6 (Escenario 5).



Nota: Tamaño del mensaje 100 bytes, tiempo entre mensajes 30 segundos, cantidad de nodos 10, y tiempo del experimento 1 hora. Porcentaje mensajes recibidos: 99.9%.

Figura 197.

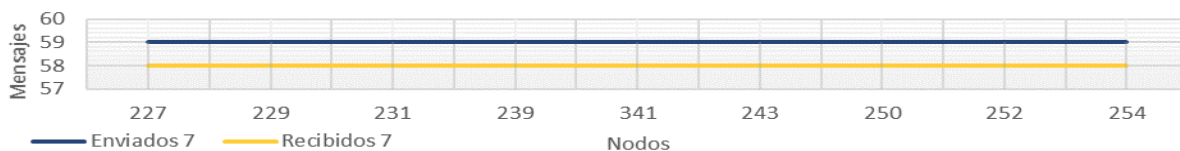
Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 6 (Escenario 6).



Nota: Tamaño del mensaje 191 bytes, tiempo entre mensajes 30 segundos, cantidad de nodos 10, y tiempo del experimento 1 hora. Porcentaje mensajes recibidos: 99.2%.

Figura 198.

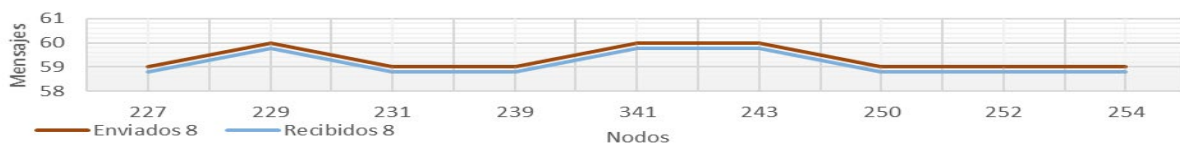
Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 6 (Escenario 7).



Nota: Tamaño del mensaje 20 bytes, tiempo entre mensajes 60 segundos, cantidad de nodos 10, y tiempo del experimento 1 hora. Porcentaje mensajes recibidos: 98.3%.

Figura 199.

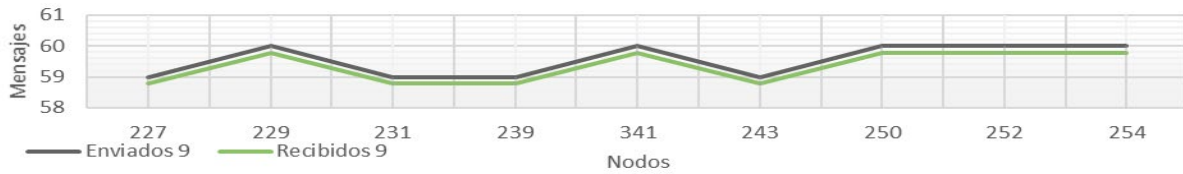
Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 6 (Escenario 8).



Nota: Tamaño del mensaje 100 bytes, tiempo entre mensajes 60 segundos, cantidad de nodos 10, y tiempo del experimento 1 hora. Porcentaje mensajes recibidos: 99.6%.

Figura 200.

Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 6 (Escenario 9).

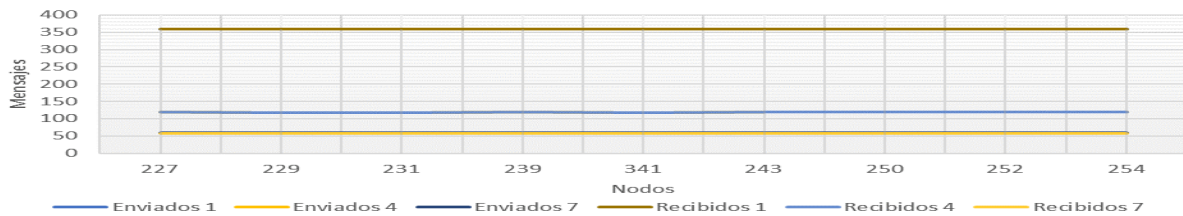


Nota: Tamaño del mensaje 191 bytes, tiempo entre mensajes 60 segundos, cantidad de nodos 10, y tiempo del experimento 1 hora. Porcentaje mensajes recibidos: 99.6%.

Las siguientes son las gráficas de comparativas de escenarios para los mensajes enviados y el estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 6.

Figura 201.

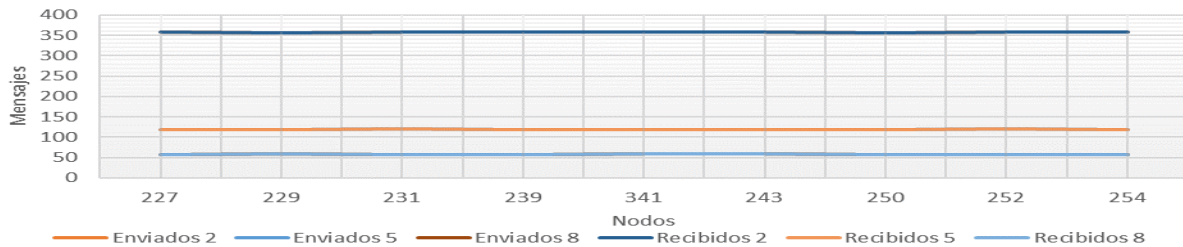
Comparación entre escenarios 1, 4 y 7 para los mensajes enviados y el estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 6.



Nota: Tamaño del mensaje 20 bytes. Cantidad de nodos 10. Tiempo del experimento 1 hora. Escenario 1: tiempo entre mensajes 10 segundos. Porcentaje mensajes recibidos: 99.9%. Escenario 4: tiempo entre mensajes 30 segundos. Porcentaje mensajes recibidos: 99.6%. Escenario 7: tiempo entre mensajes 60 segundos. Porcentaje mensajes recibidos: 98.3%.

Figura 202.

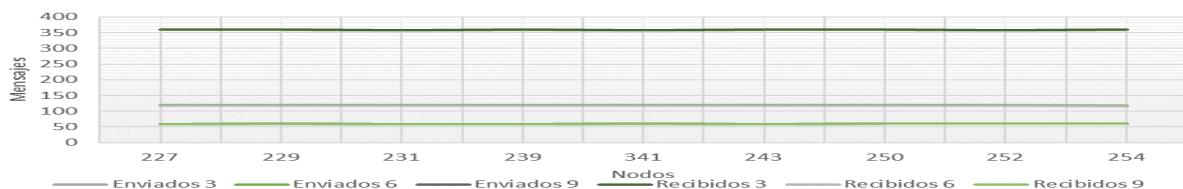
Comparación entre escenarios 2, 5 y 8 para los mensajes enviados y el estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 6.



Nota: Tamaño del mensaje 100 bytes. Cantidad de nodos 10. Tiempo del experimento 1 hora. Escenario 2: tiempo entre mensajes 10 segundos. Porcentaje mensajes recibidos: 99.7%. Escenario 5: tiempo entre mensajes 30 segundos. Porcentaje mensajes recibidos: 99.9%. Escenario 8: tiempo entre mensajes 60 segundos. Porcentaje mensajes recibidos: 99.6%.

Figura 203.

Comparación entre escenarios 3, 6 y 9 para los mensajes enviados y el estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 6.

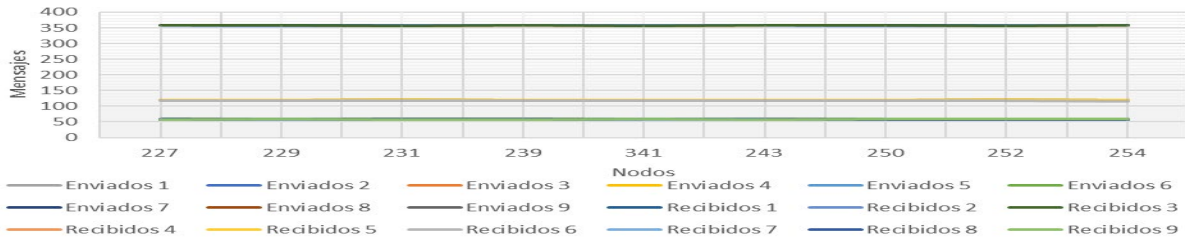


Nota: Tamaño del mensaje 191 bytes. Cantidad de nodos 10. Tiempo del experimento 1 hora. Escenario 3: tiempo entre mensajes 10 segundos. Porcentaje mensajes recibidos: 100%. Escenario 6: tiempo entre mensajes 30 segundos. Porcentaje mensajes recibidos: 99.2%. Escenario 9: tiempo entre mensajes 60 segundos. Porcentaje mensajes recibidos: 99.6%.

La siguiente es la gráfica de Resumen de los datos de los mensajes para los experimentos en IoT-Lab para la Topología 6.

Figura 204.

Resumen de los datos de los mensajes para los experimentos de la Topología 6 en IoT-Lab.

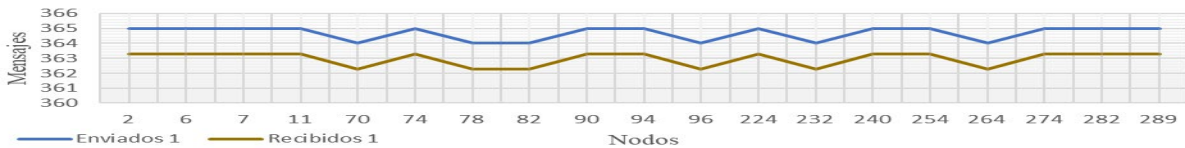


Nota: Cantidad de nodos 10. Tiempo de cada experimento: 1 hora. Tiempo entre mensajes: 10 s. Porcentaje mensajes recibidos: 99.9% (escenario 1: 20 bytes), 99.7% (escenario 2: 100 bytes), 100% (escenario 3: 191 bytes). Tiempo entre mensajes: 30 s. Porcentaje mensajes recibidos: 99.6% (escenario 4: 20 bytes), 99.9% (escenario 5: 100 bytes), 99.2% (escenario 6: 192 bytes). Tiempo entre mensajes: 60 s. Porcentaje mensajes recibidos: 98.3% (escenario 7: 20 bytes), 99.6% (escenario 8: 100 bytes), 99.6% (escenario 9: 192 bytes).

Las siguientes son las gráficas de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 7.

Figura 205.

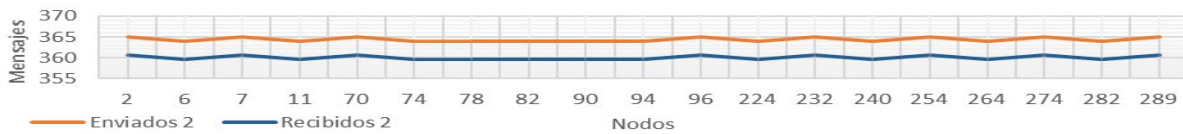
Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 7 (Escenario 1).



Nota: Tamaño del mensaje 20 bytes, tiempo entre mensajes 10 segundos, cantidad de nodos 20, y tiempo del experimento 1 hora. Porcentaje mensajes recibidos: 100%

Figura 206.

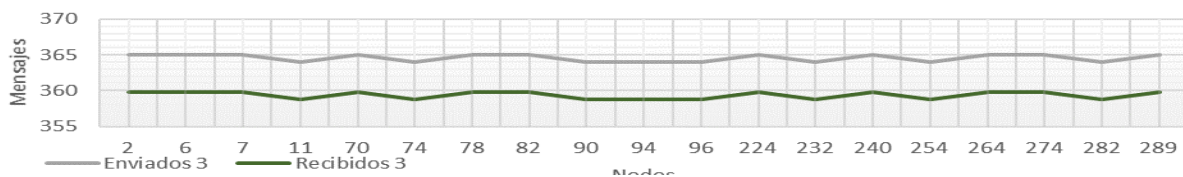
Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 7 (Escenario 2).



Nota: Tamaño del mensaje 100 bytes, tiempo entre mensajes 10 segundos, cantidad de nodos 20, y tiempo del experimento 1 hora. Porcentaje mensajes recibidos: 99.0%.

Figura 207.

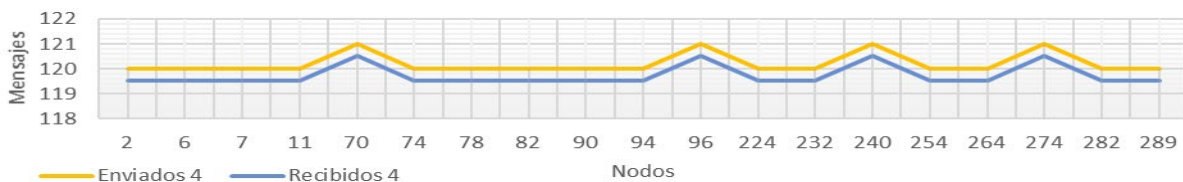
Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 7 (Escenario 3).



Nota: Tamaño del mensaje 191 bytes, tiempo entre mensajes 10 segundos, cantidad de nodos 20, y tiempo del experimento 1 hora. Porcentaje mensajes recibidos: 99.0%.

Figura 208.

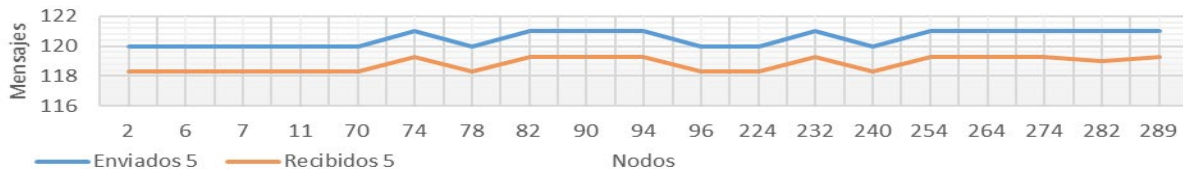
Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 7 (Escenario 4).



Nota: Tamaño del mensaje 20 bytes, tiempo entre mensajes 30 segundos, cantidad de nodos 20, y tiempo del experimento 1 hora. Porcentaje mensajes recibidos: 100%.

Figura 209.

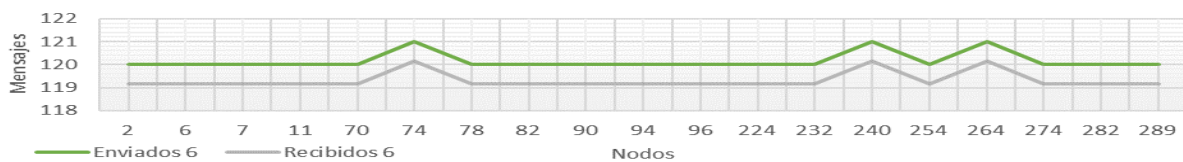
Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 7 (Escenario 5).



Nota: Tamaño del mensaje 100 bytes, tiempo entre mensajes 30 segundos, cantidad de nodos 20, y tiempo del experimento 1 hora. Porcentaje mensajes recibidos: 100%.

Figura 210.

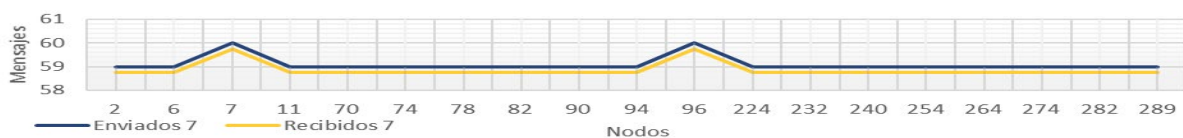
Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 7 (Escenario 6).



Nota: Tamaño del mensaje 191 bytes, tiempo entre mensajes 30 segundos, cantidad de nodos 20, y tiempo del experimento 1 hora. Porcentaje mensajes recibidos: 99.0%.

Figura 211.

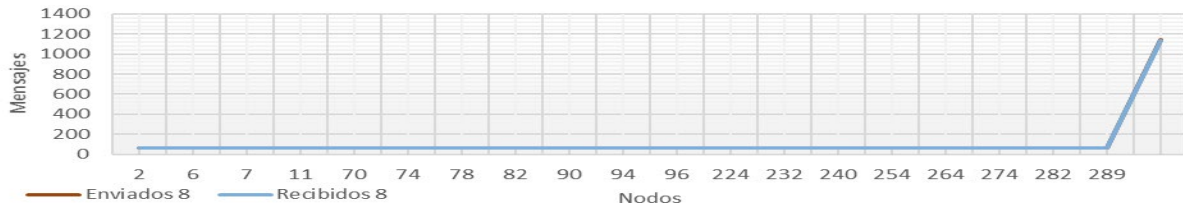
Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 7 (Escenario 7).⁹¹



Nota: Tamaño del mensaje 20 bytes, tiempo entre mensajes 60 segundos, cantidad de nodos 20, y tiempo del experimento 1 hora. Porcentaje mensajes recibidos: 100%.

Figura 212.

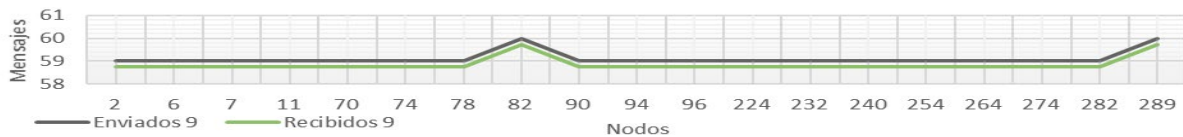
Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 7 (Escenario 8).



Nota: Tamaño del mensaje 100 bytes, tiempo entre mensajes 60 segundos, cantidad de nodos 20, y tiempo del experimento 1 hora. Porcentaje mensajes recibidos: 99.0%.

Figura 213.

Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 7 (Escenario 9).

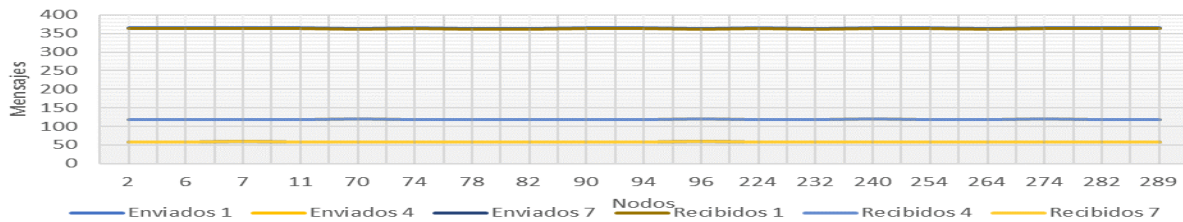


Nota: Tamaño del mensaje 191 bytes, tiempo entre mensajes 60 segundos, cantidad de nodos 20, y tiempo del experimento 1 hora. Porcentaje mensajes recibidos: 100%.

Las siguientes son las gráficas de comparativas de escenarios para los mensajes enviados y el estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 7.

Figura 214.

Comparación entre escenarios 1, 4 y 7 para los mensajes enviados y el estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 7.).



Nota: Tamaño del mensaje 20 bytes. Cantidad de nodos 20. Tiempo del experimento 1 hora. Escenario 1: tiempo entre mensajes 10 segundos. Porcentaje mensajes recibidos: 100%. Escenario 4: tiempo entre mensajes 30 segundos. Porcentaje mensajes recibidos: 100%. Escenario 7: tiempo entre mensajes 60 segundos. Porcentaje mensajes recibidos: 100%.

Figura 215.

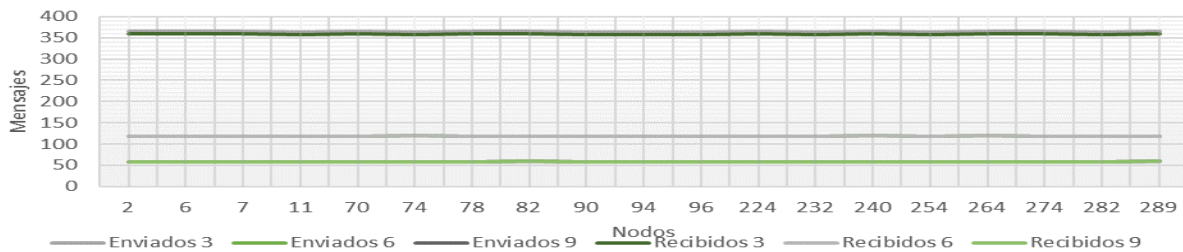
Comparación entre escenarios 2, 5 y 8 para los mensajes enviados y el estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 7.



Nota: Tamaño del mensaje 100 bytes. Cantidad de nodos 20. Tiempo del experimento 1 hora. Escenario 2: tiempo entre mensajes 10 segundos. Porcentaje mensajes recibidos: 99.0%. Escenario 5: tiempo entre mensajes 30 segundos. Porcentaje mensajes recibidos: 100.0%. Escenario 8: tiempo entre mensajes 60 segundos. Porcentaje mensajes recibidos: 99.0%.

Figura 216.

Comparación entre escenarios 3, 6 y 9 para los mensajes enviados y el estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 7.

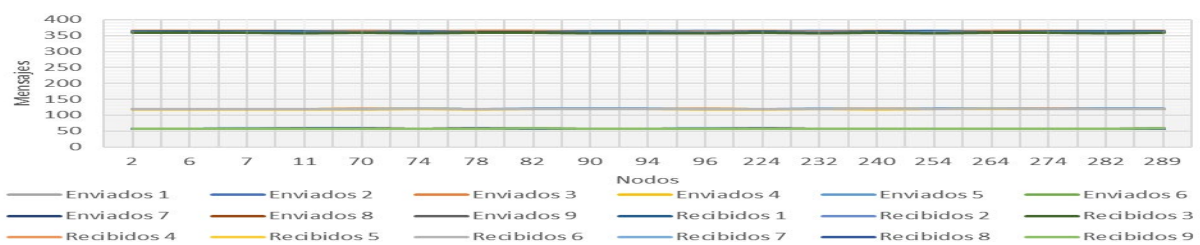


Nota: Tamaño del mensaje 191 bytes. Cantidad de nodos 20. Tiempo del experimento 1 hora. Escenario 3: tiempo entre mensajes 10 segundos. Porcentaje mensajes recibidos: 99.0%. Escenario 6: tiempo entre mensajes 30 segundos. Porcentaje mensajes recibidos: 99.0%. Escenario 9: tiempo entre mensajes 60 segundos. Porcentaje mensajes recibidos: 100.0%.

La siguiente es la gráfica de Resumen de los datos de los mensajes para los experimentos en IoT-Lab para la Topología 8.

Figura 217.

Resumen de los datos de los mensajes para los experimentos de la Topología 7 en IoT-Lab.

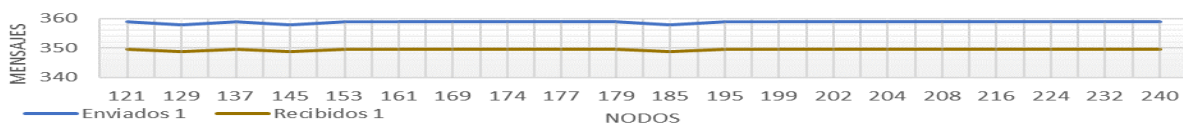


Nota: Cantidad de nodos 20. Tiempo de cada experimento: 1 hora. Tiempo entre mensajes: 10 s. Porcentaje mensajes recibidos: 100% (escenario 1: 20 bytes), 99.0% (escenario 2: 100 bytes), 99.0% (escenario 3: 191 bytes). Tiempo entre mensajes: 30 s. Porcentaje mensajes recibidos: 100% (escenario 4: 20 bytes), 100% (escenario 5: 100 bytes), 99.0% (escenario 6: 192 bytes). Tiempo entre mensajes: 60 s. Porcentaje mensajes recibidos: 100% (escenario 7: 20 bytes), 99.0% (escenario 8: 100 bytes), 100% (escenario 9: 192 bytes).

Las siguientes son las gráficas de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos, en las gráficas se puede observar cada una de las pruebas que se realizaron en la topología 8.

Figura 218.

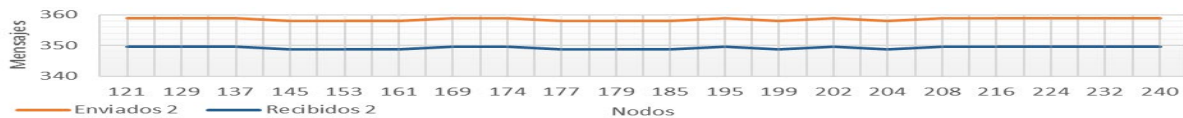
Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 8 (Escenario 1).



Nota: Tamaño del mensaje 20 bytes, tiempo entre mensajes 10 segundos, cantidad de nodos 15, y tiempo del experimento 1 hora. Porcentaje mensajes recibidos: 98.0%

Figura 219.

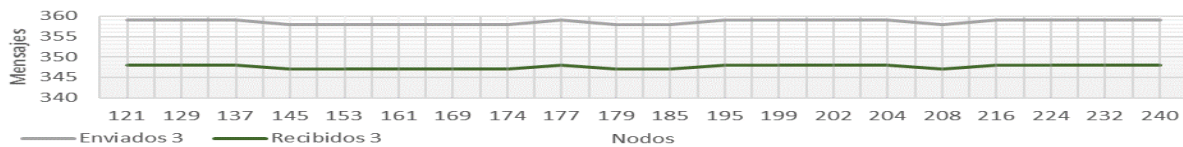
Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 8 (Escenario 2).



Nota: Tamaño del mensaje 100 bytes, tiempo entre mensajes 10 segundos, cantidad de nodos 15, y tiempo del experimento 1 hora. Porcentaje mensajes recibidos: 97.6%.

Figura 220.

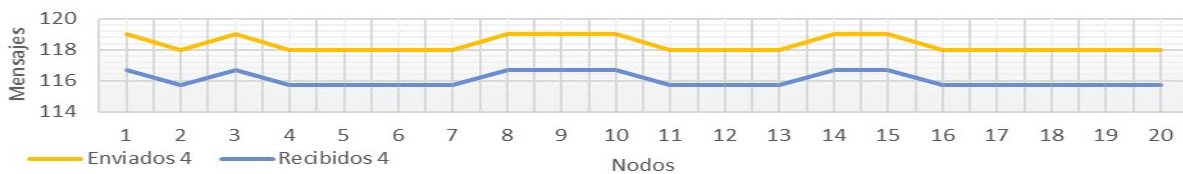
Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 8 (Escenario 3).



Nota: Tamaño del mensaje 191 bytes, tiempo entre mensajes 10 segundos, cantidad de nodos 15, y tiempo del experimento 1 hora. Porcentaje mensajes recibidos: 98.0%.

Figura 221.

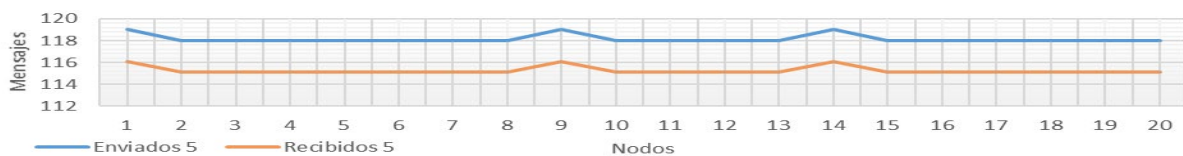
Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 8 (Escenario 4).



Nota: Tamaño del mensaje 20 bytes, tiempo entre mensajes 30 segundos, cantidad de nodos 15, y tiempo del experimento 1 hora. Porcentaje mensajes recibidos: 98.7%.

Figura 222.

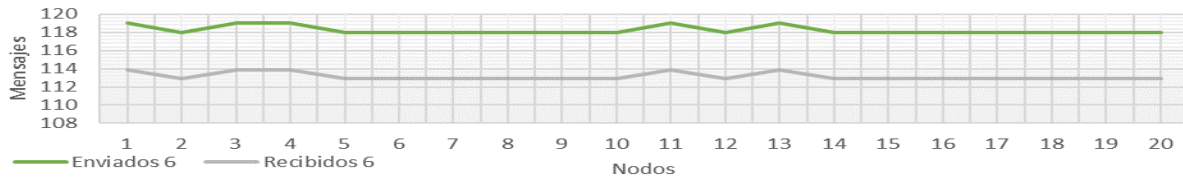
Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 8 (Escenario 5).



Nota: Tamaño del mensaje 100 bytes, tiempo entre mensajes 30 segundos, cantidad de nodos 15, y tiempo del experimento 1 hora. Porcentaje mensajes recibidos: 98.1%.

Figura 223.

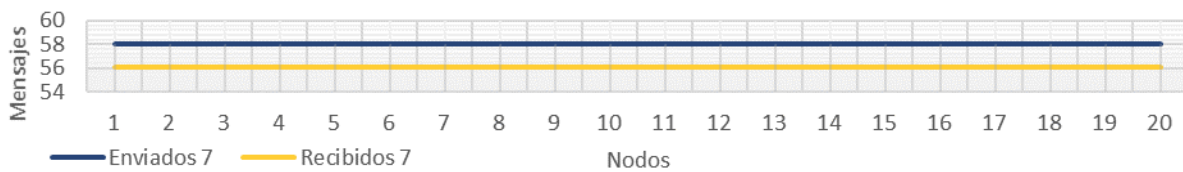
Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 8 (Escenario 6).



Nota: Tamaño del mensaje 191 bytes, tiempo entre mensajes 30 segundos, cantidad de nodos 15, y tiempo del experimento 1 hora. Porcentaje mensajes recibidos: 97.5%.

Figura 224.

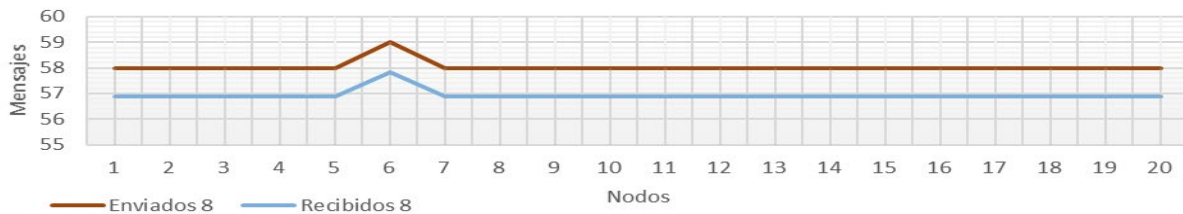
Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 8 (Escenario 7).



Nota: Tamaño del mensaje 20 bytes, tiempo entre mensajes 60 segundos, cantidad de nodos 15, y tiempo del experimento 1 hora. Porcentaje mensajes recibidos: 98.9%.

Figura 225.

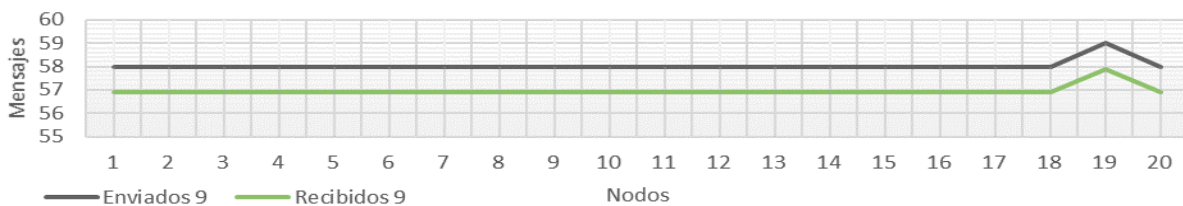
Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 8 (Escenario 8).



Nota: Tamaño del mensaje 100 bytes, tiempo entre mensajes 60 segundos, cantidad de nodos 15, y tiempo del experimento 1 hora. Porcentaje mensajes recibidos: 99.2%.

Figura 226.

Resumen de mensajes enviados versus estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 8 (Escenario 9).

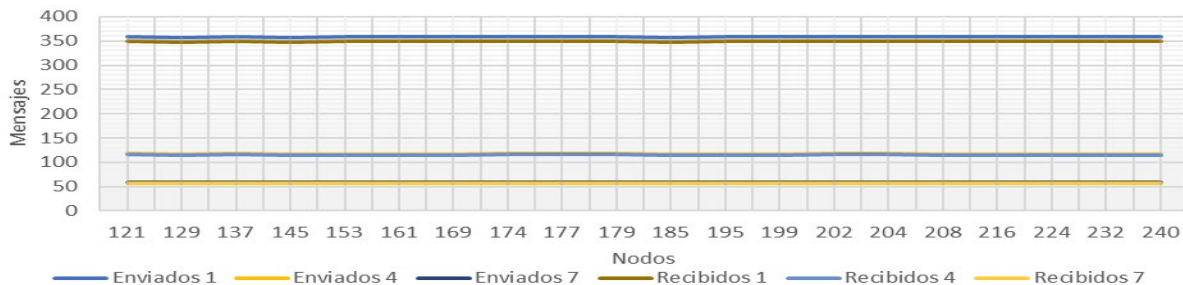


Nota: Tamaño del mensaje 191 bytes, tiempo entre mensajes 60 segundos, cantidad de nodos 15, y tiempo del experimento 1 hora. Porcentaje mensajes recibidos: 98.9%.

Las siguientes son las gráficas de comparativas de escenarios para los mensajes enviados y el estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 8.

Figura 227.

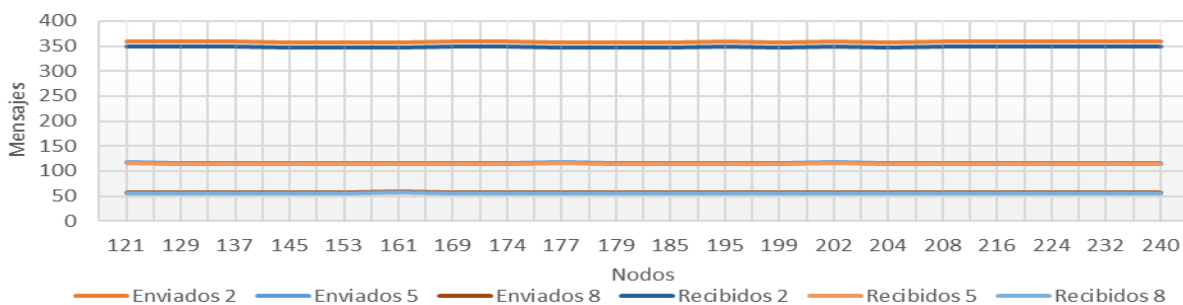
Comparación entre escenarios 1, 4 y 7 para los mensajes enviados y el estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 8.



Nota: Tamaño del mensaje 20 bytes. Cantidad de nodos 15. Tiempo del experimento 1 hora. Escenario 1: tiempo entre mensajes 10 segundos. Porcentaje mensajes recibidos: 98.0%. Escenario 4: tiempo entre mensajes 30 segundos. Porcentaje mensajes recibidos: 98.7%. Escenario 7: tiempo entre mensajes 60 segundos. Porcentaje mensajes recibidos: 98.9%.

Figura 228.

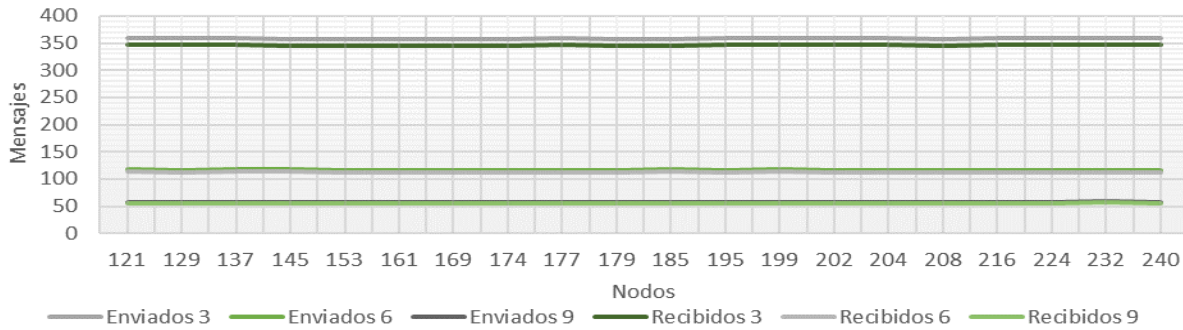
Comparación entre escenarios 2, 5 y 8 para los mensajes enviados y el estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 8.



Nota: Tamaño del mensaje 100 bytes. Cantidad de nodos 15. Tiempo del experimento 1 hora. Escenario 2: tiempo entre mensajes 10 segundos. Porcentaje mensajes recibidos: 97.6%. Escenario 5: tiempo entre mensajes 30 segundos. Porcentaje mensajes recibidos: 98.1%. Escenario 8: tiempo entre mensajes 60 segundos. Porcentaje mensajes recibidos: 99.2%.

Figura 229.

Comparación entre escenarios 3, 6 y 9 para los mensajes enviados y el estimado de mensajes recibidos por los nodos en la topología 8

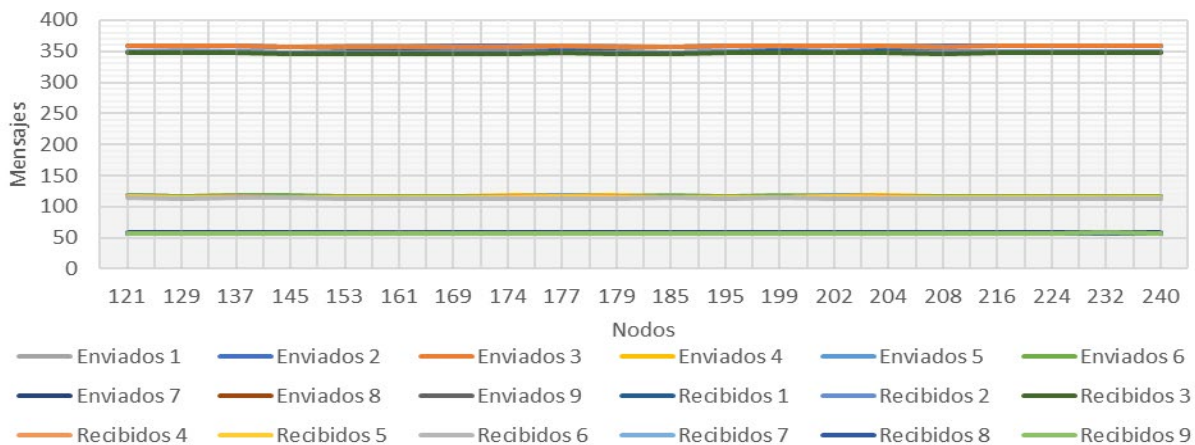


Nota: Tamaño del mensaje 191 bytes. Cantidad de nodos 15. Tiempo del experimento 1 hora. Escenario 3: tiempo entre mensajes 10 segundos. Porcentaje mensajes recibidos: 98.0%. Escenario 6: tiempo entre mensajes 30 segundos. Porcentaje mensajes recibidos: 97.5%. Escenario 9: tiempo entre mensajes 60 segundos. Porcentaje mensajes recibidos: 98.9%.

La siguiente es la gráfica de Resumen de los datos de los mensajes para los experimentos en IoT-Lab para la Topología 8.

Figura 230.

Resumen de los datos de los mensajes para los experimentos de la Topología 8 en IoT-Lab.



Nota: Cantidad de nodos 15. Tiempo de cada experimento: 1 hora. Tiempo entre mensajes: 10 s. Porcentaje mensajes recibidos: 98.0% (escenario 1: 20 bytes), 97.6% (escenario 2: 100 bytes), 98.0% (escenario 3: 191 bytes). Tiempo entre mensajes: 30 s. Porcentaje mensajes recibidos: 98.7% (escenario 4: 20 bytes), 98.1% (escenario 5: 100 bytes), 97.5% (escenario 6: 192 bytes). Tiempo entre mensajes: 60 s. Porcentaje mensajes recibidos: 98.9% (escenario 7: 20 bytes), 99.2% (escenario 8: 100 bytes), 98.9% (escenario 9: 192 bytes).

5. Análisis de resultados

En los resultados de simulaciones se observa en las Figuras 26, 30, 34, 38, 42, 46 y 50 que la potencia en las distintas topologías de los escenarios propuestos no supera los 1.5 vatios. Entre las distintas potencias monitoreadas la potencia invertida en la escucha de mensajes es la de mayor valor. En las Figuras 24, 28, 32, 36, 40, 44 y 48 donde se resumen las métricas ETX y saltos para llegar al nodo raíz se observa una peor métrica ETX cuanto más se está lejos del nodo raíz.

En los experimentos en IoT-Lab en las distintas topologías propuestas el comportamiento promedio de la potencia, corriente y voltaje tienden a tener el mismo valor, indistintamente del tamaño de los mensajes a enviar por parte de los nodos o el intervalo de tiempo entre envíos de mensajes.

En IoT-Lab, el promedio del indicador de fuerza de señal recibida RSSI visto en las figuras 75 a 82 se observa que en cada una de la pruebas de una misma topología presenta un comportamiento similar cuando se varía el tamaño de los mensajes a enviar y el intervalo de tiempo entre envíos de mensajes.

En IoT-Lab, el promedio del indicador de calidad de enlace LQI en cada una de la pruebas de una misma topología presento un comportamiento similar cuando se varió el tamaño de los mensajes a enviar y el intervalo de tiempo entre envíos de mensajes.

La potencia promedio varía entre 0.14 y 0.15 vatios. De otra parte, la corriente promedio varía entre 0.04 y 0.05 amperios. Y el voltaje varia en la mayoría de las pruebas entre 3.2 y 3.4 voltios sin importar la topología y el tamaño del mensaje. Lo cual se puede apreciar revisando las figuras 51 a 74 para experimentos en IoT-Lab. En las figuras 51 a 58, se observa que el consumo de potencia en los nodos tiene muy poca variabilidad para las diferentes topologías.

Las figuras 59 a 66 y las figuras 67 a 74 confirman la poca variación del gasto energético en los nodos para los diferentes escenarios de experimentación, es decir respecto a la variación de tamaños de mensajes, del intervalo de tiempo de envío de mensajes y de la topología. Esto muestre que RPL le saca provecho a los enlaces y es eficiente en el enrutado de los paquetes, lo que causa que los enlaces tengan pocas retransmisiones y anomalías.

El parámetro de los enlaces RSSI no cambia significativamente para cada nodo en los diferentes experimentos dentro de una misma topología. Pero si cambia entre diferentes topologías.

Las figuras 75 a 82 también muestran que, al aumentar la cantidad de nodos en una topología, el parámetro RSSI tiene más diversidad entre los nodos.

Contrastando la figura 78 del comportamiento de RSSI para las topologías 4 y 6 (figuras 16 y 18) se observa que la topología en malla favorece un mejor nivel de intensidad de señal recibida, lo cual implica mejor métrica ETX para RPL.

El comportamiento de LQI es similar al de RSSI, es mejor cuando se tiene topología malla; lo cual favorece para que RPL tenga una mejor métrica ETX. De las figuras del comportamiento de LQI, figuras 83 y 90, se destacan las figuras 86 y 88 para las topologías 4 y 6.

Observando las figuras 115 a 230 que resumen los resultados de experimentos en IoT-Lab para el envío de mensajes se encuentra un muy buen desempeño de todos los nodos en todas las topologías, para diferentes tamaños de mensajes y para diferentes intervalos de entrega de los mensajes.

Considerando las tasa de entregas de mensajes en IoT-Lab, en general superiores al 95% se puede obtener una estimación de ETX genérica de valor 1.1 para los diferentes escenarios en IoT-Lab, calculando ETX así: $ETX = 1/(0.95*0.95) = 1.1$ (Jin et al., 2011) (Cisco Systems, 2015). Que comparada con los resultados de ETX de las simulaciones en *Cooja* es muy alta si se compara con lo que se presenta en las figuras 24, 28, 32, 36, 40, 44 y 48. Puesto que *Cooja* no tiene un modelo de los enlaces cercano a la realidad de IoT-Lab, las topologías en las simulaciones muestran valores de ETX muy altos. Las figuras de resumen de tiempos de entrega de los mensajes para los diferentes experimentos muestran un buen desempeño en las simulaciones en *Cooja* (figuras 25, 29, 33, 37, 41, 45 y 49).

6. Conclusiones

A partir de los resultados, el análisis de resultados del capítulo anterior y la reflexión sobre el trabajo realizado en la ejecución del trabajo de grado se concluye lo siguiente:

La potencia, la corriente y el voltaje promedio varían poco sin importar el tamaño de los mensajes a enviar por parte de los nodos, el intervalo de tiempo entre envíos de mensajes o la topología.

La topología afecta la Métrica ETX porque cuanto más lejos está el nodo emisor del nodo raíz, mayor es el número de saltos necesarios para llegar a este y la métrica empeora.

La calidad de enlace LQI promedio no se ve afectado por el tamaño de los mensajes a enviar y el intervalo de tiempo entre envíos de mensajes.

El indicador de fuerza de señal recibida RSSI no ve afectado por el tamaño de los mensajes a enviar y el intervalo de tiempo entre envíos de mensajes.

Se obtuvo un conjunto de datos de resultados de experimentación que estarán disponibles para quien los quiera utilizar en posteriores trabajos.

IoT-Lab es un valioso recurso para experimentación en IoT y mucho más si se compara con el entorno simulado de *Cooja*.

RPL y los enlaces de las redes IEEE 802.15.4 tienen una relación de círculo virtuoso.

La topología en malla favorece el desempeño de RPL.

El eficiente enrutamiento de RPL favorece la vida útil de las baterías de los nodos de las redes IEEE 802.15.4.

Las redes desplegadas en IoT-Lab presentaron muy buen desempeño.

Es muy conveniente el conocimiento en lenguaje C y el manejo del sistema operativo Linux para trabajar en plataformas de acceso remoto para IoT.

Referencias Bibliográficas

- Adjih C., Baccelli E., Fleury E., Harter G., Mitton N., Noel T., Pissard-Gibollet R., Saint-Marcel F., Schreiner G., Vandaele G., W. T. (2015). *FIT IoT-LAB: A Large Scale Open Experimental IoT Testbed*. <https://www.iot-lab.info/>
- Buyya, R., & Dastjerdi, A. V. (2016). 1.2 INTERNET OF THINGS DEFINITION EVOLUTION. In *Internet of things : Principles and paradigms* (pp. 5–7).
- Cama, A., & Cama, D. (2012). Las redes de sensores inalámbricos y el internet de las cosas. *Inge Cuc*, 8(1), 163–172.
- Cisco Systems, I. A. rights reserved. (2015). *Routing Protocol for LLN (RPL) Configuration Guide, Cisco IOS Release 15M&T*. https://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/ios-xml/ios/rpl/configuration/15-mt/rpl-15-mt-book.html#concept_012DB79914844B24B7E10A88B127A2AC
- Cobos, A. (2016). *Diseño e implementación de una arquitectura IoT basada en tecnologías Open Source*. 133. <https://bit.ly/2vqrsx9>
- Dunkels, A, Eriksson, N., Österlind, F., & Tsiftes, N. (2006). The Contiki Operating System. In *Web page Visited*. <http://www.contiki-os.org/>
- Dunkels, Adam, Grönvall, B., & Voigt, T. (2004). Contiki - A lightweight and flexible operating system for tiny networked sensors. *Proceedings - Conference on Local Computer Networks, LCN*, 455–462. <https://doi.org/10.1109/LCN.2004.38>
- González García, A. J. (2017). “IoT: Dispositivos, tecnologías de transporte y aplicaciones.” <http://openaccess.uoc.edu/webapps/o2/handle/10609/64286>

- Institute of Electrical and Electronics Engineers, I. (2010). *802.15.4-2015 - IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks*. 2015(December 2009), 29–33.
- Jin, Y., Miao, H., Ge, Q., & Zhou, C. (2011). Expected transmission energy route metric for wireless mesh sensor networks. *International Journal of Digital Multimedia Broadcasting*, 2011. <https://doi.org/10.1155/2011/947396>
- Kurniawan, A. (2018). Practical Contiki-NG. In *Practical Contiki-NG*. <https://doi.org/10.1007/978-1-4842-3408-2>
- Sobral, J. V. V., Rodrigues, J. J. P. C., Rabêlo, R. A. L., Saleem, K., & Furtado, V. (2019). LOADng-IoT: An enhanced routing protocol for internet of things applications over low power networks. *Sensors (Switzerland)*, 19(1), 1–27. <https://doi.org/10.3390/s19010150>
- Sun, H., Wang, C., & Ahmad, B. I. (2018). Low power wide area (LPWA) networks for IoT applications. In *From Internet of Things to Smart Cities: Enabling Technologies* (pp. 323–355). <https://doi.org/10.1201/b20595>