

EQUISBÍ

**Desarrollo de aplicaciones
con comunicación remota
basadas en módulos ZigBee y 802.15.4**



Sergio R. Caprile

Índice de contenido

Prefacio.....	xix
Introducción.....	1
Preámbulo.....	1
Principios de comunicaciones inalámbricas.....	1
Potencia de salida.....	1
Ganancia de antena.....	2
Antena isotrópica.....	2
Patrón de irradiación (radiation pattern).....	2
Diagramas de irradiación.....	2
EIRP.....	3
Sensibilidad de recepción.....	3
Relación de señal a ruido.....	4
Propagación.....	4
Atenuación por espacio libre.....	4
Fórmula de Friis.....	4
Línea directa de visión (LOS).....	5
Zonas de Fresnel.....	5
Altura de la antena (reflexiones en el suelo).....	6
Modelo de Egli.....	8
Irregularidades del terreno.....	9
Difracción.....	9
Estimación estadística (statistical path loss law).....	10
Modelo de Longley-Rice (ITM).....	10
Caminos múltiples (multipath fading, shadowing).....	10
Móviles: fast fading.....	11
Modelo de Loo.....	13
Áreas urbanas	14
Espacios interiores.....	14
Recomendación P.1238 de la ITU-R.....	14
Cálculo de enlace (Link budget).....	15
Aproximaciones prácticas.....	16
Atenuación de diversos obstáculos a 2,4GHz.....	17
Modulación.....	17
Métodos m-arios.....	18
Spread spectrum.....	22
Frequency Hopping Spread Spectrum (FHSS).....	22
Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS).....	23
Principios de comunicaciones de datos.....	26
Full-duplex y half-duplex.....	26
DTE, DCE, señales de interfaz.....	26
Control de flujo.....	27

Velocidad efectiva.....	28
Multiplexado.....	28
Topologías.....	29
Punto a punto.....	29
Punto a multipunto.....	29
Multidrop.....	30
Multipunto.....	30
Peer-to-peer (entre pares).....	31
Estrella.....	31
Árbol (Tree).....	32
Cluster tree.....	33
Mesh.....	33
Topologías físicas y lógicas o virtuales: el grado de abstracción.....	34
Disponibilidad.....	36
Redundancia.....	36
Tasa de error (Bit Error Rate, BER).....	36
Sistemas de conmutación de paquetes.....	37
Modelo OSI.....	37
Nivel 1: Physical layer (Capa Física).....	38
Nivel 2: Data link layer (Capa o nivel de enlace de datos).....	38
Subnivel MAC: Medium Access Control (Control de acceso al medio).	38
Nivel 3: Network layer (Capa de red).....	38
Rutas estáticas (static routes).....	39
Ruta por defecto (default route).....	39
Algoritmos de tipo "link-state".....	39
Algoritmos de tipo "distance vector".....	39
Nivel 4: Transport layer (Capa de transporte).....	41
Confiabilidad y certeza en la entrega de la información.....	41
Confirmación de recepción y/o retransmisión.....	41
Detección de errores.....	42
Eficiencia.....	43
Acceso múltiple.....	43
Métodos de acceso al medio.....	44
Aloha.....	44
Slotted-Aloha.....	44
Sistemas CSMA.....	45
Performance.....	47
Latencia.....	47
Velocidad efectiva (throughput o thruput).....	48
Análisis de modelos simples.....	48
Random bytes.....	48
Random packets.....	49
Streaming.....	49
Polling.....	50

Dimensionamiento.....	51
Cantidad de estaciones.....	51
Latencia.....	52
Sincronización.....	55
Sincronización de bases de tiempo.....	56
Detección de inicio y fin de mensaje.....	57
Diferencias fundamentales en un medio inalámbrico.....	58
Detección de colisiones.....	58
Estaciones ocultas (hidden station problem).....	59
Estación expuesta (exposed station problem).....	60
Overhead y latencia.....	61
Apéndice.....	62
Ley de la inversa del cuadrado.....	62
Fórmula de Friis.....	62
Transferencia debida a una reflexión en el suelo.....	64
Desmitificación de las zonas de Fresnel.....	66
Curvatura de la tierra.....	67
Horizonte óptico y horizonte de radio.....	68
Shadowing.....	70
Fast fading.....	71
Presencia de componente directa.....	72
Difracción.....	73
QPSK.....	73
IEEE 802.15.4.....	77
Introducción.....	77
Nivel físico: PHY.....	77
Evaluación del canal.....	78
Energy Detection (ED).....	78
Clear Channel Assessment (CCA).....	79
Sincronización.....	79
Nivel de enlace (data-link): MAC.....	80
Acceso al medio: CSMA-CA.....	80
Direccionamiento.....	83
Dirección extendida (Extended address).....	83
Dirección corta (Short address).....	83
Identificador de red (PAN ID).....	84
Broadcasts.....	84
Tipos de tramas.....	84
Datos.....	85
ACK (Acuse de recibo).....	86
Comandos.....	87
Beacon.....	88
Detección de errores.....	89
Confirmación de recepción.....	89
Espacio entre tramas.....	89

Topologías.....	90
Tipos de dispositivos.....	90
Redes sin coordinador.....	90
Comunicación entre dispositivos.....	90
Redes con coordinador.....	91
Tipos de nodos.....	91
Redes sin beacon (nonbeacon-enabled).....	91
Comunicación desde un dispositivo hacia el coordinador.....	92
Comunicación desde el coordinador hacia un dispositivo.....	92
Sincronización y operación en bajo consumo.....	93
Redes con beacon (beacon-enabled).....	93
Nivel de enlace revisited: superframe.....	93
Nivel físico revisited: slotted CSMA-CA.....	95
Comunicación desde un dispositivo hacia el coordinador.....	97
Comunicación desde el coordinador hacia un dispositivo.....	98
Sincronización y operación en bajo consumo.....	99
Inicio de una red.....	99
Asociación.....	100
Disociación (Disassociation).....	101
Reconexión.....	101
Orphan scan.....	101
Seguridad.....	101
Throughput y latencia.....	104
Latencia.....	104
Análisis de casos simples.....	106
Transmisión de un byte.....	106
Transmisión de cien bytes.....	107
Transmisión y recepción de un byte.....	107
Transmisión de cien bytes y recepción de diez bytes.....	109
Conclusiones.....	111
Latencia end-to-end.....	111
Tiempo de roundtrip (ida y vuelta).....	113
Influencia del acceso al medio y la carga de la red.....	115
Tiempos relacionados a la certeza de envío y recepción.....	116
Tiempo de incertidumbre de envío.....	116
Tiempo de confirmación de recepción.....	117
Throughput.....	118
Capacidad máxima disponible.....	118
Eficiencia y aggregate throughput.....	119
Throughput por estación.....	121
Consideraciones para el diseño de redes 802.15.4.....	125
Alcance.....	126
Posicionamiento del centro de red (coordinador).....	126
Hidden nodes.....	126
Seguridad.....	126

Protocolo de Aplicación.....	127
Throughput, latencia y cantidad de estaciones.....	127
Apéndice.....	131
Generación de DSSS.....	131
Probabilidad de colisión dadas k estaciones intentando acceder simultáneamente.....	131
Tiempo de demora debido al proceso de random backoff.....	132
ZigBee.....	135
ZigBee en pocas palabras.....	135
Introducción.....	135
Inicio de una red ZigBee.....	135
Coordinador.....	135
Routers.....	136
End-devices.....	136
Routing en una red ZigBee.....	136
Comunicación de aplicaciones en una red ZigBee.....	137
Binding.....	137
ZigBee en detalle.....	137
¿Cuántos tipos de ZigBee hay ?.....	138
Según la historia.....	138
Según el tipo de certificación.....	139
Estructura.....	140
Tipos de nodos.....	142
Router.....	143
Coordinador.....	143
End-device.....	143
Topologías.....	143
Árbol.....	144
Asignación distribuida de direcciones a los nodos.....	144
Mesh.....	145
Asignación estocástica de direcciones a los nodos.....	145
Inicio de una red ZigBee.....	146
Beacon payload.....	147
Membresía en una red ZigBee.....	147
Asociación.....	147
Retorno (rejoin).....	148
Declararse huérfano (orphaning).....	148
Abandonando una red ZigBee.....	148
Routing en una red ZigBee.....	149
Algoritmos de routing.....	149
AODV.....	149
Árbol jerárquico (hierarchical tree routing).....	152
Rutas indicadas desde el origen (source routing).....	154
Rutas hacia concentradores de información (many-to-one routing).....	155
Broadcast.....	156

Multicast.....	157
NWK.....	158
Interacción con 802.15.4.....	158
Direccionamiento.....	159
Tramas de datos.....	160
Tramas de comandos.....	161
Comunicación de aplicaciones en una red ZigBee.....	162
¿Qué ocurre en una comunicación?.....	163
APS.....	172
Modo de entrega (Delivery mode).....	175
Tipos de tramas.....	175
Fragmentación.....	178
Aplicaciones en una red ZigBee.....	178
Descriptores.....	179
Descriptor del nodo.....	179
Descriptor de las capacidades de energía del nodo.....	179
Descriptor simple.....	179
Sobre perfiles y clusters.....	180
ZCL: ZigBee Cluster Library como biblioteca de tipos de mensajes.....	180
ZCL: ZigBee Cluster Library como protocolo de aplicación.....	182
ZDO: ZigBee Device Objects.....	182
ZDP: ZigBee Device Profile.....	183
Seguridad en una red ZigBee.....	184
Claves de seguridad.....	184
El Centro de Seguridad (Trust Center).....	185
Modos y niveles de seguridad.....	185
Membresía en una red segura.....	186
Autenticación en el modo de seguridad standard.....	187
Autenticación en el modo de alta seguridad.....	187
Comunicación de aplicaciones en una red con seguridad standard.....	189
Seguridad en NWK.....	189
Comunicación de aplicaciones en una red con alta seguridad.....	190
Seguridad en APS.....	190
Consideraciones para el diseño de redes ZigBee.....	191
Alcance.....	191
Posicionamiento del coordinador.....	192
Posicionamiento de los concentradores de información.....	192
Hidden nodes.....	192
Posicionamiento de los routers.....	192
Seguridad.....	193
Protocolo de Aplicación.....	193
Throughput, latencia y cantidad de estaciones.....	193
¿Y las primitivas?¿Cómo uso APSDE-DATA.request?¿En qué lenguaje programo?¿?.....	194

Apéndice.....	195
Probabilidad de conflicto al asignar una dirección corta.....	195
Probabilidad de adivinar un MIC al azar.....	196
¿ 802.15.4 ó ZigBee ?.....	199
Soluciones standard y propietarias.....	199
802.15.4/ZigBee o [... o]	200
802.15.4 vs. ZigBee.....	201
Throughput y latencia.....	201
Self-healing y routing.....	201
Complejidad de la red.....	202
Complejidad del stack.....	202
Seguridad.....	202
Ejemplos.....	202
¿ Por qué XBee ?.....	205
Módulos vs. chipsets.....	205
XBee vs. otras alternativas.....	207
Regalías, membresías y compañía.....	207
XBee 802.15.4.....	209
Introducción.....	209
Características principales.....	209
Configuración y operación.....	210
Comunicaciones.....	211
Introducción.....	211
Punto a punto.....	211
Punto a multipunto.....	212
Caso 1: recolección de datos remotos.....	212
Caso 2: comunicación en ambos sentidos.....	214
Peer-to-peer (entre pares).....	216
Broadcasts.....	216
Redes con Coordinador.....	217
Introducción.....	217
Red punto a multipunto con coordinador.....	217
Asociación.....	218
Comunicación.....	219
Transmisión de datos del coordinador a los remotos	220
Operación en bajo consumo.....	220
Selección de PAN y canal de RF.....	220
Coordinador.....	221
Remotos.....	221
Ejemplos de aplicación.....	221
Modbus punto a punto.....	222
Modo out-of-the-box.....	223
Modo bajo consumo.....	225
Modbus multipunto.....	231
Operación en bajo consumo.....	235

Hibernate.....	235
Doze.....	236
Cyclic sleep.....	236
Cyclic sleep with pin wake-up.....	236
Lectura de Entradas.....	237
Introducción.....	237
Entradas analógicas.....	237
Bajo consumo.....	237
Entradas digitales.....	237
Pull-up.....	237
Bajo consumo.....	237
Lectura de la información.....	238
Muestreo y envío de la información.....	238
Bajo consumo.....	239
Detección de cambios (Change Detect).....	239
Detección de cambios en bajo consumo.....	239
Recepción de la información.....	239
Manejo de Salidas.....	240
Introducción.....	240
Salidas digitales.....	241
Bajo consumo.....	241
Salidas PWM.....	241
Salida de RSSI.....	241
Conexión virtual entrada a salida (I/O line passing).....	241
Introducción.....	242
Salidas digitales.....	242
Pérdida de la conexión.....	243
Bajo consumo.....	243
Salidas PWM.....	243
Pérdida de la conexión.....	244
Bajo consumo.....	244
Consideraciones para el diseño de redes basadas en XBee 802.15.4.....	244
Alcance.....	244
Certeza de envío y confirmación de recepción.....	245
Throughput y Latencia.....	245
Latencia.....	245
Throughput.....	247
Seguridad.....	248
Hardware.....	249
XBee ZB.....	251
Introducción.....	251
Características principales.....	251
Configuración y operación.....	252
Inicio de una red XBee ZB.....	253
Asociación del router.....	253

Asociación del end-device.....	260
Comunicaciones.....	266
Introducción.....	266
Comunicación punto a punto.....	268
Comunicación punto a multipunto.....	269
Caso 1a: comunicación en un sentido (hacia el coordinador), el coordinador es el centro de red.....	269
Caso 1b: el centro de red es otro módulo cualquiera.....	270
Caso 2: comunicación en ambos sentidos.....	270
Comunicación peer to peer.....	271
Broadcasts.....	272
Ejemplos de aplicación.....	272
Modbus punto a punto.....	272
Modo semi out-of-the-box.....	273
Modo bajo consumo.....	276
Modbus multipunto.....	280
Operación del end-device en bajo consumo.....	281
Pin sleep.....	282
Cyclic sleep.....	282
Extended sleep (sueño prolongado).....	283
Cyclic sleep with pin wake-up.....	283
Lectura de entradas.....	283
Introducción.....	283
Entradas analógicas.....	284
Entradas digitales.....	284
Pull-up.....	284
Bajo consumo.....	284
Lectura local de la información.....	284
Lectura remota de la información.....	286
Envío periódico de la información.....	288
Recepción de la información.....	288
Detección de cambios (Change Detect).....	289
Detección de cambios en bajo consumo.....	289
Bajo consumo (sólo end-devices).....	289
Manejo de salidas.....	289
Control de las salidas.....	290
Control a distancia.....	290
Bajo consumo y resets.....	291
¿ Cómo funciona el XBee ZB ?.....	291
Aplicación: Transmisión de datos.....	291
Profile-ID.....	292
Endpoints.....	292
Además, el proceso de node discovery que se realiza como respuesta a un comando ND, utiliza el endpoint 0xE6.....	292
Routing.....	292

Link Status.....	293
Aplicación: mi aplicación ZigBee.....	294
Consideraciones para el diseño de redes basadas en XBee ZB.....	295
Alcance.....	295
Certeza de envío y confirmación de recepción.....	295
Seguridad.....	295
Throughput y Latencia.....	298
Latencia.....	298
Throughput.....	299
Hardware.....	300
Modo API.....	301
Introducción.....	301
Descripción del framing API.....	301
Modos: con y sin caracteres de escape.....	301
Tipos de tramas.....	302
Tramas particulares de XBee 802.15.4.....	303
Datos de I/O.....	304
Tramas particulares de XBee ZB.....	305
Datos de I/O.....	306
Modo explícito.....	307
Node ID.....	308
Recepción de tramas.....	309
Modo sin caracteres de escape.....	309
Detección de inicio de trama.....	309
Detección de fin de trama.....	309
Desincronización y resincronización.....	310
Algoritmo.....	310
Modo con caracteres de escape.....	311
Detección de inicio de trama.....	311
Detección de fin de trama.....	311
Desincronización y resincronización.....	311
Recuperación de datos.....	312
Algoritmo.....	312
Implementación en C.....	314
API XBee 802.15.4.....	316
Ejemplo de utilización.....	317
Contenido del archivo API-802_15_4.zip.....	318
API XBee ZB.....	319
Ejemplo de utilización.....	321
Contenido del archivo API-ZB.zip.....	322
Ejemplo de utilización: node discovery (ndzb.c).....	323
Sobre abejas y conejos.....	327
Introducción.....	327
xbee_api.lib.....	327
Introducción.....	327

Inicialización.....	328
Definiciones.....	328
En tiempo de ejecución.....	329
Membresía de la red.....	329
Network Discovery.....	330
Encontrando un nodo en particular.....	330
El centro de control: xbee_tick().....	331
Manejo de parámetros del XBee.....	332
Configuración remota.....	332
Comunicación de datos.....	332
Transmisión de un mensaje.....	333
Transmisión a una dirección conocida.....	333
Transmisión de broadcasts.....	333
Transmisión a un nodo descubierto.....	334
Recepción de datos.....	334
Contestar al remitente.....	334
Recepción de mensajes de I/O de otros nodos.....	334
Aplicaciones ZigBee (uso de endpoints).....	335
Transmisión a una dirección conocida.....	336
Transmisión a una dirección descubierta.....	336
Recepción.....	336
Datos útiles.....	337
Usando ZDO.....	337
Depuración.....	339
Conectando un XBee a cualquier módulo Rabbit.....	339
Ejemplos de aplicación en página web.....	340