

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

DEPARTAMENTO DE COMUNICACIONES



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

TESIS DOCTORAL

«MODELADO Y EVALUACIÓN DE PRESTACIONES DE REDES DE
SENSORES INALÁMBRICOS HETEROGÉNEOS CON CICLO DE TRABAJO
SÍNCRONO»

Autor: Canek Portillo Jiménez

Directores: Dr. Jorge Martínez Bauset
Dr. Vicent Pla Boscà

VALÈNCIA

MAYO 2021

*A Rocío, Mateo y Mariana; por su amor,
apoyo y fortaleza en cualquier
circunstancia.*

Agradecimientos

Quisiera expresar mi gratitud al Dr. Jorge Martínez Bauset; agradecer su ayuda, su apoyo, en todo el proceso de desarrollo de esta investigación. Más allá de haber compartido su experiencia y conocimientos, le agradezco sobre todo su enorme paciencia y gran calidad humana.

Quiero agradecer también al Dr. Vicent Pla Boscà, sus consejos, apoyo y comprensión, además de generosamente haberme abierto las puertas de la UPV.

A todos los miembros del grupo GIRBA. Al Dr. Vicente Casares y al Dr. Luis Guijarro, por su amabilidad. Los cursos que imparten son excelentes. A mis compañeros de laboratorio: Luis, Israel, Ángel, Jairo, Julián y Amal, les agradezco su ayuda y compañerismo.

Muy especialmente agradezco a mis padres Tomás e Irene, a mis hermanas Xitlali y Nicté. Muchas gracias por su apoyo incondicional.

También quisiera agradecer el apoyo recibido por parte de:

- The European Union under the program Erasmus Mundus Partnerships, project EuroinkaNet, GRANT AGREEMENT NUMBER - 2014 - 0870/001/001.

Agradecer también al pueblo de México que, por medio de sus impuestos, permite la existencia de apoyos como el otorgado a través de:

-
- La Secretaría de Educación Pública (México), bajo el Programa para el Desarrollo Profesional Docente: SEP-SES (DSA/103.5/15/6629).

Finalmente, quiero agradecer a la Universidad Autónoma de Sinaloa por haberme permitido continuar con mi preparación académica. Agradecer a todos los estudiantes y profesores que, en épocas pasadas, lucharon por mejorar las condiciones laborales de los trabajadores en general, logrando con mucho esfuerzo y no sin pérdidas, conquistar ese derecho.

Abstract

Wireless sensor networks (WSN) have experienced a resurgence due to the development of the Internet of Things (IoT). One of the characteristics of IoT is the deployment of applications that require sensor devices and actuators. In applications such as building automation, energy management, industrial or health, the sensor nodes that make up the WSN transmit information to a central collector or sink. The information is processed, analyzed and used for specific purposes. In each of these applications, the sensor devices can be considered part of a WSN.

In this sense, the modeling and performance evaluation of WSN is important, since it allows obtaining a clearer vision of their behavior, facilitating an adequate design and a successful operation.

In the present thesis, analytical models based on Discrete Time Markov Chains (DTMC) have been developed to evaluate the performance of WSN. The parameters defined for the performance evaluation are: average consumed energy, energy efficiency, throughput and average packet delay. The obtained results have been validated by means of discrete event simulation (DES).

There are studies of WSN in homogeneous scenarios, where the nodes that compose the WSN are of the same type and have the same operating characteristics. In these previous studies, homogeneous WSN are defined as a cell or cluster composed of a central node or sink, which receives the information from the sensor nodes located around it. These nodes operate in

SPT (Single Packet Transmission), sending a single packet per transmission cycle.

However, it is possible to find, especially now with the development of the IoT, scenarios where different types of nodes coexist, although they have different characteristics or specific operational requirements. This results in the formation of clusters whose nodes have different applications, uneven power consumption, different data transmission rates, and even different priorities for access to the transmission channel. These types of scenarios, which we call heterogeneous, are part of the scenarios studied in this thesis work.

In the first part, a model has been developed to evaluate the performance of a heterogeneous WSN and with priorities to access a common channel. The model includes a two-dimensional DTMC pair (2D-DTMC), whose solution in terms of the stationary probability distribution is used to obtain the performance parameters. Closed expressions are provided for the determination of performance parameters of interest, given in terms of the stationary distribution of the 2D-DTMC.

In a second part, an analytical model is developed to evaluate the performance of a heterogeneous WSN, where nodes operate in aggregate packet transmission (APT) mode and deploy different channel access priorities. Unlike the previous model, where the nodes transmit one packet per cycle (SPT) when they gain access to the channel, in APT the nodes can transmit a number of packets larger than one, that is the minimum between a configurable parameter and the number of packets in the packet queue of the node. This results in greater energy efficiency and throughput, while decreases the average packet delay.

In a third part, a new analytical model is proposed to determine the energy consumption of the nodes that make up a WSN. Unlike previous computation procedures, this alternative proposal is based on more intuitive and systematic expressions, and allows to obtain more accurate results. With this new procedure, energy studies are performed for WSN in homogeneous and heterogeneous scenarios.

Resumen

Las redes de sensores inalámbricas (WSN) han experimentado un resurgimiento debido al desarrollo de la Internet de las Cosas (IoT). Una de las características de las aplicaciones de la IoT es la necesidad de hacer uso de dispositivos sensores y actuadores. En aplicaciones como automatización de edificios, de gestión energética, industriales o de salud, los nodos sensores que componen la WSN, transmiten información a un colector central o *sink*. La información es posteriormente procesada, analizada y utilizada para propósitos específicos. En cada una de estas aplicaciones, los dispositivos sensores pueden considerarse como parte de una WSN.

En ese sentido el modelado y la evaluación de las prestaciones en las WSN es importante, ya que permite obtener una visión más clara de su comportamiento, facilitando un adecuado diseño y una exitosa puesta en operación.

En el presente trabajo de tesis se han desarrollado modelos matemáticos para evaluar las prestaciones de WSN, los cuales están basados en Cadenas de Markov en Tiempo Discreto (DTMC). Los parámetros de prestaciones elegidos para la evaluación son: energía consumida promedio, eficiencia energética, caudal cursado y retardo promedio de los paquetes. Los resultados que se han obtenido, han sido validados por medio de simulación basada en eventos discretos (DES).

Existen estudios de WSN en escenarios homogéneos, donde los nodos que componen la red inalámbrica son del mismo tipo y tienen las mismas características de operación. En estos análisis se definen WSN homogéneas

compuestas por un nodo central o sumidero (*sink*), que recibe la información de los nodos sensores localizados alrededor, formando una célula o *cluster*. Estos nodos realizan las transmisiones en SPT (*Single Packet Transmission*), enviando un solo paquete por ciclo de transmisión.

Sin embargo, es posible encontrar, más ahora con el desarrollo de la IoT, escenarios donde coexisten distintos tipos de nodos, con características diferentes y, por tanto, con requerimientos de operación específicos. Esto da lugar a la formación de *clusters* cuyos nodos tienen aplicaciones distintas, desigual consumo de energía, diversas tasas de transmisión de datos, e incluso diferentes prioridades de acceso al canal de transmisión. Este tipo de escenarios, que denominamos heterogéneos, forman parte de los escenarios estudiados en el presente trabajo de tesis.

En una primera parte, se ha desarrollado un modelo para evaluar las prestaciones de una WSN heterogénea y con prioridades de acceso al medio. El modelado incluye un par de DTMC de dos dimensiones (2D-DTMC) cada una, cuya solución en términos de la distribución de probabilidad estacionaria, es utilizada para determinar los parámetros de prestaciones. Se desarrollan, por tanto, expresiones cerradas para los parámetros de prestaciones, en función de la distribución estacionaria que se ha obtenido a partir de la solución de las 2D-DTMC.

En una segunda parte, se desarrolla un modelo analítico también pensado para escenarios heterogéneos y con prioridades, pero en el que los nodos de la WSN, cuando consiguen acceso al canal, transmiten un conjunto de paquetes en vez de uno solo como en el modelo de la primera parte. Estos dos modos de operación de los sensores los denominamos *aggregated packet transmission* (APT) y *single packet transmission* (SPT), respectivamente. El número de paquetes que un nodo funcionando en APT transmite cuando accede al canal es el menor entre un parámetro configurable y el número de paquetes que tuviera en la cola en ese momento. Este modo de operación consigue una mayor eficiencia energética y un aumento en el caudal cursado, además de una disminución en el retardo promedio de los paquetes.

En una tercera parte, se propone un nuevo procedimiento analítico para la determinación del consumo energético de los nodos que conforman una WSN. A diferencia de los métodos de cálculo anteriores, la nueva propuesta permite obtener resultados más precisos, y al mismo tiempo, permite obtener expresiones más intuitivas y sistemáticas. Con este nuevo procedimiento, se realizan estudios energéticos para WSN en escenarios homogéneos y heterogéneos.

Resum

Les xarxes de sensors sense fils (WSN) han experimentat un ressorgiment causa de al desenvolupament de la Internet de les Coses (IoT). Una de les característiques de IoT és la inclusió, en les seves aplicacions, de dispositius sensors i actuadors. En aplicacions com automatització d'edificis, de gestió energètica, industrials o de salut, els nodes sensors que componen la WSN, transmeten informació a un col·lector central o *sink*. La informació és posteriorment processada, analitzada i utilitzada per a propòsits específics. En cadascuna d'aquestes aplicacions, els dispositius sensors poden considerar com a part d'una WSN.

En aquest sentit el modelitzat i l'avaluació de l'acompliment en les WSN és important, ja que permet obtenir una visió més clara del seu comportament, facilitant un adequat disseny i una exitosa posada en operació.

En el present treball de tesi s'han desenvolupat models matemàtics per avaluar l'acompliment de WSN, els quals estan basats en Cadenes de Markov en Temps Discret (DTMC). Els paràmetres d'acompliment obtinguts per a l'avaluació són: energia consumida mitjana, eficiència energètica, cabal cursat i retard mitjà dels paquets. Els resultats que s'han obtingut, han estat validats per mitjà de simulació basada en esdeveniments discrets (DES).

Existeixen estudis de WSN en escenaris homogenis, on els nodes que componen la xarxa sense fils són de el mateix tipus i tenen les mateixes característiques d'operació. En aquests anàlisis prèvies es defineixen WSN homogènies compostes per un node central o embornal (*sink*), que rep la

informació dels nodes sensors localitzats al voltant, formant una cèl·lula o *cluster*. Aquests nodes realitzen les transmissió en SPT (*Single Packet Transmission*), és a dir, enviant un sol paquet cada vegada que transmeten.

No obstant això, és possible trobar, més ara amb el desenvolupament de la IOT, escenaris on hi ha una coexistència de disintos tipus de nodes, amb característiques diferents i, per tant, amb requeriments d'operació específics. Això dóna lloc a formació de *clusters* els nodes tenen aplicacions diferents, desigual consum d'energia, diverses taxes de transmissió de dades, i fins i tot diferent prioritats d'accés a canal de transmissió. Aquest tipus d'escenaris, que anomenem heterogenis, formen part dels escenaris estudiats en el present treball de tesi.

En una primera part, s'ha desenvolupat un model per avaluar l'acompliment d'una WSN heterogènia i amb prioritats d'accés al medi. El modelitzat inclou un parell DTMC de dues dimensions (2D-DTMC), la solució en termes de la distribució estacionària de probabilitat, és utilitzada per obtenir posteriorment els paràmetres d'acompliment. Es desenvolupen, per tant, expressions tancades per a la determinació dels paràmetres d'acompliment, on és substituïda la distribució estacionària que s'ha obtingut a partir de la solució de les 2D-DTMC.

En una segona part, es desenvolupa un model, en el qual els nodes pertencientes a la WSN, poden transmetre els seus paquets en agregat (APT) en escenaris heterogenis i amb prioritats. A diferència del model anterior, on els nodes transmeten un paquet per cicle (SPT), en APT els nodes poden transmetre més d'un paquet. Això porta com a conseqüència una major eficiència energètica, a més d'un augment en el cabal cursat i disminució en el retard mitjana.

En una tercera part, es proposa un nou desenvolupament analític per a la determinació del consum energètic dels nodes que conformen una WSN. A diferència de les expressions utilitzades anteriorment per al càlcul del consum energètic, aquesta proposta alternativa permet obtenir resultats més precisos a través del desenvolupament d'expressions més intuïtives i sis-

temàtiques. Amb aquest nou procediment, es realitzen estudis energètics per WSN en escenaris homogenis i heterogenis.

Abreviaturas y acrónimos

ACK Trama de reconocimiento (*Acknowledgement*)

APT Transmisión de paquetes en agregado (*Aggregated Packet transmission*)

CSMA/CA Acceso múltiple con detección de portadora y evasión de colisiones (*Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance*)

CTS Libre para envío (*Clear to Send*)

DC Ciclo de trabajo (*Duty Cycling*)

DES Simulación de eventos discretos (*Discrete Event Simulation*)

DTMC Cadena de Markov en tiempo discreto (*Discrete Time Markov Chain*)

FIFO Primero en entrar, primero en salir (*First in, First out*)

IoT Internet de las cosas (*Internet of Things*)

ITS Sistema inteligente de transporte (*Intelligent Transport System*)

MAC Control de acceso al medio (*Medium Access Control*)

PSA-MAC Acceso prioritario al nodo central o sumidero (*Priority Sink Access - MAC*)

SC1 Escenario 1

SC2 Escenario 2

SPT Transmisión de un solo paquete (*Single Packet transmission*)

RN Nodo de referencia (*Reference Node*)

RTS Petición para envío (*Request to Send*)

S-MAC Control de acceso al medio en sensores (*Sensor Medium Access Control*)

WBAN Red inalámbrica de área corporal (*Wireless Body Area Network*)

WSN Red de sensores inalámbricos (*Wireless Sensor Network*)

2D-DTMC DTMC de dos dimensiones (*two-Dimensional DTMC*)

Contenido

Abstract	vii
Resumen	ix
Resum	xiii
Abreviaturas y acrónimos	xvii
Lista de Figuras	xxvii
Lista de Tablas	xxxv
1 Introducción	1
1.1 Escenario Tecnológico	1
1.1.1 Contribuciones	6
1.2 Objetivo general	8
1.3 Objetivos específicos	8
1.4 Metodología	9
1.5 Herramientas	10
1.6 Estructura de la tesis	10

2	Contextualización y contribución	13
2.1	Introducción	13
2.2	Modelos previos	13
2.2.1	Modelo de un Nodo (1D)	14
2.2.2	Modelo 2D	19
2.3	Parámetros de Prestaciones	20
2.3.1	Energía promedio consumida - Cadena 1D	20
2.3.2	Energía Consumida - Cadena 2D	21
2.4	Contribuciones	21
3	Modelado de red WSN heterogénea	29
3.1	Introducción	29
3.2	Trabajos relacionados	29
3.3	Escenario de red	31
3.3.1	Protocolo MAC	31
3.3.2	Operación de la red y suposiciones	32
3.3.3	Asignación de prioridades de acceso medio	34
3.4	Modelado del sistema	35
3.4.1	Acceso al medio	35
3.4.2	Sistema de dos clases y prioridades	37
3.4.3	Solución de las 2D-DTMC	42
3.4.4	Parámetros de prestaciones	44
	Caudal cursado	44
	Retardo promedio de los paquetes	45
3.4.5	Modelo para el cálculo del consumo energético	46
3.5	Resultados numéricos	49

3.5.1	Escenarios y configuración de parámetros	50
3.5.2	Retardo promedio de los paquetes	51
3.5.3	Caudal cursado	54
3.5.4	Consumo promedio de energía	56
3.6	Conclusiones	57
4	Modelado de red WSN heterogénea: Mejora del cálculo de consumo energético	59
4.1	Introducción	59
4.2	Parámetros de prestaciones	60
4.2.1	Caudal cursado	60
4.2.2	Retardo promedio de los paquetes	61
4.3	Modelo para el cálculo del consumo energético	62
4.3.1	Evaluación de las prestaciones del método mejorado para determinar el consumo de energía	65
4.4	Resultados Numéricos	66
4.4.1	Validación del modelo 2D-DTMC	66
4.4.2	Escenarios y configuración de parámetros	68
4.4.3	Retardo promedio de los paquetes	69
4.4.4	Caudal cursado	72
4.4.5	Consumo promedio de energía	74
4.5	Conclusiones	76
5	Modelado de red WSN heterogénea: Transmisión de paquetes con agregación de tráfico (APT)	79
5.1	Introducción	79
5.2	Trabajos relacionados	80

- 5.3 Escenario de red 81
 - 5.3.1 Operación de red y suposiciones 81
 - 5.3.2 Asignación de prioridades de acceso al medio 82
- 5.4 Modelado del sistema 82
 - 5.4.1 Sistema de dos clases y prioridades 82
 - 5.4.2 Solución de las 2D-DTMC 88
- 5.5 Parámetros de prestaciones 90
 - 5.5.1 Caudal cursado 90
 - 5.5.2 Retardo promedio de los paquetes 91
 - 5.5.3 Consumo promedio de energía 92
- 5.6 Resultados numéricos 94
 - 5.6.1 Escenarios y configuración de parámetros 94
 - 5.6.2 Retardo promedio de los paquetes 95
 - 5.6.3 Caudal cursado 96
 - 5.6.4 Consumo promedio de energía 97
- 5.7 Estudio desagregado de la energía y eficiencia energética 98
 - 5.7.1 Desglose de las componentes de consumo energético 99
 - 5.7.2 Eficiencia Energética 101
 - 5.7.3 Eficiencia energética y variación del tamaño de la ventana de contienda 103
 - 5.7.4 Análisis del consumo energético debido a colisiones y al *overhearing* 105
 - 5.7.5 Eficiencia energética (gasto energético por unidad de datos) 108
 - 5.7.6 Eficiencia energética (gasto energético por unidad de datos) y variación del tamaño de la ventana de contienda 110
- 5.8 Conclusiones 111

6 Estudio de consumo energético de ciclo completo: Red WSN Homogénea.	113
6.1 Introducción	113
6.2 Trabajos relacionados	114
6.3 Escenario de red	116
6.3.1 Protocolo MAC con ciclo de trabajo sincronizado	116
6.3.2 Operación de la red y suposiciones	117
6.4 Modelo del sistema	118
6.4.1 Acceso al medio	118
6.4.2 La 2D-DTMC	119
6.4.3 Solución de la 2D-DTMC	119
6.5 Modelo para el cálculo del consumo energético	120
6.5.1 Consumo promedio de energía durante el periodo <i>sync</i>	120
6.5.2 Consumo promedio de energía en el periodo <i>data</i>	121
6.5.3 Consumo promedio de energía durante los ciclos <i>awake</i>	122
6.5.4 Consumo promedio de energía durante los ciclos <i>normal</i>	124
6.5.5 Consumo energético promedio total	125
6.5.6 Eficiencia energética	126
Eficiencia energética	126
Eficiencia energética (gasto energético por unidad de datos)	126
6.6 Resultados numéricos	127
6.6.1 Escenarios y configuración de parámetros	127
6.6.2 Consumo promedio de energía	128
6.6.3 Eficiencia energética	133
6.7 Conclusiones	135

- 7 Estudio de consumo energético de ciclo completo: Red WSN heterogénea. 137
 - 7.1 Introducción 137
 - 7.2 Trabajos relacionados 138
 - 7.3 Consumo energético de una WSN con dos clases de nodos . . . 139
 - 7.3.1 Consumo promedio de energía en el período *sync* 142
 - 7.3.2 Consumo promedio de energía en el período *data* 142
 - 7.3.3 Consumo medio de energía durante los ciclos *awake* . . 144
 - 7.3.4 Escenario de consumo en estado *awake* para la clase 1 . 145
 - 7.3.5 Energía consumida en *awake* por RN_1 145
 - 7.3.6 Escenario de consumo en estado *awake* para la clase 2 . 150
 - 7.3.7 Energía consumida en *awake* por RN_2 151
 - 7.3.8 Consumo promedio de energía durante los ciclos *normal* 154
 - Para los nodos de clase 1 155
 - Para los nodos de clase 2 156
 - 7.3.9 Consumo promedio total de energía 157
 - 7.4 Resultados numéricos 158
 - 7.4.1 Escenarios y configuración de parámetros 158
 - 7.4.2 Componentes del consumo energético. 159
 - 7.4.3 Número mínimo de paquetes en cola (b_m) para contener por el medio 166
 - 7.5 Conclusiones 174

- 8 Conclusiones 177

Apéndices	183
A Notación, variables y parámetros más utilizados	183
B Tablas de las expresiones para obtener las probabilidades de transición del modelo 2D (capítulo 2)	185
C Procedimiento de cálculo energético previo para las cadenas de 1D y 2D (capítulo 2)	189
C.1 Retardo y Energía Consumida	189
C.1.1 Cadena 1D	189
D Tablas de las expresiones para obtener las probabilidades de transición de las 2D-DTMC (capítulo 3)	193
E Tablas de las expresiones para obtener las probabilidades de transición de las 2D-DTMC con agregación de tráfico (APT)(capítulo 5)	197
F Tablas de las expresiones para obtener las probabilidades de transición de la 2D-DTMC. Escenario WSN homogénea con SPT (capítulo 6)	203
G Publicaciones	205
G.1 Revistas	205
G.2 Congresos	205
H Proyectos de investigación	207
Bibliografía	209

Lista de Figuras

2.1	Diagrama de estados de la cadena del <i>nodo</i>	16
2.2	Diagrama de estados de la cadena del <i>sistema</i>	17
2.3	Esquema del acoplamiento entre ambas 2D-DTMC.	24
3.1	Un ciclo de operación con los periodos <i>active</i> y <i>sleep</i> . El periodo <i>active</i> se subdivide en los periodos <i>sync</i> y <i>data</i>	31
3.2	Red heterogénea de sensores inalámbricos (WSN) con dos clases de nodos. Los nodos de clase 1 (C1) tienen prioridad de acceso al canal sobre los nodos de clase 2 (C2). Se define un nodo de referencia (RN) por cada clase.	33
3.3	Protocolo MAC en funcionamiento durante el periodo <i>data</i> , para ambas clases de nodos.	34
3.4	Retardo promedio de los paquetes en ciclos para ambas clases de nodos (D_1 y D_2) y ambos escenarios (SC1 y SC2). Tasa de arribo de paquetes para la clase 1: $\lambda_1 = 0.5$	52
3.5	Retardo promedio de los paquetes en ciclos para ambas clases de nodos (D_1 y D_2) en el escenario 1 (SC1). Tasas de arribo de paquetes para la clase 1: $\lambda_1 = \{0.5, 1\}$	53
3.6	Retardo promedio de los paquetes en ciclos para los nodos de clase 2 (D_2) en ambos escenarios (SC1 y SC2). Tasas de arribo de paquetes para la clase 1: $\lambda_1 = \{0.5, 1\}$	53

3.7 Caudal cursado por nodo para la clase 2 (η_2) considerando ambos escenarios (SC1 y SC2). Tasa de arribo de paquetes para la clase 1: $\lambda_1 = 0.5$ 55

3.8 Caudal total cursado en el sistema (Th) para ambas clases de nodos considerando el escenario 1 (SC1). Tasa de arribo de paquetes para la clase 1: $\lambda_1 = 0.5$ 55

3.9 Consumo promedio de energía (E) por nodo por ciclo. Se consideran ambos escenarios (SC1 y SC2) y ambas clases. Tasa de arribo de paquetes para la clase 1: $\lambda_1 = 0.5$ 56

4.1 Retardo promedio de los paquetes para ambas clases de nodos (D_1 y D_2), considerando el escenario 1 (SC1). Tasa de arribo de paquetes para la clase 1: $\lambda_1 = \{0.5, 1\}$ 70

4.2 Retardo promedio de los paquetes para la clase 2 (D_2) considerando ambos escenarios (SC1 y SC2). Tasa de arribo de paquetes para la clase 1: $\lambda_1 = \{0.5, 1\}$ 70

4.3 Retardo promedio de los paquetes para la clase 2 (D_2) en el escenario 1 (SC1). Ventana de contienda para la clase 1: $W_1 = 16$. Tasa de arribo de paquetes para la clase 1: $\lambda_1 = 0.5$ 71

4.4 Caudal cursado por nodo para la clase 2 (η_2), considerando ambos escenarios (SC1 y SC2). Tasa de arribo de paquetes para la clase 1: $\lambda_1 = 0.5$ 73

4.5 Caudal total cursado en el sistema (Th) para ambas clases de nodos (SC1 y SC2). Cantidad de nodos de clase 1: $N_1 = 5$. Tasa de arribo de paquetes para los nodos de clase 1 y clase 2, respectivamente: $\lambda_1 = 0.5, \lambda_2 = 1.5$ 73

4.6 Consumo promedio de energía (E_2) para ambas clases considerando ambos escenarios (SC1 y SC2). Tasa de arribo de paquetes para los nodos de clase 1: $\lambda_1 = 0.5$ 75

4.7	Consumo promedio de energía para la clase 2 (E_2) en el escenario 1 (SC1). Ventana de contienda de los nodos de clase 1: $W_1 = 16$. Tasa de arribo de paquetes para los nodos de clase 1: $\lambda_1 = 0.5$	75
5.1	Operación del protocolo MAC durante el período <i>data</i> para ambas clases de nodos. Se observa la unidad de información TRAMA en el proceso de transmisión.	83
5.2	Retardo promedio de los paquetes considerando ambas clases de nodos (D_1 y D_2) y ambos esquemas de transmisión (SPT y APT). Tasa de arribo de paquetes para la clase 1: $\lambda_1 = 0.5$. Escenario SC2 ($N_1 = 5, N_2 = 20, Q_1 = Q_2 = 10$).	95
5.3	Caudal cursado por nodo, considerando ambas clases de nodos (η_1 y η_2) y ambos esquemas de transmisión (SPT y APT). Tasa de arribo de paquetes para la clase 1: $\lambda_1 = 0.5$. Escenario SC2 ($N_1 = 5, N_2 = 20, Q_1 = Q_2 = 10$).	97
5.4	Consumo promedio de energía para ambas clases de nodos (E_1 y E_2) y ambos esquemas de transmisión (SPT y APT). Tasa de arribo de paquetes para la clase 1: $\lambda_1 = 0.5$. Escenario SC2 ($N_1 = 5, N_2 = 20, Q_1 = Q_2 = 10$).	98
5.5	Desglose de las componentes de consumo energético (éxito (Suc), colisión (Col), <i>overhearing</i> (Oh) y Total) para los nodos de clase 2, considerando APT ($F_1 = F_2 = 10$). Tasa de arribo de paquetes de clase 1: $\lambda_1 = 0.5$. Escenario SC2 ($N_1 = 5, N_2 = 20, Q_1 = Q_2 = 10$).	99
5.6	Desglose de las componentes de consumo energético (éxito (Suc), colisión (Col), <i>overhearing</i> (Oh) y Total) para los nodos de clase 2, considerando SPT (ambas clases). Tasa de arribo de paquetes de clase 1: $\lambda_1 = 0.5$. Escenario SC2 ($N_1 = 5, N_2 = 20, Q_1 = Q_2 = 10$).	100

5.7 Eficiencia energética para los nodos de la clase 2 (EE_2). Se consideran ambos modos de transmisión (SPT and APT), y una tasa de transmisión de paquetes para los nodos de clase 1: $\lambda_1 = 0.5$. Escenario SC2 ($N_1 = 5, N_2 = 20, Q_1 = Q_2 = 10$). 102

5.8 Eficiencia energética para la clase 2 (EE_2). Modo de transmisión APT ($F_1 = F_2 = 10$). Ventana de contienda y tasa de arribo de paquetes (clase 1): $W_1 = 16$ y $\lambda_1 = 0.5$. Escenario SC2 ($N_1 = 5, N_2 = 20, Q_1 = Q_2 = 10$). 104

5.9 Eficiencia energética para los nodos de clase 2 (EE_2). Modo de transmisión SPT (ambas clases). Ventana de contienda y la tasa de arribo de paquetes (clase 1): $W_1 = 16$ y $\lambda_1 = 0.5$. Escenario SC2 ($N_1 = 5, N_2 = 20, Q_1 = Q_2 = 10$). 104

5.10 Energía consumida por colisiones para la clase 2 (E_{2COL}). Modo de transmisión APT ($F_1 = F_2 = 10$). $W_1 = 16$ y $\lambda_1 = 0.5$. Escenario SC2 ($N_1 = 5, N_2 = 20, Q_1 = Q_2 = 10$). 106

5.11 Proporción de energía consumida cuando se transmite con colisión respecto a la energía total para la clase 2 (E_{2COL}/E_2). Modo de transmisión APT ($F_1 = F_2 = 10$). $W_1 = 16$ y $\lambda_1 = 0.5$. Escenario SC2 ($N_1 = 5, N_2 = 20, Q_1 = Q_2 = 10$). 106

5.12 Energía consumida debido a *overhearing* para la clase 2 (E_{2oh}). Modo de transmisión APT ($F_1 = F_2 = 10$). Ventana de contienda y tasa de arribo paquetes (clase 1): $W_1 = 16$ y $\lambda_1 = 0.5$. Escenario SC2 ($N_1 = 5, N_2 = 20, Q_1 = Q_2 = 10$). 107

5.13 Proporción de energía consumida debido al *overhearing* respecto a la energía total para los nodos de clase 2 (E_{2oh}/E_2). Se utiliza el modo de transmisión APT ($F_1 = F_2 = 10$). La ventana de contienda y la tasa de arribo de paquetes para la clase 1 son: $W_1 = 16$ y $\lambda_1 = 0.5$, respectivamente. Escenario SC2 ($N_1 = 5, N_2 = 20, Q_1 = Q_2 = 10$). 108

5.14 Eficiencia energética (ζ), para ambas clases de nodos. Se consideran ambos modos de transmisión (APT y SPT). Escenario SC2 ($N_1 = 5, N_2 = 20, Q_1 = Q_2 = 10$). 109

5.15 Eficiencia energética (ζ_2), para los nodos de la clase 2. Se considera el modo de transmisión APT ($F_1 = F_2 = 10$). Escenario SC2 ($N_1 = 5, N_2 = 20, Q_1 = Q_2 = 10$). 110

5.16 Eficiencia energética (ζ_2), para los nodos de la clase 2. Se considera el modo de transmisión SPT (ambas clases). Escenario SC2 ($N_1 = 5, N_2 = 20, Q_1 = Q_2 = 10$). 111

6.1 Red de sensores inalámbricos (WSN) homogénea (una clase de nodos). Se define un nodo de referencia (RN). 118

6.2 Proceso de transmisión. 119

6.3 Consumo promedio total de energía. El número de nodos que conforman la red es de $N = 15$ 129

6.4 Diferentes contribuciones a la energía consumida por el RN a medida que la tasa de llegada de datos varía, cuando $N = 15$ 130

6.5 Diferentes contribuciones a la energía consumida por el RN a medida que la tasa de llegada de datos varía, cuando $N = 15$. Desglose de E_d y E_{nr} 130

6.6 Energía promedio total consumida por RN a medida que varía el número de nodos, cuando $\lambda = 1.5$ 131

6.7 Diferentes contribuciones a la energía consumida por el RN a medida que varía el número de nodos, cuando $\lambda = 1.5$ 132

6.8 Diferentes contribuciones a la energía consumida por RN a medida que varía el número de nodos, cuando $\lambda = 1.5$. Desglose de datos en *data-tx* y *normal* 133

6.9 Eficiencia energética (EE) a medida que la tasa de arribo de datos varía, cuando $N = 15$ 134

6.10 Eficiencia energética (ξ) a medida que la tasa de arribo de datos varía, cuando $N = 15$ 135

7.1 Red heterogénea de sensores inalámbricos (WSN) con dos clases de nodos. Los nodos de clase 1 (C1) tienen prioridad de acceso al canal sobre los nodos de clase 2 (C2). Se define un nodo de referencia (RN) por cada clase. 140

7.2 Proceso de transmisión. Incluye los periodos de los procedimientos de acceso al medio y de transmisión de los paquetes SYNC 141

7.3 Componentes del consumo energético, para la clase 1, durante el periodo *data*, y las fases *awake* y *normal*. Modo de transmisión SPT (ambas clases) y $Q_1 = Q_2 = 10$ 160

7.4 Componentes del consumo energético, para la clase 2, durante el periodo *data*, y las fases *awake* y *normal*. Modo de transmisión SPT (ambas clases) y $Q_1 = Q_2 = 10$ 160

7.5 Componentes del consumo energético, para la clase 1, durante el periodo *data*, y las fases *awake* y *normal*. Modo de transmisión APT ($F_1 = F_2 = 2$) y $Q_1 = Q_2 = 10$ 161

7.6 Componentes del consumo energético, para la clase 2, durante el periodo *data*, y las fases *awake* y *normal*. Modo de transmisión APT ($F_1 = F_2 = 2$) y $Q_1 = Q_2 = 10$ 162

7.7 Componentes del consumo energético, para la clase 1, durante el periodo *data*, y las fases *awake* y *normal*. Modo de transmisión APT ($F_1 = F_2 = 5$) y $Q_1 = Q_2 = 10$ 163

7.8 Componentes del consumo energético, para la clase 2, durante el periodo *data*, y las fases *awake* y *normal*. Modo de transmisión APT ($F_1 = F_2 = 5$) y $Q_1 = Q_2 = 10$ 163

7.9 Componentes del consumo energético, para la clase 1, durante el periodo *data*, y las fases *awake* y *normal*. Modo de transmisión APT ($F_1 = F_2 = 10$) y $Q_1 = Q_2 = 10$ 165

7.10 Componentes del consumo energético, para la clase 2, durante el periodo *data*, y las fases *awake* y *normal*. Modo de transmisión APT ($F_1 = F_2 = 10$) y $Q_1 = Q_2 = 10$ 165

7.11 Consumo energético al variar el número máximo de paquetes que se transmiten por trama (F). El valor del número mínimo de paquetes en cola para contener por el medio se mantiene en todos los casos ($b_m = 1$). ($N = 15, Q = 10, W = 128$). 168

7.12 Consumo energético al variar el número mínimo de paquetes en cola para contener (b_m) y el número máximo de paquetes que se transmiten por trama (F). ($b_m = F, N=15, Q=10, W=128$). 169

7.13 Porcentaje de ahorro energético como consecuencia de modificar el número mínimo de paquetes en cola para contener ($b_m = 1$), en combinación con el número máximo de paquetes a transmitir por trama (F). ($N=15, Q=10, W=128$). 170

7.14 Retardo promedio de los paquetes al variar el número máximo de paquetes que se transmiten por trama (F). El valor del número mínimo de paquetes en cola para contener por el medio se mantiene en todos los casos en $b_m = 1$. ($N = 15, Q = 10, W = 128$). 171

7.15 Retardo al variar el número mínimo de paquetes en cola para contener (b_m) y el número máximo de paquetes que se transmiten por trama (F). ($b_m = F, N=15, Q=10, W=128$). 171

7.16 Probabilidad de pérdida de los paquetes por desbordamiento en la cola del RN (P_L). $F = \{2, 5, 10\}$ y $b_m = 1$. ($N = 15, Q = 10, W = 128$). 173

7.17 Probabilidad de pérdida de los paquetes por desbordamiento en la cola del RN (P_L). $b_m = F = \{2, 5, 10\}$. ($N=15, Q=10, W=128$). 174

Lista de Tablas

3.1	Configuración de parámetros [1].	51
4.1	Errores relativos para los dos métodos de cálculo energético. . .	66
4.2	Configuración de parámetros [1].	68
6.1	Configuración de parámetros [1].	128
7.1	Configuración de parámetros [1].	159
B.1	Matriz de probabilidades de transición (I).	186
B.2	Matriz de probabilidades de transición (II).	187
B.3	Matriz de probabilidades de transición (III).	187
D.1	Probabilidades de transición de la 2D DTMC (nodos de clase 1)	194
D.2	Probabilidades de transición de la 2D DTMC (nodos de clase 2)	195
E.1	Probabilidades de transición de la 2D-DTMC con APT para los nodos de clase 1 (I)	198
E.2	Probabilidades de transición de la 2D-DTMC con APT para los nodos de clase 1 (II)	199

E.3 Probabilidades de transición de la 2D-DTMC con APT para los
nodos de clase 2 (I) 200

E.4 Probabilidades de transición de la 2D-DTMC con APT para los
nodos de clase 2 (II) 201

F.1 Probabilidades de transición de la 2D DTMC 204

Capítulo 1

Introducción

1.1 Escenario Tecnológico

La internet de las cosas (IoT) y las comunicaciones de máquina a máquina (M2M) se han posicionado como uno de los segmentos tecnológicos de más rápido crecimiento, empujando un creciente desarrollo de dispositivos utilizados en diversas aplicaciones de comunicación, tales como: sensores y actuadores. Dado lo anterior, las redes de sensores inalámbricos (WSNs) han experimentado un resurgimiento por la diversidad y el potencial de aplicaciones [2, 25, 27]. Una red de sensores inalámbricos (WSN) puede definirse como una colección de dispositivos o nodos con capacidad para monitorizar el ambiente y procesar información, pero también con capacidad de comunicación entre los diferentes nodos en una forma cooperativa [7, 56]. Entre las aplicaciones específicas para las WSNs tenemos: red eléctrica inteligente (*smart grid*), monitorización ambiental o agrícola, el cuidado de la salud (*health care*), automatización de procesos industriales, automatización de edificios y hogares (domótica) [7, 56, 39, 61, 17, 31, 45, 24] .

Por otro lado, dado que los nodos sensores que conforman la red inalámbrica son dispositivos que consumen relativamente poca energía, usualmente se

alimentan a base de baterías, por tanto, son dispositivos limitados energéticamente. El tiempo de vida de los nodos y, en consecuencia, el tiempo de vida de la WSN, dependerá de la capacidad de dichas baterías. [50, 48, 42]. Los principales componentes consumidores de energía de un nodo son: i) el sensor, que mide parámetros ambientales o de otro tipo; ii) el microcontrolador, que realiza actividades de procesamiento; y iii) el radio transmisor, que permite la comunicación inalámbrica. Por otro lado, dado que los nodos comparten un mismo canal de comunicación, necesitan realizar un proceso de acceso al medio para transmitir información, este mecanismo que se implementa para transmitir los paquetes en el canal de comunicación, implica un consumo significativo de energía [41]. En particular, el proceso de acceso al canal se rige por el protocolo de acceso al medio (MAC, *Medium Access Control*), cuya función principal es la coordinación del acceso de los nodos a un medio de transmisión común.

Existen tres enfoques para el diseño de los protocolos MAC: basados en reserva, basados en contienda y los protocolos híbridos [9, 41]. En los protocolos basados en contienda, los nodos deben competir por el medio inalámbrico compartido. Los nodos sensores esperan un cierto período de *back off* y realizan una de detección del canal para comprobar si está ocupado antes de transmitir los datos. Una ventaja de estos protocolos basados en contienda es su relativa simplicidad en comparación con los programados o basados en reserva. Otras ventajas son su escalabilidad ante cambios en la densidad de nodos y la carga de tráfico, y su mayor flexibilidad para cambios de topología. La desventaja principal de estos protocolos es la relativa ineficiencia debido al mecanismo de acceso, en comparación con los protocolos calendarizados o libres de contienda [27].

En los protocolos libres de contienda, a los nodos se les asignan recursos de la red de forma planificada, tal como frecuencia y tiempo, con la finalidad de prevenir colisiones. De esta forma, se evita pérdidas de energía debido a la escucha ociosa (*idle listening*), y al *overhearing* debido a la recepción de mensajes dirigidos a otros nodos. Comúnmente se necesita una estación base centralizada para implementar el algoritmo de asignación planificada de los

recursos de acceso. Además, son más adecuados, este tipo de protocolos, para redes donde los nodos presentan poca movilidad, y los cambios en la topología no son frecuentes.

Dos ejemplos de este tipo de protocolos son: TDMA (*Time Division Multiple Access*) en donde un solo canal de frecuencia se comparte con los nodos a través de la asignación de una ranura de tiempo a cada nodo de la red; y FDMA (*Frequency Division Multiple Access*), donde el ancho de banda disponible se subdivide en múltiples subbandas, de acuerdo al número de nodos de la red.

Los protocolos híbridos son combinaciones de los anteriores. En protocolos MAC para WSN se pueden encontrar combinaciones de FDMA con TDMA, y también algunos protocolos combinan protocolos basados en contienda con protocolos libres de contienda.

Para el caso de un protocolo MAC, que se implementa en una WSN, deben tener las siguientes características: eficiencia, escalabilidad, baja latencia, consumo bajo de energía; y que se pueda implementar utilizando *hardware* de bajo costo. Además, deben proporcionar un acceso equitativo a los nodos para que transmitan su información; su diseño debe permitir la reducción de la probabilidad de que ocurran colisiones entre transmisiones de los distintos nodos, se deberá mantener un bajo retardo, y también utilizar la energía eficientemente [9, 41].

De acuerdo con [21], los protocolos MAC se pueden clasificar en cuatro categorías: asíncronos, síncronos, basados en trama-ranura (frame-slotted), y multicanal. Típicamente, los protocolos síncronos y asíncronos funcionan en modo *duty cycle* para ahorrar energía, de forma que el sensor funciona en dos estados, despierto (activo) y durmiendo (inactivo). De esta forma, para que la comunicación entre dos sensores pueda producirse, es necesario que ambos estén despiertos simultáneamente.

Para ello, los protocolos síncronos requieren que los nodos estén sincronizados y se despierten al mismo tiempo. Como ventaja adicional, el retardo es más reducido y el caudal mayor. Sin embargo, como desventaja está el hecho

de que, en muchos casos, un nodo debe sincronizarse con dos o más ciclos de trabajo, si desea transferir paquetes a diferentes destinos. Los protocolos síncronos son más apropiados para aplicaciones de tráfico periódico donde el calendario de trabajo de los nodos es fácil de determinar.

Los protocolos asíncronos centran su esfuerzo en establecer comunicaciones entre nodos que siguen ciclos de trabajo diferentes de forma eficiente. En principio, son adecuados para aplicaciones de baja carga de tráfico donde las transmisiones de datos ocasionales no generan demasiada sobrecarga y la contención del canal no es grave. Básicamente se han definido dos técnicas para establecer la comunicación en los protocolos asíncronos: *sender-initiated low power listening* (LPL) y *receiver-initiated low power probing* (LPP). La segunda es más actual y busca aumentar las prestaciones del sistema y reducir costes del nodo que transmite la información.

Los protocolos del tipo *frame-slotted* centran sus esfuerzos en la asignación de ranuras temporales a los nodos, o a grupos de ellos, para permitir una transferencia de información con los vecinos libre de colisiones, y al mismo tiempo evitar el problema del *hidden terminal*. Sin embargo, una de las desventajas de estos protocolos es la baja utilización del canal cuando la carga es baja. En ese caso, un importante cantidad de ranuras temporales pueden perderse cuando los nodos no tienen información que transferir. Un caso especial de WSN es la red de área corporal (WBAN, *Wireless Body Area Network*). Una WBAN consta de una serie de sensores que están conectados con el cuerpo de una persona o son lo suficientemente pequeños para ser implantados. En estas redes el procedimiento de sincronización puede simplificarse debido a la estructura jerárquica. Los nodos maestros, que tienen más capacidad computacional, actúan como coordinadores y esto elimina la necesidad a otros nodos de la escucha ociosa.

Los protocolos multicanal han sido propuestos recientemente para aumentar las prestaciones de las WSN, realizando múltiples transferencias en paralelo. El problema principal al que deben enfrentarse estos protocolos es la gestión distribuida del uso de los canales.

Se han propuesto varios protocolos MAC para WSN que incluyen técnicas y estrategias cuyo objetivo es cumplir con los requerimientos antes mencionados. En relación al ahorro energético, existen protocolos que buscan ese objetivo (*energy-aware*), y en particular, las estrategias que implementan el ciclo de trabajo (*duty-cycling*), son propuestas para maximizar el tiempo de vida de los nodos sensores que operan con baterías [48, 9, 58, 59, 49, 13, 11]. Los protocolos MAC para WSN que utilizan *duty-cycling* (DC), emplean ciclos de reposo (*sleep*) y de vigilia (*awake*) para ahorrar energía en los periodos de escucha ociosa (*idle listening*), los cuales dan lugar a un consumo energético inútil, y ocurren cuando los nodos mantienen su radio encendido mientras escuchan al canal para recibir posibles datos.

El protocolo *sensor MAC* (S-MAC) pertenece a la categoría de protocolos síncronos que usan DC. Los nodos periódicamente se despiertan, reciben y transmiten información (con un consumo de potencia $P_{rx} = 59mW$ y $P_{tx} = 52mW$, respectivamente [1]), y regresan al modo *sleep* (consumiendo una potencia $P_{sl} = 3\mu W$ [1]). La sincronización ocurre al principio del periodo *awake*, permitiendo que el nodo y sus vecinos puedan despertar al mismo tiempo [13, 58, 59]. Ejemplos recientes de modelado y análisis de prestaciones con aplicaciones al protocolos DC síncrono, pueden encontrarse en [55, 33, 19]. En particular, en esos trabajos se ha modelado el protocolo utilizando cadenas de Markov en tiempo discreto (DTMC). Esos modelos se diseñaron considerando escenarios homogéneos, en los cuales todos los nodos se comportan de la misma forma en términos de carga, comunicación y capacidades energéticas.

Un escenario heterogéneo podría modificar el comportamiento de la red inalámbrica, por ejemplo, posibles variaciones de tráfico, haciendo necesario para los nodos trabajar con diferentes cargas de tráfico e incluso con diferentes prioridades de acceso al medio [7, 62, 51]. Diferentes tipos de protocolos MAC se han propuesto para hacer frente a las situaciones que presentan la redes con escenarios heterogéneos y tráfico variable [9, 22, 8, 12, 47], además de incorporar técnicas para proveer de priorización y esquemas de clasificación de tráfico [43, 46, 44].

Uno de los objetivos principales del trabajo llevado a cabo ha sido el desarrollo de nuevos modelos analíticos para WSN que utilizan protocolos DC MAC y que operan en escenarios heterogéneos, compuestos por diferentes clases de sensores, soportando diferentes cargas de tráfico y con diferentes prioridades de acceso al medio.

1.1.1 Contribuciones

Dentro de las contribuciones que resultaron de este trabajo, se destacan las siguientes:

El modelado analítico de WSN en escenarios heterogéneos en los cuales se incorpora a la red dos clases de nodos. Los resultados del modelo analítico se validan mediante simulación de eventos discretos, confirmando que el modelo predice con excelente precisión el comportamiento del sistema. Entre los parámetros de prestaciones principales obtenidos, se tiene: el consumo energético, el caudal eficaz y el retardo de los paquetes.

Se propone e implementa un procedimiento o protocolo para la operación conjunta entre los nodos de ambas clases, en el cual se establecen prioridades de acceso al medio para la transmisión de información por parte de los nodos. En el procedimiento de operación, que denominamos PSA-MAC (*Priority Sink Access MAC*), la etapa de sincronización de los nodos es común a ambas clases, mientras que la etapa posterior, donde contienen por el medio para la transmisión de los datos, se inicia primero para una de las clases; de esta forma se otorga prioridad en la transmisión a dicha clase.

Para llevar a cabo lo anterior, en una primera parte, se implementa una primera cadena de Markov en dos dimensiones (2D-DTMC) que describe la evolución de los paquetes en la cola del nodo de referencia de clase 1 (RN_1), además de describir el número de nodos activos de la misma clase en la WSN.

Por otro lado, también se propone, desarrolla e implementa una segunda cadena de Markov en dos dimensiones (2D-DTMC) que describe la evolución

de los paquetes en la cola del nodo de referencia de clase 2 (RN_2), además de describir el número de nodos activos de la misma clase en la WSN.

El modelo analítico se desarrolla a partir de las dos cadenas de Markov mencionadas anteriormente. Por tanto, se propone e implementa el acoplamiento entre dos cadenas de Markov, ya que permite partir o dividir la complejidad del análisis, además de simplificar el proceso de cómputo. En lugar de un posible modelo más complejo que incluya una cadena de Markov de cuatro dimensiones (4D-DTMC), se propone un modelo donde se acoplan dos cadenas de dos dimensiones cada una (2D-DTMC), realizándose con una muy buena aproximación, al utilizar dos nodos de referencia, uno por clase (RN_1 y RN_2).

Por otro lado, el modelo se basa en la información de los nodos de referencia, en cuanto al número de paquetes en cola y al número de nodos activos, de la clase correspondiente, de tal forma que no es necesario tener la información del estado de cada uno de los nodos que componen a WSN, permitiendo además la posibilidad de una análisis a mayor escala, más compacto y con muy buena aproximación.

En la construcción de las expresiones para las probabilidades de transición, que se desarrollan para la 2D-DTMC de la clase 2, se ha definido el parámetro $R_{1,0}$ referente a la fracción de ciclos en los que los nodos de clase 1 están inactivos, y que es importante su inclusión para el adecuado acoplamiento entre las cadenas de Markov. Otra forma de ver a este parámetro, es como la probabilidad de que no haya nodos activos de clase 1 en la WSN. De la misma forma, se tiene que tomar en cuenta para la determinación de los parámetros de prestaciones de los nodos de la clase 2.

Se ha propuesto una nueva forma de cómputo para determinar la energía consumida por los nodos de WSN homogéneas, que implica una mejora en precisión respecto a procedimientos previos, siendo además un método más sistemático e intuitivo.

Se propone también un procedimiento de cálculo del consumo energético para WSN del tipo heterogéneo, donde coexisten dos clases de nodos. En este

procedimiento se logra sortear y calcular con éxito la complejidad de tener más de una clase de nodos operando en la WSN; esto es especialmente cierto, cuando se determina el consumo considerando el modo o fase *awake* de los nodos.

1.2 Objetivo general

El objetivo general es la evaluación de prestaciones de WSN que operan con ciclo de trabajo (*duty-cycled*) síncrono, enfocándose en la evaluación del mecanismo de acceso al medio en escenarios heterogéneos. Los principales parámetros para el análisis de prestaciones son: retardo promedio de los paquetes, caudal cursado y consumo promedio de energía.

1.3 Objetivos específicos

- Desarrollar un modelo analítico basado en cadenas de Markov en tiempo discreto, que permita evaluar escenarios heterogéneos, donde se consideren diferentes clases de nodos conformando la red, transmitiendo en modo SPT (un paquete por ciclo), y haya asignación de prioridades.
- Desarrollar un nuevo método de cálculo para determinar el consumo energético de los nodos, considerando el periodo de transmisión donde los nodos están en su fase activa, y el modo de transmisión SPT.
- Desarrollar un modelo analítico para la evaluación de prestaciones de WSN que operen en escenarios heterogéneos y cuyos nodos utilicen el modo de transmisión denominado *Aggregated Packet Transmission* (APT) o Transmisión de paquetes con agregación de tráfico.
- Desarrollar un modelo analítico para determinar el consumo energético de los nodos de una WSN que opere en escenarios homogéneos. El modelo debe considerar los diferentes periodos en la operación de

los nodos: periodo de sincronización (*sync*), periodo de datos (*data*), el periodo inactivo (*sleep*), además de las fases de operación de reposo y vigilia.

- Desarrollar un modelo analítico para determinar el consumo energético de los nodos de una WSN que opere en escenarios heterogéneos. El modelo debe considerar los diferentes periodos en la operación de los nodos: periodo de sincronización (*sync*), periodo de datos (*data*), el periodo inactivo (*sleep*), además de las fases de operación de reposo y vigilia.

1.4 Metodología

La metodología se basa en la investigación bibliográfica, el análisis de estudios previos y en la propuesta de nuevas soluciones. El principal objetivo es desarrollar modelos analíticos para evaluar protocolos MAC para WSN. Las métricas de interés son: eficiencia energética, caudal cursado, y retardo de paquete. Existen diferentes enfoques matemáticos para el modelado de sistemas de comunicación. La teoría de colas y los procesos estocásticos son herramientas matemáticas que permiten un modelado relativamente sencillo y que han probado su efectividad en la determinación de los parámetros clave para determinar las prestaciones en aplicaciones de comunicaciones [34]. Para el modelado de los protocolos MAC, se aplica un análisis matemático estocástico y de colas. En particular, se modela aplicando cadenas de Markov en tiempo discreto (DTMC) para obtener los modelos de los protocolos MAC para las WSN. Los resultados obtenidos a partir de los modelos analíticos, se validan por medio de simulación por computadora basada en eventos discretos (DES, *Discrete Event Simulation*).

1.5 Herramientas

Las soluciones analíticas para los modelos propuestos se obtienen por medio de análisis numérico y se efectúa a través del software computacional MATLAB. Para la validación de los resultados obtenidos de los modelos analíticos, se utiliza el enfoque de simulación de eventos discretos, implementándose un software específico en lenguaje C.

1.6 Estructura de la tesis

En el capítulo 2 se presenta una contextualización de la contribución de este trabajo de tesis en relación con los trabajos previos relacionados.

En el capítulo 3 se presenta un modelo analítico para evaluar las prestaciones de una WSN considerando heterogeneidad en su composición e incluyendo prioridades en el acceso al medio. Se estudia el escenario constituido de dos clases de nodos, con otorgamiento de prioridad de acceso al medio a una de las clases, y transmisión en modo SPT. Se analizan y discuten resultados de retardo promedio de los paquetes, caudal cursado y consumo promedio de energía.

En el capítulo 4 se desarrolla una extensión del modelo del capítulo 3, la cual incorpora un nuevo procedimiento para la determinación del consumo energético, considerando modo de transmisión SPT, obteniéndose resultados más precisos de consumo de energía. Por otro lado, al escenario previamente considerado, se le incrementa el número de nodos en la WSN, obteniéndose resultados para los parámetros de prestaciones de retardo promedio de los paquetes, caudal cursado y consumo promedio de energía.

En el capítulo 5 se presenta un modelo analítico para evaluar las prestaciones de una WSN heterogénea donde existe asignación de prioridades para el acceso al canal de transmisión, y donde los nodos que transmiten sus paquetes, lo pueden hacer con agregación de tráfico (APT). Esto significa

que se pueden transferir varios paquetes por ciclo. En los anteriores modelos, la transmisión de los paquetes es de solo un paquete por ciclo (SPT). En una primera parte se discuten resultados de retardo promedio de los paquetes, caudal cursado y consumo promedio de energía, realizando un análisis comparativo entre ambos modos de transmisión APT y SPT. En una segunda parte, se presenta un estudio de la eficiencia energética, realizando una descomposición de la energía consumida por transmisión de los datos, por colisiones y *overhearing*.

Los últimos dos capítulos, previos a las conclusiones, se enfocan en un estudio exhaustivo del consumo energético de los sensores que componen la WSN. En el capítulo 6 se presenta el análisis de consumo energético, considerando todo el ciclo completo de transmisión. Esto implica tomar en cuenta el periodo utilizado por los nodos para la sincronización (*sync*), la transferencia de los datos y la desactivación de los nodos. Se considera también las fases de operación de reposo (*sleep*) y vigilia (*awake*) de los nodos sensores. El estudio se realiza para una WSN del tipo homogénea, donde solo un tipo de sensores componen la red inalámbrica.

En el capítulo 7, se realiza el análisis de prestaciones enfocado en el consumo energético considerando el ciclo completo de transmisión, tomando en cuenta heterogeneidad y prioridades de acceso en la WSN. Aquí también se toma en cuenta el periodo (*sync*), la transferencia de los datos y la desactivación de los nodos. Además, se consideran las fases de operación de (*sleep*) y (*awake*) de los nodos sensores. Por otro lado, en este escenario, se toma en cuenta los modos de transmisión de los paquetes: SPT y APT.

Por último en el capítulo 8 se presentan las conclusiones.

Capítulo 2

Contextualización y contribución

2.1 Introducción

Este capítulo tiene la finalidad de contextualizar la aportación de este trabajo de tesis respecto al trabajo previo realizado por el grupo de investigación. Dicho trabajo previo ha servido de base para continuar desarrollando y extendiendo esta investigación. En ese sentido, se presentan un par de modelos analíticos previos para el análisis de prestaciones de una WSN compuesta por múltiples sensores formando una única célula. Ambos modelos se basan en cadenas de Markov, uno de ellos en cadenas unidimensionales (1D), y el otro en cadenas bidimensionales (2D). Posteriormente, se presenta un apartado donde se resaltan las principales contribuciones de este trabajo de tesis.

2.2 Modelos previos

Los modelos anteriores se han obtenido siguiendo un proceso de desarrollo que permite la obtención de modelos cada vez más precisos. De esa forma, se inicia con la propuesta de un modelo que consiste en una cadena de Markov (1D), donde los estados representan el número de paquetes en el *buffer* de un

nodo de referencia elegido arbitrariamente entre los nodos de la red. En este modelo se considera que un nodo está activo con independencia del estado del resto de los nodos, comprobándose que esta suposición puede originar resultados con una precisión inaceptable. Por tanto, se opta por construir una segunda cadena de 1D, que describa la evolución del número de nodos activos con el tiempo. Con ambas cadenas de 1D en conjunto, la cadena del nodo y la cadena del sistema, se logra mejorar el modelo, aunque aún presenta una precisión no del todo satisfactoria. Finalmente, se logra mejorar la precisión del modelo analítico al combinar ambas cadenas, la del nodo y del sistema, en una sola cadena de Markov de dos dimensiones (2D). A continuación se hace una breve descripción de ambos modelos analíticos. Más información y resultados se presentan con detalle en [33].

2.2.1 Modelo de un Nodo (1D)

En el desarrollo de este modelo, se consideró razonable modelar la evolución del número de paquetes en la cola de un nodo con el tiempo mediante una cadena de Markov, dado que las oportunidades de transición del sistema ocurren una vez por ciclo, y dado que los ciclos son de igual duración. Además, la distribución de la carga en los nodos es homogénea, por tanto, el estudio puede reducirse a un único nodo. Por tanto, se hace referencia a esta cadena de Markov como la cadena del *nodo*, para diferenciarla de la cadena de Markov del *sistema*, que se define más adelante.

Otra de las consideraciones del modelo, es la existencia de una matriz de tráfico homogénea, es decir, la fracción de paquetes que un nodo transmite a otro es $1/(N - 1)$, para cualquier pareja de nodos. Por conveniencia se selecciona un nodo de forma arbitraria y nos referimos a él como el nodo de referencia (*RN*). Como el sistema es homogéneo, todos los nodos perciben las mismas prestaciones.

También, por sencillez, se supone que los paquetes llegan al *buffer* siguiendo un proceso de renovación. Es decir, se caracteriza la llegada de paquetes

al *buffer* en cada ranura mediante variables aleatorias independientes e idénticamente distribuidas. Así, en cada ciclo los paquetes llegan al *buffer* siguiendo una distribución general, con independencia de cómo fueron generados. Es decir, se considera irrelevante que fueran generados por el propio nodo, como consecuencia de su propia actividad de muestreo del entorno, o bien que llegasen de otros nodos.

Antes de definir a la matriz de probabilidades de transición P , conviene exponer lo siguiente: Se denota por A_i a la probabilidad de que i paquetes lleguen a un nodo en un ciclo de duración T unidades de tiempo. Por sencillez, se supone que los paquetes llegan según un proceso de Poisson de tasa λ . Entonces, $A_i = (\lambda T)^i \cdot e^{-\lambda T} / i!$ y $A_{\geq i} = 1 - \sum_0^{i-1} A_i$, donde $A_{\geq i}$ denota la probabilidad de que lleguen i paquetes o más en un ciclo. Observe que el modelo es válido para cualquier distribución, siempre que el proceso de llegada sea de renovación.

Se define a $P = [P_{i,j}]$ como la matriz de probabilidades de transición de la cadena del *nodo*, donde $P_{i,j}$ es la probabilidad de encontrar j paquetes en la cola en el ciclo $m + 1$, condicionada a haber encontrado i paquetes en el ciclo anterior m . Estas probabilidades de transición vienen dadas por,

$$\begin{aligned} P_{0,i} &= A_i, \quad i \leq Q - 1, \quad P_{0,Q} = A_{\geq Q}, \\ P_{i,j} &= P_s A_{j-i+1} + (1 - P_s) A_{j-i}, \quad i = 0 \dots Q - 1, j = i \dots Q - 1, \\ P_{i,Q} &= P_s A_{\geq Q-i+1} + (1 - P_s) A_{\geq Q-i}, \quad i = 1 \dots Q, \\ P_{i,i-1} &= P_s A_0, \quad i = 1 \dots Q, \\ P_{i,j} &= 0, \quad j \leq i - 2. \end{aligned}$$

donde P_s es la probabilidad de que un nodo activo transmita con éxito en un ciclo arbitrario. Los nodos soportan un número infinito de retransmisiones. El diagrama de estados y transiciones se puede ver en la Fig. 2.1.

La solución de esta cadena de Markov se obtiene mediante el sistemas de ecuaciones lineales,

$$\pi = \pi P, \quad \pi e = 1, \tag{2.1}$$

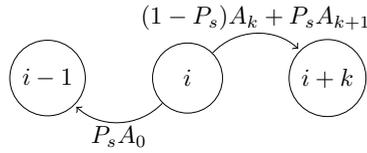


Figura 2.1: Diagrama de estados de la cadena del *nodo*.

siendo π la distribución estacionaria del número de paquetes en el *buffer* del RN, y e un vector columna de unos.

Se denota por N_A la variable aleatoria número de nodos activos en un ciclo, condicionada a que el RN esté activo, siendo $N_{A,k} = P[N_A = k]$, $k \leq N - 1$. Si esta distribución es conocida, entonces P_s puede determinarse como $P_s = \sum_{k=0}^{N-1} N_{A,k} P_{s,k}$. Donde $P_{s,k}$ es la probabilidad de que el RN transmita un paquete exitosamente cuando el RN contiene con otros k nodos. En la expresión 3.1 del apartado 3.4.1 en el capítulo 3, se presenta con más detalle.

En [55] se utiliza la aproximación de considerar que un nodo está activo con independencia del estado del resto de los nodos. Por tanto,

$$N_{A,k}(\pi_0) = \binom{N-1}{k} (1 - \pi_0)^k \pi_0^{N-1-k}, \quad P_s(\pi_0) = \sum_{k=0}^{N-1} N_{A,k}(\pi_0) P_{s,k}. \quad (2.2)$$

Como se observa, $P_s(\pi_0)$ viene dado en función de π_0 , la probabilidad estacionaria de encontrar el *buffer* vacío, y por tanto el nodo inactivo.

Por otra parte, la distribución estacionaria π en (2.1) viene dada en función de $P_s(\pi_0)$. Este sistema de ecuaciones puede ser resuelto mediante el método iterativo del punto fijo. Se denota por P_s al punto fijo, es decir, al valor de $P_s(\pi_0)$ en el punto fijo.

En [55] se estudia un escenario sin retransmisiones. Para ese caso, la definición de los elementos de P son los mismos, sustituyendo P_s por P_{sf} , la probabilidad de que un nodo activo transmita un paquete en un ciclo arbitrario. Claramente, P_{sf} es el punto fijo de un sistema de ecuaciones similar al

anterior, pero con,

$$P_{sf}(\pi_0) = \sum_{k=0}^{N-1} N_{A,k}(\pi_0) P_{sf,k}, \quad (2.3)$$

Donde $P_{sf,k}$ es la probabilidad de que el RN transmita un paquete, exitosamente o con colisión, cuando el RN contiene con otros k nodos. En la expresión 3.3, del apartado 3.4.1, en el capítulo 3, se presenta con más detalle.

Parece intuitivo pensar que, dado que los nodos comparten un canal común, y se ven sometidos a las mismas condiciones de carga, si se observa que un nodo está activo, la probabilidad de que el resto de los nodos de la red también están activos, es mayor que si observásemos al mismo nodo inactivo. Es decir, la aproximación de independencia entre nodos puede llevar a que los parámetros de mérito que se derivan de la distribución estacionaria, no gocen de una precisión aceptable.

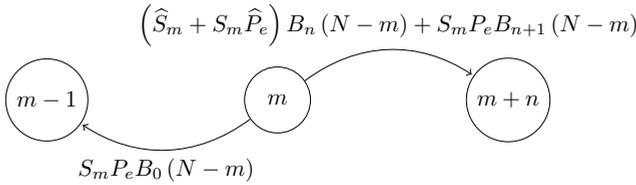


Figura 2.2: Diagrama de estados de la cadena del *sistema*.

De hecho, un estudio realizado por simulación, llevó a la conclusión de que la precisión del modelo anterior era pobre. Por ello, se pensó determinar N_A de una forma alternativa. Se optó por construir una cadena de Markov unidimensional adicional para describir la evolución del número de nodos activos con el tiempo. A esta cadena se la denominó la del *sistema*, para diferenciarla de la anterior, la cadena del *nodo*.

Definen a $P' = [P'_{i,j}]$ como la matriz de probabilidades de transición de dicha cadena, donde $P'_{i,j}$ es la probabilidad de encontrar j nodos activos en el ciclo $m+1$, condicionada a haber encontrado i nodos activos en el ciclo

anterior m . Las probabilidades de transición de esta cadena vienen dadas por,

$$\begin{aligned}
 P'_{0j} &= B_j(N), \quad 0 \leq j \leq N, \\
 P'_{ij} &= \left(\widehat{S}_i + S_i \widehat{P}_e \right) B_{j-i}(N-i) + S_i P_e B_{j-i+1}(N-i), \\
 &\quad 1 \leq i \leq N-1, \quad i \leq j \leq N-1, \\
 P'_{iN} &= \left(\widehat{S}_i + S_i \widehat{P}_e \right) B_{N-i}(N-i), \quad 1 \leq i \leq N-1, \\
 P'_{NN} &= \widehat{S}_N + S_N \widehat{P}_e = (1 - S_N P_e), \\
 P'_{ij} &= 0, \quad 2 \leq i \leq N, \quad j < i-1, \\
 P'_{ij} &= S_i P_e B_0(N-i), \quad 1 \leq i \leq N-1, \quad j = i-1, \\
 P'_{NN-1} &= S_N P_e,
 \end{aligned}$$

donde: i) $B_j(n) = \binom{n}{j} A_{\geq 1}^j A_0^{n-j}$ es la probabilidad de que j de n nodos inactivos reciban paquetes en un ciclo, y pasen a activos; ii) $S_k = k P_{s,k-1}$ y $\widehat{S}_k = 1 - S_k$ definen las probabilidades de que un nodo transmita con éxito en un ciclo con k nodos activos, y de que dos o más nodos colisionen; y iii) $P_e = P_s A_0 \pi_1 / P_s (1 - \pi_0)$ y $\widehat{P}_e = 1 - P_e$ son las probabilidades de que un nodo que ha transmitido con éxito en el ciclo vacíe su cola y pase a inactivo, y su complementaria.

Observe que P_e depende de π_0 y π_1 , las probabilidades estacionarias de encontrar la cola vacía, o con un paquete. También, que P_e es una probabilidad condicionada a que el RN transmita con éxito, y se calcula como la fracción de ciclos con transmisión exitosa que vacían el *buffer*. El diagrama de estados y transiciones se puede ver en la Fig. 2.2.

Si se denota por $\{\pi'_n\}$ la distribución estacionaria de la cadena del *sistema*, ésta puede obtenerse mediante el sistema de ecuaciones lineales de (2.1) pero con P' en vez de P . Sea α'_k la fracción de ciclos en los que el RN está activo junto a otros k nodos, y α_k la probabilidad de que haya k nodos activos diferentes del RN en un ciclo, condicionada a que el RN esté también activo en el mismo ciclo. Entonces,

$$\alpha'_k(\pi_0, \pi_1) = \binom{N-1}{k} \pi'_{k+1} / \binom{N}{k+1} = (k+1) \pi'_{k+1} / N, \quad (2.4)$$

$$\alpha_k(\pi_0, \pi_1) = \alpha'_k / G, \quad G = \sum_{k=0}^{N-1} \alpha'_k, \quad k = 0, \dots, N-1, \quad (2.5)$$

$$P_s(\pi_0, \pi_1) = \sum_{k=1}^{N-1} \alpha_k(\pi_0, \pi_1) P_{s,k}. \quad (2.6)$$

De nuevo, este sistema de ecuaciones puede ser resuelto mediante el método iterativo del punto fijo, para lo cual ambas cadenas, la del nodo y sistema, deben ser resueltas en cada iteración. Se denota por P_s al punto fijo, es decir, al valor de $P_s(\pi_0, \pi_1)$ en el punto fijo.

2.2.2 Modelo 2D

Como parte del trabajo realizado en [33], se observa que la precisión del modelo analítico puede mejorarse si se combinan las cadenas del nodo y del sistema, en una única cadena de Markov. A este nuevo modelo le denominan 2D. Por conveniencia se selecciona un nodo de forma arbitraria y nos referimos a él como el nodo de referencia (RN). Los estados de la nueva cadena de Markov se representan como (i, n) , donde i es el número de paquetes en el buffer del RN, $i \leq Q$, y n es el número de nodos activos diferentes del RN en el sistema, $n \leq M$, donde $M = N - 1$.

Definen a $\mathbf{P} = [P_{im,jn}]$ como la matriz de probabilidades de transición del nuevo modelo 2D, donde $P_{im,jn}$ es la probabilidad de encontrar j paquetes en la cola del RN y n nodos activos diferentes del RN en el ciclo $k+1$, condicionado a que en el ciclo k encontremos i paquetes en la cola del RN y m nodos activos diferentes del RN. La matriz \mathbf{P} se define en las Tablas B.1, B.2 y B.3, del apéndice B.

Se considera a $\pi(i, n)$ como la probabilidad estacionaria de encontrar i paquetes en el buffer del RN, $0 \leq i \leq Q$, y n nodos activos en el sistema diferentes del RN, $0 \leq n \leq M$. La distribución estacionaria $\{\pi(i, n)\}$ puede

obtenerse resolviendo el sistema de ecuaciones lineales,

$$\pi = \pi P, \quad \pi e = 1, \quad (2.7)$$

donde π es la distribución estacionaria y e es un vector columna de unos.

Por otro lado, la probabilidad de que el RN transmita un paquete con éxito en un ciclo arbitrario, condicionado a que esté activo (P_s), viene dado por,

$$P_s = \frac{1}{G} \sum_{i=1}^Q \sum_{k=0}^M \pi(i, k) \cdot P_{s,k}. \quad (2.8)$$

siendo $G = \sum_{i=1}^Q \sum_{k=0}^M \pi(i, k)$.

Este sistema de ecuaciones puede ser resuelto mediante el método iterativo del punto fijo.

2.3 Parámetros de Prestaciones

2.3.1 Energía promedio consumida - Cadena 1D

El procedimiento completo para la obtención del consumo promedio de energía viene explicado con más detalle en el apéndice C [33].

Aquí se mostrarán las expresiones finales, para el cálculo de la energía promedio consumida por ciclo por el RN en la fase *data*, que viene expresada por 2.9.

$$E_d = \sum_{n=0}^N R_n E_{d,n}, \quad (2.9)$$

donde R_n se expresa como $R_n = \binom{N}{n} (1 - \pi_0)^n \pi_0^{N-n}$, o bien como $R_n = \pi'_n$. $E_{d,n}$ es la energía media consumida en un ciclo por el RN en la fase *data*. R_n es

la distribución de los nodos activos, la cual puede representarse por una función binomial, si se considera que los nodos son independientes entre sí, o de forma más realista con la distribución resultado de la segunda cadena de 1D, denominada cadena del sistema, y en la cual se considera interdependencia entre los nodos.

2.3.2 Energía Consumida - Cadena 2D

Energía promedio consumida. La energía media consumida por el RN en un ciclo puede ser determinada siguiendo el procedimiento descrito en la Sección 2.3.1. Por ejemplo, la energía media consumida durante la transmisión de los datos (periodo *data*) de un ciclo por el RN, viene dada por,

$$E_d = \sum_{k=0}^N E_{d,k} \cdot \pi'_k, \quad \pi'_k = \sum_{i=1}^Q \pi(i, k), \quad (2.10)$$

donde π'_k es la probabilidad estacionaria de encontrar k nodos activos en un ciclo. Observe que la información en relación de los nodos activos de la red se extrae de la distribución de probabilidad estacionaria de 2D.

2.4 Contribuciones

A continuación se presentan las contribuciones que resultaron de este trabajo, en relación a los diferentes objetivos de la tesis.

Primera, continuando con el desarrollo de los modelos previos, y en cumplimiento del primer objetivo específico de la tesis, se propone desarrollar un modelo que permita describir el comportamiento de una WSN en un escenario heterogéneo que incorpore dos clases distintas de nodos, que puedan operar con distintas tasas de transmisión de paquetes, y que permita la asignación de prioridades de acceso al medio a una de las clases de nodos que conforman la red.

Segunda, se propone e implementa un procedimiento o protocolo para la operación conjunta entre los nodos de ambas clases, en el cual se establecen prioridades de acceso al medio para la transmisión de información por parte de los nodos. En el procedimiento de operación, que denominamos PSA-MAC (*Priority Sink Access MAC*), la etapa de sincronización de los nodos es común a ambas clases, mientras que la etapa posterior, donde contendrán por el medio para la transmisión de los datos, se inicia primero para una de las clases; de esta manera se otorga prioridad en la transmisión a dicha clase. Este procedimiento se explica con detalle en el capítulo 3.3.

Tercera, para llevar a cabo lo anterior, y basándose en el desarrollo del modelo de 2D del apartado 2.2.2, se propone un modelo que incluya dos cadenas de Markov de 2D, quedando una cadena de 2D por cada clase de nodos. En consecuencia, se implementa la cadena de 2D de [33], para que describa el comportamiento de los nodos de la clase 1, y se desarrolla e implementa una segunda cadena de Markov en dos dimensiones (2D-DTMC), que describe la evolución de los paquetes en la cola del nodo de referencia de clase 2 (RN_2), además de describir el número de nodos activos de la misma clase en la WSN. Las probabilidades de transición para esta segunda cadena se presentan en las tablas del apéndice D.

Cuarta, una parte fundamental del modelo es la implementación del acoplamiento entre las dos cadenas de Markov de 2D. Es por ello que, en la construcción de las expresiones para las probabilidades de transición que se desarrollan para la 2D-DTMC de la clase 2, se ha definido e incorporado adecuadamente el parámetro $R_{1,0}$. Este parámetro se refiere a la fracción de ciclos en los que los nodos de clase 1 están inactivos, y es importante su inclusión para el adecuado acoplamiento entre ambas cadenas de Markov. Otra forma de ver a este parámetro, es como la probabilidad de que no haya nodos activos de clase 1 en la WSN.

Antes de explicar el procedimiento de acoplamiento entre las dos cadenas de Markov, conviene recordar que la solución de cada una de estas 2D-DTMC

puede obtenerse resolviendo el conjunto de ecuaciones lineales de (2.11).

$$\pi P = \pi, \quad \pi e = 1, \quad (2.11)$$

donde $\pi = [\pi(i, n)]$ es la distribución de probabilidad estacionaria, P es la matriz de probabilidades de transición, cuyos elementos se definen en el apéndice D, y e es un vector columna de unos.

Recuerde también que, por otro lado, la probabilidad promedio, P_s , de que el correspondiente RN transmita un paquete exitosamente en un ciclo aleatorio, condicionado a que el RN esté activo, está dado por:

$$P_s = \frac{1}{G} \sum_{i=1}^Q \sum_{k=0}^K \pi(i, k) \cdot P_{s,k}, \quad (2.12)$$

$$G = \sum_{i=1}^Q \sum_{k=0}^K \pi(i, k) = 1 - \sum_{k=0}^K \pi(0, k). \quad (2.13)$$

De la expresiones (2.11) y (2.12), se observa que la distribución de probabilidad estacionaria es función de P_s , $\pi(P_s)$. Hay una relación de dependencia entre P_s y π , que posibilita, la resolución del conjunto de ecuaciones de (2.11), siguiendo un procedimiento iterativo de punto fijo que permite determinar su solución, en este caso: π .

Quinta, dado lo anterior, el proceso de acoplamiento de las cadenas de Markov para ambas clases de nodos, se muestra en el esquema de la figura 2.3. De acuerdo al esquema, primero se resuelve la primer cadena, con el procedimiento iterativo, para obtener la distribución estacionaria de los nodos de clase 1 (π_1). A partir de π_1 , se obtiene la fracción de ciclos en los que los nodos de clase 1 están inactivos o la probabilidad de que los nodos de clase 1 estén inactivos: $R_{1,0} = \pi_1(0,0)$. Este parámetro $R_{1,0}$ es fundamental en la formación de la matriz de probabilidades de transición P de la clase 2, por tanto, podemos establecer que la distribución estacionaria de los nodos de clase 2, también es función de $R_{1,0}$, es decir: $\pi_2(P_{s2}, R_{1,0})$. Finalmente, π_2 se obtiene con el procedimiento iterativo mencionado. De la misma forma, $R_{1,0}$ se tiene que tomar en cuenta para la determinación de los parámetros

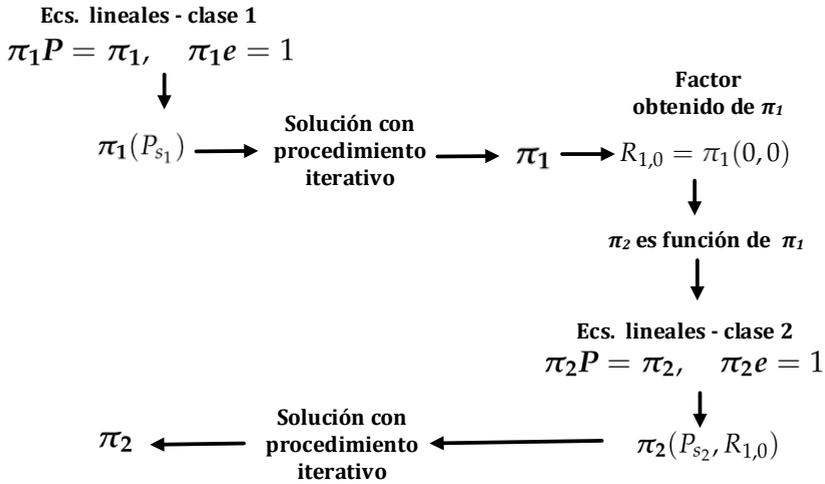


Figura 2.3: Esquema del acoplamiento entre ambas 2D-DTMC.

de prestaciones de los nodos de la clase 2. Este parámetro permite en el modelo indicar que durante la transmisión de los nodos de clase 2, no existen nodos de clase 1 activos intentando transmitir. Por tanto, es importante para la correcta operación del protocolo, sobre todo en relación a la inclusión de las prioridades de acceso al medio.

Sexta, en relación al segundo objetivo específico, se propone y desarrolla un nuevo método de cálculo de consumo energético de los nodos cuando se encuentran en el periodo *data*. Este método mejora a los métodos previos, tanto en precisión de los resultados conseguidos, como en la sistematización del procedimiento, haciéndolo incluso más intuitivo. En los procedimientos previos, expuestos en 2.3, para obtener la energía promedio consumida por ciclo por el RN, se determina por separado la distribución de los nodos activos en la red. Esto tiene la desventaja, no solo de que se incrementa el número de ecuaciones (ver con más detalle en el apéndice C), haciéndolo más complejo, sino que también se incrementa el número de pasos previos al resultado final, ocasionando pérdida en su precisión con cada paso agregado.

En cambio, con el método que ahora se propone, y que se expone en el apartado 4.3, se obtiene el consumo promedio de energía con expresiones que incluyen a la distribución de probabilidad estacionaria, la cual indica además de la evolución de los paquetes en la cola de RN , la evolución de los nodos activos de la red. Con lo anterior, se logra un procedimiento más directo, con menos pérdida de información en los cálculos, mejorándose la precisión. En el apartado 4.3 del capítulo 4 se explica con detalle este procedimiento.

Séptima, con respecto al tercer objetivo específico, se desarrolla un modelo analítico para la evaluación de prestaciones de una WSN, que opera en escenarios heterogéneos, donde los nodos tienen la capacidad de transmitir paquetes en forma agregada; es decir, en cada ciclo de transmisión, los nodos pueden transmitir más de un paquete. Este modo de transmisión se denomina *Aggregated Packet Transmission* (APT) o Transmisión de paquetes con agregación de tráfico. En los modelos anteriores, los nodos de la WSN transmiten solo un paquete por ciclo de transmisión o modo SPT (*Single Packet Transmission*). Esto es una mejora respecto a los modelos anteriores de los capítulos 3 y 4, ya que el modelo permite que los nodos de la WSN transmitan en modo APT, además de SPT. También, este desarrollo representa una mejora en relación al modelo de [19], donde se evalúa el esquema APT para una WSN, pero en el estudio no se consideran escenarios heterogéneos o distintas clases de nodos, ni tampoco algún esquema de asignación de prioridades. En el capítulo 5 se presenta con detalle el modelado de red WSN heterogénea, que incluye la transmisión de paquetes con agregación de tráfico.

Octava, en cumplimiento con el penúltimo objetivo, se desarrolla un modelo para determinar el consumo energético de los nodos de una WSN que opera en escenarios homogéneos. Este modelo considera todos los subperiodos del ciclo de transmisión, obteniéndose un resultado más completo de consumo energético, en relación a los anteriores modelos mostrados en los capítulos 3, 4 y 5. Los diferentes periodos del ciclo de transmisión consisten en: periodo de sincronización (*sync*), periodo de datos (*data*), el periodo inactivo (*sleep*), además de las fases de operación de reposo y vigilia. También, este modelo representa una mejora en relación al modelo de [19], donde se

evalúa la energía consumida por los nodos de una WSN en escenarios homogéneos. Incluso toman en cuenta el ciclo completo de transmisión en el cálculo, pero lo hacen con un procedimiento de cálculo basado en el método visto en el apartado 2.3. Como se ha visto, y se ha comprobado en el apartado 4.3.1, el nuevo modelo implica un método de cálculo energético que mejora a los métodos previos, tanto en precisión de los resultados conseguidos, como en la sistematización del procedimiento, haciéndolo incluso más intuitivo. Este modelo se presenta con detalle en el capítulo 6, denominado: estudio de consumo energético de ciclo completo: Red WSN Homogénea.

Novena, en relación al último objetivo, se desarrolla un modelo analítico para determinar el consumo energético de los nodos de una WSN que opera en escenarios heterogéneos. El modelo considera los diferentes periodos en la operación de los nodos: periodo de sincronización (*sync*), periodo de datos (*data*), el periodo inactivo (*sleep*), además de las fases de operación de reposo y vigilia. Una de las diferencias del modelo que se explica en el capítulo 6, y el que desarrollan en [19], con respecto al que ahora se propone, es la consideración de heterogeneidad, al incluirse dos clases de nodos en el escenario de la WSN. La heterogeneidad implica cierto grado de complejidad, especialmente cuando se determina la energía, ya que además de que se contabiliza todo el ciclo completo, incluyendo los distintos periodos, los nodos participan de distintos modos de operación, tal como el modo *sleep* y *awake* como parte del protocolo para el ahorro energético.

Lo anterior, aunado a la existencia de más de una clase, le da un mayor grado de complejidad al modelo. Sin embargo, con el procedimiento de cálculo propuesto en el modelo, se logra sortear y calcular con éxito la complejidad de tener más de una clase de nodos operando en la WSN; esto es especialmente cierto, cuando se determina el consumo considerando el modo o fase de vigilia (*awake*) de los nodos. En el modo de operación en *awake*, los nodos se *despiertan* y permanecen en vigilia durante un ciclo, y lo repiten periódicamente cada cierto número de ciclos. Esto lo realizan para estar a la escucha de posibles paquetes de sincronización (*sync*) en el canal de comunicación, y de esta forma no perder la sincronía. Por otro lado, el modelo

también considera los modos de transmisión tanto en SPT como en APT. Este modelo se presenta con detalle en el capítulo 7, denominado: Estudio de consumo energético de ciclo completo: Red WSN heterogénea.

Capítulo 3

Modelado de red WSN heterogénea

3.1 Introducción

En esta sección se presenta el estudio de las prestaciones de una red inalámbrica de sensores (WSN) que opera con ciclo de trabajo (DC) sincronizado y donde se presentan escenarios heterogéneos. En este caso, el modelo se configura para dos clases de nodos y un modo de transmisión de un solo paquete por ciclo (SPT, *Single Packet Transmission*). Se incorpora también al modelo la consideración de prioridades de acceso al medio.

Se presentan resultados numéricos de los parámetros de prestaciones: retardo medio de los paquetes, caudal cursado y energía media consumida. En el cálculo del consumo energético, solo se considera el subperiodo de datos del periodo activo (*active*) de acuerdo al ciclo de transmisión.

3.2 Trabajos relacionados

En muchas WSNs suele presentarse cierto grado de heterogeneidad [57, 60, 5, 28, 20]. Un enfoque común, utilizado en el modelado de las WSNs con

escenarios heterogéneos, consiste en definir diferentes clases de nodos, considerando también diferentes patrones de tráfico [38].

En el presente estudio, además, las diferentes clases de nodos tienen diferentes prioridades de acceso al canal. Por ejemplo, en lugares donde se instalan WSNs con aplicaciones para escenarios de emergencia, donde pudiera ocurrir incendios, terremotos e incluso aplicaciones médicas, se requiere que los nodos envíen la información hacia un centro de control tan pronto como ocurran los eventos. Por lo tanto, los nodos que envían datos de emergencia, deben tener prioridad de acceso al medio sobre el resto de nodos que forman parte de la red.

Existen modelos basados en procesos de Markov, donde se consideran escenarios heterogéneos para WSN [32, 26]. En [32], consideran diferentes clases de nodos, incluida la asignación de diferentes tasas de arribo de paquetes para cada clase, pero todos los nodos presentan la misma prioridad de acceso al medio. En [26], se contemplan esquemas de prioridad que incluyen diferentes clases de nodos, pero sin la posibilidad de tener distintas tasas de arribo de paquete o diferente número de nodos por clase. Aunque estos modelos markovianos evalúan escenarios heterogéneos para WSN, no son directamente aplicables para WSN que utilizan el mecanismo de ciclo de trabajo (DC, *Duty-Cycled*).

Una de las principales contribuciones que se presentan en este capítulo es el modelado analítico y la evaluación del rendimiento de una WSN que opera con ciclo de trabajo, donde los nodos tienen diferentes cargas y prioridades de acceso. El modelo se basa en dos cadenas de Markov de tiempo discreto del tipo bidimensional (2D-DTMC). Este modelo extiende las capacidades de los modelos de [33] para habilitar diferentes clases de nodos con diferentes asignaciones de prioridad en escenarios de red heterogéneos.

3.3 Escenario de red

3.3.1 Protocolo MAC

Como en la mayoría de los protocolos MAC que operan con DC, en el que se expone en este apartado y que denominamos PSA-MAC (*Priority Sink Access MAC*, MAC con acceso prioritario al nodo central o sumidero), el tiempo se divide en ciclos de igual duración T , y cada ciclo consiste de un periodo activo (*active*) y un periodo inactivo (*sleep*), como se muestra en la Fig. 3.1. El periodo *active* se subdivide en dos partes: el periodo de sincronización (*sync*) de una duración fija igual a T_{sync} , donde los paquetes SYNC son intercambiados; y el periodo de datos (*data*), donde se intercambian los paquetes DATA. Durante el periodo *sync*, los nodos establecen la calendarización del proceso

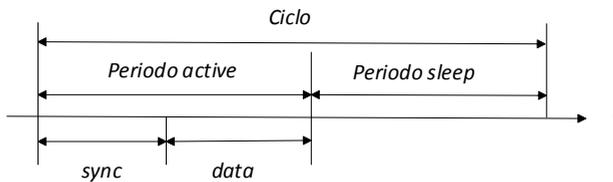


Figura 3.1: Un ciclo de operación con los periodos *active* y *sleep*. El periodo *active* se subdivide en los periodos *sync* y *data*.

de sueño-vigilia (*sleep-awake*), donde indican los instantes en los que habrán de dormir o despertar, y los intercambian con sus nodos vecinos utilizando los paquetes SYNC. Estos paquetes incluyen la dirección del nodo transmisor y el tiempo de inicio de su próximo periodo *active*. Con esta información, los nodos se coordinan para despertar simultáneamente al inicio de cada periodo *sync*.

Con el objetivo de acceder al canal de transmisión, los paquetes SYNC y DATA utilizan el mecanismo de contención CSMA/CA. En esta técnica de acceso los nodos activos generan un tiempo aleatorio de retracción (*backoff*)

y realizan un procedimiento de detección de portadora. Un nodo se considera activo cuando tiene paquetes que transmitir. Si el canal está desocupado cuando el tiempo de *backoff* expira, los nodos transmiten un paquete usando el intercambio de paquetes RTS/CTS/DATA/ACK. Cuando un nodo que ha ganado el acceso al medio recibe un paquete CTS, como respuesta al envío previo del paquete RTS, este transmite el paquete SYNC o DATA y espera por el paquete ACK.

Durante el periodo *data*, los nodos transmiten los paquetes DATA. Los nodos activos generan un nuevo tiempo de *backoff* con cada inicio del periodo *data* y realizan la detección de portadora antes de acceder al canal. En PSA-MAC, durante el periodo *data* un nodo se duerme hasta el inicio del próximo periodo *sync* o periodo *data* cuando: (i) el nodo pierde la contienda (escucha el medio ocupado antes de que su tiempo de *backoff* expire); (ii) el nodo encuentra una colisión con un paquete RTS; (iii) después de una transmisión exitosa (solo se transmite un paquete por ciclo).

3.3.2 Operación de la red y suposiciones

Se considera una WSN heterogénea con N nodos de diferentes clases, donde todos los nodos se escuchan unos a otros y envían paquetes a un nodo común llamado sumidero (*sink*). En la Fig. 3.2 se muestra un esquema ejemplo del escenario considerado, las flechas punteadas indican la dirección de la transmisión de los datos que va de los nodos hacia el *sink*. Observe que se define un nodo de referencia (*RN*) por cada clase. El interés de los *RN* desde el punto de vista del modelado se describe más adelante. El escenario consiste en una sola célula, conformada por un grupo (*cluster*) de nodos; aunque varios *clusters* juntos pueden configurar una red más grande. En este trabajo, se estudia el escenario de un solo *cluster*. Se consideran dos clases de nodos, y suponemos que los nodos de clase 1 tiene prioridad en el acceso al medio sobre los nodos de clase 2. Otras suposiciones que se consideran en este estudio son: (i) el nodo *sink* solo recibe paquetes, nunca transmite; (ii) para escenarios realistas, se ha demostrado que una o dos retransmisiones

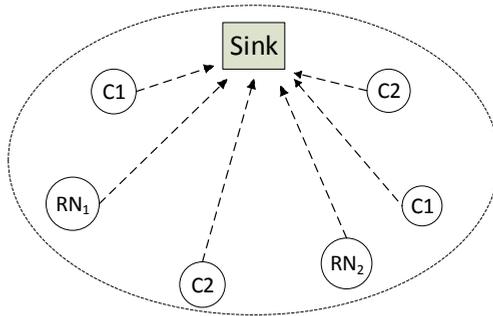


Figura 3.2: Red heterogénea de sensores inalámbricos (WSN) con dos clases de nodos. Los nodos de clase 1 (C1) tienen prioridad de acceso al canal sobre los nodos de clase 2 (C2). Se define un nodo de referencia (RN) por cada clase.

son suficientes para transmitir un paquete exitosamente [33]. Por lo tanto, para simplificar, se considera un modelo de retransmisiones infinitas, como una alternativa más sencilla al modelo más complejo de retransmisiones finitas; (iii) desde la perspectiva de la MAC, el canal se considera ideal (libre de errores); (iv) los paquetes arriban a la cola o línea de espera de un nodo, siguiendo un proceso de renovación, y el número de paquetes que arriban en cada ciclo se caracteriza por variables aleatorias independientes e idénticamente distribuidas.

Cada nodo tiene una cola finita con una capacidad de Q paquetes que son atendidos conforme a una disciplina FIFO. Por facilidad, suponemos que el número de paquetes que llegan a la cola por ciclo sigue una distribución discreta de Poisson de media λT , donde λ es la tasa de arribo de paquetes, y T es la duración del ciclo. Sin embargo, el modelo analítico propuesto es suficientemente genérico para incluir cualquier otra distribución.

Para los nodos de clase 1, los nodos con la mayor prioridad de acceso al canal, consideramos carga de tráfico baja debido a que en aplicaciones realistas, por ejemplo: emergencias, la información a transmitir de más alta

prioridad es poca y esporádica. No obstante, el modelo propuesto soporta cualquier carga para los nodos de clase 1.

3.3.3 Asignación de prioridades de acceso medio

Una forma de priorizar a los dispositivos de clase 1 sobre los de la clase 2 es asegurar que los dispositivos de clase 1 efectúen primero el procedimiento de acceso al medio. La Fig. 3.3 muestra un diagrama del proceso de transmisión correspondiente al periodo *data*. En la figura se ha omitido el periodo *sync* para ambas clases de nodos. En la operación de la WSN que se propone, la

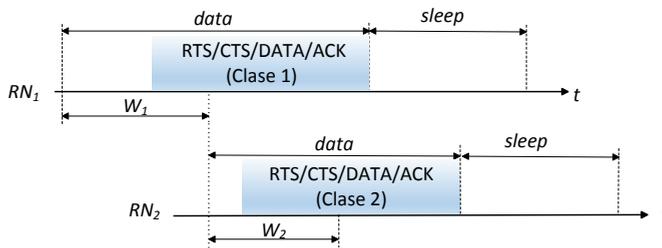


Figura 3.3: Protocolo MAC en funcionamiento durante el periodo *data*, para ambas clases de nodos.

prioridad de acceso al medio se otorga a los nodos de clase 1 siguiendo el siguiente procedimiento de acceso. Al comienzo de un ciclo, solo los nodos activos de clase 1 compiten entre ellos mismos por el acceso al medio. Los nodos activos de clase 2 despertarán (*wake up*) justo después de que la ventana de contienda de clase 1 (W_1) haya finalizado, y si detectan un medio inactivo, los nodos activos de clase 2 iniciarán su propio mecanismo de contienda. Si los nodos de clase 2 detectan el medio ocupado en ese instante, debido a la transmisión de un paquete por un nodo de clase 1, vuelven al modo de reposo (*sleep*) y se despertarán nuevamente en el próximo ciclo. Para los ciclos en los que los nodos de clase 1 colisionan, se considera que los nodos de clase 2 detectan la actividad y no realizarán contienda. Se supone también

que la duración de un paquete transmitido por un nodo de clase 1 es mayor que W_1 .

3.4 Modelado del sistema

Las expresiones que se presentan en los siguientes apartados son igualmente aplicables a ambas clases de nodos. Se usa una notación genérica para definir los parámetros del modelo asociados a cualquiera de las dos clases de nodos, a menos que otra cosa se especifique. Por conveniencia en la descripción, se selecciona arbitrariamente un nodo de cada clase como nodo de referencia: RN_1 y RN_2 , respectivamente.

3.4.1 Acceso al medio

Los nodos activos generan tiempos aleatorios de *backoff* elegidos del intervalo $[0, W - 1]$. Cuando el RN está activo, este transmite un paquete exitosamente si los otros nodos contendientes eligen un tiempo de *backoff* mayor que el elegido por el RN . El paquete transmitido por el RN colisionará (fallará la transmisión) cuando el RN y uno o más de los otros nodos contendientes eligen el mismo tiempo de *backoff*, y su tiempo de *backoff* es el más pequeño de aquellos generados en el ciclo actual. Si el tiempo de *backoff* generado por el RN no es el más pequeño de todos, se pueden dar dos situaciones: (i) otro nodo es capaz de transmitir exitosamente; (ii) otros nodos colisionarán cuando transmitan. Los nodos que pierdan la contienda (porque escuchan ocupado el canal antes de que expire su tiempo de *backoff*), o encuentren una colisión con un paquete RTS, entran en modo *sleep* y se mantienen en ese modo hasta el periodo *active* del próximo ciclo.

Por facilidad en la notación, N denota el número de nodos de una clase dada. Considerando un ciclo donde el RN está activo, k denota el número de nodos que también están activos en el mismo ciclo además del RN , donde: $0 \leq k \leq N - 1$.

Sean $P_{s,k}$, $P_{sf,k}$ y $P_{f,k}$, las probabilidades de que el RN transmita un paquete exitosamente, transmita un paquete (exitosamente o con colisión), y transmita con falla (colisión), respectivamente, cuando el RN contiene con otros k nodos. Entonces,

$$P_{s,k} = \sum_{i=0}^{W-1} \frac{1}{W} \left(\frac{W-1-i}{W} \right)^k, \quad (3.1)$$

$$P_{sf,k} = \sum_{i=0}^{W-1} \frac{1}{W} \left(\frac{W-i}{W} \right)^k, \quad (3.2)$$

$$P_{f,k} = P_{sf,k} - P_{s,k} = \frac{1}{W}. \quad (3.3)$$

Note que $P_{s,k}$ es la probabilidad de que el RN elija un valor de *backoff* en el intervalo $[0, W-1]$, y que otros k nodos elijan un valor mayor. Las probabilidades $P_{sf,k}$ y $P_{f,k}$ pueden describirse en los mismos términos. Para la clase 1, estas probabilidades se calculan considerando el nodo de referencia RN_1 y la ventana de contienda correspondiente W_1 . Para la clase 2, se considera RN_2 y W_2 .

Condicionado a que el RN transmita un paquete exitosamente o de forma fallida, cuando contiene con otros k nodos, los tiempos promedio de *backoff* están dados por,

$$BT_{s,k} = \frac{1}{P_{s,k}} \sum_{i=0}^{W-1} i \cdot \frac{1}{W} \left(\frac{W-1-i}{W} \right)^k, \quad (3.4)$$

$$BT_{f,k} = \sum_{i=0}^{W-1} i \cdot \left[\left(\frac{W-i}{W} \right)^k - \left(\frac{W-1-i}{W} \right)^k \right]. \quad (3.5)$$

De igual forma, estos tiempos son independientes para cada clase. Para la clase 1, se obtienen con la ventana de contienda W_1 y con las probabilidades de (3.1), (3.2) y (3.3), calculadas para la clase 1. Para la clase 2, se utiliza W_2 y las probabilidades de (3.1), (3.2) y (3.3), pero calculadas para la clase 2.

3.4.2 Sistema de dos clases y prioridades

Aquí modelamos, por medio de un par de 2D-DTMC, la evolución en el tiempo del número de paquetes en la cola de RN_1 y RN_2 , y el número de nodos activos en el *cluster*; se implementa una cadena por cada clase de nodos. El estado de cada 2D-DTMC se representa por (i, m) , donde $i \leq Q$ es el número de paquetes en la cola del RN , y m es el número de nodos activos además del RN , en la red de la clase correspondiente, $m \leq K$.

Entonces, $P_{(i,m),(j,n)}$ es la probabilidad de transición del estado (i, m) al estado (j, n) . La primera 2D-DTMC se basa del estudio realizado en [33] y describe la evolución en el tiempo del estado de los nodos de clase 1. La segunda 2D-DTMC se propone para definir la evolución del estado de los nodos de la clase 2. Las probabilidades de transición de las dos 2D-DTMC, se presentan con detalle a continuación, pero antes de definir las probabilidades de transición de las dos 2D-DTMC, definimos algunas expresiones útiles.

- $A_i = (\lambda T)^i e^{-\lambda T} / i!$ expresa la probabilidad de que i paquetes arriben, y $A_{\geq i} = 1 - \sum_{n=0}^{i-1} A_n$ denota la probabilidad de que i o más paquetes arriben a un nodo en un ciclo.
- $B_j(n) = \binom{n}{j} \hat{A}^j A_0^{n-j}$, $\hat{A} = 1 - A_0$, define la probabilidad de que j nodos de n que tienen su cola vacía reciban paquetes en un ciclo.
- Definimos a $S_k = kP_{s,k-1}$ y $\hat{S}_k = 1 - S_k$ como las probabilidades de que un nodo activo transmita con éxito un paquete en un ciclo cuando compiten k nodos, y su complemento. Entonces, \hat{S}_k es la probabilidad de que los paquetes de dos o más nodos colisionen. Por tanto, $S_1 = 1$, $\hat{S}_1 = 0$.
- $E = P_s A_0 \pi_1 / P_s (1 - \pi_0)$ expresa la probabilidad de que la cola de un nodo se vacíe cuando transmita con éxito. Donde π_i es la probabilidad estacionaria de encontrar i paquetes en la cola del RN , y P_s es la probabilidad (promedio) de que el RN transmita un paquete con éxito en un ciclo aleatorio, condicionado a que el RN esté activo. $\hat{E} = 1 - E$ denota

la probabilidad de que la cola de un nodo se mantenga con al menos un paquete cuando haya transmitido con éxito.

- $P = [P_{(i,m),(j,n)}]$ expresa la matriz de probabilidades de transición de la 2D-DTMC, donde $P_{(i,m),(j,n)}$ es la probabilidad de que j paquetes se encuentren en la cola del RN y otros n nodos se activen en el ciclo $s + 1$, condicionado a encontrar i paquetes en la cola de RN y otros m nodos activos en el ciclo s .
- También, denotamos a $M = N - 1$. Donde N es el número de nodos de la clase correspondiente.

Hay que notar que las probabilidades anteriores se determinan para cada clase de forma independiente, pero para simplificar se ha dejado la notación en forma genérica. Por ejemplo, para la determinación de la probabilidad de arribo de los paquetes A_i , para los nodos de clase 1 será $A_{1,i} = (\lambda_1 T)^i e^{-\lambda_1 T} / i!$, utilizándose una tasa de arribo λ_1 . Para la clase 2, se utiliza una tasa de arribo λ_2 , para obtener $A_{2,i} = (\lambda_2 T)^i e^{-\lambda_2 T} / i!$.

De forma similar, se obtienen para cada clase las expresiones de $B_{1,j}(n)$, $B_{2,j}(n)$, $S_{1,k}$, $S_{2,k}$, E_1 , E_2 , P_1 y P_2 . Cada una determinadas de forma independiente por medio de los parámetros de la clase correspondiente. Por otro lado, el número de nodos para la clase 1 se expresa como N_1 , en tanto que para expresar el número de nodos de la clase 2 se usa N_2 . A partir de estos, se obtiene M_1 y M_2 . Las probabilidades de transición de las dos 2D-DTMC para los nodos de clase 1 y los nodos de clase 2, se dan en las Tablas D.1 y D.2 (anexo D), respectivamente.

Probabilidades de transición de la 2D-DTMC de la clase 1

En la Tabla D.1, las transiciones se organizan de la siguiente forma:

- La primera fila define las transiciones ocasionadas por los nuevos arribos cuando el RN_1 correspondiente tiene la cola vacía y ningún otro nodo está activo.

- La segunda fila describe las transmisiones hechas por los otros nodos mientras el RN_1 tiene su cola vacía.
- La tercera y cuarta fila definen las transmisiones de RN_1 en los ciclos donde no hay más nodos activos y cuando sí hay otros nodos activos, respectivamente.
- Finalmente, la quinta fila muestra las transiciones que no son posibles.

Como un ejemplo, explicamos $P_{im,jn}$, es decir, la probabilidad de transición del estado (i, m) al estado (j, n) . Elegimos, de la Tabla D.1, la primera expresión de la cuarta fila, donde las transiciones son ocasionadas por los $m + 1$ nodos activos incluyendo a RN_1 :

$$\begin{aligned}
 P_{im,jn} = & P_{s_1,m} B_{1,n-m} (M_1 - m) A_{1,j-i+1} \\
 & + m P_{s_1,m} E_1 B_{1,n-m+1} (M_1 - m) A_{1,j-i} \\
 & + m P_{s_1,m} \hat{E}_1 B_{1,n-m} (M_1 - m) A_{1,j-i} \\
 & + (1 - (m + 1) P_{s_1,m}) B_{1,n-m} (M_1 - m) A_{1,j-i}
 \end{aligned} \tag{3.6}$$

$$1 \leq i \leq j \leq (Q_1 - 1), 1 \leq m \leq n < M_1$$

- El primer término define la probabilidad de que el RN_1 gane la contienda, transmita un paquete, reciba $j - i + 1$ paquetes y se activen $n - m$ nodos de $M_1 - m$ nodos inactivos.
- El segundo término define la probabilidad de que un nodo activo distinto a RN_1 gane la contienda, transmita un paquete con éxito y vacíe su cola (E_1), y por tanto el nodo se inactive, se activen $n - m + 1$ nodos de $M_1 - m$ nodos inactivos, y el RN_1 reciba $j - i$ paquetes.
- El tercer término define la probabilidad de que un nodo diferente de RN_1 gane la contienda, transmita un paquete con éxito pero su cola no se vacíe (\hat{E}_1), se activen $n - m$ nodos de $M_1 - m$ nodos activos, y el RN_1 reciba $j - i$ paquetes.

- Por último, el cuarto término define la probabilidad de que RN_1 no transmita cuando contiene con otros k nodos y dos o más de los otros nodos colisionen $(1 - (m + 1)P_{s_1,m})$, se activen $n - m$ nodos de $M_1 - m$ nodos inactivos, y el RN_1 reciba $j - 1$ paquetes.

Probabilidades de transición de la 2D-DTMC de la clase 2

De forma similar, en la Tabla D.2, las transiciones se organizan de la siguiente forma:

- La primera fila define las transiciones ocasionadas por los nuevos arribos cuando el RN_2 correspondiente tiene la cola vacía y ningún otro nodo está activo.
- La segunda fila describe las transmisiones hechas por los otros nodos mientras el RN_2 tiene su cola vacía.
- La tercera y cuarta fila definen las transmisiones de RN_2 en los ciclos donde no hay más nodos activos y cuando sí hay otros nodos activos, respectivamente.
- Finalmente, la quinta fila muestra las transiciones que no son posibles.

De igual manera, como un ejemplo, explicamos $P_{im,jn}$, es decir, la probabilidad de transición del estado (i, m) al estado (j, n) . Elegimos, de la Tabla D.2, la primera expresión de la cuarta fila, donde las transiciones son ocasionadas por los $m + 1$ nodos activos incluyendo a RN_2 :

$$\begin{aligned}
 P_{im,jn} = & [P_{s_2,m}B_{2,n-m}(M_2 - m)A_{2,j-i+1} \\
 & + mP_{s_2,m}E_2B_{2,n-m+1}(M_2 - m)A_{2,j-i} \\
 & + mP_{s_2,m}\hat{E}_2B_{2,n-m}(M_2 - m)A_{2,j-i} \\
 & + (1 - (m + 1)P_{s_2,m})B_{2,n-m}(M_2 - m)A_{2,j-i}] R_{1,0} \\
 & + B_{2,n-m}(M_2 - m)A_{2,j-i} (1 - R_{1,0}) \\
 & 1 \leq i \leq j \leq (Q_2 - 1), 1 \leq m \leq n < M_2
 \end{aligned} \tag{3.7}$$

- El primer término define la probabilidad de que el RN_2 gane la contienda, transmita un paquete, reciba $j - i + 1$ paquetes y se activen $n - m$ nodos de $M_2 - m$ nodos inactivos.
- El segundo término define la probabilidad de que un nodo activo distinto a RN_2 gane la contienda, transmita un paquete con éxito y vacíe su cola (E_2), y por tanto el nodo se inactive, se activen $n - m + 1$ nodos de $M_2 - m$ nodos inactivos, y el RN_2 reciba $j - i$ paquetes.
- El tercer término define la probabilidad de que un nodo diferente de RN_2 gane la contienda, transmita un paquete con éxito pero su cola no se vacíe (\hat{E}_2), se activen $n - m$ nodos de $M_2 - m$ nodos activos, y el RN_2 reciba $j - i$ paquetes.
- El cuarto término define la probabilidad de que RN_2 no transmita cuando contiene con otros k nodos y dos o más de los otros nodos colisionen ($1 - (m + 1)P_{s_2,m}$), se activen $n - m$ nodos de $M_2 - m$ nodos inactivos, y el RN_2 reciba $j - 1$ paquetes.
- Por último, el quinto término define la probabilidad de que el RN_2 reciba $j - i$ paquetes y se activen $n - m$ nodos de $M_2 - m$ nodos inactivos.

Observe que a diferencia de la expresión ejemplo de las transiciones de la clase 1 que se muestra en (3.6), en la expresión (3.7) correspondiente a la clase 2, se incluye el factor $R_{1,0}$, además de un último término adicional. El factor $R_{1,0}$, que se ha definido como la probabilidad de que los nodos de clase 1 estén inactivos (según se ha visto en capítulo 2), multiplica a los primeros cuatro términos de la expresión (3.7).

Hay que recordar que la clase 1 es la clase prioritaria, y que la clase 2 accede al medio solo cuando los nodos de clase 1 no tienen paquetes que transmitir. Debido a que los primeros cuatro términos de (3.7) implican eventos donde los nodos de clase 2 realizan transmisiones, necesariamente estos eventos solo pueden ocurrir cuando los nodos de clase 1 están inactivos. Por tal motivo se multiplica dichos términos por la probabilidad de que los nodos de clase 1 estén inactivos ($R_{1,0}$).

El término final de (3.7), implica que los nodos de clase 2 puedan generar paquetes, aunque no estén en posibilidad de intentar transmitirlos porque la clase prioritaria (clase 1) se encuentra ocupando el canal. Es por ello que este término es multiplicado por $(1 - R_{1,0})$, que indica la probabilidad de que los nodos de clase 1 estén activos.

Como se ha visto en el capítulo 2, y se verá en el apartado 3.4.3, $R_{1,0}$ se obtiene a partir de la distribución estacionaria de la clase 1 (π_1), la cual es resultado de la primera cadena. Por otro lado, para obtener la distribución estacionaria de la clase 2 (π_2), se tiene que resolver la segunda cadena, pero ésta estará en función de $R_{1,0}$.

De lo anterior, se infiere que aunque los resultados de la primera cadena son independientes de la segunda, los de la segunda dependen de los resultados de la primera. La forma de esta dependencia, también ha quedado explícita en la Figura 2.3 del capítulo 2.

3.4.3 Solución de las 2D-DTMC

Solución de la primera 2D-DTMC

La solución de la primera 2D-DTMC, para la clase 1, puede obtenerse resolviendo el conjunto de ecuaciones lineales,

$$\pi_1 P_1 = \pi_1, \quad \pi_1 e = 1, \quad (3.8)$$

donde $\pi_1 = [\pi_1(i, n)]$ es la distribución de probabilidad estacionaria, P es la matriz de probabilidades de transición, cuyos elementos se definen en el apéndice D (Tabla D.1), y e es un vector columna de unos.

La probabilidad promedio, P_{s_1} , de que el correspondiente RN_1 transmita un paquete exitosamente en un ciclo aleatorio, condicionado a que el RN_1 esté activo, está dado por:

$$P_{s_1} = \frac{1}{G_1} \sum_{i=1}^{Q_1} \sum_{k=0}^{M_1} \pi_1(i, k) \cdot P_{s_1, k}, \quad (3.9)$$

$$G_1 = \sum_{i=1}^{Q_1} \sum_{k=0}^{M_1} \pi_1(i, k) = 1 - \sum_{k=0}^{M_1} \pi_1(0, k). \quad (3.10)$$

La distribución de probabilidad estacionaria es función de P_{s_1} , $\pi_1(P_{s_1})$. Resolviendo el conjunto de ecuaciones de (3.8), $\pi_1(P_{s_1})$ puede determinarse para una P_{s_1} dada. Luego, una nueva P_{s_1} puede obtenerse de (3.9). Se sigue un procedimiento iterativo de punto fijo y denotamos con π_1 a su solución.

Solución de la segunda 2D-DTMC

De forma similar, la solución de la segunda 2D-DTMC, para la clase 2, puede obtenerse resolviendo el conjunto de ecuaciones lineales,

$$\pi_2 P_2 = \pi_2, \quad \pi_2 e = 1, \quad (3.11)$$

donde $\pi_2 = [\pi_2(i, n)]$ es la distribución de probabilidad estacionaria, P es la matriz de probabilidades de transición, cuyos elementos se definen en el apéndice D (Tabla D.2), y e es un vector columna de unos.

La probabilidad promedio, P_{s_2} , de que el correspondiente RN_2 transmita un paquete exitosamente en un ciclo aleatorio, condicionado a que el RN_2 esté activo, está dado por:

$$P_{s_2} = \frac{1}{G_2} \sum_{i=1}^{Q_2} \sum_{k=0}^{M_2} \pi_2(i, k) \cdot P_{s_2, k}, \quad (3.12)$$

$$G_2 = \sum_{i=1}^{Q_2} \sum_{k=0}^{M_2} \pi_2(i, k) = 1 - \sum_{k=0}^{M_2} \pi_2(0, k). \quad (3.13)$$

Se requiere de la información del estado de los nodos de clase 1, lo cual se obtiene de la distribución estacionaria de la clase 1. En específico, se requiere conocer el estado de actividad de los nodos de clase 1.

Definimos el parámetro $R_{1,0}$, que indica la fracción de ciclos en los que los nodos de clase 1 están inactivos, o de otra forma, la probabilidad de que los nodos de clase 1 estén inactivos o no tengan paquetes en cola para transmitir.

$$R_{1,0} = \pi_1(0, 0) \quad (3.14)$$

Ese parámetro, se establece como factor, y se incluye como parte de las expresiones desarrolladas que determinan las probabilidades de transición, que se exponen en la Tabla 2 del apéndice D.

Por tanto, la distribución de probabilidad estacionaria es función de P_{s_2} , pero también de $R_{1,0}$, $\pi_2(P_{s_2}, R_{1,0})$. Resolviendo el conjunto de ecuaciones de (3.11), $\pi_2(P_{s_2}, R_{1,0})$ puede determinarse para una P_{s_2} dada. Luego, una nueva P_{s_2} puede obtenerse de (3.12). Se sigue un procedimiento iterativo de punto fijo y denotamos con π_2 a su solución.

Dado el procedimiento de priorización del acceso al medio en esta propuesta, recordemos que los nodos de clase 1 son los que tienen prioridad para acceder al canal de comunicación. Los nodos de clase 2, podrán acceder al medio, solo si no existen nodos de clase 1 con paquetes en su cola, es decir, que no haya nodos activos. Los resultados de cada cadena están dados por sus respectivas distribuciones estacionarias, pero dado el acoplamiento existente entre ambas cadenas, los resultados de la segunda cadena dependen de los resultados que se hayan obtenido para la primer cadena. En cambio, la primer cadena, es independiente en cuanto a resultados, de la segunda cadena.

3.4.4 Parámetros de prestaciones

Caudal cursado

El caudal cursado por nodo η se define como el número promedio de paquetes entregados con éxito por un nodo en un ciclo. El caudal total cursado por el sistema o caudal en agregado, Th , expresado en paquetes por ciclo, es la suma de los caudales cursados de los N nodos de la clase correspondiente.

Para los nodos de clase 1, el caudal cursado por nodo se obtiene con la ecuación (3.15), mientras que el caudal total cursado por el sistema se

determina con la expresión (3.16).

$$\eta_1 = \sum_{i=1}^{Q_1} \sum_{k=0}^{M_1} \pi_1(i, k) \cdot P_{s_1, k} , \quad (3.15)$$

$$Th_1 = N_1 \cdot \eta_1 . \quad (3.16)$$

Para los nodos de la clase 2, las expresiones para el caudal cursado por nodo y el caudal total del sistema están dados por las expresiones (3.17) y (3.18), respectivamente.

$$\eta_2 = \sum_{i=1}^{Q_2} \sum_{k=0}^{M_2} \pi_2(i, k) \cdot P_{s_2, k} \cdot R_{1,0} , \quad (3.17)$$

$$Th_2 = N_2 \cdot \eta_2 . \quad (3.18)$$

Observe que para el cálculo del caudal para la clase 2, es necesario considerar la inactividad de los nodos de clase 1, a través del parámetro $R_{1,0}$.

Retardo promedio de los paquetes

Se define D como el retardo promedio en ciclos, que experimenta un paquete desde su llegada a la cola del nodo, hasta que se transmite con éxito. Para la determinación del retardo promedio de los paquetes, D , se aplica la ley de Little.

Para los nodos de clase 1, el retardo se calcula con las expresiones siguientes:

$$D_1 = \frac{N_{av_1}}{\gamma_{a_1}} , \quad N_{av_1} = \sum_{i=0}^{Q_1} i \pi_{i_1} , \quad \gamma_{a_1} = \eta_1 , \quad \pi_{i_1} = \sum_{k=0}^{M_1} \pi_1(i, k) . \quad (3.19)$$

Tenga en cuenta que: i) π_{i_1} es la probabilidad estacionaria de encontrar i paquetes en la cola del correspondiente RN_1 ; ii) N_{av_1} es el número promedio de paquetes en la cola de RN_1 ; iii) γ_{a_1} es el número promedio de paquetes que ingresaron a la cola del RN_1 (aceptados) por ciclo, que es igual a η_1 .

Para los nodos de clase 2, el retardo se calcula con las expresiones siguientes:

$$D_2 = \frac{N_{av_2}}{\gamma_{a_2}}, \quad N_{av_2} = \sum_{i=0}^{Q_2} i\pi_{i_2}, \quad \gamma_{a_2} = \eta_2, \quad \pi_{i_2} = \sum_{k=0}^{M_2} \pi_2(i, k). \quad (3.20)$$

Tenga en cuenta que: i) π_{i_2} es la probabilidad estacionaria de encontrar i paquetes en la cola del correspondiente RN_2 ; ii) N_{av_2} es el número promedio de paquetes en la cola de RN_2 ; iii) γ_{a_2} es el número promedio de paquetes que ingresaron a la cola del RN_2 (*aceptados*) por ciclo, que es igual a η_2 .

Observe que en el cálculo del retardo para la clase 2, el factor $R_{1,0}$ no se incluye directamente en las expresiones, ya que en éstas solo se contabilizan los paquetes en la cola del RN_2 , sin implicar de forma explícita transmisiones de paquetes. Sin embargo, el parámetro η_2 sí implica transmisión por parte de RN_2 , este parámetro ya se ha calculado por medio de la expresión (3.17), realizándose la consideración del factor $R_{1,0}$.

3.4.5 Modelo para el cálculo del consumo energético

El procedimiento de cálculo desarrollado en esta sección, es similar a los procedimientos vistos en los modelos 1D y 2D, en el apartado donde se revisan los antecedentes o modelos previos 2.2. La diferencia radica en que, en el presente apartado, se utiliza el escenario y protocolo MAC que se ha explicado en el apartado 3.3.

En los modelos 1D y 2D, se suponía un modelo de tráfico homogéneo en el que los nodos se intercambian paquetes entre sí, y el nodo destino de cada paquete puede ser cualquier nodo diferente al transmisor con la misma probabilidad. En cambio, en el escenario estudiado ahora, el tráfico se destina a un único nodo que opera como un *sink*. Éste nodo sólo recibe, y nunca transmite paquetes de datos, más allá de intercambio de paquetes de control necesarios para que pueda recibir con éxito, es decir, RTS/CTS/DATA/ACK. Este nuevo escenario tiene repercusiones, principalmente, en la forma en que se calcula la energía media consumida por ciclo.

Como se ha descrito en el apartado 3.3, Fig. 3.1, el periodo *active* de un ciclo se subdivide en los periodos *sync* y *data*. La energía consumida durante el periodo *active* representa la contribución más significativa del total de energía consumida. En el presente apartado calculamos la energía promedio consumida por el nodo de referencia *RN* y por ciclo en el periodo *data*. Debe notarse que solamente se estudia la energía media consumida por el transceptor de radiofrecuencia. La energía consumida por los nodos sensores debido a eventos relacionados con tareas específicas de detección o monitorización dependen de la aplicación y no se incluyen en este estudio.

Sea $E_{d,k+1}$ la energía promedio consumida por el *RN* correspondiente y por ciclo cuando contiene con otros $k \geq 1$ nodos durante el periodo *data*. Lo anterior está dado por:

$$\begin{aligned}
 E_{d,k+1} &= q_k [P_{s,k} E_{s,k}^{tx} + P_{f,k} E_{f,k}^{tx} + E_{oh,k}] , \\
 E_{s,k}^{tx} &= (t_{RTS} + t_{DATA}) P_{tx} + (BT_{s,k} + t_{CTS} + t_{ACK} + 4D_p) P_{rx} , \\
 E_{f,k}^{tx} &= t_{RTS} P_{tx} + (BT_{f,k} + 2D_p) P_{rx} , \\
 E_{oh,k} &= (kP_{s,k} BT_{s,k} + (1 - kP_{s,k} - P_{sf,k}) BT_{f,k} + D_p) P_{rx} .
 \end{aligned} \tag{3.21}$$

Donde $E_{s,k}^{tx}$, $E_{f,k}^{tx}$ y $E_{oh,k}$ son los términos de consumo promedio de energía, cuando el *RN* contiene con otros k nodos y transmite con éxito, con falla (colisión), y cuando escucha la transmisión de otros nodos (*overhearing*).

Sea $q_k = (k + 1)/N$ la probabilidad de que el correspondiente *RN* esté activo, condicionada a encontrar $k + 1$ nodos activos.

Cuando el *RN* está activo, $1 - P_{sf,k}$ define la probabilidad de que este no transmita, pero que otro nodo k sí lo haga. En ese caso: i) uno de ellos transmite exitosamente (con probabilidad $kP_{s,k}$); o ii) dos o más colisionan (con probabilidad $1 - kP_{s,k}$).

Debe notarse que si el *RN* no está activo, entonces no escuchará el canal, ya que suponemos que los nodos transmiten al *sink*, y el *sink* solo recibe, nunca transmite.

Los parámetros t_{RTS} , t_{DATA} , t_{CTS} y t_{ACK} , son los tiempos de transmisión de los paquetes correspondientes, P_{tx} y P_{rx} son los niveles de potencia de

transmisión y recepción, y D_p es el retardo de propagación en un solo sentido. Note que $P_{s,0} = 1$, $P_{f,0} = 0$, $BT_{s,0} = (W - 1)/2$, $E_{d,1} = q_0 E_{s,0}^{tx}$ y $E_{d,0} = 0$.

La energía promedio consumida por el RN durante el periodo *data* en un ciclo está dado por:

$$E_d = \sum_{k=0}^N E_d \cdot \pi'_k \quad (3.22)$$

donde π'_k es la distribución de probabilidad estacionaria de encontrar activos k nodos en un ciclo, y se determina como: $\pi'_k = \sum_{i=1}^Q \pi(i, k)$, $1 \leq k \leq N - 1$, $\pi'_N = \sum_{i=1}^Q \pi(i, N - 1)$, $\pi'_0 = \pi(0, 0)$. La energía promedio consumida por los nodos de clase 1, en el periodo *data*, puede obtenerse por medio de las expresiones (3.21) y (3.22). Solo se ha de considerar que la información que se ingrese en las expresiones, corresponda con la información de los nodos de clase 1, por ejemplo, la distribución estacionaria (π_1).

Denotamos por E_1 al consumo energético promedio por ciclo de los nodos de clase 1, por tanto, este consumo puede determinarse mediante la siguiente expresión:

$$E_1 = E_{d_1} \quad (3.23)$$

Donde E_{d_1} denota la energía promedio consumida por ciclo por RN_1 en el periodo *data*.

Para calcular la energía promedio consumida por los nodos de clase 2, en el periodo *data*, conviene primero recordar que la clase 2 es la clase no prioritaria. Los nodos de clase 2, podrán acceder al medio, solo si no existen previamente nodos de clase 1 ocupando el medio. Los nodos activos de clase 2 despertarán justo después de que la ventana de contienda de clase 1 (W_1) haya finalizado y, si detectan en ese instante un medio inactivo, los nodos activos de clase 2 intentarán transmitir, iniciando su propio mecanismo de contienda.

En realidad, ese instante en el cual los nodos despiertan para detectar la disponibilidad del medio se denomina *slot*, corresponde a la duración de un

backoff tic, y es el tiempo que suponemos necesario para detectar si el canal está ocupado. En la Tabla 3.1, donde se muestra la configuración de parámetros, puede observarse su magnitud en términos de t_s o tiempo de *slot*. Ese consumo de energía, cuando los nodos de clase 2 despiertan y detectan el medio ocupado, se añade al cómputo total, y puede calcularse con la expresión siguiente:

$$E_0 = \text{tiempo slot} \cdot P_{rx} . \quad (3.24)$$

Una vez explicado lo anterior, podemos decir que la energía promedio consumida por los nodos de clase 2, en el periodo *data*, puede obtenerse por medio de las expresiones (3.21) y (3.22). Solo se ha de considerar que la información que se ingrese en las expresiones, corresponda con la información de los nodos de clase 2, por ejemplo, la distribución estacionaria (π_2).

Denotamos por E_2 al consumo energético promedio por ciclo de los nodos de clase 2, por tanto, este consumo pueden determinarse mediante la siguiente expresión:

$$E_2 = (1 - R_{1,0})E_0 + R_{1,0} \cdot E_{d_2} . \quad (3.25)$$

Donde $R_{1,0}$ es la probabilidad estacionaria de que no haya nodos activos de clase 1 en un ciclo (fracción de ciclos en los que los nodos de clase 1 están inactivos), E_{d_2} denota la energía promedio consumida por ciclo por RN_2 en el periodo *data*. Por sencillez, debido a que $E_0 \cong 0$, lo igualamos a cero, por tanto $E_2 \cong R_{1,0} \cdot E_{d_2}$.

3.5 Resultados numéricos

En este apartado se presentan los escenarios, la configuración de parámetros, y los resultados obtenidos para los parámetros de prestaciones, tal como: retardo promedio, caudal cursado y energía promedio consumida. En las figuras donde se presentan los resultados, las líneas continuas o discontinuas representan los valores que resultan de la solución del modelo analítico; en

las mismas figuras, los diferentes marcadores representan los valores obtenidos como resultado de las simulaciones.

3.5.1 Escenarios y configuración de parámetros

Los resultados analíticos se obtienen de los modelos que se han desarrollado (las cadenas de Markov de dos dimensiones 2D-DTMC). Los resultados de simulación se obtienen por medio de un simulador de propósito específico, realizado en lenguaje C y que implementa el esquema de transmisión. El simulador que se ha desarrollado imita el comportamiento físico del sistema. Esto es, en cada ciclo los nodos reciben paquetes de acuerdo a una distribución discreta de probabilidades dada, contiene por el acceso al canal con otros nodos, en caso de que tenga paquetes en su cola, y si gana, transmite un paquete de acuerdo al esquema de transmisión. Los resultados de simulación son completamente independientes de aquellos obtenidos con el modelo analítico. Es decir, el cálculo de las métricas de prestaciones en las simulaciones no dependen de las expresiones matemáticas que se han definido en el modelo analítico.

La WSN se configura considerando dos clases de nodos y dos escenarios (SC1 y SC2), los parámetros de configuración se muestran en la Tabla 3.1. Uno de los parámetros mostrados es la tasa de arribo de paquetes, la cual se expresa en paquetes/segundo, sin embargo, a modo de referencia, también se pueden expresar en paquetes/ciclo, quedando de la siguiente manera: $\lambda_1 = \{0.03, 0.06\}$ paquetes/ciclo y $\lambda_2 = [0.03, 0.27]$ paquetes/ciclo.

En los siguientes apartados se muestran los resultados de los parámetros de prestaciones obtenidos del modelo analítico y por simulación. Los resultados de simulación se representan con marcadores rojos. Los resultados analíticos se representan con líneas y marcadores.

Tabla 3.1: Configuración de parámetros [1].

Duración del ciclo (T)	60 ms	Retardo de propagación (D_p)	0.1 μ s
t_{SYNC} , t_{RTS} , t_{CTS} and t_{ACK}	0.18 ms	Tiempo de slot (ts)	0.1 ms
t_{DATA}	1.716 ms	Ventana de contienda (W)	128 slots
Tamaño del paquete DATA (S)	50 bytes	Tamaño de la cola (Q)	5 paquetes
Potencia de transmisión (P_{tx})	52 mW	Potencia de recepción (P_{rx})	59 mW
Número de nodos y escenarios	Tasa de arribo de los paquetes (paquetes/s)		
$N_1 = 3$ (SC1 and SC2)	$\lambda_1 = \{0.5, 1.0\}$		
$N_2 = 2N_1 = 6$ (SC1),	$\lambda_2 = [0.5, 4.5]$		
$N_2 = 3N_1 = 9$ (SC2)			

3.5.2 Retardo promedio de los paquetes

La Fig. 3.4 muestra el retardo promedio de los paquetes expresado en ciclos, para ambas clases de nodos en los escenarios SC1 y SC2, y una tasa de arribo de paquetes $\lambda_1 = 0.5$ paquetes/segundo. Denotamos por D_1 y D_2 al retardo promedio de paquetes transmitidos exitosamente por la clase 1 y clase 2, respectivamente. Observe en la figura que D_1 toma un valor constante. Esto es porque λ_1 y el número de nodos N_1 también son valores constantes, y los nodos de clase 1 tienen prioridad sobre los nodos de clase 2. Sin embargo, para los nodos de clase 2, la tasa de arribo de paquetes puede tomar valores dentro del intervalo: $\lambda_2 \in [0.5, 4.5]$.

Note que D_2 aumenta con λ_2 , debido a que la fracción de paquetes que colisionan aumenta con λ_2 , y se requieren más retransmisiones. Por lo tanto, para los nodos de clase 2, toma más tiempo transmitir sus paquetes. Note que los nodos de clase 1 operan con carga baja, y tienen sus colas vacías la mayor parte del tiempo. Entonces, cuando un paquete llega se transmite de inmediato y sin colisión.

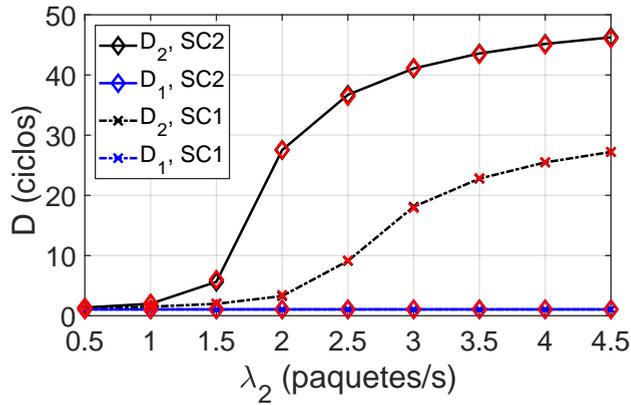


Figura 3.4: Retardo promedio de los paquetes en ciclos para ambas clases de nodos (D_1 y D_2) y ambos escenarios (SC1 y SC2). Tasa de arribo de paquetes para la clase 1: $\lambda_1 = 0.5$.

Note también que para el SC1 el número de nodos de clase 2 es el doble que el número de nodos de clase 1 ($N_2 = 2N_1$), y para el SC2 se tiene el triple de nodos de clase 2 respecto al número de nodos de clase 1 ($N_2 = 3N_1$). Para el SC2, donde el número de nodos se incrementa, D_2 alcanza valores mayores que en el SC1. Cuando el número de nodos aumenta, toma más tiempo lograr acceder al canal debido al aumento de la contienda. Por lo tanto, los paquetes tienen que esperar más tiempo en la cola antes que sean transmitidos. Además, ocurren más colisiones lo cual conlleva a más retransmisiones. La Fig. 3.5 muestra el retardo promedio de los paquetes expresado en ciclos, para ambas clases de nodos en el SC1, y dos valores de tasa de arribo de paquetes $\lambda_1 = \{0.5, 1\}$. En D_1 no se observa efecto como consecuencia del incremento de λ_1 , esto es debido al hecho de que los nodos de clase 1 operan a baja carga, y tienen sus colas vacías la mayor parte del tiempo. Por tanto, cuando llega un paquete se transmite de inmediato y sin colisión.

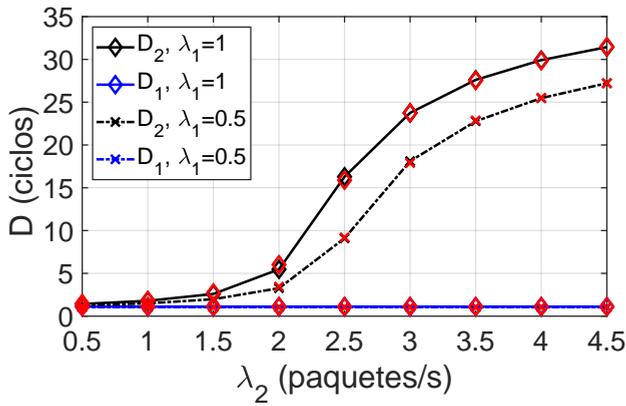


Figura 3.5: Retardo promedio de los paquetes en ciclos para ambas clases de nodos (D_1 y D_2) en el escenario 1 (SC1). Tasas de arribo de paquetes para la clase 1: $\lambda_1 = \{0.5, 1\}$.

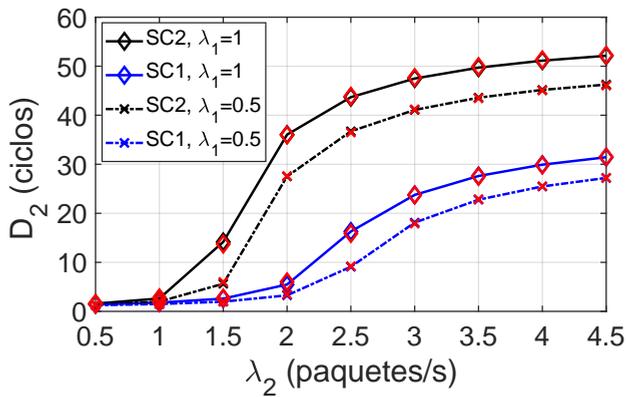


Figura 3.6: Retardo promedio de los paquetes en ciclos para los nodos de clase 2 (D_2) en ambos escenarios (SC1 y SC2). Tasas de arribo de paquetes para la clase 1: $\lambda_1 = \{0.5, 1\}$.

Por otro lado, la Fig. 3.6 muestra el retardo promedio de los paquetes para la clase 2, considerando ambos escenarios (SC1 y SC2) y los dos valores para $\lambda_1 = \{0.5, 1\}$. Para el SC1, los valores del retardo son menores que los correspondientes al SC2. La figura muestra una estabilidad relativa hasta los valores de $\lambda_2 = \{1.5, 2\}$, a partir de los cuales comienza un incremento pronunciado en el retardo. Las curvas del SC2 presentan un comportamiento similar, pero el aumento del retardo comienzan antes, a partir de $\lambda_2 = 1$. Para el SC2, donde el número de nodos es mayor, D_2 alcanza mayores valores que en el SC1. A medida que el número de nodos aumenta, les toma más tiempo acceder al canal debido a que aumenta la contienda, por tanto, los paquetes tienen que esperar más tiempo en la cola antes de transmitirse. Además, ocurren más colisiones lo que implica más retransmisiones. En la Fig. 3.6, también se observa un incremento en el retardo promedio de los paquetes cuando se incrementa el valor λ_1 , y puede explicarse en los mismos términos que en la Fig. 3.5.

3.5.3 Caudal cursado

La Fig. 3.7 muestra el caudal cursado para los nodos de la clase 2 (η_2), considerando ambos escenarios (SC1 y SC2). Se alcanza un valor máximo de caudal cursado, a partir del cual, se presenta un comportamiento prácticamente constante con λ_2 llegando a un nivel de saturación.

En general, el caudal cursado es mayor en el SC1 respecto al SC2. Esto es debido a que en el SC1, el número de nodos es menor y por tanto, se presenta menor contienda. Los nodos tienen más oportunidades de acceder al canal y de tener éxito en la transmisión de los paquetes, alcanzando valores mayores de caudal cursado. Por otro lado, al haber menos nodos, es posible operar a mayores tasas de arribo antes de presentarse una saturación.

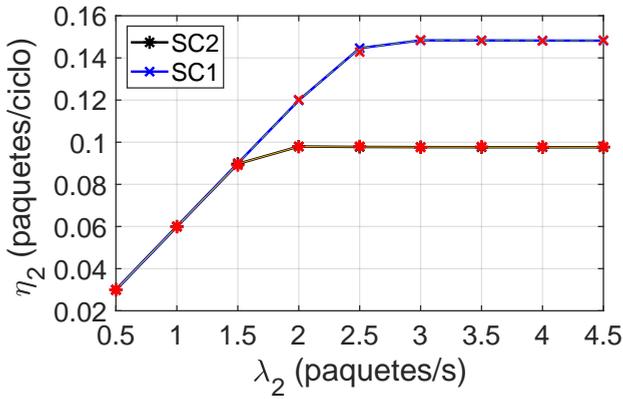


Figura 3.7: Caudal cursado por nodo para la clase 2 (η_2) considerando ambos escenarios (SC1 y SC2). Tasa de arribo de paquetes para la clase 1: $\lambda_1 = 0.5$.

La Fig. 3.8 muestra el caudal en agregado (Th) o caudal total cursado por el sistema para ambas clases de nodos, considerando el SC1.

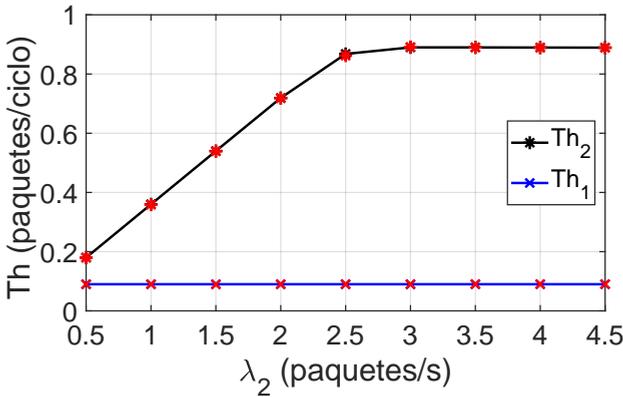


Figura 3.8: Caudal total cursado en el sistema (Th) para ambas clases de nodos considerando el escenario 1 (SC1). Tasa de arribo de paquetes para la clase 1: $\lambda_1 = 0.5$.

Dado que el número de nodos de clase 1 es constante, como también lo es λ_1 , su caudal en agregado también permanece constante. Para la clase 2, el caudal en agregado aumenta con λ_2 , alcanzando un nivel de saturación en $\lambda_2 = 2.5$. El caudal cursado en agregado es la suma del caudal cursado de cada uno de los nodos de la clase correspondiente.

3.5.4 Consumo promedio de energía

La Fig. 3.9 muestra el consumo promedio de energía (E) por ciclo y en milijulios (mJ), para ambas clases de nodos y considerando ambos escenarios (SC1 y SC2). Se observa que para los nodos de clase 2 hay un mayor consumo de energía por nodo en el SC1 comparado con el SC2.

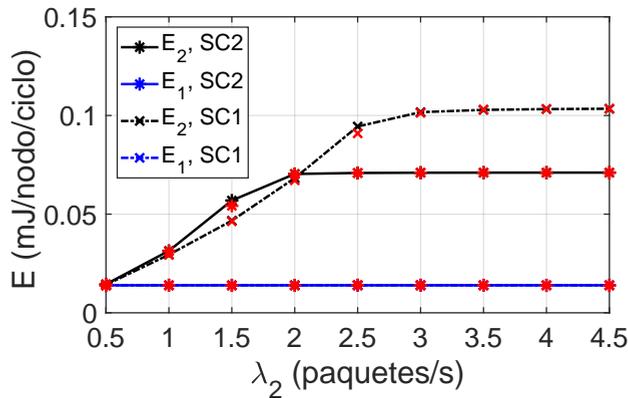


Figura 3.9: Consumo promedio de energía (E) por nodo por ciclo. Se consideran ambos escenarios (SC1 y SC2) y ambas clases. Tasa de arribo de paquetes para la clase 1: $\lambda_1 = 0.5$.

Hay que recordar que SC1 se conforma de un menor número de nodos. Este escenario de mayor consumo energético se corresponde con el escenario donde se alcanza un mayor caudal cursado (ver Fig. 3.7). Mayores valores

de caudal cursado implica realizar más transmisiones y entrega de paquetes, llevando a una mayor actividad de los nodos y, en consecuencia, a un mayor consumo de energía. La Fig. 3.9, también muestra que para los nodos de clase 1, la energía consumida es constante con λ_2 . Esto es debido a que ambos, la tasa de arribo de paquetes λ_1 y el número de nodos N_1 son constantes. Para los nodos de clase 2, la tasa de arribo de paquetes varía ($\lambda_2 \in [0.5, 4.5]$), y el número de nodos que constituyen la red es diferente para cada escenario. Los nodos eventualmente alcanzan un límite de actividad que tiene asociado un límite de consumo energético. La Fig. 3.9 también muestra que para los nodos de clase 2 en el SC1, el límite de consumo de energía es mayor y este se alcanza a un valor mayor de carga de tráfico, que aquella de SC2. Debido a que hay menos nodos en el SC1, los nodos pueden operar a tasas de arribo de paquetes mayores antes de alcanzar un nivel de saturación de actividad.

3.6 Conclusiones

Se ha realizado un estudio de rendimiento de una red WSN heterogénea, considerando diferentes clases de nodos y la asignación de prioridades de acceso al medio. Se desarrolló un modelo analítico para un protocolo MAC WSN que considera heterogeneidad y prioridades. Funciona en WSN con un protocolo MAC de ciclo de trabajo síncrono parecido a S-MAC. El modelo analítico se basa en dos cadenas de Markov en tiempo discreto de dos dimensiones (2D-DTMC). A diferencia de los modelos analíticos existentes para protocolos MAC de ciclo de trabajo aplicados a S-MAC, nuestro modelo tiene en cuenta las diferentes clases de nodos y la asignación de prioridades de acceso medio. El modelo analítico se resuelve para escenarios específicos, obteniendo valores de parámetros de prestaciones como retardo promedio de los paquetes, caudal cursado y consumo promedio de energía. El modelo analítico se valida a través de simulaciones basadas en eventos discretos, que muestran resultados precisos. El estudio muestra el impacto en los parámetros de prestaciones de los nodos de clase 2, debido a la priorización del

acceso al medio para los nodos de clase 1. Esto ocurre cuando aumenta el tráfico y el número de nodos. Se logra una coexistencia de tráfico aceptable entre ambas clases, cuando la clase prioritaria contribuye con una carga baja.

Capítulo 4

Modelado de red WSN heterogénea: Mejora del cálculo de consumo energético

4.1 Introducción

En el capítulo anterior (capítulo 3) se ha visto el modelado de una WSN en un escenario con características heterogéneas, operando con ciclo de trabajo sincronizado y con un modo de transmisión SPT. En este capítulo se realiza una evaluación de una WSN con las mismas condiciones antes expuestas, pero ahora se propone la incorporación de un nuevo método para el cálculo del consumo energético, que presenta una mayor precisión, además de ser un procedimiento más sistemático que los propuestos previamente en la literatura [54, 55, 33, 19]. En este capítulo también se consideran nuevos escenarios donde se incrementa el número de nodos en la WSN, y se obtienen nuevamente resultados de los parámetros de prestaciones: consumo promedio de energía, retardo de los paquetes, y caudal cursado. Aunque este capítulo se enfoca en la descripción y análisis del nuevo procedimiento para la determinación del consumo energético, debido a la variación del escenario, se obtienen resultados para los otros parámetros de prestaciones diferentes a al consumo promedio de energía, de los cuales se realiza su correspondiente

discusión.

4.2 Parámetros de prestaciones

4.2.1 Caudal cursado

El caudal cursado se calcula de la misma forma que se ha calculado en el capítulo 3, sin embargo, por facilidad en la lectura, se coloca de nuevo el procedimiento y las expresiones utilizadas.

El caudal cursado por nodo η se define como el número promedio de paquetes entregados con éxito por un nodo en un ciclo. El caudal total cursado por el sistema o caudal en agregado, Th , expresado en paquetes por ciclo, es la suma de los caudales cursados de los N nodos de la clase correspondiente.

Para los nodos de clase 1, el caudal cursado por nodo se obtiene con la ecuación (4.1), mientras que el caudal total cursado por el sistema se determina con la expresión (4.2).

$$\eta_1 = \sum_{i=1}^Q \sum_{k=0}^{M_1} \pi_1(i, k) \cdot P_{s,k} , \quad (4.1)$$

$$Th_1 = N_1 \cdot \eta_1 . \quad (4.2)$$

Para los nodos de la clase 2, las expresiones para el caudal cursado por nodo y el caudal total del sistema están dados por las expresiones (4.3) y (4.4), respectivamente.

$$\eta_2 = \sum_{i=1}^Q \sum_{k=0}^{M_2} \pi_2(i, k) \cdot P_{s,k} \cdot R_{1,0} , \quad (4.3)$$

$$Th_2 = N_2 \cdot \eta_2 . \quad (4.4)$$

Observe que para el cálculo del caudal para la clase 2, es necesario considerar la inactividad de los nodos de clase 1, a través del parámetro $R_{1,0}$.

4.2.2 Retardo promedio de los paquetes

El retardo promedio de los paquetes también se calcula de la misma manera que se ha calculado en el capítulo 3. A continuación se explica el procedimiento y las expresiones usadas.

Se define D como el retardo promedio en ciclos, que experimenta un paquete desde su llegada a la cola del nodo, hasta que se transmite con éxito. Para la determinación del retardo promedio de los paquetes, D , se aplica la ley de Little.

Para los nodos de clase 1, el retardo se calcula con las expresiones siguientes:

$$D_1 = \frac{N_{av_1}}{\gamma_{a_1}}, \quad N_{av_1} = \sum_{i=0}^{Q_1} i\pi_{i_1}, \quad \gamma_{a_1} = \eta_1, \quad \pi_{i_1} = \sum_{k=0}^{M_1} \pi_1(i, k). \quad (4.5)$$

Tenga en cuenta que: i) π_{i_1} es la probabilidad estacionaria de encontrar i paquetes en la cola del correspondiente RN_1 ; ii) N_{av_1} es el número promedio de paquetes en la cola RN_1 ; iii) γ_{a_1} es el número promedio de paquetes que ingresaron a la cola del RN_1 (*aceptados*) por ciclo, que es igual a η_1 .

Para los nodos de clase 2, el retardo se calcula con las expresiones siguientes:

$$D_2 = \frac{N_{av_2}}{\gamma_{a_2}}, \quad N_{av_2} = \sum_{i=0}^{Q_2} i\pi_{i_2}, \quad \gamma_{a_2} = \eta_2, \quad \pi_{i_2} = \sum_{k=0}^{M_2} \pi_2(i, k). \quad (4.6)$$

Tenga en cuenta que: i) π_{i_2} es la probabilidad estacionaria de encontrar i paquetes en la cola del correspondiente RN_2 ; ii) N_{av_2} es el número promedio de paquetes en la cola RN_2 ; iii) γ_{a_2} es el número promedio de paquetes que ingresaron a la cola del RN_2 (*aceptados*) por ciclo, que es igual a η_2 .

Observe que en el cálculo del retardo para la clase 2, el factor $R_{1,0}$ no se incluye directamente en las expresiones, ya que en éstas solo se contabilizan los paquetes en la cola del RN_2 , sin implicar de forma explícita transmisiones de paquetes. Sin embargo, el parámetro η_2 sí implica transmisión por parte de RN_2 , este parámetro ya se ha calculado por medio de la expresión (4.3), realizándose la consideración del factor $R_{1,0}$.

4.3 Modelo para el cálculo del consumo energético

El escenario general de la red es el mismo que el que se considera en el anterior capítulo 3.3. Lo relativo a la operación de la red y las suposiciones realizadas se retoman de las hechas en el apartado 3.3.2; la asignación de las prioridades se especifica en el apartado 3.3.3; el modelo en general y el procedimiento de resolución del mismo se retoma de la sección 3.4. Hay que recordar que está enfocado en un sistema de dos clases con prioridades.

Como se ha observado en la Fig. 3.1, el periodo *active* de un ciclo es subdividido en los periodos *sync* y *data*. La energía consumida durante el periodo *active* representa la contribución más significativa del total del consumo energético. En este apartado, se expone el desarrollo del nuevo procedimiento que permite determinar de manera más precisa, sencilla y sistemática, el consumo promedio de energía por parte del RN. Se considera para este cálculo, las actividades y procedimientos necesarios para el intercambio de paquetes de datos (DATA), lo cual ocurre en el periodo *data*. Hay que notar que solo se considera la energía consumida por el transceptor de radiofrecuencia. La energía consumida por los nodos sensores debido a los eventos relacionados a tareas específicas de detección depende de la aplicación particular. Por tanto, como no depende de la MAC, no se incluye en este estudio.

Sean E_s^{tx} , E_f^{tx} y E_{oh} , los términos de consumo promedio de energía por ciclo, cuando el RN transmite exitosamente, cuando transmite con falla (colisión), y cuando escucha la transmisión de otros nodos (*overhearing*), respectivamente. Entonces, el consumo promedio de energía de RN por ciclo está dado por la suma de los tres términos:

$$E_d = E_s^{tx} + E_f^{tx} + E_{oh}. \quad (4.7)$$

El consumo promedio de energía por ciclo del RN cuando éste consigue una

transmisión exitosa (E_s^{tx}) se obtiene con las siguientes expresiones:

$$E_s^{tx} = \sum_{i=1}^Q \sum_{k=0}^M \pi(i, k) P_{s,k} (P_{s,1}^{tx} + P_{s,2}^{tx} + P_s^{rx} + BT_{s,k} P_{rx}), \quad (4.8)$$

$$P_{s,1}^{tx} = t_{RTS} P_{tx}, \quad P_{s,2}^{tx} = t_{DATA} P_{tx}, \quad (4.9)$$

$$P_s^{rx} = [t_{CTS} + t_{ACK} + 4D_p] P_{rx}. \quad (4.10)$$

donde t_{RTS} , t_{DATA} , t_{CTS} y t_{ACK} , son los tiempos de transmisión para los paquetes RTS, DATA, CTS y ACK, respectivamente. P_{tx} y P_{rx} son los valores de potencia de transmisión y recepción, y D_p es el retardo de propagación en un sentido.

El consumo promedio de energía, E_s^{tx} , tiene dos versiones: $E_{s,1}^{tx}$ y $E_{s,2}^{tx}$. Para cada clase los parámetros son independientes y, por tanto, pueden ser diferentes. Es decir, la longitud de DATA puede ser distinta para la clase 1 y la clase 2. Podría tratarse de sensores con un *hardware* distinto y, en consecuencia, las potencias de transmisión y recepción, P_{tx} y P_{rx} , podrían ser diferentes. Las ventanas de contienda para cada clase, W_1 y W_2 , también podrían ser distintas y, por tanto, la probabilidad de que el RN transmita un paquete exitosamente, $P_{s,k}$, y el tiempo promedio de *backoff* que conlleva dicha transmisión, $BT_{s,k}$, también serían diferentes.

El último término de (4.8) hace referencia al consumo de energía del RN, debido al proceso realizado por el mecanismo de acceso (*backoff*), cuando el RN transmite un paquete con éxito. Este término se compone del factor $BT_{s,k}$, que es la duración promedio del mecanismo de *backoff* cuando el RN transmite con éxito, y el factor P_{rx} , que corresponde a la potencia que se consume por permanecer a la escucha (recepción) durante el tiempo de (*backoff*).

Por otro lado, recordemos que $\pi(i, k)$ es la fracción de ciclos en los que el RN tiene i paquetes en cola y contiene con otros k nodos activos

El consumo promedio de energía cuando se transmite con falla (E_f^{tx}) se

determina con:

$$E_f^{tx} = \sum_{i=1}^Q \sum_{k=1}^M \pi(i, k) P_{f,k} (P_f^{tx} + BT_{f,k} P_{rx} + P_f^{rx}), \quad (4.11)$$

$$P_f^{tx} = t_{RTS} P_{tx}, \quad P_f^{rx} = 2D_p P_{rx}. \quad (4.12)$$

Finalmente, el consumo promedio de energía en *overhearing* (E_{oh}) se obtiene con:

$$E_{oh} = \sum_{i=1}^Q \sum_{k=1}^M \pi(i, k) k P_{s,k} (BT_{s,k} P_{rx}) + \sum_{i=1}^Q \sum_{k=2}^M \pi(i, k) \hat{P}_{f,k} (BT_{f,k} P_{rx}), \quad (4.13)$$

$$\hat{P}_{f,k} = \sum_{i=1}^W \left[\sum_{n=2}^k \binom{k}{n} \left(\frac{1}{W} \right)^n \left(\frac{W-i}{W} \right)^{k-n+1} \right]. \quad (4.14)$$

donde $\hat{P}_{f,k}$ es la probabilidad de que dos o más de los otros k nodos distintos al RN elijan el valor de *backoff* más pequeño, y por tanto, menor al elegido por el RN. En ese caso, el RN perderá la contienda, y dos o más de los otros k nodos activos transmitirán con colisión por haber elegido el mismo valor de *backoff*.

En síntesis, un RN activo incurre en *overhearing* en el canal cuando : i) uno de los otros k nodos transmite exitosamente (con probabilidad $kP_{s,k}$); o ii) dos o más de los otros k nodos activos en el ciclo colisionen (con probabilidad $\hat{P}_{f,k}$). Note que si el RN no está activo, no escuchará el canal, dado que suponemos que el *sink* solo recibe y nunca transmite.

La energía promedio consumida por los nodos de clase 1 (E_{d_1}), en el periodo *data*, puede obtenerse siguiendo el procedimiento a partir de la expresión (4.7). Solo hay considerar la información de los nodos de clase 1 cuando se evalúen las expresiones, por ejemplo, la distribución estacionaria (π_1).

Para los nodos de clase 2, se aplican las mismas expresiones para obtener la energía consumida (E_{d_2}) durante el periodo *data*. Sin embargo, debe

sumarse un término adicional para contabilizar la energía consumida por los nodos de clase 2, para detectar el estado del canal de transmisión, particularmente cuando se despiertan pero detectan un canal ocupado. Se denota a este término como $E_0 = ts \cdot P_{rx}$, donde ts es la duración de un tiempo de *slot*. Se asume que la detección del canal requiere un tiempo igual a un *slot*.

Sean E_1 y E_2 la energía promedio consumida por ciclo, para los nodos de la clase 1 y la clase 2, respectivamente. Las expresiones finales para determinar el consumo de energía para ambas clases son las siguientes:

$$E_1 = E_{d1}, \quad (4.15)$$

$$E_2 = (1 - R_{1,0})E_0 + R_{1,0} \cdot E_{d2}. \quad (4.16)$$

donde $R_{1,0}$ es la probabilidad estacionaria de no encontrar nodos activos de clase 1 en un ciclo (fracción de ciclos donde todos los nodos de clase 1 están inactivos). Debido a que $E_0 \approx 0$, aproximamos $E_2 \approx R_{1,0} \cdot E_{d2}$.

El modelo, propuesto para determinar el consumo de energía por nodo y ciclo, permite predecir con precisión la vida útil de un nodo de cualquier clase prioritaria en la red y, por tanto, la vida útil de la red. Cuando los nodos comienzan a operar con diferentes niveles de batería, a medida que los nodos agotan sus baterías, se pueden eliminar de la red y entonces se debe calcular una nueva distribución de probabilidad estacionaria.

4.3.1 Evaluación de las prestaciones del método mejorado para determinar el consumo de energía

El nuevo procedimiento para determinar el consumo energético por un nodo por ciclo fue descrito en el apartado inmediato anterior 4.3. En el presente apartado, resaltamos sus ventajas en términos de la mejora en la precisión, particularmente para los nodos de clase 2, con respecto al método de cálculo de consumo de energía propuesto en otros estudios [54, 55, 33, 19]. En síntesis, los procedimientos anteriores requerían el cálculo de términos intermedios adicionales (ver el apartado 3.4.5), además de la distribución de

probabilidad estacionaria $\pi(i, k)$. Sin embargo, el nuevo procedimiento descrito por las ecuaciones (4.7) a (4.14), solo requiere de $\pi(i, k)$.

Como ejemplo, la Tabla 4.1 muestra el error relativo de consumo energético para los nodos de clase 2 calculado para dos escenarios específicos definidos en el apartado 4.4. Para resaltar la diferencia con respecto al método de cálculo anterior de 3.4.5, hemos escogido dos puntos de operación donde se obtiene la peor precisión. Note que los valores relativos se obtienen como $|x - y|/y$, donde x es el valor obtenido con el correspondiente procedimiento de cálculo analítico, y y es el valor obtenido por simulación.

Como se muestra, en promedio, el nuevo método de cálculo supera significativamente al anterior, hasta por dos órdenes de magnitud. Además, es más sistemático e intuitivo que el método previo, debido a que utiliza la distribución de probabilidad estacionaria más eficientemente en el proceso de cálculo.

Tabla 4.1: Errores relativos para los dos métodos de cálculo energético.

Clase 2					
Escenario 1			Escenario 2		
$\lambda_2 = 2.5$	Previo	Nuevo	$\lambda_2 = 1.5$	Previo	Nuevo
	3.851 %	0.569 %		4.953 %	0.036 %

4.4 Resultados Numéricos

4.4.1 Validación del modelo 2D-DTMC

Los resultados obtenidos del modelo analítico propuesto 2D-DTMC se validan con simulación. Hemos desarrollado un simulador de eventos discretos en lenguaje C que implementa el comportamiento físico del esquema de transmisión y describe la evolución en el tiempo del estado de la red de

sensores. En cada ciclo, cada sensor recibe paquetes de acuerdo a una distribución discreta dada. Si un sensor tiene paquetes en su cola, este contiene con los otros nodos por el acceso al canal, y si gana, transmite un paquete DATA de acuerdo al esquema de transmisión descrito.

Los resultados de simulación son completamente independientes de los obtenidos por medio del modelo analítico. Esto es, el cálculo de las métricas de prestaciones por medio de simulación no utilizan la representación del sistema de estados, ni su distribución de probabilidad estacionaria, ni tampoco las expresiones matemáticas desarrolladas para el modelo analítico. Los resultados de simulación que se presentan más adelante son valores promedio de mediciones realizadas a lo largo de 10^8 ciclos. Hemos obtenido intervalos de confianza con un nivel de confianza de 95 %. Sin embargo, como son muy pequeños, por claridad se han omitido en su mayoría. Con fines ilustrativos y como ejemplos, se dibujan intervalos de confianza para las curvas superiores de las Figs. 4.1, y 4.4 a 4.6.

En los siguientes subapartados, mostramos los resultados de las prestaciones obtenidos por medio del modelo analítico y por medio de simulación. Los resultados de simulación se representan con intervalos de confianza rojos o marcadores rojos. Los intervalos de confianza son muy estrechos. Por sencillez y claridad, sólo se muestran en algunas curvas, a modo de ejemplo. Los resultados analíticos se representan con líneas, o líneas y marcadores. En muchos casos, los marcadores de los resultados analíticos y los de simulación se superponen totalmente y son difíciles de distinguir. En particular, los marcadores rojos (resultados de simulación) se superponen y ocultan marcadores representados con otros colores (resultados analíticos), que son los que se muestran en las leyendas de las figuras correspondientes. Como ejemplo, en la Fig. 4.1, el retardo promedio de los paquetes transmitidos con éxito se muestra para ambas clases de nodos. Claramente, los resultados analíticos y de simulación coinciden perfectamente, lo que confirma que el modelo analítico es muy preciso.

4.4.2 Escenarios y configuración de parámetros

En esta sección, se evalúa las prestaciones de una WSN, como la ilustrada en la Fig. 3.2. Se han considerado dos clases de nodos (1 y 2), con poblaciones N_1 y N_2 . Se han estudiado dos escenarios (SC1 y SC2) con diferentes configuraciones para cada clase de nodos, en términos de carga y población. La configuración de parámetros se resume en la Tabla 4.2. Los parámetros de prestaciones de interés son: retardo promedio de los paquetes, caudal cursado y consumo promedio de energía.

Tabla 4.2: Configuración de parámetros [1].

Duración del ciclo (T)	60 ms	Retardo de propagación (D_p)	0.1 μ s
t_{SYNC} , t_{RTS} , t_{CTS} and t_{ACK}	0.18 ms	Tiempo de slot (ts)	0.1 ms
t_{DATA}	1.716 ms	Ventana de contienda (W)	128 slots
Tamaño del paquete DATA (S)	50 bytes	Tamaño de la cola (Q)	5 paquetes
Potencia de transmisión (P_{tx})	52 mW	Potencia de recepción (P_{rx})	59 mW
Número de nodos y escenarios	Tasa de arribo de los paquetes (paquetes/s)		
$N_1 = 5$ (SC1 and SC2)	$\lambda_1 = \{0.5, 1.0\}$		
$N_2 = 3N_1 = 15$ (SC1),	$\lambda_2 = [0.5, 4.5]$		
$N_2 = 4N_1 = 20$ (SC2)			

Para simplificar, en el escenario de evaluación definido en este apartado, se ha considerado que los nodos tienen suficiente energía para que el régimen estacionario se logre antes de que se agote la batería de cualquier nodo. Cuando se configura adecuadamente, el régimen estacionario se logra después de un pequeño número de ciclos. Cuando los nodos no tienen la misma energía inicial, los nodos que agotan sus baterías dejan de funcionar, y, para fines de modelado, se pueden eliminar de la red. El procedimiento de consumo de energía propuesto permite predecir con excelente precisión la vida útil de un nodo con una energía inicial dada. Una vez que se reajusta la población

de nodos de cada clase, el modelo se puede resolver nuevamente hasta que el siguiente nodo deje de funcionar.

4.4.3 Retardo promedio de los paquetes

La Fig. 4.1 muestra el retardo promedio de los paquetes, expresado en ciclos, para ambas clases de nodos en el escenario 1 (SC1), y dos valores de tasa de arribo de paquetes para los nodos de clase 1, $\lambda_1 = \{0.5, 1\}$. Se denota con D_1 y D_2 el retardo promedio de los paquetes transmitidos con éxito por la clase 1 y la clase 2, respectivamente.

Observe en la Fig. 4.1 que D_1 es constante para el rango de carga estudiado, ya que los paquetes de clase 1 tienen prioridad de acceso, y λ_1 y N_1 son constantes. Además, toma un valor muy bajo a medida que estudiamos escenarios realistas donde los nodos de clase 1 generan una carga pequeña y esporádica. Sin embargo, para los nodos de clase 2, la tasa de arribo de paquetes toma valores en el intervalo $\lambda_2 \in [0.5, 4.5]$. Hay que notar que la fracción de paquetes que colisionan incrementan su valor con λ_2 . A medida que aumenta el número de retransmisiones, D_2 también aumenta.

Tenga en cuenta que a medida que aumenta la carga de tráfico de clase 1, los nodos de clase 2 perciben el canal como ocupado durante una fracción mayor de ciclos. Por lo tanto, los nodos de clase 2 tardan más en transmitir sus paquetes y su retardo aumenta. Tenga en cuenta también que D_1 no aumenta cuando se incrementa λ_1 de 0.5 a 1 paquetes/s, ya que para ambos valores de carga, las colas de los nodos de clase 1 permanecen casi vacías la mayor parte del tiempo, es decir, los nodos permanecen inactivos y rara vez acceden al canal. Luego, cuando llega un paquete, se transmite inmediatamente, sin demora y sin colisión.

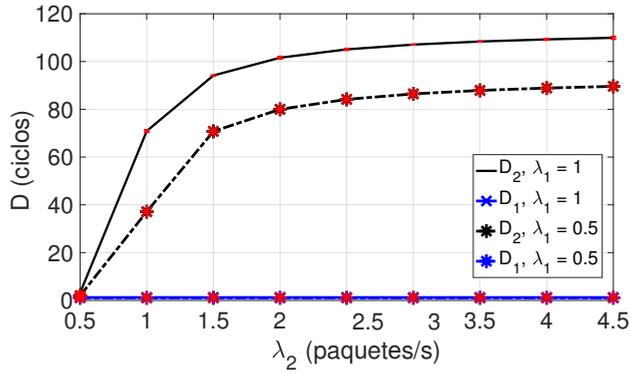


Figura 4.1: Retardo promedio de los paquetes para ambas clases de nodos (D_1 y D_2), considerando el escenario 1 (SC1). Tasa de arribo de paquetes para la clase 1: $\lambda_1 = \{0.5, 1\}$.

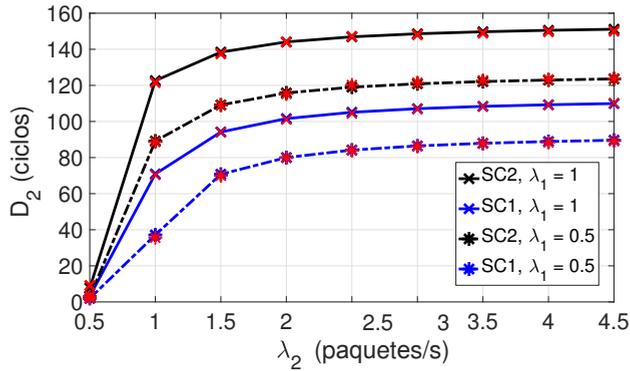


Figura 4.2: Retardo promedio de los paquetes para la clase 2 (D_2) considerando ambos escenarios (SC1 y SC2). Tasa de arribo de paquetes para la clase 1: $\lambda_1 = \{0.5, 1\}$.

La fig. 4.2 muestra la evolución del retardo promedio de los paquetes para los nodos de clase 2 (D_2), en función de λ_2 , considerando ambos escenarios (SC1 y SC2), y con tasa de arribo de datos para los nodos de la clase 1 de

$\lambda_1 = \{0.5, 1\}$. Tenga en cuenta que para el SC1, el número de nodos de clase 2 triplica el número de nodos de la clase 1 ($N_2 = 3N_1$), y para el SC2, el número de nodos de la clase 2 es cuatro veces mayor que los nodos de clase 1 ($N_2 = 4N_1$).

Las curvas muestran que D_2 aumenta rápidamente con λ_2 , hasta aproximadamente $\lambda_2 = 1$. Para cargas más altas, D_2 aumenta lentamente. Como se esperaba en el SC2, donde el número de nodos es mayor, D_2 toma valores más altos que en el SC1. Cuando el número de nodos aumenta, la contienda también aumenta, y lleva más tiempo acceder al canal. Por lo tanto, los paquetes esperan más tiempo en la cola antes de ser transmitidos. Además, se producen más colisiones y, por lo tanto, se producen más retransmisiones. Observe también que D_2 aumenta con λ_1 . Esto puede explicarse en los mismos términos que los utilizados para explicar los resultados de la Fig. 4.1.

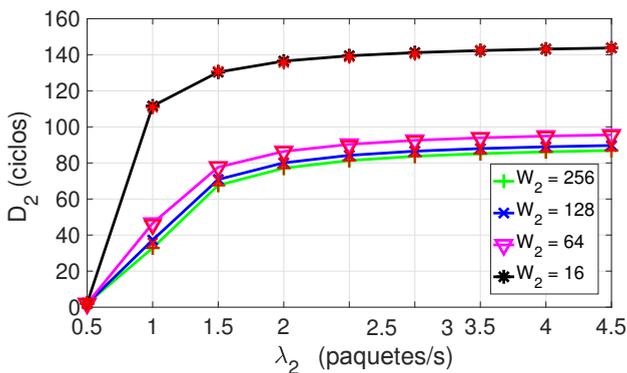


Figura 4.3: Retardo promedio de los paquetes para la clase 2 (D_2) en el escenario 1 (SC1). Ventana de contienda para la clase 1: $W_1 = 16$. Tasa de arribo de paquetes para la clase 1: $\lambda_1 = 0.5$.

La fig. 4.3 muestra la evolución del retardo promedio de los paquetes para los nodos de clase 2 (D_2), en función de λ_2 , y con diferentes tamaños de ventana de contienda de la clase 2 (W_2), considerando el escenario 1 (SC1).

Los resultados de la Fig. 4.3 (y la Fig. 4.7, que se muestran más adelante) se han obtenido con los siguientes cambios en la configuración general para la ventana de contienda: $W_1 = 16$ y $W_2 = \{16, 64, 128, 256\}$, de la clase 1 y la clase 2, respectivamente. Tenga en cuenta que en el modelo, la asignación de prioridad no se ve afectada por el tamaño de la ventana de contienda, como se explica en el apartado 3.3.3.

Los cambios en los valores del tamaño de las ventanas de contienda, W_1 y W_2 , no modifican la prioridad definida, pero sí influyen en el retardo de los paquetes. Se ha elegido $W_1 = 16$ porque siendo N_1 pequeño, la probabilidad de colisión no cambia significativamente para valores mayores de W_1 . Recuerde que la probabilidad de colisión se definió en la ecuación (3.3). Además, se ha observado que D_1 no cambia significativamente cuando $W_1 > 16$. Sin embargo, para los nodos de clase 2, hay un impacto significativo cuando cambia el valor de W_2 . Para los nodos de la clase 2, la probabilidad de que coincidan dos o más valores del tiempo de *backoff*, aumenta a medida que W_2 disminuye. La Fig. 4.3 muestra claramente el efecto que tiene la variación de W_2 en D_2 . Para una carga fija, cuando W_2 aumenta, la probabilidad de colisión disminuye y, por lo tanto, D_2 disminuye.

4.4.4 Caudal cursado

La Fig. 4.4 muestra el caudal cursado por nodo para la clase 2 (η_2) considerando ambos escenarios (SC1 y SC2). En los dos escenarios, η_2 alcanza un nivel de saturación para cargas aproximadamente de $\lambda_2 = 1$, observándose un comportamiento relativamente constante para cargas más altas. Además, tenga en cuenta que η_2 es más mayor en el SC1 que en el SC2. Esto se debe a que en el SC1 el número de nodos es menor y, por lo tanto, hay menos contienda en el canal.

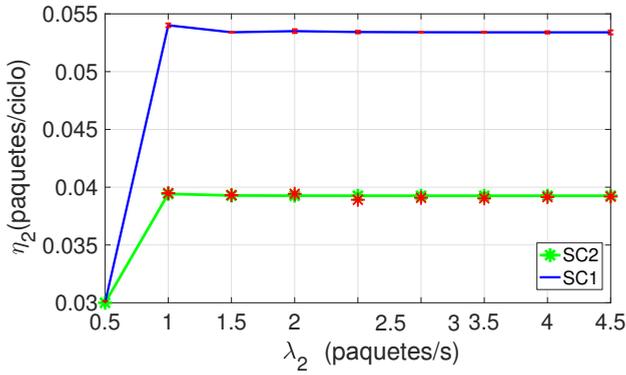


Figura 4.4: Caudal cursado por nodo para la clase 2 (η_2), considerando ambos escenarios (SC1 y SC2). Tasa de arribo de paquetes para la clase 1: $\lambda_1 = 0.5$.

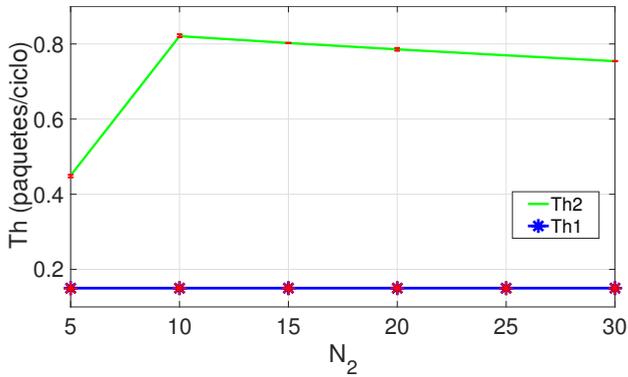


Figura 4.5: Caudal total cursado en el sistema (Th) para ambas clases de nodos (SC1 y SC2). Cantidad de nodos de clase 1: $N_1 = 5$. Tasa de arribo de paquetes para los nodos de clase 1 y clase 2, respectivamente: $\lambda_1 = 0.5$, $\lambda_2 = 1.5$.

La Fig. 4.5 muestra el caudal cursado en agregado (Th) o caudal total cursado en el sistema, para ambas clases de nodos (SC1 y SC2) y en función del número de nodos de clase 2 (N_2). Los resultados se obtienen con los siguien-

tes cambios en la configuración generales, relativos a la variación del número de nodos y la tasa de arribo de paquetes, para la clase 2, respectivamente: $N_2 = [5, 30]$, $\lambda_2 = 1.5$.

Observe que Th_2 alcanza un máximo para $N_2 = 10$, disminuyendo gradualmente para valores mayores de N_2 . Claramente, Th_2 disminuye porque a medida que aumenta N_2 , también lo hace la contienda entre los nodos, intensificándose las colisiones, e incrementándose las retransmisiones y el retardo promedio de los paquetes. Sin embargo, Th_1 permanece constante ya que N_1 se mantiene constante, y los nodos de clase 2 no tienen influencia en la percepción que los nodos de clase 1 tienen del estado del canal.

4.4.5 Consumo promedio de energía

La Fig. 4.6 muestra el consumo de energía promedio por ciclo, expresado en milijulios (mJ), para ambas clases de nodos (E_1 y E_2). Tenga en cuenta que el consumo de energía de los nodos de clase 2 es mayor en el SC1 que en el SC2. Este escenario de mayor consumo de energía se corresponde con el escenario donde se logra un mayor caudal cursado por nodo (Fig. 4.4). Valores mayores de caudal cursado implica que se producen más transmisiones, lo que lleva a una mayor actividad de los nodos y, por lo tanto, a un mayor consumo de energía. La Fig. 4.6 también muestra que para E_1 se tienen valores menores que para E_2 , y además son valores constantes con λ_2 . Esto se debe al hecho de que los nodos de clase 1 tienen prioridad sobre los nodos de clase 2. Para los nodos de clase 2, la tasa de arribo de paquetes toma valores en el intervalo $\lambda_2 \in [0.5, 4.5]$, y el número de nodos en la red es diferente para cada escenario. Observe en la Fig. 4.6 un aumento lineal inicial del consumo de energía para los nodos de clase 2 (E_2) en ambos escenarios (SC1 y SC2). Aproximadamente en $\lambda_2 = 1$ paquetes/s, se alcanza la carga de saturación y la actividad de los nodos, además de su consumo de energía, también alcanzan su límite.

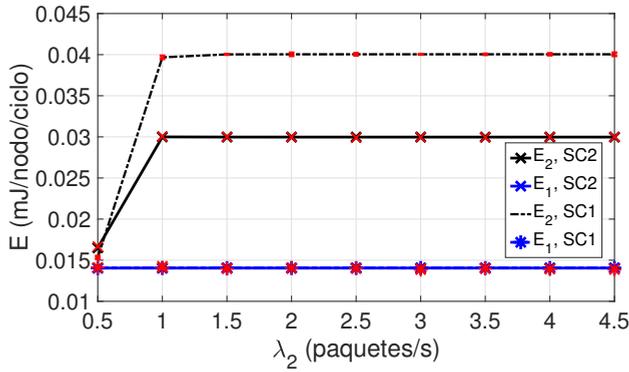


Figura 4.6: Consumo promedio de energía (E_2) para ambas clases considerando ambos escenarios (SC1 y SC2). Tasa de arribo de paquetes para los nodos de clase 1: $\lambda_1 = 0.5$.

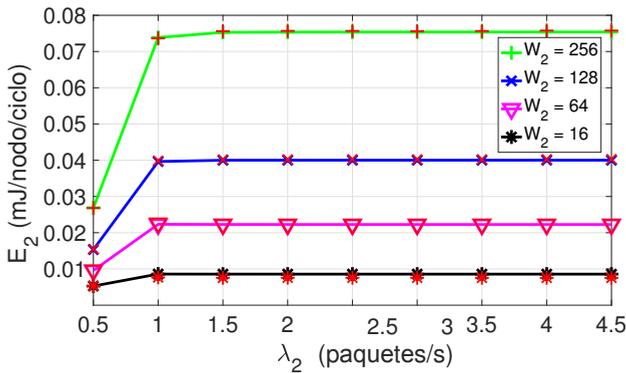


Figura 4.7: Consumo promedio de energía para la clase 2 (E_2) en el escenario 1 (SC1). Ventana de contienda de los nodos de clase 1: $W_1 = 16$. Tasa de arribo de paquetes para los nodos de clase 1: $\lambda_1 = 0.5$.

La Fig. 4.7 muestra el consumo de energía promedio para los nodos de clase 2 (E_2) en el escenario SC1, cuando se establecen los siguientes valores para las ventanas de contienda: $W_1 = 16$ y $W_2 = \{16, 64, 128, 256\}$, en los

nodos de la clase 1 y de la clase 2, respectivamente. Tenga en cuenta que E_2 aumenta con W_2 . A medida que aumenta la ventana de contienda W_2 , la probabilidad de colisión disminuye y E_2 aumenta. Con tamaños de ventana más grandes, en promedio, el mecanismo de detección de portadora permanece activo durante más tiempo escuchando el canal, aumenta el caudal cursado de los nodos y aumenta el consumo de energía. Por otro lado, si W_2 disminuye, el consumo de energía por nodo también disminuye. Sin embargo, cuando W_2 disminuye, D_2 aumenta, como se discutió en la Fig. 4.3.

Como ejemplo, tenga en cuenta que el modelo propuesto se puede usar para establecer apropiadamente W_2 . Como se observó, $W_2 = 64$ podría ser un buen compromiso, ya que el consumo de energía aumenta moderadamente en comparación con $W_2 = 16$ (por un factor de dos), y el retardo casi se reduce a la mitad, como se muestra en la Fig. 4.3. Sin embargo, al aumentar W_2 más allá de 64, el retardo disminuye solo ligeramente, pero el consumo de energía aumenta drásticamente.

4.5 Conclusiones

Se ha desarrollado un nuevo modelo analítico aproximado para evaluar el rendimiento de una red inalámbrica de sensores que funciona con un mecanismo de ciclo de trabajo sincronizado. La red está compuesta por diferentes clases de nodos con diferentes requisitos de tráfico y prioridades de acceso al canal.

Como ejemplo, para un escenario con dos clases de nodos, cada uno con una prioridad de acceso diferente, el modelo analítico se basa en dos DTMC bidimensionales y se resuelve para diferentes escenarios. Se obtienen múltiples parámetros de rendimiento, como el retardo promedio de los paquetes, el caudal cursado y el consumo promedio de energía.

El modelo es bastante flexible y puede extenderse a varios escenarios diferentes. Por ejemplo, cuando se implementan más de dos prioridades, cuando el canal es propenso a errores, cuando el *sink* no solo recibe paquetes de datos

sino que también transmite, o cuando el nivel de batería de los nodos no es igual [18, 20, 28, 33, 38].

Se ha propuesto un nuevo procedimiento para determinar la energía promedio consumida por los nodos de la red. Sus características más notables son que es más simple y más sistemático que otros métodos alternativos encontrados en la literatura. Además, los resultados obtenidos con el nuevo procedimiento de cálculo de energía son más precisos que los obtenidos por propuestas anteriores. Proporcionamos evidencia que muestra que la mejora de la precisión puede estar entre uno y dos órdenes de magnitud.

Los resultados del estudio muestran el impacto que tiene la incorporación de prioridades en los parámetros de prestaciones. Como se esperaba, para dos clases de nodos, el caudal cursado de los nodos con prioridad de acceso al canal no se ve afectado por la carga de tráfico de baja prioridad. Además, para cargas moderadamente bajas de tráfico de alta prioridad, el retardo obtenido por los paquetes de alta prioridad es insignificante. Los resultados obtenidos confirman la idoneidad del modelo propuesto para la evaluación de las prestaciones de WSN implementado en escenarios de emergencia.

Capítulo 5

Modelado de red WSN heterogénea: Transmisión de paquetes con agregación de tráfico (APT)

5.1 Introducción

En este capítulo se presenta el modelado y los resultados del análisis de prestaciones de una WSN heterogénea con gestión de prioridades, que opera con ciclo de trabajo sincronizado, y los nodos transmiten sus paquetes en agregado (APT, *Aggregated Packet Transmission*). En APT es posible enviar más de un paquete por ciclo durante el proceso de transmisión de los datos. Los paquetes se encapsulan en una unidad de información denominada trama. El estudio considera la actividad y procedimientos que ocurren durante el periodo *data*, se obtienen y discuten los resultados para los parámetros de prestaciones: retardo promedio de los paquetes, caudal cursado y consumo promedio de energía.

En una segunda parte, se presenta un estudio de la energía desagregada y de eficiencia energética. Se exponen resultados donde se desglosa en sus componentes a la energía total consumida por los nodos: energía consumida

por la transmisión exitosa de los paquetes; energía consumida debido al *over-hearing*, en que se incurre por escuchar las transmisiones de los otros nodos que han ganado la contienda; y la energía consumida debido a colisiones ocurridas entre paquetes.

5.2 Trabajos relacionados

Una de las formas en que suele transmitirse la información en las WSNs es transmitiendo un solo paquete por ciclo (SPT, *Single Packet Transmission*) [58, 59]; sin embargo, también es posible la transmisión en agregado o con agregación de tráfico (APT, *Aggregated Packet Transmission*). A diferencia de SPT, en APT los nodos transmiten más de un paquete (un lote) por ciclo. La agregación de datos, que es el proceso de combinar múltiples paquetes de datos en una sola unidad de datos, denominada trama, se usa con frecuencia para mejorar la eficiencia energética en las WSNs. Este mecanismo puede ayudar a reducir el número de transmisiones y, en consecuencia, disminuir el consumo de energía [3]. La agregación de datos también ayuda a reducir la contienda en el acceso al medio, así como la cantidad de paquetes transmitidos y, por lo tanto, puede ayudar a minimizar el retardo de la transmisión de los paquetes [10].

Se han propuesto muchos esquemas de agregación de datos que contribuyen en el ahorro de energía, la reducción del retardo de los paquetes y la disminución de las colisiones [40, 3, 10]. Sin embargo, existen muy pocos modelos analíticos para la evaluación de las prestaciones de WSNs con transmisión con agregación de tráfico. Existen propuestas relacionadas a la agregación de paquetes para WSNs [16, 23, 6], aunque se enfocan con una perspectiva de enrutamiento y sin considerar ningún protocolo de capa MAC específico. Otras propuestas de protocolos MAC [30, 29, 35] integran la agregación de datos en WSN, pero estos estudios se han llevado a cabo principalmente mediante simulaciones o basados en pruebas con prototipos experimentales. En [19], los autores han desarrollado modelos DTMC para evaluar el esque-

ma APT para una WSN cuya MAC opera con DC, pero en el estudio no se considera escenarios heterogéneos o clases de nodos, ni tampoco algún esquema de asignación de prioridades. En los capítulos 3 y 4, se ha evaluado el rendimiento de una WSN heterogénea compuesta de distintas clases de nodos, que opera con un protocolo MAC regulado por un DC sincronizado, donde existe asignación de prioridades, y donde los nodos transmiten en modo SPT. En el presente capítulo, se desarrolla un modelo con las características mencionadas, pero que además, amplía las capacidades de los nodos para transmitir con agregado de tráfico (APT).

Para la determinación del consumo energético, se utiliza el nuevo método introducido en el capítulo 4. Este método presenta una precisión muy buena cuando los resultados se comparan con los obtenidos por simulación, además, se ha demostrado que mejora significativamente la precisión, respecto al método de cálculo de energía propuesto antes en el capítulo 3.

5.3 Escenario de red

5.3.1 Operación de red y suposiciones

En lo general, se toman en cuenta el mismo escenario y las consideraciones que se han descrito en el apartado 3.3.2. Cabe recordar que el esquema ejemplo del escenario considerado se muestra en la figura 3.2, donde se observa la existencia de dos clases de nodos (N_1 y N_2) que envían paquetes al nodo *sink*. También, en lo general, se retoman las mismas suposiciones, solo que en este modelo, los nodos son capaces de realizar un proceso de agregación de paquetes en función del número de paquetes acumulados en sus colas. Al conjunto de paquetes agregados, de acuerdo a la regla que se explica más adelante, se denomina trama. Por razones de implementación práctica, el modelo define un tamaño máximo de trama F , en paquetes. La transmisión de una trama, por el RN correspondiente, ocurre cuando este gana la contienda por el acceso medio. Si el número de paquetes en su cola

es menor que el tamaño máximo de paquetes permitido por trama (F), se transmite una trama que contiene todos los paquetes en la cola. Sin embargo, si el número de paquetes en su cola es mayor o igual que F , se transmite una trama que contiene F paquetes. Si la transmisión es exitosa, el número de paquetes en la cola del RN se reduce de acuerdo al número de paquetes o tamaño de la trama enviada. Por ejemplo, si q es el número de paquetes en la cola Q del nodo, y si $q \leq F$, cuando se haya transmitido con éxito, la cola del RN quedará sin paquetes o vacía; por otro lado, si $q \geq F$, se transmitirán una trama con F paquetes, quedando una cantidad de paquetes en la cola igual a $q - F$.

5.3.2 Asignación de prioridades de acceso al medio

El proceso que aquí se considera, en lo general, es el mismo que se ha descrito en el apartado 3.3.3. La diferencia radica en que las transmisiones realizadas por los nodos, de la clase que sean, incluyen tramas con un agrupación de paquetes, en lugar de un solo paquete. Hay que recordar que la clase 1 es la prioritaria en el acceso al canal de transmisión.

La figura 5.1 muestra un diagrama del proceso de transmisión correspondiente al período *data*. En la figura, se ha omitido el período de sincronización para ambas clases de nodos.

5.4 Modelado del sistema

5.4.1 Sistema de dos clases y prioridades

Se desarrollan también dos cadenas de Markov en tiempo discreto (2D-DTMC), una cadena por cada clase de nodos que se analiza. Estas clases están representadas por los nodos de referencia RN_1 y RN_2 , para los nodos de clase 1 y nodos de clase 2, respectivamente. Ambas cadenas también son de dos dimensiones, puesto que modelan cómo evoluciona en el tiempo, tanto el

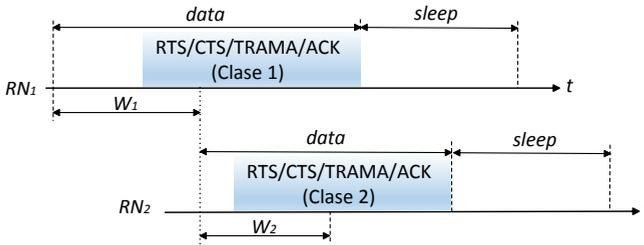


Figura 5.1: Operación del protocolo MAC durante el período *data* para ambas clases de nodos. Se observa la unidad de información TRAMA en el proceso de transmisión.

número de paquetes en la cola de los RN respectivos, así como el número de nodos activos de cada clase.

Recuerde que $i \leq Q$ es el número de paquetes en la cola del RN , y m es el número de nodos activos, además del RN , en la red de la clase correspondiente, y $m \leq K$. De esta forma, el estado de cada 2D-DTMC se representa por (i, m) . La probabilidad de transición del estado (i, m) al estado (j, n) , se representa por: $P_{(i,m),(j,n)}$.

Conviene recordar algunas expresiones útiles antes de definir las probabilidades de transición de ambas 2D-DTMC. En el apartado 3.4.2 ya se han definido algunas, pero vale la pena recordarlas aquí, ya que se agregan nuevas expresiones, y se realiza en otra modificaciones, de acuerdo a la nueva conceptualización del modelo de agregación de tráfico.

- $A_i = (\lambda T)^i e^{-\lambda T} / i!$ expresa la probabilidad de que i paquetes arriben, y $A_{\geq i} = 1 - \sum_{n=0}^{i-1} A_n$ denota la probabilidad de que k o más paquetes arriben a un nodo en un ciclo.
- $B_j(n) = \binom{n}{j} \hat{A}^j A_0^{n-j}$, $\hat{A} = 1 - A_0$, define la probabilidad de que j nodos de n que tienen su cola vacía reciban paquetes en un ciclo.
- Definimos a $S_k = k P_{s,k-1}$ y $\hat{S}_k = 1 - S_k$ como las probabilidades de

que un nodo activo transmita con éxito un paquete en un ciclo cuando compiten k nodos, y su complemento. Entonces, \hat{S}_k es la probabilidad de que los paquetes de dos o más nodos colisionen. Por tanto, $S_1 = 1$, $\hat{S}_1 = 0$.

- Sea E la probabilidad de que la cola de un nodo se vacíe cuando transmita con éxito. Entonces, $E = P_s A_0 \sum_{k=1}^F \pi_i / P_s (1 - \pi_0)$, donde π_i es la distribución de probabilidad estacionaria de encontrar i paquetes en la cola del RN y P_s es la probabilidad (promedio) de que el RN transmita un paquete con éxito en un ciclo aleatorio, condicionado a que el RN esté activo. Sea \hat{E} la probabilidad de que la cola de un nodo se mantenga con al menos un paquete cuando haya transmitido con éxito. Entonces, $\hat{E} = 1 - E$.
- α es el número de paquetes agregados para la transmisión cuando el nodo se encuentra en el estado i , y está determinada por la siguiente expresión: $\alpha = \min(i, F)$.
- Se define a F como el tamaño máximo de la trama (medido en paquetes) que un nodo puede transmitir.
- $P = [P_{(i,m),(j,n)}]$ expresa la matriz de probabilidades de transición de la 2D-DTMC, donde $P_{(i,m),(j,n)}$ es la probabilidad de que j paquetes se encuentren en la cola del RN y otros n nodos se activen en el ciclo $s + 1$, condicionado a encontrar i paquetes en la cola de RN y otros m nodos activos en el ciclo s .
- También, denotamos $M = N - 1$.

Hay que notar que las probabilidades anteriores se determinan para cada clase de forma independiente, pero para simplificar se ha dejado la notación en forma genérica. Por ejemplo, para la determinación de la probabilidad de arribo de los paquetes A_i , para la clase 1 será $A_{1,i} = (\lambda_1 T)^i e^{-\lambda_1 T} / i!$, utilizándose una tasa de arribo λ_1 . Para la clase 2, se utiliza una tasa de arribo λ_2 , determinándose con la expresión $A_{2,i} = (\lambda_2 T)^i e^{-\lambda_2 T} / i!$.

De forma similar, se obtienen para cada clase las expresiones: $B_{1,j}(n)$, $B_{2,j}(n)$, $S_{1,k}$, $S_{2,k}$, E_1 , E_2 , P_1 , P_2 , α_1 , α_2 , F_1 y F_2 . Cada una determinadas o establecidas de forma independiente por medio de los parámetros de la clase correspondiente. Por otro lado, el número de nodos para la clase 1 se expresa como N_1 , en tanto que para expresar el número de nodos de la clase 2 se usa N_2 . A partir de estos, se obtiene M_1 y M_2 .

Las expresiones de las probabilidades de transición para cada clase de nodos se muestran en las tablas del apéndice E; a diferencia de las tablas de los modelos anteriores, en estas se considera el concepto de agregación de paquetes en cada uno de los términos de las expresiones desarrolladas. Las probabilidades de transición de las dos 2D-DTMC para los nodos de clase 1 están dadas por la Tablas E.1 y E.2, en tanto que las correspondientes para la clase 2 se definen en la Tablas E.3 y E.4.

- La primera fila define las transiciones causadas por nuevas llegadas cuando el RN correspondiente tiene la cola vacía y ningún otro nodo está activo.
- La segunda fila describe las transmisiones realizadas por otros nodos mientras el RN tiene su cola vacía.
- Las filas tercera y cuarta definen las transmisiones del RN en ciclos donde no hay otros nodos activos y cuando hay otros nodos activos, respectivamente.
- Finalmente, la quinta fila define transiciones imposibles.

Probabilidades de transición de la 2D-DTMC de la clase 1

Como ejemplo, se describen los diferentes términos de $P_{im,jn}$, es decir, la probabilidad de transición del estado (i, m) al estado (j, n) . Elijiendo, de la Tabla E.2, la segunda expresión de primer columna, en la cuarta fila, donde

las transiciones se deben a los nodos activos $m + 1$, incluido el RN_1 :

$$\begin{aligned}
 P_{im,jn} = & P_{s_1,m} B_{1,n-m} (M_1 - m) A_{1,j-i+\alpha_1} \\
 & + m P_{s_1,m} E_1 B_{1,n-m+1} (M_1 - m) A_{1,j-i} \\
 & + m P_{s_1,m} \hat{E}_1 B_{1,n-m} (M_1 - m) A_{1,j-i} \\
 & + (1 - (m + 1) P_{s_1,m}) B_{1,n-m} (M_1 - m) A_{1,j-i} \\
 & 1 \leq i \leq j \leq (Q_1 - 1), 1 \leq m \leq n < M_1
 \end{aligned} \tag{5.1}$$

- El primer término define la probabilidad de que el RN_1 gane la contienda, transmita una trama compuesta de $\alpha_1 = \min(i, F_1)$ paquetes, reciba $j - i + \alpha_1$ paquetes, y $n - m$ nodos de los $M_1 - m$ inactivos se activen.
- El segundo término define la probabilidad de que un nodo activo diferente del RN_1 gane la contienda, transmita una trama con éxito y su cola se vacíe (E_1), y por lo tanto el nodo se vuelva inactivo, $n - m + 1$ nodos de los $M_1 - m$ nodos inactivos se activen, y el RN_1 reciba paquetes de $j - i$.
- El tercer término define la probabilidad de que un nodo activo diferente del RN_1 gane la contienda, transmita una trama con éxito pero su cola no se vacíe (\hat{E}_1), $n - m$ nodos de los $M_1 - m$ nodos inactivos se activen, y el RN_1 reciba $j - i$ paquetes.
- Por último, el cuarto término define la probabilidad de que ninguno de los $m + 1$ nodos activos en el ciclo transmita con éxito, debido a la colisión de dos o más ($1 - (m + 1) P_{s_1,m}$), $n - m$ nodos de los $M_1 - m$ inactivos se activen, y el RN_1 reciba $j - 1$ paquetes.

Probabilidades de transición de la 2D-DTMC de la clase 2

Como ejemplo, se describen los diferentes términos de $P_{im,jn}$, es decir, la probabilidad de transición del estado (i, m) al estado (j, n) . Elijiendo, de la

Tabla ??, la segunda expresión de primer columna, en la cuarta fila, donde las transiciones se deben a los nodos activos $m + 1$, incluido el RN_2 :

$$\begin{aligned}
 P_{im,jn} = & [P_{s_2,m}B_{2,n-m}(M_2 - m)A_{2,j-i+\alpha_2} \\
 & + mP_{s_2,m}E_2B_{2,n-m+1}(M_2 - m)A_{2,j-i} \\
 & + mP_{s_2,m}\hat{E}_2B_{2,n-m}(M_2 - m)A_{2,j-i} \\
 & + (1 - (m + 1)P_{s_2,m})B_{2,n-m}(M_2 - m)A_{2,j-i}] R_{1,0} \\
 & + B_{2,n-m}(M_2 - m)A_{2,j-i+\alpha_2} (1 - R_{1,0}) \\
 & 1 \leq i \leq j \leq (Q_2 - 1), 1 \leq m \leq n < M_2
 \end{aligned} \tag{5.2}$$

- El primer término define la probabilidad de que el RN_2 gane la contienda, transmita una trama compuesta de $\alpha = \min(i, F_2)$ paquetes, reciba $j - i + \alpha_2$ paquetes, y $n - m$ nodos de los $M_2 - m$ inactivos se activen.
- El segundo término define la probabilidad de que un nodo activo diferente del RN_2 gane la contienda, transmita una trama con éxito y su cola se vacíe (E_2), y por lo tanto el nodo se vuelva inactivo, $n - m + 1$ nodos de los $M_2 - m$ nodos inactivos se activen, y el RN_2 reciba paquetes de $j - i$.
- El tercer término define la probabilidad de que un nodo activo diferente del RN_2 gane la contienda, transmita una trama con éxito pero su cola no se vacíe (\hat{E}_2), $n - m$ nodos de los $M_2 - m$ nodos inactivos se activen, y el RN_2 reciba $j - i$ paquetes.
- El cuarto término define la probabilidad de que ninguno de los $m + 1$ nodos activos en el ciclo transmita con éxito, debido a la colisión de dos o más ($1 - (m + 1)P_{s_2,m}$), $n - m$ nodos de los $M_2 - m$ inactivos se activen, y el RN_2 reciba $j - 1$ paquetes.
- Por último, el quinto término define la probabilidad de que el RN_2 reciba $j - i + \alpha_2$ paquetes y se activen $n - m$ nodos de $M_2 - m$ nodos inactivos.

Observe que a diferencia de la expresión ejemplo de las transiciones de la clase 1 que se muestra en (5.1), en la expresión (5.2) correspondiente a la clase 2, se incluye el factor $R_{1,0}$, además de un último término adicional. El factor $R_{1,0}$, que se ha definido como la probabilidad de que los nodos de clase 1 estén inactivos multiplica a los primeros cuatro términos de la expresión (5.2).

Debido a que los primeros cuatro términos de (5.2) implican eventos donde los nodos de clase 2 realizan transmisiones, necesariamente estos eventos solo pueden ocurrir cuando los nodos de clase 1 están inactivos. Por tal motivo se multiplica dichos términos por la probabilidad de que los nodos de clase 1 estén inactivos ($R_{1,0}$).

El término final de (5.2), implica que los nodos de clase 2 puedan generar paquetes, aunque no estén en posibilidad de intentar transmitirlos porque la clase prioritaria (clase 1) se encuentra ocupando el canal. Es por ello que este término es multiplica por $(1 - R_{1,0})$, que indica la probabilidad de que los nodos de clase 1 estén activos.

5.4.2 Solución de las 2D-DTMC

La solución de cada una de estas 2D-DTMC se obtiene de forma similar a como se ha explicado en el apartado 3.4.3.

Solución de la primera 2D-DTMC

La solución de la primera 2D-DTMC, para la clase 1, puede obtenerse resolviendo el conjunto de ecuaciones lineales,

$$\pi_1 P_1 = \pi_1, \quad \pi_1 e = 1, \quad (5.3)$$

donde $\pi_1 = [\pi_1(i, n)]$ es la distribución de probabilidad estacionaria, P es la matriz de probabilidades de transición, cuyos elementos se definen en el apéndice E (Tablas E.1 y E.2), y e es un vector columna de unos.

La probabilidad promedio, P_{s_1} , de que el correspondiente RN_1 transmita

un paquete exitosamente en un ciclo aleatorio, condicionado a que el RN_1 esté activo, está dado por:

$$P_{s_1} = \frac{1}{G_1} \sum_{i=1}^{Q_1} \sum_{k=0}^{M_1} \pi_1(i, k) \cdot P_{s_1, k}, \quad (5.4)$$

$$G_1 = \sum_{i=1}^{Q_1} \sum_{k=0}^{M_1} \pi_1(i, k) = 1 - \sum_{k=0}^{M_1} \pi_1(0, k). \quad (5.5)$$

La distribución de probabilidad estacionaria es función de P_{s_1} , $\pi_1(P_{s_1})$. Resolviendo el conjunto de ecuaciones de (5.3), $\pi_1(P_{s_1})$ puede determinarse para una P_{s_1} dada. Luego, una nueva P_{s_1} puede obtenerse de (5.4). Se sigue un procedimiento iterativo de punto fijo y denotamos con π_1 a su solución.

Solución de la segunda 2D-DTMC

De forma similar, la solución de la segunda 2D-DTMC, para la clase 2, puede obtenerse resolviendo el conjunto de ecuaciones lineales,

$$\pi_2 P_2 = \pi_2, \quad \pi_2 e = 1, \quad (5.6)$$

donde $\pi_2 = [\pi_2(i, n)]$ es la distribución de probabilidad estacionaria, P es la matriz de probabilidades de transición, cuyos elementos se definen en el apéndice E (Tablas E.3 y E.4), y e es un vector columna de unos.

La probabilidad promedio, P_{s_2} , de que el correspondiente RN_2 transmita un paquete exitosamente en un ciclo aleatorio, condicionado a que el RN_2 esté activo, está dado por:

$$P_{s_2} = \frac{1}{G_2} \sum_{i=1}^{Q_2} \sum_{k=0}^{M_2} \pi_2(i, k) \cdot P_{s_2, k}, \quad (5.7)$$

$$G_2 = \sum_{i=1}^{Q_2} \sum_{k=0}^{M_2} \pi_2(i, k) = 1 - \sum_{k=0}^{M_2} \pi_2(0, k). \quad (5.8)$$

Se requiere de la información del estado de los nodos de clase 1, lo cual se obtiene de la distribución estacionaria de la clase 1. En específico, se requiere conocer el estado de actividad de los nodos de clase 1.

Definimos el parámetro $R_{1,0}$, que indica la fracción de ciclos en los que los nodos de clase 1 están inactivos, o de otra forma, la probabilidad de que los nodos de clase 1 estén inactivos o no tengan paquetes en cola para transmitir.

$$R_{1,0} = \pi_1(0,0) \quad (5.9)$$

Ese parámetro, se establece como factor, y se incluye como parte de las expresiones desarrolladas que determinan las probabilidades de transición, que se exponen en las Tablas E.3 y E.4 del apéndice E.

Por tanto, la distribución de probabilidad estacionaria es función de P_{s_2} , pero también de $R_{1,0}$, $\pi_2(P_{s_2}, R_{1,0})$. Resolviendo el conjunto de ecuaciones de (5.6), $\pi_2(P_{s_2}, R_{1,0})$ puede determinarse para una P_{s_2} dada. Luego, una nueva P_{s_2} puede obtenerse de (5.7). Se sigue un procedimiento iterativo de punto fijo y denotamos con π_2 a su solución.

De lo anterior, se infiere que aunque los resultados de la primera cadena son independientes de la segunda, los de la segunda dependen de los resultados de la primera. La forma de esta dependencia, también ha quedado explícita en la Figura 2.3 del capítulo 2.

5.5 Parámetros de prestaciones

5.5.1 Caudal cursado

El caudal cursado se calcula de la misma forma que se ha calculado en el capítulo 3. Para la determinación del caudal cursado se realiza una incorporación conceptualmente significativa; se considera en su cálculo el acumulado de paquetes por agregación de tráfico y su transmisión en una sola trama.

El caudal cursado por nodo η se define como el número promedio de paquetes entregados con éxito por un nodo en un ciclo. El caudal total cursado por el sistema o caudal en agregado, Th , expresado en paquetes por ciclo, es la suma de los caudales cursados de los N nodos de la clase correspondiente.

Para los nodos de clase 1, el caudal cursado por nodo se obtiene con la ecuación (5.10), mientras que el caudal total cursado por el sistema se determina con la expresión (5.11).

$$\eta_1 = \sum_{i=1}^{Q_1} \sum_{k=0}^{M_1} \alpha_1 \pi_1(i, k) \cdot P_{s_1, k} , \quad (5.10)$$

$$Th_1 = N_1 \cdot \eta_1 . \quad (5.11)$$

donde $\alpha_1 = \min(i, F_1)$.

Recuerde que, i es el número de paquetes en la cola del nodo, F_1 y F_2 es el número máximo de paquetes que se pueden agregar de acuerdo a la configuración establecida, para la clase 1 y clase 2, respectivamente.

Para los nodos de la clase 2, las expresiones para el caudal cursado por nodo y el caudal total del sistema están dados por las expresiones (5.12) y (5.13), respectivamente.

$$\eta_2 = \sum_{i=1}^{Q_2} \sum_{k=0}^{M_2} \alpha_2 \pi_2(i, k) \cdot P_{s_2, k} \cdot R_{1,0} , \quad (5.12)$$

$$Th_2 = N_2 \cdot \eta_2 . \quad (5.13)$$

donde $\alpha_2 = \min(i, F_2)$.

Observe que para el cálculo del caudal para la clase 2, es necesario considerar la inactividad de los nodos de clase 1, a través del parámetro $R_{1,0}$.

5.5.2 Retardo promedio de los paquetes

Se define D como el retardo promedio en ciclos, que experimenta un paquete desde su llegada a la cola del nodo, hasta que se transmite con éxito. Para la determinación de del retardo promedio, D , se aplica la ley de Little.

Para los nodos de clase 1, el retardo se calcula con las expresiones siguientes:

$$D_1 = \frac{N_{av1}}{\gamma_{a1}}, \quad N_{av1} = \sum_{i=0}^{Q_1} i\pi_{i1}, \quad \gamma_{a1} = \eta_1, \quad \pi_{i1} = \sum_{k=0}^{M_1} \pi_1(i, k). \quad (5.14)$$

Tenga en cuenta que: i) π_{i1} es la probabilidad estacionaria de encontrar i paquetes en la cola del correspondiente RN_1 ; ii) N_{av1} es el número promedio de paquetes en la cola RN_1 ; iii) γ_{a1} es el número promedio de paquetes que ingresaron a la cola del RN_1 (*aceptados*) por ciclo, que es igual a η_1 .

Para los nodos de clase 2, el retardo se calcula con las expresiones siguientes:

$$D_2 = \frac{N_{av2}}{\gamma_{a2}}, \quad N_{av2} = \sum_{i=0}^{Q_2} i\pi_{i2}, \quad \gamma_{a2} = \eta_2, \quad \pi_{i2} = \sum_{k=0}^{M_2} \pi_2(i, k). \quad (5.15)$$

Tenga en cuenta que: i) π_{i2} es la probabilidad estacionaria de encontrar i paquetes en la cola del correspondiente RN_2 ; ii) N_{av2} es el número promedio de paquetes en la cola RN_2 ; iii) γ_{a2} es el número promedio de paquetes que ingresaron a la cola del RN_2 (*aceptados*) por ciclo, que es igual a η_2 .

Observe que en el cálculo del retardo para la clase 2, el factor $R_{1,0}$ no se incluye directamente en las expresiones, ya que en éstas solo se contabilizan los paquetes en la cola del RN_2 , sin implicar de forma explícita transmisiones de paquetes. Sin embargo, el parámetro η_2 sí implica transmisión por parte de RN_2 , este parámetro ya se ha calculado por medio de la expresión (5.12), realizándose la consideración del factor $R_{1,0}$.

5.5.3 Consumo promedio de energía

Para la determinación del consumo promedio de energía se realiza una incorporación conceptualmente significativa; se considera en su cálculo el acumulado de paquetes por agregación de tráfico y su transmisión en una sola trama.

La determinación del consumo promedio de energía es similar al que se ha desarrollado en el apartado 4.3. Se calcula la energía durante el periodo *data*, y solo se estudia la energía consumida por el tranceptor de radiofrecuencia. No se considera la energía consumida debida a aplicaciones particulares debido a tareas específicas de los nodos sensores.

Recordemos que E_s^{tx} , E_f^{tx} y E_{oh} representan a los términos de la energía consumida cuando el RN transmite con éxito, con falla (colisión) y cuando escucha la transmisión de otros nodos (*overhearing*), respectivamente. De esta forma, la energía promedio consumida por el correspondiente RN durante el periodo *data* en un ciclo, está dada por la siguiente expresión:

$$E_d = E_s^{tx} + E_f^{tx} + E^{oh} \quad (5.16)$$

El valor de consumo de E_s^{tx} se obtiene con las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned} E_s^{tx} &= \sum_{i=1}^Q \sum_{k=0}^M \pi(i, k) P_{s,k} (P_{s,1}^{tx} + \alpha P_{s,2}^{tx} + P_s^{rx} + BT_{s,k} P_{rx}) \\ P_{s,1}^{tx} &= t_{RTS} P_{tx}, \quad P_{s,2}^{tx} = t_{DATA} P_{tx} \\ P_s^{rx} &= [t_{CTS} + t_{ACK} + 4D_p] P_{rx} \end{aligned} \quad (5.17)$$

donde, t_{RTS} , t_{DATA} , t_{CTS} y t_{ACK} , son los tiempos de transmisión de paquetes correspondientes, P_{tx} y P_{rx} son los niveles de potencia de transmisión y recepción, D_p es el retardo de propagación unidireccional, y $\alpha = \min(i, F)$ es el número de paquetes agregados.

El factor α determina el número de paquetes que se agregan a la trama que se transmite, de tal forma que a mayor número de paquetes agregados, mayor también es el consumo energético cuando se transmiten con éxito. Para determinar E_f^{tx} y E_{oh} , se realiza el mismo procedimiento que el desarrollado en el apartado 4.3 con las ecuaciones (4.11) y (4.14), respectivamente.

De igual forma, los principios aplicados y expresiones (4.15), se aplican aquí para determinar el consumo promedio de energía para cada una de las

clases:

$$E_1 = E_{d1}, \quad (5.18)$$

$$E_2 = (1 - R_{1,0})E_0 + R_{1,0} \cdot E_{d2}. \quad (5.19)$$

Hay que recordar que dado la forma de asignar prioridades en nuestro modelo (ver apartado 3.3.3 y 5.3.2), para el cálculo de la energía de los nodos de clase no prioritaria, se ha establecido el factor $R_{1,0}$, que es la distribución de probabilidad estacionaria de no encontrar nodos activos de clase 1 en un ciclo (fracción de ciclos donde todos los nodos de clase 1 están inactivos). Además, debido a que $E_0 \approx 0$, aproximamos $E_2 \approx R_{1,0} \cdot E_{d2}$.

5.6 Resultados numéricos

5.6.1 Escenarios y configuración de parámetros

Los resultados analíticos se obtienen de los modelos 2D-DTMC desarrollados. Los resultados de la simulación se obtienen por medio de un simulador de eventos discretos personalizado desarrollado en lenguaje C, que imita el comportamiento físico del sistema (esquemas SPT o APT). Es decir, en cada ciclo un nodo recibe paquetes de acuerdo con una distribución discreta dada, compite por el acceso al canal con otros nodos si tiene paquetes en la cola, y si gana, transmite una trama de acuerdo con el esquema de transmisión (un paquete para SPT o un lote de paquetes para APT). Los resultados de la simulación son completamente independientes de los obtenidos por el modelo analítico. En los siguientes apartados se muestran los resultados de los parámetros de rendimiento obtenidos del modelo analítico y por simulación. Los resultados de la simulación se representan solo con marcadores, los resultados analíticos se representan con líneas y marcadores. Los resultados analíticos y de simulación coinciden perfectamente, lo que confirma que el modelo analítico es muy preciso. Hemos obtenido intervalos de confianza con un nivel de confianza de 95 %, sin embargo, como son muy pequeños, por claridad se han omitido en las figuras.

La configuración de los parámetros para este escenario se puede retomar de la Tabla 4.2 del apartado 4.4.2, solo considerando que los nodos en este modelo con agregación de paquetes, son capaces de transmitir tanto en SPT como en APT. Para este último caso, los valores máximos de número de paquetes (F) que se envían por trama, varían de acuerdo al siguiente intervalo: $F_1 = F_2 = \{2, 5, 10\}$. El escenario que se ha considerado es el SC2 ($N_1 = 5, N_2 = 20$).

5.6.2 Retardo promedio de los paquetes

La Fig. 5.2 muestra el retardo promedio de los paquetes expresado en ciclos, para ambas clases de nodos, ambos esquemas de transmisión (SPT, APT) y una tasa de llegada de paquetes $\lambda_1 = 0.5$. Denotamos por D_1 y D_2 el retardo promedio de los paquetes transmitidos con éxito por la clase 1 y la clase 2, respectivamente.

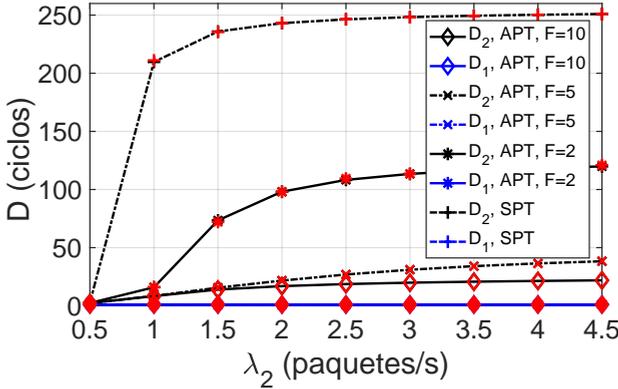


Figura 5.2: Retardo promedio de los paquetes considerando ambas clases de nodos (D_1 y D_2) y ambos esquemas de transmisión (SPT y APT). Tasa de arribo de paquetes para la clase 1: $\lambda_1 = 0.5$. Escenario SC2 ($N_1 = 5, N_2 = 20, Q_1 = Q_2 = 10$).

Como se esperaba, la clase 1, siendo la clase prioritaria, experimenta un retardo muy bajo para ambos esquemas (SPT, APT), y los distintos tamaños de F que se utilizan en APT ($F = 2, 5, 10$). Hay que tener en cuenta que los nodos de clase 1 funcionan con poca carga y tienen sus colas vacías la mayor parte del tiempo. Por lo tanto, cuando llega un paquete a sus colas, este se transmite inmediatamente y sin colisión. Es claro también, que para los nodos de la clase 2 (la clase no prioritaria), se observa el impacto del aumento del tráfico y las colisiones. Tenga en cuenta que D_2 aumenta con λ_2 , ya que la fracción de paquetes que colisionan aumenta con λ_2 , y se requieren más retransmisiones para poder transmitir los paquetes con éxito. Por lo tanto, para los nodos de clase 2, lleva más tiempo transmitir sus paquetes. También se observa que para el esquema APT, se alcanzan valores más bajos de D_2 , a medida que aumenta el valor de F . Este efecto es muy significativo para los valores de $F = \{5, 10\}$. La cola del nodo se vacía más rápido cuando se transmiten varios paquetes juntos, lo que reduce la contienda por el acceso al medio y las colisiones.

5.6.3 Caudal cursado

La Fig. 5.3 muestra el caudal cursado por nodo para ambas clases de nodos (clase 1 y clase 2). También muestra cómo la clase 2 (no prioritaria) se beneficia del uso del esquema APT, obteniendo valores mayores de caudal cursado. Mientras que en el esquema SPT, la clase 2 alcanza un límite máximo de caudal cursado (saturación) en $\lambda_2 = 1$, cuando se usa APT, estos valores límites de saturación aumentan con F . De esta forma, para $F = 2$ el caudal cursado se duplica, y para $F = 5$ y $F = 10$ no alcanzan el punto de saturación para el escenario considerado. En saturación, todos los nodos tienen paquetes para enviar en casi todos los ciclos, es decir, todos los nodos están activos en casi todos los ciclos. El caudal cursado aumenta, no solo porque en APT se transmiten más paquetes por ciclo, sino también porque aumenta la probabilidad de que un nodo transmita un paquete con éxito. En APT, la cola se vacía más rápido, por lo tanto, el número de nodos que compiten por ciclo disminuye.

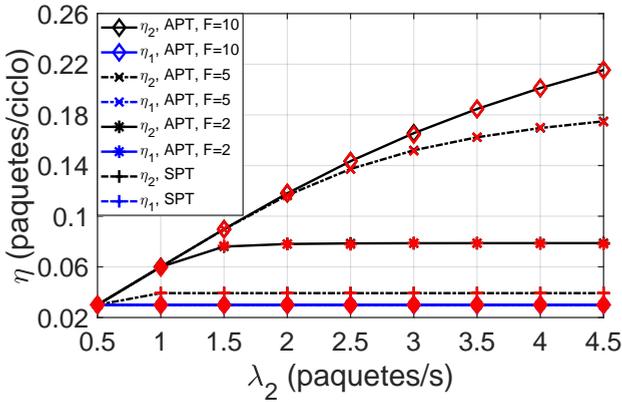


Figura 5.3: Caudal cursado por nodo, considerando ambas clases de nodos (η_1 y η_2) y ambos esquemas de transmisión (SPT y APT). Tasa de arribo de paquetes para la clase 1: $\lambda_1 = 0.5$. Escenario SC2 ($N_1 = 5, N_2 = 20, Q_1 = Q_2 = 10$).

5.6.4 Consumo promedio de energía

La Fig. 5.4 muestra el consumo promedio de energía en ambas clases de nodos (E_1 y E_2), por ciclo y en milijulios (mJ). La figura también muestra que para los nodos de la clase 1, la energía consumida es constante con λ_2 . Esto se debe a que tanto la tasa de llegada de paquetes λ_1 como el número de nodos N_1 son constantes. Para los nodos de clase 2, la tasa de llegada de paquetes varía ($\lambda_2 \in [0, 4.5]$ paquetes/s). Los nodos finalmente alcanzan un límite de actividad, que tiene asociado un límite de consumo de energía. Además, al observar una correspondencia con la Fig. 5.3, alcanzar un mayor caudal cursado, implica llevar a cabo más transmisiones y entregas de paquetes, lo que lleva a una mayor actividad de los nodos y, por lo tanto, a un mayor consumo de energía.

Sin embargo, una parte importante de este consumo de energía se debe a que el nodo incurre frecuentemente en *overhearing* (escucha de otros nodos).

Esto ocurre cuando el nodo pierde la contienda por el acceso al canal, pero tuvo que *escuchar* el canal durante el período de *backoff*, para darse cuenta. El nodo se da cuenta si el canal está ocupado, cuando detecta actividad en el canal. Se puede ver que con APT hay un mayor consumo de energía por nodo por ciclo en comparación con SPT. A medida que aumenta el valor de F , el consumo de energía alcanza niveles más altos.

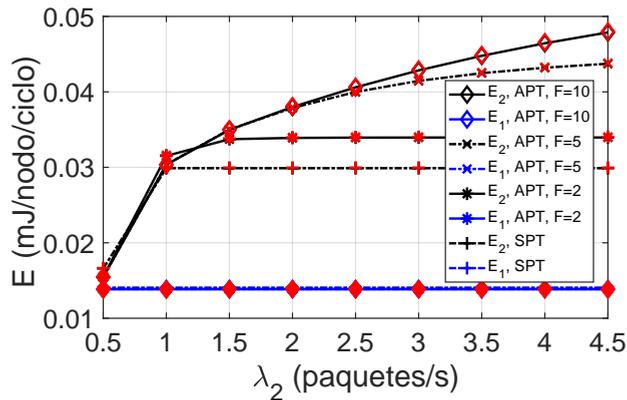


Figura 5.4: Consumo promedio de energía para ambas clases de nodos (E_1 y E_2) y ambos esquemas de transmisión (SPT y APT). Tasa de arribo de paquetes para la clase 1: $\lambda_1 = 0.5$. Escenario SC2 ($N_1 = 5, N_2 = 20, Q_1 = Q_2 = 10$).

5.7 Estudio desagregado de la energía y eficiencia energética

En este apartado se analiza el consumo energético desglosándolo en sus componentes debidas al consumo del nodo cuando este transmite con éxito, cuando ocurren colisiones de los paquetes que transmite, y cuando el nodo escucha la transmisión de otros nodos (*overhearing*). Hay que recordar que se trata

de un escenario donde los nodos de la WSN transmiten en modos SPT y APT, y que se considera el periodo *data* para el análisis, obteniéndose el consumo promedio de energía. Se analiza la eficiencia (EE) a partir de relacionar la energía consumida durante una transmisión exitosa y la energía total, pero también se determina la eficiencia (ζ) en términos del gasto energético por unidad de datos. Por otra parte, se realiza un análisis de consumo energético debido a las colisiones y el *overhearing*.

5.7.1 Desglose de las componentes de consumo energético

La Fig. 5.5 muestran el desglose o componentes de la energía consumida por el RN considerando una transmisión en APT con un valor de $F = 10$.

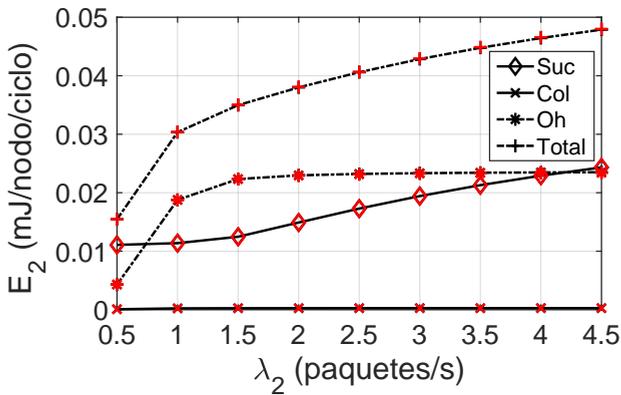


Figura 5.5: Desglose de las componentes de consumo energético (éxito (Suc), colisión (Col), *overhearing* (Oh) y Total) para los nodos de clase 2, considerando APT ($F_1 = F_2 = 10$). Tasa de arribo de paquetes de clase 1: $\lambda_1 = 0.5$. Escenario SC2 ($N_1 = 5, N_2 = 20, Q_1 = Q_2 = 10$).

En la Fig. 5.6, se presenta el escenario de transmisión en SPT. Recuerde (ver apartado 5.5.3) que E_s^{tx} es la energía consumida debido a una transmisión exitosa, en la figuras se expresa con la etiqueta Suc; E_f^{tx} es la energía con-

sumida cuando se transmite con colisión, representada con la etiqueta Col; y E_{oh} , representado con la etiqueta Oh en las figuras, es la energía consumida por el nodo en *overhearing*. También se muestra la suma de estas energías o E_d , expresado como Total en las figuras.

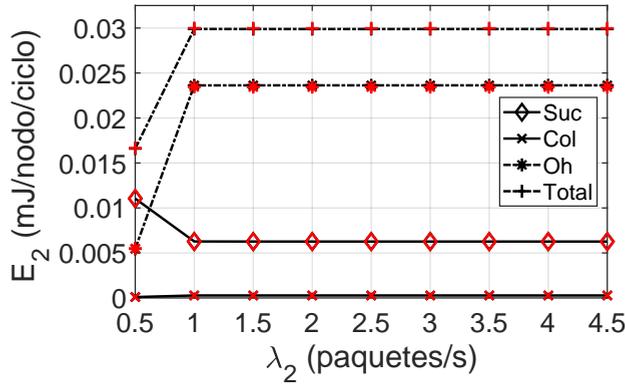


Figura 5.6: Desglose de las componentes de consumo energético (éxito (Suc), colisión (Col), *overhearing* (Oh) y Total) para los nodos de clase 2, considerando SPT (ambas clases). Tasa de arribo de paquetes de clase 1: $\lambda_1 = 0.5$. Escenario SC2 ($N_1 = 5, N_2 = 20, Q_1 = Q_2 = 10$).

En la Fig. 5.5 y la Fig. 5.6, se muestra que la energía consumida debido a transmisiones exitosas presenta un comportamiento distinto dependiendo del esquema de transmisión. Cuando se transmite con el esquema APT, se observa un aumento sostenido del consumo energético con λ_2 en la transmisión exitosa de tramas, en comparación con el esquema SPT, donde se mantiene constante. Claramente en SPT se llega rápidamente a un límite máximo, mientras que en APT se aprovechan las condiciones de menor congestión que aporta este tipo de transmisión, para que la capacidad de los nodos de transmitir exitosamente paquetes siga aumentando con λ_2 .

Por otro lado, la energía consumida debido a colisiones es relativamente baja en comparación con los otros tipos de energía, esto se observa para

ambos esquemas de transmisión. En la Fig. 5.5 y en la Fig. 5.6, la energía consumida debido al *overhearing* es significativa para ambos esquemas (SPT y APT), aunque es menor en APT. Además, en SPT representa una fracción considerablemente mayor de la energía total consumida, comparada con la correspondiente fracción en APT. El nodo con una trama que transmitir, compete por el acceso al canal realizando el mecanismo de detección de portadora durante un período *backoff* (con un tamaño máximo de W). Durante este período, el nodo escucha el canal, consumiendo energía debido a la recepción de radio para verificar si el canal está ocupado. En *overhearing*, este consumo se interrumpe cuando el nodo detecta que otro nodo ha obtenido el acceso al medio (transmitiendo con éxito o con colisión).

5.7.2 Eficiencia Energética

Denotamos por EE a la eficiencia energética de un nodo cualquiera, por ejemplo el RN , que se define como la relación entre el consumo de energía cuando el RN transmite con éxito y la energía total consumida por el RN correspondiente, durante el período *data* de un ciclo. Esta proporción nos da un indicativo de la energía efectiva utilizada en la transmisión de los paquetes, con respecto a total del consumo que incluye la energía consumida por colisiones o transmisiones fallidas y la consumida por *overhearing*.

Las expresiones, de las cuales resulta un valor adimensional, se muestran a continuación:

$$EE_1 = E_s^{tx} / E_1, \quad EE_2 = E_s^{tx} / E_2. \quad (5.20)$$

En (5.20) se muestran las expresiones para la obtención de EE para los nodos de clase 1 y para los nodos de clase 2. Las relaciones se forman a partir de las expresiones (5.16), (5.17) y (5.18), que se muestran en el apartado 5.5.3, donde se explica el procedimiento para el cálculo del consumo de energía.

En la Fig. 5.7, se presenta la Eficiencia Energética para los nodos de clase 2 (EE_2), para los esquemas de transmisión SPT y APT. La EE_2 alcanzan valores altos para un tráfico bajo. Esto significa que, para este intervalo de tráfico

bajo donde se alcanzan valores altos de EE_2 , la mayor parte de la energía consumida por los nodos se usa para transmitir tramas con éxito. La congestión es baja, por tanto, los nodos no incurrir tanto en *overhearing*. Sin embargo, la EE_2 disminuye con λ_2 , obteniéndose valores bajos, especialmente para el esquema SPT. La Fig. 5.7 también muestra que el uso del esquema APT mejora significativamente la eficiencia con λ_2 , y es más evidente para los valores de $F = \{5, 10\}$. En el esquema APT, el número de paquetes transmitidos con éxito se incrementa con F . Con más paquetes transmitidos, la eficiencia aumenta. Esa es una razón por la cual la eficiencia aumenta con F .

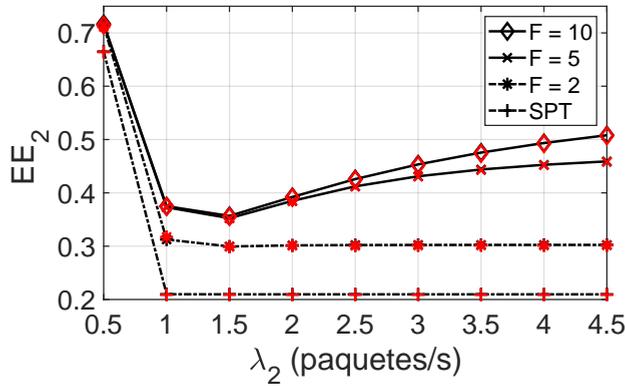


Figura 5.7: Eficiencia energética para los nodos de la clase 2 (EE_2). Se consideran ambos modos de transmisión (SPT and APT), y una tasa de transmisión de paquetes para los nodos de clase 1: $\lambda_1 = 0.5$. Escenario SC2 ($N_1 = 5, N_2 = 20, Q_1 = Q_2 = 10$).

Hay que recordar que la energía Total (E) incluye el proceso de transmisión en el periodo *data* que forma parte del periodo *active* (ver Fig. 5.1). Esto incluye el mecanismo CSMA/CA, con la consecuente generación de la ventana de contienda W , y el intercambio de los paquetes de control RTS/CTS/TRAMA/ACK.

La Fig. 5.7 nos muestra qué porcentaje de la energía Total, para los nodos

de clase 2 (E_2), se utiliza para la transmisión con éxito de los paquetes, dando una idea de la eficiencia. Se observa que las curvas inician alrededor del 70 %, que se interpreta como el porcentaje de energía dedicado a la transmisión efectiva de los datos, del total consumido por el nodo. El 30 % de la energía restante se distribuye entre los consumos debido a las colisiones (Col, E_f^{tx}) y al *overhearing* (Oh, E^{oh}), que como ya vimos en figuras anteriores, el segundo es el componente dominante, siendo el primero poco significativo. La diferencia entre los consumos debido a colisiones y *overhearing* se aprecia en las Figs. 5.5 y 5.6.

En la Fig. 5.7, se aprecia que tras la caída de las curvas, éstas vuelven a subir o continúan con un valor constante. Este valor aumenta con F , de esa forma, para SPT se tiene la eficiencia más baja con poco más del 20 % por ciento de la energía total utilizada para transmitir los datos. Cuando $F = 2$, mejora la eficiencia, pero no aumenta por encima del 30 % por ciento. Las curvas de $F = 5$ y $F = 10$ tienen un perfil muy similar. El hecho de que $F = 10$ no implica una gran mejora en la eficiencia respecto a $F = 5$, aunque sí alcanza la curva una eficiencia del 50 % por ciento, sin llegar aún a una estabilización.

5.7.3 Eficiencia energética y variación del tamaño de la ventana de contienda

En las Figs. 5.8 y 5.9, se muestra la Eficiencia Energética para los nodos de la clase 2 (EE_2), considerando los esquemas de transmisión SPT y APT ($F = 10$), respectivamente. El tamaño máximo de la ventana de contienda, que se usa durante el mecanismo de acceso al medio, varía para la clase 2 de acuerdo al siguiente intervalo: $W_2 = \{16, 64, 128, 256\}$. Para la clase 1 se fija la ventana al siguiente valor: $W_1 = 16$.

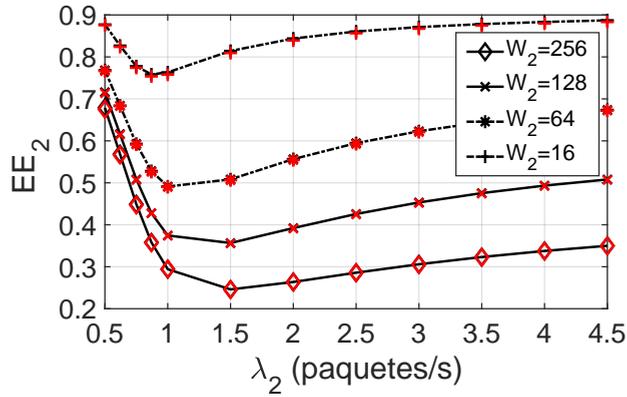


Figura 5.8: Eficiencia energética para la clase 2 (EE_2). Modo de transmisión APT ($F_1 = F_2 = 10$). Ventana de contienda y tasa de arribo de paquetes (clase 1): $W_1 = 16$ y $\lambda_1 = 0.5$. Escenario SC2 ($N_1 = 5, N_2 = 20, Q_1 = Q_2 = 10$).

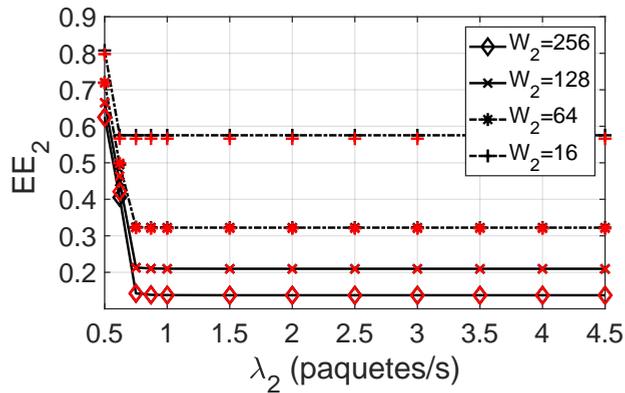


Figura 5.9: Eficiencia energética para los nodos de clase 2 (EE_2). Modo de transmisión SPT (ambas clases). Ventana de contienda y la tasa de arribo de paquetes (clase 1): $W_1 = 16$ y $\lambda_1 = 0.5$. Escenario SC2 ($N_1 = 5, N_2 = 20, Q_1 = Q_2 = 10$).

Dependiendo del tamaño de la ventana de contienda, habrá un impacto en términos de la EE . Si reducimos el tamaño de esta ventana, obtenemos mejores resultados de eficiencia para ambos esquemas de transmisión. Esto significa que mientras la ventana de contienda sea más grande, los nodos que tienen algún paquete o trama que transmitir, tienen una mayor probabilidad de elegir un valor *backoff* más grande, como parte del mecanismo de acceso al medio. Esto implica que los nodos apliquen por más tiempo el mecanismo de detección de portadora, consumiendo más energía. En APT, la EE es, en general, mayor que en el esquema SPT. Esto se debe a que en cada transmisión exitosa, se entregan más paquetes con el esquema APT.

5.7.4 Análisis del consumo energético debido a colisiones y al *overhearing*

En la Fig. 5.10, se muestra la energía debida a una transmisión fallida o con colisión, para los nodos de clase 2, considerando la variación del tamaño de la ventana de contienda de acuerdo al siguiente intervalo: $W_2 = \{16, 64, 128, 256\}$. La ventana de contienda para los nodos de clase 1, se ha fijado a un valor igual a: $W_1 = 16$.

En general, la magnitud de la energía consumida debido a transmisiones fallidas es baja, pero se observa claramente el efecto de la variación del tamaño de la ventana de contienda. Cuando W_2 se reduce, la energía consumida debido a las colisiones aumenta. La razón es que la probabilidad de que un nodo elija el mismo valor de *backoff* es mayor si la W_2 es más pequeña. Recuerde que si dos o más nodos eligen el mismo valor de *backoff*, se produce una colisión de paquetes y, por lo tanto, una transmisión fallida.

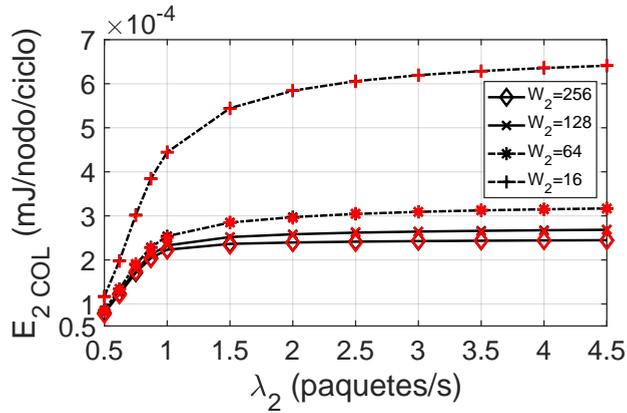


Figura 5.10: Energía consumida por colisiones para la clase 2 (E_{2COL}). Modo de transmisión APT ($F_1 = F_2 = 10$). $W_1 = 16$ y $\lambda_1 = 0.5$. Escenario SC2 ($N_1 = 5, N_2 = 20, Q_1 = Q_2 = 10$).

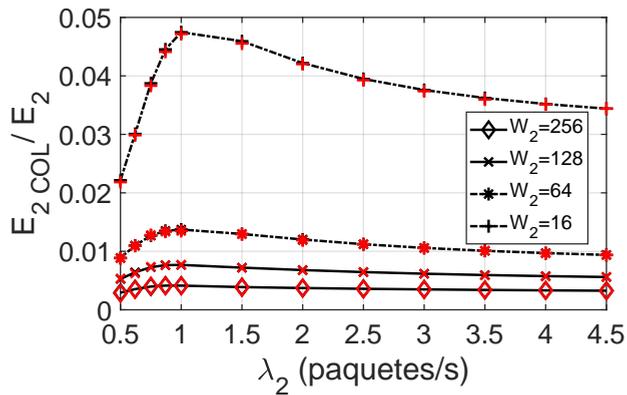


Figura 5.11: Proporción de energía consumida cuando se transmite con colisión respecto a la energía total para la clase 2 (E_{2COL}/E_2). Modo de transmisión APT ($F_1 = F_2 = 10$). $W_1 = 16$ y $\lambda_1 = 0.5$. Escenario SC2 ($N_1 = 5, N_2 = 20, Q_1 = Q_2 = 10$).

En la Fig. 5.11, se muestra la contribución de E_{2col} en relación a la energía total consumida E_2 . Estos valores de energía son bajos, sin embargo, para $W_2 = 16$, el valor relativo es mayor. En general, en el escenario considerado, la congestión del nodo no es un problema (menos del 1 por ciento de la contribución para $W_2 = 128$). Sin embargo, para $W_2 = 16$, la congestión del nodo es mayor y es cuando ocurren más colisiones.

En la Fig. 5.12, se muestra la energía consumida debido a *overhearing* (E_{2oh}). En este caso, cuando el tamaño de la ventana de contienda de los nodos de clase 2 disminuye (W_2), la energía consumida debido a *overhearing* (E_{2oh}) también lo hace.

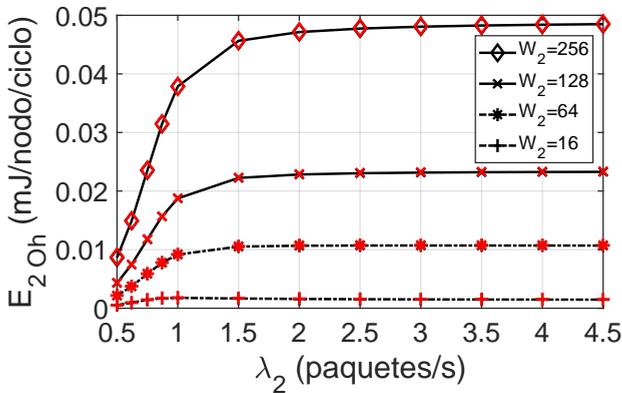


Figura 5.12: Energía consumida debido a *overhearing* para la clase 2 (E_{2oh}). Modo de transmisión APT ($F_1 = F_2 = 10$). Ventana de contienda y tasa de arribo paquetes (clase 1): $W_1 = 16$ y $\lambda_1 = 0.5$. Escenario SC2 ($N_1 = 5, N_2 = 20, Q_1 = Q_2 = 10$).

En la Fig. 5.13, se muestra la proporción de la energía debido al *overhearing* en relación con la energía total consumida. Podemos ver la cantidad significativa de E_{2oh} que se consume en todos los casos. El *overhearing* afecta a los nodos de clase 2, dado que es la clase no prioritaria, la que se ha configurado con una mayor cantidad de nodos y la que opera a tasas más altas de tráfi-

co. No se muestra aquí, pero para la clase 1 se obtuvieron valores bajos de consumo energético de *overhearing*.

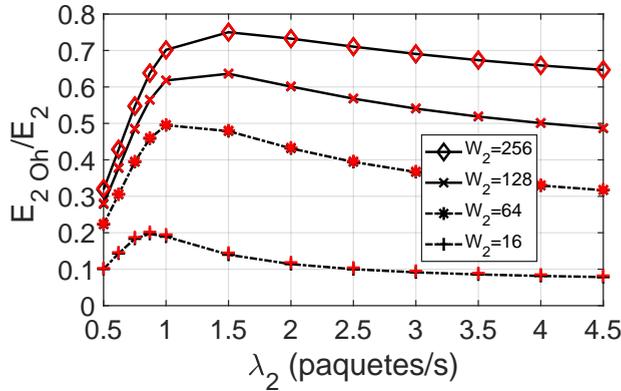


Figura 5.13: Proporción de energía consumida debido al *overhearing* respecto a la energía total para los nodos de clase 2 (E_{2oh}/E_2). Se utiliza el modo de transmisión APT ($F_1 = F_2 = 10$). La ventana de contienda y la tasa de arribo de paquetes para la clase 1 son: $W_1 = 16$ y $\lambda_1 = 0.5$, respectivamente. Escenario SC2 ($N_1 = 5, N_2 = 20, Q_1 = Q_2 = 10$).

5.7.5 Eficiencia energética (gasto energético por unidad de datos)

Por otro lado, también se puede tener resultados de eficiencia en términos de cuánto cuesta energéticamente transmitir las unidades de información; nos referimos a la relación de cuántos milijulios de energía se consumen por la transmisión efectiva de los datos, medidos estos últimos en bytes.

De esta forma, se define a ξ como la eficiencia energética del RN, a partir de la relación entre el número promedio de bytes transmitidos con éxito por ciclo y la energía promedio total consumida en ese ciclo.

$$\xi = \eta \cdot S/E. \tag{5.21}$$

donde S es el tamaño del paquete $DATA$, y η es el caudal cursado del nodo, definido como el número promedio de paquetes entregados con éxito por un nodo en un ciclo, y está determinado por las expresiones vistas en la sección 5.5.1. La Fig. 5.14 presenta los resultados de eficiencia ξ para ambas clases de nodos.

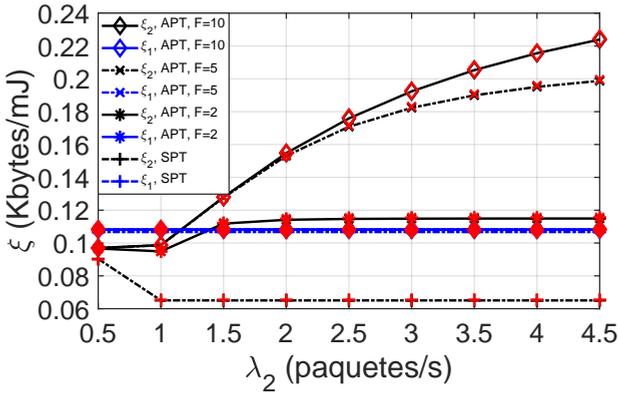


Figura 5.14: Eficiencia energética (ξ), para ambas clases de nodos. Se consideran ambos modos de transmisión (APT y SPT). Escenario SC2 ($N_1 = 5, N_2 = 20, Q_1 = Q_2 = 10$).

En la Fig. 5.14, por cuestión de espacio, no se coloca etiqueta para los nodos de clase 1, pero se observan sus resultados en las curvas de color rojo. Hay que notar que todos los resultados para los nodos de clase 1, prácticamente coinciden sobre una misma línea; esto incluye tanto a los valores que resultan del modelo analítico (líneas), como a los obtenidos por simulación (marcadores), considerando los esquemas de transmisión SPT y APT. Además, para el esquema APT, las opciones de tamaño máximo de trama a transmitirse son $F = \{2, 5, 10\}$. Observe que para la clase 2 con esquema SPT, se tiene un muy bajo rendimiento, incluso por debajo de lo observado para SPT de la clase 1 en la figura 5.14.

5.7.6 Eficiencia energética (gasto energético por unidad de datos) y variación del tamaño de la ventana de contienda

Los resultados de eficiencia que aquí se muestran están en función de las variaciones de la ventana de contienda. Se ha dejado fija la ventana de contienda de la clase 1, $W_1 = 16$, mientras se varía la ventana de contienda de la clase 2, de acuerdo al siguiente intervalo: $W_2 = \{16, 64, 128, 256\}$.

En principio, en la Fig. 5.15 se observa que la eficiencia (ξ_2) aumenta a medida que W_2 disminuye.

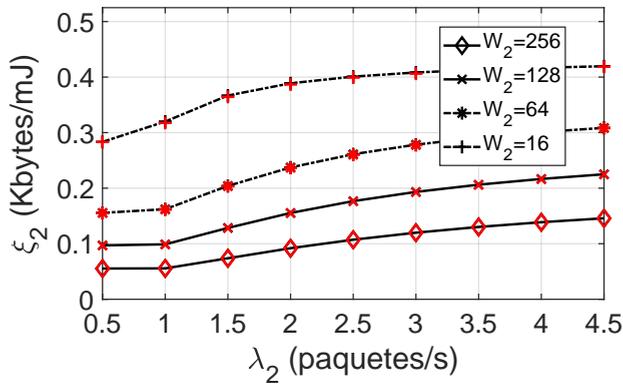


Figura 5.15: Eficiencia energética (ξ_2), para los nodos de la clase 2. Se considera el modo de transmisión APT ($F_1 = F_2 = 10$). Escenario SC2 ($N_1 = 5, N_2 = 20, Q_1 = Q_2 = 10$).

En la figura 5.16, se observa la eficiencia (ξ_2) para el esquema SPT. La tendencia es similar; fijada una carga, a medida que disminuye el valor de W_2 , la eficiencia aumenta. En ambas figuras, se observa una diferencia relativa significativa para ξ_2 , cuando se comparan en la misma figura, las curvas correspondientes a $W_2 = 16$ y a $W_2 = 256$. Comparando con la Fig. 5.15, donde existe un modo de transmisión APT ($F = 10$), en la Fig. 5.16 las curvas

se estabilizan a un valor constante más rápido. Además, en APT se alcanzan valores mayores de (ξ_2) que con el esquema SPT.

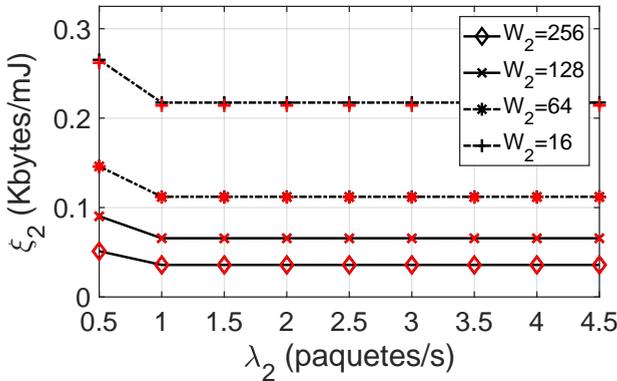


Figura 5.16: Eficiencia energética (ξ_2), para los nodos de la clase 2. Se considera el modo de transmisión SPT (ambas clases). Escenario SC2 ($N_1 = 5, N_2 = 20, Q_1 = Q_2 = 10$).

5.8 Conclusiones

Se ha realizado un estudio de las prestaciones de una WSN heterogénea, considerando diferentes clases de nodos, asignación de prioridades de acceso al medio y esquemas de transmisión SPT y APT. Se ha desarrollado un modelo analítico para un protocolo MAC de una WSN que opera con ciclo de trabajo sincronizado y que considera la heterogeneidad de los nodos que conforman la WSN, las prioridades de acceso, y los esquemas de operación SPT y APT. El modelo analítico se resuelve para escenarios específicos, obteniéndose valores de caudal cursado, retardo promedio de los paquetes y consumo promedio de energía. El modelo analítico se valida a través de simulaciones basadas en eventos discretos, que muestran resultados precisos. El estudio muestra el impacto en los parámetros de rendimiento de los no-

dos de clase 2, debido a la priorización del acceso al medio para los nodos de clase 1. Además, incluso muestra cómo la clase 2 se beneficia del esquema de transmisión APT, cuando aumenta el tráfico, logrando un mejor rendimiento que con el esquema SPT.

Por otro lado, se incluye un estudio donde se desglosa el consumo de energía en sus distintas componentes. Se analiza las contribuciones de los consumos de energía debido a la transmisión exitosa de los datos, el consumo debido a las transmisiones fallidas o colisiones, y el consumo debido al *overhearing*, y finalmente se presenta también un análisis de la eficiencia energética. Se ha observado que el consumo debido al *overhearing* es muy significativo, siendo incluso la componente de energía dominante. Con el esquema de agregación de tráfico, se contribuye a aliviar la congestión, sobre todo para tasas altas de tráfico, permitiendo obtener valores de eficiencia mayores cuando se utiliza APT. En general se observa que el esquema de agregación de tráfico mejora notablemente la eficiencia, aumentando esta con el tamaño máximo de trama transmitida F . El consumo por *overhearing* se puede disminuir realizando un ajuste de la ventana de contienda del mecanismo de acceso al medio. Si se reduce la ventana de contienda, impacta en una reducción del consumo por *overhearing*. Por otro lado, el reducir la ventana de contienda, ocasiona un incremento en el consumo energético debido a las colisiones, aunque es poco significativo.

Se ha demostrado que el modelo desarrollado cumple adecuadamente con su función de describir el comportamiento del sistema objetivo propuesto.

Capítulo 6

Estudio de consumo energético de ciclo completo: Red WSN Homogénea.

6.1 Introducción

En este capítulo, se realiza un estudio exhaustivo del consumo energético de una WSN. En los capítulos anteriores se ha estudiado la energía pero enfocado solo al periodo *active*, y dentro de este, al periodo *data*, que hemos considerado, en su momento, es donde se realiza el consumo energético más significativo. Sin embargo, ahora se profundiza el análisis y se considera todo el ciclo completo; esto incluye al periodo *sync* donde se lleva a cabo la sincronización de los nodos, y el periodo *sleep*, en el cual los nodos que no tienen paquetes que transmitir o que han perdido la contienda, se inactivan quedando en un estado de reposo. Este último estado inactivo, se utiliza para ahorrar energía, sin embargo no queda totalmente inactivo, sino que hay un consumo mínimo de los nodos mientras se mantiene en dicho estado. Por otro lado, aunque en los ciclos normales, de acuerdo a lo anteriormente explicado, ocurre la inactivación de los nodos para ahorrar energía, cada cierto número de ciclos habrá un ciclo *awake*, necesario también para que el nodo pueda mantenerse sincronizado, en lugar de irse a dormir, y con el propósi-

to de escuchar los paquetes SYNC para actualizarse en el estado de la WSN. Ambos ciclos, *normal* y *awake*, se consideran en la determinación del consumo energético.

Se desarrolla un modelo para el cálculo energético, que implica un procedimiento que sigue la misma filosofía de los capítulos previos, en el sentido de hacer uso más directo de la distribución de probabilidad estacionaria en las expresiones desarrolladas. Se considera un escenario de una WSN del tipo homogénea, donde solo una clase de nodos conforma la red y, por tanto, se implementa y se resuelve solo una cadena de Markov de dos dimensiones (2D-DTMC). Para demostrar que el modelo ha resultado adecuado para describir el comportamiento del sistema, se presentan y analizan resultados, tanto analíticos como de simulación, del consumo energético y de la eficiencia energética.

6.2 Trabajos relacionados

El estudio del consumo de energía en las WSNs es de gran importancia debido a las limitaciones de suministro de energía de los nodos sensores, que comúnmente se alimentan con baterías. Podemos encontrar varios estudios de rendimiento energético para WSN, incluso orientados a aplicaciones de la Internet de las cosas (IoT). Por ejemplo, estudios exhaustivos de la energía para este tipo de aplicaciones de IoT, basadas en WSN, se presentan en [36, 37, 14]. Sin embargo, todos estos estudios se basan en simulaciones o se desarrollan enfocados en el protocolo de enrutamiento y sin considerar adecuadamente el protocolo de control de acceso medio (MAC). En [52], se realiza un análisis de energía a través de experimentos, considerando un escenario de aplicación específico, pero no se contempla ningún modelo analítico en la evaluación que se realiza. Podemos encontrar modelos analíticos para el análisis del consumo de energía de los nodos que conforma una WSN, pero estos se han desarrollado desde una perspectiva de enrutamiento [15] o si se considera en el estudio al protocolo MAC, estos modelos no se basan en

cadena de Markov de tiempo discreto (DTMC) [4, 63]. En [53], se realiza un análisis estocástico del consumo de energía, incluso se construye una cadena de Markov, pero utilizando un protocolo MAC genérico y sin especificar, en su análisis de la vida útil de los nodos sensores, los diferentes consumos de energía en el proceso de transmisión. Se pueden encontrar ejemplos de modelos y análisis de prestaciones aplicados a WSN, donde se analiza el consumo de energía [55, 33, 19]. En esos documentos, los autores han modelado el protocolo MAC utilizando DTMC, pero no se tiene en cuenta todo el proceso de transmisión para el cálculo del consumo de energía [33]. O si se toma en cuenta todo el proceso de transmisión completo, estos modelos son menos sistemáticos y menos precisos, ya que no se considera la distribución de probabilidad estacionaria desde el principio, en los cálculos de consumo de energía [55, 19].

En los capítulos anteriores, se han evaluado las prestaciones de WSNs que utilizan un protocolo MAC con ciclo de trabajo (DC) sincronizado, y como parte de esa evaluación se ha considerado el parámetro de consumo energético, realizándose un análisis bastante completo. Se han considerado, en dichos estudios, el consumo debido al proceso de acceso al medio, la transmisión de los datos y los paquetes de control, así como los consumos debido a las transmisiones exitosas, el consumo debido a colisiones y al *overhearing*. Sin embargo, esos estudios se limitaron al periodo *data*, el cual se considera que tendría una mayor contribución en el consumo durante el proceso de transmisión. Aún así, se ha decidido realizar un estudio más detallado, donde se incluya el ciclo completo y los diferentes modos de operación de los nodos, incluyendo la energía que se consume cuando están inactivos.

En el presente capítulo incluimos un análisis detallado del rendimiento centrado en el consumo de energía. La principal contribución es el modelado analítico y la evaluación del consumo de energía para una WSN cuya MAC opera con DC sincronizado. El modelo se basa en una cadena de Markov de tiempo discreto bidimensional (2D-DTMC). El cálculo del consumo de energía es exhaustivo pero más sistemático y preciso que los encontrados en la literatura. Las diferentes contribuciones a la energía consumida por un

nodo en su proceso de transmisión también están bien diferenciadas.

Se demuestra que el modelo propuesto es adecuado para describir comportamiento en términos de consumo de energía y eficiencia energética del sistema estudiado. Se presentan y analizan resultados del modelo y se validan con resultados obtenidos mediante simulación.

6.3 Escenario de red

6.3.1 Protocolo MAC con ciclo de trabajo sincronizado

Las consideraciones realizadas en el apartado 3.3.1, en relación a la operación del protocolo, se aplican aquí de igual manera. Uno puede remitirse a esa sección para recordar qué periodos componen el ciclo transmisión (Fig. 3.1), así como los tipos de paquetes que se intercambian en los diferentes periodos. También, se explica cómo se realiza la sincronización de los nodos, y se detalla el procedimiento de acceso al medio CSMA/CA junto con el intercambio de paquetes de control CTS/RTS y ACK. Hay que tener presente que en este estudio, la WSN se compone de una sola clase de nodos, y habría que agregar también que, en el escenario considerado, los nodos transmiten en SPT.

Conviene definir los diferentes ciclos de operación y la relación de estos con las fases o modos de operación de los nodos que conforman la WSN.

Primeramente, tenemos al ciclo normal cuya duración y subdivisiones (*active* y *sleep*) coinciden con el ciclo de transmisión de duración T . Recuerde que en un ciclo normal los nodos se desactivan o entran en reposo cuando: i) pierde la contienda (escucha un medio ocupado antes de que expire su *backoff*); ii) encuentra una colisión con RTS; iii) después de una transmisión exitosa (solo se envía un paquete por ciclo) [59].

Por otro lado, definimos un ciclo de actualización de agenda de sincronización, de cada N_{sc} ciclos consecutivos, uno se dedica a sincronización y los otros $N_{sc} - 1$ son ciclos normales, de acuerdo a la configuración del escenario.

En dicho superciclo de actualización, los nodos transmiten un paquete SYNC, es decir, cada N_{sc} ciclos envían dicho paquete, pero pueden recibir un paquete SYNC en los ciclos restantes $N_{sc} - 1$. A un conjunto de N_{sc} ciclos consecutivos lo llamamos *superciclo*.

Por otra parte, definimos el ciclo *awake*. En estos ciclos *awake*, el nodo no se desactiva después de perder la contienda, transmitir con colisión o con éxito, sino que se mantiene despierto, con la finalidad de evitar la pérdida de los paquetes SYNC que pudieran enviar los nodos vecinos. A un conjunto de N_{aw} superciclos lo denominamos *hiperciclo*, y está compuesto de $N_{aw} \cdot N_{sc}$ ciclos consecutivos. Un superciclo *awake*, ocurre cada hiperciclo, y está compuesto por N_{sc} ciclos consecutivos. Por tanto, un nodo realizará ciclos normales durante el resto de $N_{aw} - 1$ superciclos del hiperciclo, es decir, durante $(N_{aw} - 1) \cdot N_{sc}$ ciclos consecutivos.

Es importante lo anterior, ya que las características de estos ciclos determinan la energía consumida por el nodo, que más adelante se habrá de explicar.

6.3.2 Operación de la red y suposiciones

La operación de la red y las suposiciones que se consideran son, en lo general, similares a las establecidas en el apartado 3.3.2, recordando que aquí se considera una red homogénea compuesta de una sola clase de nodos. Por lo anterior, solo se considera un nodo de referencia *RN*, pero el *sink* se comporta igual, como un nodo que solo recibe paquetes, sin transmitir paquetes del tipo *DATA*. Se considera también la misma distribución (Poisson) para el arribo de los paquetes a la cola del nodo (Q), que son atendidos de acuerdo con la disciplina FIFO. Para los detalles específicos en relación a estas y otras suposiciones, remitirse al apartado 3.3.2.

En la Fig. 6.1, se observa una WSN homogénea compuesta de N nodos que envían los paquetes a un nodo *sink*.

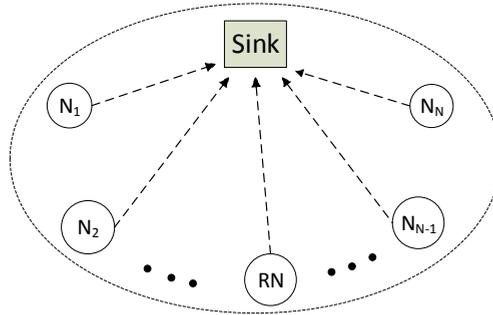


Figura 6.1: Red de sensores inalámbricos (WSN) homogénea (una clase de nodos). Se define un nodo de referencia (RN).

6.4 Modelo del sistema

6.4.1 Acceso al medio

Los mismos principios que se han empleado en 3.4.1 para explicar el procedimiento de acceso al medio, son igualmente aplicables aquí, solo que para una sola clase de nodos. Habrá un nodo de referencia RN elegido arbitrariamente, que se considerará activo e intentará realizar una transmisión, cuando este tiene al menos un paquete en su cola (Q). Al ser un medio compartido, se gestiona el acceso al medio de forma tal, que el nodo activo habrá de generar un tiempo aleatorio de *backoff* seleccionado de $[0, W - 1]$. Una vez expirado este tiempo, el nodo intentará efectuar la transmisión, pudiendo resultar con éxito, con colisión, o inhibiéndola cuando detecte que otro nodo le ha ganado la contienda por el medio. En estos últimos dos casos, el nodo se inactivará entrando en reposo o modo *sleep* durante los ciclos normales.

Este procedimiento aleatorio donde se compite por el medio se aplica no solo para el periodo *data* donde se transmiten paquetes *DATA*, sino también en el periodo *sync* para la transmisión de los paquetes *SYNC*. En la Figura 6.2, se muestra un diagrama del proceso de transmisión, donde se representan los

periodos *sync*, *data* y *sleep*. Para más detalles del procedimiento, remítase al apartado 3.4.1 y a las expresiones (3.1-3.5).

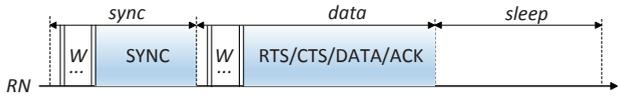


Figura 6.2: Proceso de transmisión.

6.4.2 La 2D-DTMC

De forma similar a lo explicado en el apartado 3.4.2, se modela la evolución en el tiempo del número de paquetes en la cola de *RN*, y el número de nodos activos en el *cluster*, mediante una sola 2D-DTMC, porque en este caso, existe solo una clase de nodos. La 2D-DTMC describe la evolución con el tiempo del estado de los nodos. El estado del sistema se representa por (i, m) , donde $i \leq Q$ es el número de paquetes en la cola de *RN*, y m , es el número de nodos activos distintos de *RN*, en la red, donde $m < N$ y $K = N - 1$. En consecuencia, $P_{(i,m),(j,n)}$ es la probabilidad de transición del estado (i, m) al estado (j, n) . Algunas de las expresiones utilizadas en la implementación de las probabilidades de transición, se definen en el apartado 3.4.2, por tanto, para más detalles remitirse a dicho apartado. Por otro lado, las probabilidades de transición entre los estados de la 2D-DTMC se detallan en el apéndice F, aunque esta tabla es equivalente a la tabla construida para los nodos de clase 1 en el modelo WSN heterogéneo.

6.4.3 Solución de la 2D-DTMC

La solución de la 2D-DTMC se puede obtener resolviendo el conjunto de ecuaciones lineales,

$$\pi P = \pi, \quad \pi e = 1. \quad (6.1)$$

donde $\pi = [\pi(i, n)]$ es la distribución de probabilidad estacionaria, P es la matriz de probabilidad de transición, cuyos elementos se definen en el apéndice F, y e es un vector columna de unos.

La probabilidad promedio, P_s , de que el RN transmita un paquete con éxito, condicionado a que el RN esté activo, viene dado por,

$$P_s = \frac{1}{G} \sum_{i=1}^Q \sum_{k=0}^K \pi(i, k) \cdot P_{s,k} . \quad (6.2)$$

y $G = \sum_{i=1}^Q \sum_{k=0}^K \pi(i, k)$. Resolviendo el conjunto de ecuaciones (6.1), $\pi(P_s)$ puede determinarse para un P_s dado. Luego, un nuevo P_s puede obtenerse de (6.2) para una π dada. Se sigue un procedimiento iterativo de punto fijo y denotamos por π su solución.

6.5 Modelo para el cálculo del consumo energético

El proceso de transmisión se realiza durante un ciclo que se compone de los periodos *active* y *sleep* (ver Fig. 6.2). A su vez, el periodo *active* se subdivide en los periodos *sync* y *data*. En esta sección se desarrollan las expresiones para determinar la energía promedio consumida por el RN, considerando las contribuciones en los diferentes periodos y en sus distintas fases o modos de operación.

6.5.1 Consumo promedio de energía durante el periodo *sync*

Durante el periodo *sync*, los nodos consumen energía debido a la transmisión de paquetes SYNC y también debido a la recepción de dichos paquetes. Las siguientes expresiones nos permiten determinar la energía consumida por el RN, en el periodo *sync* (E_{sc}):

$$T_{sync} = (W - 1) + t_{SYNC} + D_p . \quad (6.3)$$

$$E_{sc} = \frac{1}{N_{sc}} \cdot [(t_{SYNC} \cdot P_{tx} + (T_{sync} - t_{SYNC}) \cdot P_{rx})] + \frac{N_{sc} - 1}{N_{sc}} \cdot (T_{sync} \cdot P_{rx}) . \quad (6.4)$$

donde T_{sync} es la duración del periodo *sync*, W es el tamaño de la ventana de contienda, t_{sync} es la duración de la transmisión de un paquete *SYNC*, y D_p es el retardo de propagación en un sentido. También, P_{rx} y P_{tx} son las magnitudes de potencia de recepción y transmisión, respectivamente. El parámetro N_{sc} indica la periodicidad en ciclos de la transmisión de los paquetes *SYNC*. Se supone que el *RN* transmite un paquete *SYNC* cada N_{sc} ciclos, y recibe un paquete *SYNC* por ciclo en los ciclos restantes ($N_{sc} - 1$).

6.5.2 Consumo promedio de energía en el periodo *data*

En esta sección, se calcula la energía consumida por el *RN* en el periodo *data*. Nótese que solo se estudia la energía consumida por el transceptor de radio frecuencia. La energía consumida por los nodos sensores debido a eventos relacionados con tareas específicas de monitorización dependen de la aplicación, y no se incluye aquí.

Se considera que $E_{tx,s}^d$ y $E_{tx,f}^d$ son los términos para referirse a la energía consumida cuando el *RN* transmite exitosamente y cuando falla la transmisión (colisión), respectivamente. En consecuencia, la energía promedio consumida por el *RN* durante el periodo *data* de un ciclo, está dado por la siguiente expresión:

$$E_d = E_{tx,s}^d + E_{tx,f}^d . \quad (6.5)$$

El consumo energético, cuando se transmite con éxito ($E_{tx,s}^d$), se obtiene con las expresiones siguientes:

$$E_{tx,s}^d = \sum_{i=1}^Q \sum_{k=0}^K \pi(i,k) P_{s,k} (E_1^d + BT_{s,k} P_{rx}) , \quad (6.6)$$

$$E_1^d = (t_{RTS} + t_{DATA}) P_{tx} + [t_{CTS} + t_{ACK} + 4D_p] P_{rx} .$$

donde, t_{RTS} , t_{DATA} , t_{CTS} y t_{ACK} , son los tiempos de duración de la transmisión de los correspondientes tipos de paquetes. El consumo de energía cuando se transmite con colisión ($E_{tx,f}^d$), está dado por los siguientes términos:

$$E_{tx,f}^d = \sum_{i=1}^Q \sum_{k=0}^K \pi(i, k) P_{f,k} (E_2^d + B T_{f,k} P_{rx}), \quad (6.7)$$

$$E_2^d = t_{RTS} P_{tx} + 2D_p P_{rx}.$$

6.5.3 Consumo promedio de energía durante los ciclos *awake*

Con la finalidad de *escuchar* a los paquetes *SYNC* de los nodos vecinos, el *RN* se mantiene despierto (*awake*) en ciertos ciclos después de una transmisión exitosa o con fallo. Nos referimos a estos como ciclos *awake*.

Se ha considerado a $E_{tx,s}^{aw}$, $E_{tx,f}^{aw}$ y E_{oh}^{aw} , como los términos para referirse a la energía consumida durante los ciclos *awake*, cuando el *RN* transmite exitosamente, cuando transmite con fallo (colisión), y cuando incurre en *overhearing*, respectivamente. Por lo tanto, la energía promedio consumida por el *RN* durante un ciclo *awake*, está dado por

$$E_{aw} = E_{tx,s}^{aw} + E_{tx,f}^{aw} + E_{oh}^{aw}. \quad (6.8)$$

El consumo cuando ocurre una transmisión con éxito ($E_{tx,s}^{aw}$), se determina con las ecuaciones siguientes:

$$E_{tx,s}^{aw} = \sum_{i=1}^Q \sum_{k=0}^K \pi(i, k) P_{s,k} [E_1^{aw} - B T_{s,k} P_{rx}], \quad (6.9)$$

$$E_1^{aw} = [T - T_{sync} - (t_{RTS} + t_{CTS} + t_{DATA} + t_{ACK} + 4D_p)] P_{rx}.$$

donde T es la duración de un ciclo.

El consumo de energía cuando ocurre un fallo en la transmisión debido a

una colisión ($E_{tx,f}^{aw}$), se obtiene a partir de las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned} E_{tx,f}^{aw} &= \sum_{i=1}^Q \sum_{k=1}^K \pi(i, k) P_{f,k} \left[E_2^{aw} - BT_{f,k} P_{rx} \right], \\ E_2^{aw} &= [T - T_{sync} - (t_{RTS} + 2D_p)] P_{rx}. \end{aligned} \quad (6.10)$$

El consumo de energía debido al *overhearing* (E_{aw}^{oh}) está dado por las expresiones 6.11 y 6.12.

$$\begin{aligned} E_{aw}^{oh} &= \sum_{i=1}^Q \sum_{k=1}^K \pi(i, k) k P_{s,k} [E_1^{aw} + E_3^{aw}] \\ &+ \sum_{k=1}^K \pi(0, k) k P_{s,k-1} [E_1^{aw} + E_3^{aw}] \\ &+ \sum_{i=1}^Q \sum_{k=2}^K \pi(i, k) \hat{P}_{f,k} (T - T_{sync}) P_{rx} \\ &+ \sum_{k=2}^K \pi(0, k) \hat{P}'_{f,k} (T - T_{sync}) P_{rx} + \pi(0, 0) (T - T_{sync}) P_{rx}, \end{aligned} \quad (6.11)$$

$$\begin{aligned} E_3^{aw} &= [t_{RTS} + D_p] P_{rx} + [t_{CTS} + t_{DATA} + t_{ACK} + 3D_p] P_{sl}, \\ \hat{P}_{f,k} &= \sum_{i=1}^W \left[\sum_{n=2}^k \binom{k}{n} \left(\frac{1}{W} \right)^n \left(\frac{W-i}{W} \right)^{k-n+1} \right], \\ \hat{P}'_{f,k} &= \sum_{i=1}^W \left[\sum_{n=2}^k \binom{k}{n} \left(\frac{1}{W} \right)^n \left(\frac{W-i}{W} \right)^{k-n} \right]. \end{aligned} \quad (6.12)$$

donde, $\hat{P}_{f,k}$ y $\hat{P}'_{f,k}$ definen las probabilidades de que uno de los k nodos diferentes de RN , gane el acceso al canal pero transmita con colisión, cuando el RN está activo o inactivo, respectivamente. El factor P_{sl} es la magnitud de la potencia de *sleep*.

Dependiendo de si el RN está activo o inactivo durante el *overhearing*, los siguientes eventos pueden ocurrir: i) uno de los otros k nodos transmiten exitosamente (con probabilidad $kP_{s,k}$ o $kP_{s,k-1}$); y ii) dos o más de los otros k nodos colisionan (con probabilidad $\hat{P}_{f,k}$ o $\hat{P}'_{f,k}$). Se supone que el RN escucha

el paquete RTS , donde viene contenida la información de la duración de la transmisión, luego pasa al estado de reposo durante la transmisión, y se despierta al final de la misma, permaneciendo despierto por el resto del ciclo.

6.5.4 Consumo promedio de energía durante los ciclos *normal*

Comúnmente, después de una transmisión exitosa o fallida, los nodos se duermen para ahorrar energía. Nos referiremos a estos ciclos como ciclos *normal*. Las siguientes expresiones se utilizan para determinar el consumo energético del RN durante el periodo *sleep* en los ciclos *normal*. Además, en este cálculo de consumo energético, se incluye el consumo debido al *overhearing* durante el periodo *data*.

Se consideran los términos $E_{tx,s}^{nr}$, $E_{tx,f}^{nr}$ y E_{oh}^{nr} , para referirse a los consumos energéticos durante un ciclo *normal*, cuando el RN transmite exitosamente, cuando lo hace con colisión y cuando existe *overhearing*, respectivamente. Dado lo anterior, la energía consumida por el RN durante un ciclo normal, está dado por

$$E_{nr} = E_{tx,s}^{nr} + E_{tx,f}^{nr} + E_{oh}^{nr}. \quad (6.13)$$

La contribución debida a $E_{tx,s}^{nr}$ se determina con

$$E_{tx,s}^{nr} = \sum_{i=1}^Q \sum_{k=0}^K \pi(i, k) P_{s,k} [E_1^{nr} - BT_{s,k} P_{sl}], \quad (6.14)$$

$$E_1^{nr} = [T - T_{sync} - (t_{RTS} + t_{CTS} + t_{DATA} + t_{ACK} + 4D_p)] P_{sl}.$$

El consumo correspondiente a $E_{tx,f}^{nr}$ está dado por

$$E_{tx,f}^{nr} = \sum_{i=1}^Q \sum_{k=1}^K \pi(i, k) P_{f,k} [E_2^{nr} - BT_{f,k} P_{sl}], \quad (6.15)$$

$$E_2^{nr} = [T - T_{sync} - (t_{RTS} + 2D_p)] P_{sl}.$$

La energía consumida en este ciclo debido a E_{oh}^{nr} se obtiene a partir de

$$\begin{aligned}
 E_{oh}^{nr} &= \sum_{i=1}^Q \sum_{k=1}^K \pi(i, k) k P_{s,k} [(BT_{s,k} + D_p) P_{rx} + (E_3^{nr} - BT_{s,k} P_{sl})] \\
 &+ \sum_{i=1}^Q \sum_{k=2}^K \pi(i, k) \hat{P}_{f,k} [(BT_{f,k} + D_p) P_{rx} + (E_3^{nr} - BT_{f,k} P_{sl})] \\
 &+ \sum_{k=0}^K \pi(0, k) (T - T_{sync}) P_{sl}, \\
 E_3^{nr} &= [T - T_{sync} - D_p] P_{sl}.
 \end{aligned} \tag{6.16}$$

El RN duerme cuando está inactivo, $i = 0$. Note que en la determinación de E_{nr} , solo se considera la energía consumida adicional a las energías $E_{tx,s}^d$ y $E_{tx,f}^d$ consumidas en los ciclos *normal*.

6.5.5 Consumo energético promedio total

Se considera que habrá una fracción de ciclos (ciclos *normal*), en los cuales el nodo se dormirá durante el periodo *sleep* del ciclo (una vez haya transmitido con éxito, con falla o inhibido la transmisión porque ha perdido la contienda). Esta energía consumida cuando los nodos se duermen durante el periodo *sleep* se determina de acuerdo a lo visto en el apartado 6.5.4.

Por otro lado, habrá otra fracción de ciclos (ciclos *awake*) en los cuales, durante el periodo *sleep*, los nodos se despertarán (si estaban inactivos) o no se dormirán y permanecerán despiertos (después de una transmisión exitosa), con la finalidad de escuchar algún posible paquete SYNC transmitido por alguno de los otros nodos que de la red. Esta energía consumida cuando los nodos no duermen durante el periodo *sleep* se determina de acuerdo a lo visto en el apartado 6.5.3.

Dado lo anterior, se define a E_{sl} como la energía consumida en el periodo *sleep*, el cual se determina considerando los consumos en los ciclos *normal* y los ciclos *awake*, expresándose su cálculo de la manera siguiente:

$$E_{sl} = E_{nr} \frac{(N_{aw} - 1)}{N_{aw}} + E_{aw} \frac{1}{N_{aw}}. \tag{6.17}$$

donde N_{aw} es la periodicidad en superciclos donde el RN permanece *awake* en el periodo *sleep*.

Por lo tanto, para determinar el consumo energético promedio total, se consideran tres contribuciones, que se observan en la siguiente ecuación:

$$E = E_{sc} + E_d + E_{sl}. \quad (6.18)$$

donde E_{sc} es la energía consumida durante el periodo *sync*, E_d es la energía consumida durante el periodo *data*, y E_{sl} es el consumo de energía durante el periodo *sleep*.

6.5.6 Eficiencia energética

Eficiencia energética

Sea EE la eficiencia energética de RN, que se define como la relación entre el consumo promedio de energía cuando el RN transmite con éxito y la energía promedio total consumida por el RN durante un ciclo. En el consumo de energía, se considera todo el proceso de transmisión durante los períodos *data* y *sleep*, cuando el nodo RN transmite con éxito. Por otro lado, en la energía promedio total se consideran las transmisiones fallidas debido a colisiones, y también el consumo por *overhearing*. Tenga en cuenta que la energía consumida debido a la señalización, necesaria para mantener la sincronización, se omite en el cálculo.

$$EE = \left(E_{tx,s}^d + E_{tx,s}^{nr} \right) / (E_d + E_{sl}). \quad (6.19)$$

Eficiencia energética (gasto energético por unidad de datos)

También, en relación a la eficiencia, se define a ζ como la eficiencia energética de RN, determinándose como la relación entre el número promedio de bytes transmitidos con éxito por ciclo y la energía promedio total consumida en ese ciclo.

$$\zeta = \eta \cdot S / E. \quad (6.20)$$

donde S es el tamaño de los paquetes *DATA*, y η es el caudal cursado del nodo, definido como el número promedio de paquetes entregados con éxito por un nodo en un ciclo, y está determinado por,

$$\eta = \sum_{i=1}^Q \sum_{k=0}^K \pi(i, k) \cdot P_{s,k}. \quad (6.21)$$

6.6 Resultados numéricos

6.6.1 Escenarios y configuración de parámetros

Los resultados analíticos se han obtenido del modelo de 2D-DTMC. Los resultados de la simulación se obtienen por medio de un simulador de eventos discretos personalizado desarrollado en lenguaje C, donde se implementa el esquema de transmisión para una WSN homogénea. El simulador imita el comportamiento físico del sistema. Es decir, en cada ciclo un nodo recibe paquetes de acuerdo con una distribución discreta dada, compite por el acceso al canal con otros nodos si tiene paquetes en si cola y, si gana, transmite un paquete. Los resultados de la simulación son completamente independientes de los obtenidos por medio del modelo analítico. Esto es, el cálculo de las métricas de rendimiento en las simulaciones no depende de las expresiones matemáticas desarrolladas.

El escenario de la WSN se configura de acuerdo a los parámetros que se muestran en la Tabla 6.1.

Tabla 6.1: Configuración de parámetros [1].

Duración del ciclo (T)	60 ms	Retardo de propagación (D_p)	0.1 μ s
t_{SYNC} , t_{RTS} , t_{CTS} and t_{ACK}	0.18 ms	Tiempo de slot (ts)	0.1 ms
t_{DATA}	1.716 ms	Ventana de contienda (W)	128 slots
Tamaño del paquete DATA (S)	50 bytes	Tamaño de la cola (Q)	10 paquetes
Periodo de Tx de paquete SYNC (N_{sc})	20 ciclos	Periodo awake (N_{aw})	80 superciclos
Potencia de transmisión (P_{tx})	52 mW	Potencia de recepción (P_{rx})	59 mW
Potencia consumida en reposo (P_{sl})	$P_{sl} = 3\mu W$		
Número de nodos	Tasa de arribo de los paquetes (paquetes/s)		
$N = 15$,	$\lambda = \{1.5\}$,		
$N = [5, 30]$	$\lambda = [0.5, 4.5]$		

En las siguientes subpartados se muestran los resultados de los parámetros de prestaciones obtenidos del modelo analítico y por simulación. En las figuras, los resultados de simulación se representan solo con marcadores, mientras que los resultados analíticos se representan con líneas y marcadores.

6.6.2 Consumo promedio de energía

En la figura 6.3, se muestra el consumo de energía promedio total en función de la tasa de llegada de los paquetes λ . La energía consumida aumenta aproximadamente linealmente con la carga, hasta cerca de $\lambda = 1.5$, luego permanece constante para cargas más mayores. El aumento de λ provoca una saturación relativamente rápida que permite la estabilización del consumo de energía. Una cantidad relativamente grande de energía consumida se debe al *overhearing*, especialmente cuando la curva se estabiliza. Recuerde que E es la suma de todas las contribuciones de energía consideradas, tanto en el período *active* como en el período *sleep*.

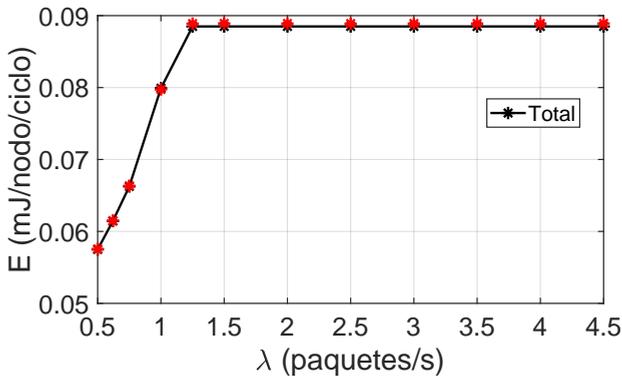


Figura 6.3: Consumo promedio total de energía. El número de nodos que conforman la red es de $N = 15$.

En la figura 6.4, se muestran las diferentes contribuciones al consumo promedio total de energía. Estos incluyen la energía consumida durante el período *sync* (E_{sc}), la energía consumida durante el período *data* (E_d) (considerando los ciclos *normal* y la energía correspondiente (E_{nr}), y la energía debido a los ciclos *awake* (E_{aw}) durante el período *sleep*. El comportamiento de los consumos de energía debido al período *sync* y a los ciclos *awake* son constantes y corresponden a la energía consumida por realizar tareas de señalización. El consumo de energía en el periodo *data* incluye a la energía consumida debido a la transmisión de los paquetes *DATA* con éxito y con colisión, la energía consumida por *overhearing* (debido a que otro nodo diferente de *RN* ha ganado la contienda), y el consumo en los ciclos *normal* durante el período *sleep*, cuando los nodos entran en reposo, una vez que su actividad durante ese ciclo ha finalizado.

Podemos desglosar aún más la energía consumida y separar el consumo de energía en el periodo *data* (E_d) y el consumo de energía en los ciclos *normal* (E_{nr}).

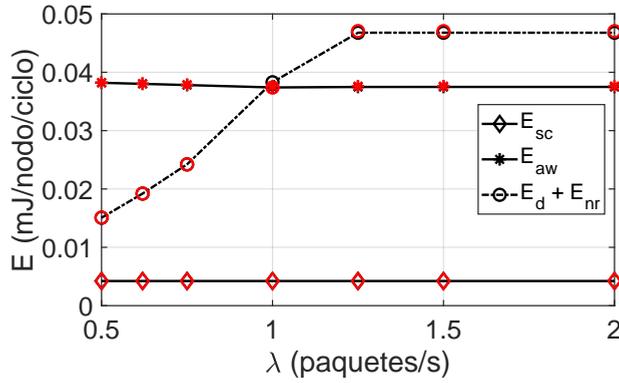


Figura 6.4: Diferentes contribuciones a la energía consumida por el RN a medida que la tasa de llegada de datos varía, cuando $N = 15$.

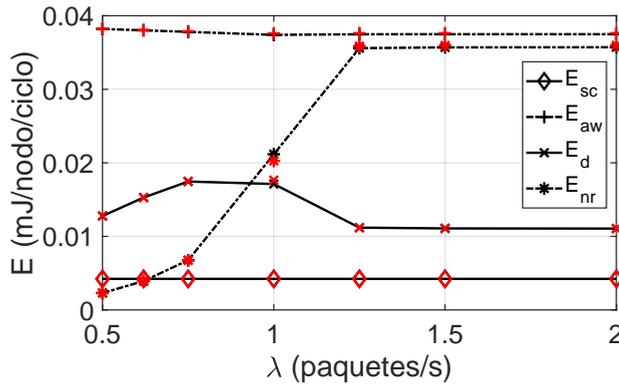


Figura 6.5: Diferentes contribuciones a la energía consumida por el RN a medida que la tasa de llegada de datos varía, cuando $N = 15$. Desglose de E_d y E_{nr} .

En la figura 6.5, E_d se representa la energía consumida durante la transmisión del paquete DATA, incluyendo el procedimiento de contienda y las coli-

siones, mientras que E_{nr} representa la energía consumida durante el período *sleep* y la debida al *overhearing*. La figura muestra que para cargas bajas, la energía consumida debido a E_d , alcanza los valores más altos. Por otro lado, la energía consumida debido a los ciclos *awake* (E_{aw}) y *normal* (E_{nr}) es significativamente mayor en comparación con la energía consumida E_d . Debemos recordar que la energía consumida en los ciclos *awake* y *normal*, también incluye la energía debida a colisiones y *overhearing*.

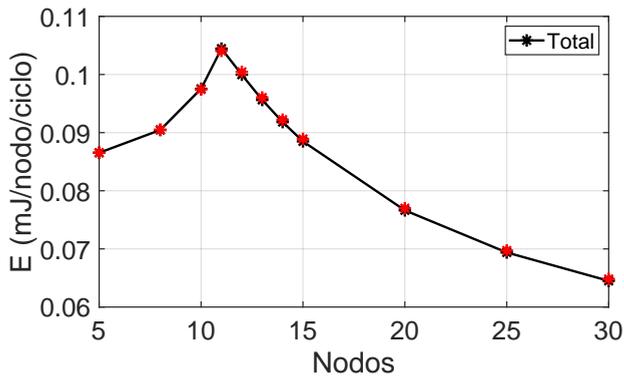


Figura 6.6: Energía promedio total consumida por RN a medida que varía el número de nodos, cuando $\lambda = 1.5$.

En la figura 6.6, el consumo de energía promedio total se muestra como una función del número de nodos en la red. En este caso, la energía consumida aumenta con N hasta $N = 11$, luego la curva decae, a medida que se agregan más nodos a la red. La primera parte, cuando la curva aumenta, la contiene por el acceso medio es baja, por lo tanto, una fracción significativa de la energía consumida se debe a las transmisiones de los paquetes *DATA*. Por otro lado, una fracción más pequeña de la energía consumida se debe a colisiones y *overhearing*. Tenga en cuenta que los últimos consumos mencionados son consecuencia del funcionamiento del mecanismo de acceso medio. En la segunda parte, cuando la curva decae, la contiene continúa

aumentando a medida que se agregan más nodos a la red. La disminución en el consumo de energía se explica a medida que al canal se incorporan más nodos N , y se vuelve ocupado en todos los ciclos. Por lo tanto, los nodos tienen muy pocas oportunidades para transmitir sus paquetes, consumiendo energía en escuchar las colisiones y yendo al modo de reposo.

La curva de la figura puede entenderse mejor si la energía consumida se desagrega. En la figura 6.7, se muestran las diferentes contribuciones al consumo de energía promedio total en función del número de nodos. Esta figura puede explicarse en los mismos términos que hemos utilizado para explicar las diferentes contribuciones de energía en 6.4.

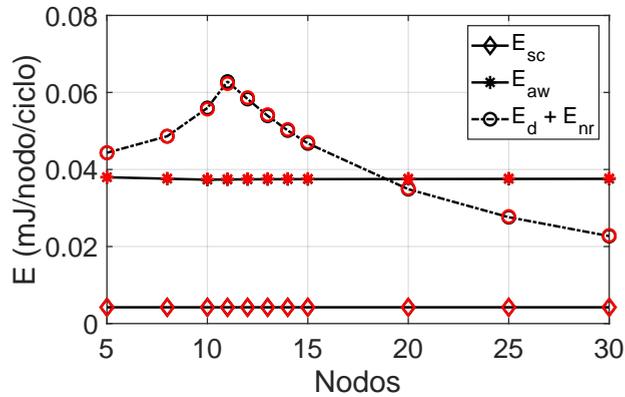


Figura 6.7: Diferentes contribuciones a la energía consumida por el RN a medida que varía el número de nodos, cuando $\lambda = 1.5$.

En la figura 6.8, se muestra una desagregación adicional de la energía con las componentes E_d y E_{nr} . De la figura, podemos confirmar que la primera parte, a medida que aumenta la carga, la energía consumida se debe principalmente a E_d (transmisión de paquetes DATA). Sin embargo, en la segunda parte, al seguir aumentando la carga, la energía E_d decae y la componente de energía dominante es la E_{nr} .

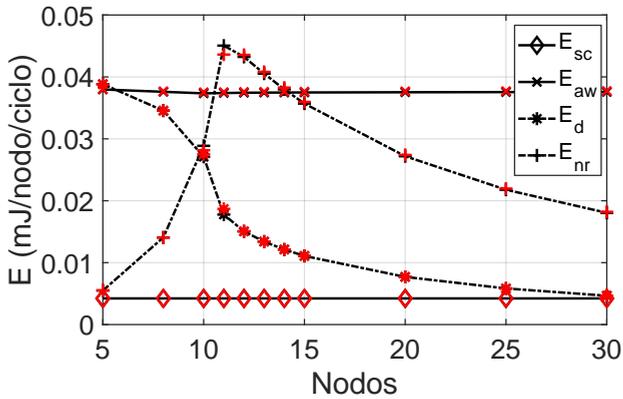


Figura 6.8: Diferentes contribuciones a la energía consumida por RN a medida que varía el número de nodos, cuando $\lambda = 1.5$. Desglose de datos en *data-tx* y *normal*

De la figura 6.6 y la figura 6.8, tenga en cuenta que los consumos de energía promedio total alcanzado, cuando $N = 5$ y $N = 15$ son muy similares. Aunque la energía promedio total es similar, la proporción de sus componentes de consumo de energía no lo es. Para $N = 15$, el componente de consumo de energía dominante se debe al *overhearing* y las colisiones (E_{nr}). Sin embargo, en el caso menos congestionado ($N = 5$), la fracción de energía consumida en la transmisión de DATA (E_d) es relativamente mayor.

6.6.3 Eficiencia energética

En la figura 6.9, se muestra la eficiencia energética (EE) en función de λ , considerando la variación del tamaño de la ventana de contienda $W = \{16, 64, 128, 256\}$. En general, la EE alcanza valores relativamente altos para poco tráfico. Esto significa que, para este intervalo de tráfico bajo, la mayor parte de la energía consumida por los nodos se usa para transmitir paquetes con éxito. Sin embargo, posteriormente EE disminuye con λ , obteniendo valores relativamente

bajos. Cuando la carga aumenta, la congestión de la red también aumenta, por lo tanto, la probabilidad de que un nodo transmita exitosamente un paquete *DATA* disminuye significativamente con λ . Del mismo modo, cuando W disminuye, la probabilidad de que un nodo transmita con éxito disminuye. Por lo tanto, EE aumenta con W . Recuerde que estos resultados representan la fracción de la energía promedio consumida durante una transmisión exitosa sobre la energía promedio total consumida en una transmisión (incluyendo el *overhearing* y las colisiones) (vea la ecuación (6.19)).

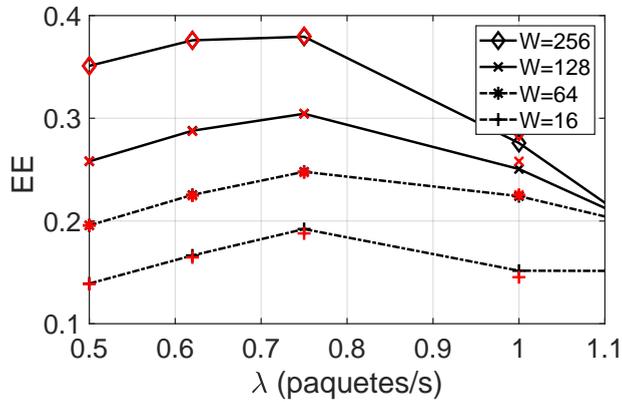


Figura 6.9: Eficiencia energética (EE) a medida que la tasa de arribo de datos varía, cuando $N = 15$.

En la figura 6.10, se muestra la eficiencia energética en términos de unidad de datos por energía ($Kbytes/mJ$), como función de λ y considerando diferentes tamaños de W . La figura muestra que, en general, para una carga baja, un nodo puede enviar más bytes por Joule. Además, la eficiencia lograda es mayor a medida que disminuye W . Recuerde que en el cálculo de ζ , se considera el consumo total de energía, incluidas las energías *sync* y *awake*, que se utilizan con fines de señalización.

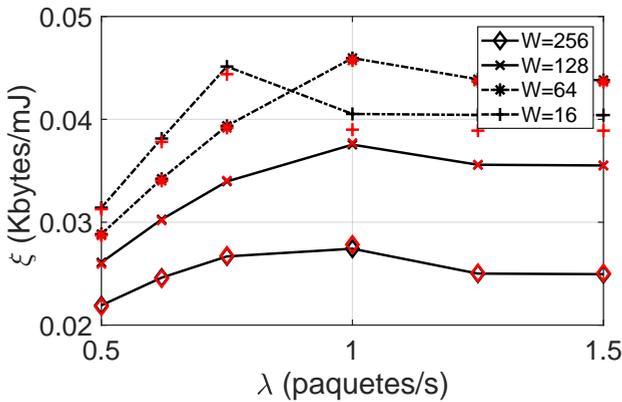


Figura 6.10: Eficiencia energética (ξ) a medida que la tasa de arribo de datos varía, cuando $N = 15$.

6.7 Conclusiones

En este capítulo se desarrolla un modelo basado en una 2D-DTMC para analizar el rendimiento del consumo de energía de los dispositivos sensores de una WSN. Se incluyen al modelo expresiones que permiten determinar el consumos de energía de los nodos sensores, de una forma más completa y más precisa. Se considera todo el ciclo completo de transmisión y las distintas fases de operación de los nodos, incluyendo el consumo por sincronización, el consumo por la transmisión de los datos, y el debido a las fases de operación *normal* y *awake*, durante el periodo *sleep* del ciclo.

El modelo considera un protocolo MAC de ciclo de trabajo sincronizado para una red homogénea con modo de transmisión en SPT, y su solución, en términos de distribución de probabilidad estacionaria, es utilizada por las expresiones para evaluar las prestaciones del consumo energético, de una manera más precisa y sistemática.

Los resultados de consumo promedio de energía y eficiencia energética se

obtienen del modelo analítico y se validan a través de simulaciones basadas en eventos discretos, obteniéndose resultados muy precisos. En relación con los resultados de energía, se realiza un análisis de las distintas componentes del consumo de energía de los nodos.

Capítulo 7

Estudio de consumo energético de ciclo completo: Red WSN heterogénea.

7.1 Introducción

En este capítulo se presenta lo relacionado al modelado y resultados del análisis de prestaciones del escenario de una WSN del tipo heterogéneo, pero incluyendo en el análisis de la energía todo el ciclo de transmisión completo. Además, se incorpora en el estudio el modo de transmisión con agregación de tráfico (APT), en el cual les es posible a los nodos transmitir más de un paquete por trama.

Se presenta un análisis de los resultados de consumo promedio de energía, donde se desagrega la energía en sus diferentes aportaciones en función de los ciclos y fases de operación de los nodos.

A diferencia del capítulo 6, donde se realiza un estudio de la energía de forma parecida, en el presente estudio se incluye la heterogeneidad, es decir, se consideran distintas clases de nodos y la priorización del acceso al medio. También, se incluye en el presente modelo la transmisión con agregación de tráfico (APT), además del modo SPT, para las dos clases consideradas.

Como demostración de la idoneidad del modelo para modelar sistemas que representan WSN con las características previamente mencionadas, se presentan resultados de energía y de eficiencia energética. Para la validación de los resultados obtenidos por medio del modelo analítico, se contrastan con resultados obtenidos de forma independiente por medio de simulación.

Por otro lado, hacia el final del capítulo, se realiza un estudio del efecto de la variación del número mínimo de los paquetes en la cola del nodo, para que este se considere activo y, por tanto, intente el acceso al medio para la transmisión de sus paquetes. En este último estudio, basado solo en simulación, se presentan resultados de consumo promedio de energía, retardo promedio de los paquetes, y pérdida de los paquetes.

7.2 Trabajos relacionados

De los trabajos relacionados al estudio del consumo energético en las WSN, y que utilizan herramientas de modelado similares a las utilizadas en el presente capítulo, se ha encontrado a [53], donde se realiza un análisis estocástico del consumo de energía, incluso se construye una cadena de Markov, pero sin considerar escenarios heterogéneos o algún esquema APT.

Muy pocos trabajos se han encontrado donde desarrollan modelos analíticos para la evaluación de WSN con agregación de paquetes. Sin embargo, en [16], se realiza un análisis de energía de una WSN, considerando la agregación de paquetes y derivando modelos de Markov, pero enfocado en una perspectiva de enrutamiento y sin considerar ningún protocolo de capa MAC específico. Otros estudios, incluyen el análisis de energía de WSN con una MAC que opera con ciclo de trabajo (DC), considerando un esquema de agregación de datos, e incluso algún grado de heterogeneidad en los nodos [30, 29], pero estos estudios se han llevado a cabo principalmente por simulaciones o pruebas con prototipos de laboratorio.

En [19], los autores han desarrollado modelos DTMC para evaluar los parámetros de rendimiento para una WSN con MAC operando con DC, in-

cluido el consumo de energía, y considerando el esquema APT. Sin embargo, este estudio no considera escenarios heterogéneos. Además, aunque en el análisis de energía consideran los diferentes ciclos y fases de operación de los nodos, el presente estudio es más directo con la distribución de probabilidad estacionaria resultante, que se utiliza en las expresiones para determinar los consumos de energía. Como se ha visto en el capítulo 4, este nuevo enfoque empleado para la determinación de energía, permite obtener resultados más precisos con un método de cálculo más sistemático. En los capítulos 3 y 4, se ha evaluado el rendimiento de una red heterogénea que utiliza un protocolo MAC de ciclo de trabajo. En esos modelos el esquema de transmisión establecido es un solo paquete por ciclo (SPT). En el presente trabajo, incluimos un análisis detallado del rendimiento centrado en el consumo de energía, a través de un modelo analítico que amplía las capacidades de los nodos para transmitir con agregación de paquetes (APT), además de SPT.

La principal contribución de este trabajo es el modelado analítico y la evaluación exhaustiva del rendimiento del consumo de energía, para una WSN que cuya MAC operan con el mecanismo DC, en escenarios donde los nodos tienen diferentes cargas, prioridades de acceso y capacidades de transmisión APT y SPT. El modelo se basa en dos cadenas de Markov de tiempo discreto bidimensionales (2D-DTMC).

7.3 Consumo energético de una WSN con dos clases de nodos

Antes de especificar el procedimiento para la determinación del consumo de la energía, conviene recordar algunos aspectos en relación al escenario de la WSN, al procedimiento de transmisión, y los ciclos y fases de operación de los nodos. Se retoma el modelo heterogéneo, donde coexisten dos clases de nodos en la WSN, tal como se muestra en la Fig. 7.1, y donde habrá un par de nodos de referencia, para cada una de las clases consideradas (RN_1 y RN_2).

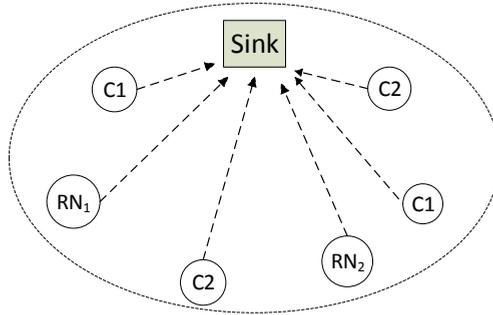


Figura 7.1: Red heterogénea de sensores inalámbricos (WSN) con dos clases de nodos. Los nodos de clase 1 (C1) tienen prioridad de acceso al canal sobre los nodos de clase 2 (C2). Se define un nodo de referencia (RN) por cada clase.

Los nodos de clase 1 son a los que se les otorga prioridad en el acceso al medio, como se explica a detalle en el apartado 3.3.3, aunque de acuerdo al proceso de transmisión que se observa en la Fig. 7.2.

Recuerde que el proceso de transmisión (SPT o APT) se estructura en ciclos, que se componen de los períodos *active* y *sleep*, y que el período *active* a su vez, se subdivide en los períodos *sync* y *data*. En la Fig. 7.2, también puede observarse los distintos periodos que componen el ciclo, mostrándose el esquema de una transmisión donde se considera las dos clases de nodos de la WSN.

En este modelo, se considera la contribución de consumo energético de los procedimientos del periodo *sync*. Se toma en cuenta la contienda por el acceso al medio, y la transmisión y recepción de los paquetes SYNC.

Además, se considera la contribución de energía durante el periodo *data*, utilizado por los nodos para transmitir los paquetes DATA. En este modelo, los nodos tienen la capacidad para transmitir tanto en SPT como con agregación de tráfico (APT). Recuerde que existe un intercambio de paquetes de control, que se observa también en la Fig. 7.2 (RTS, CTS y ACK).

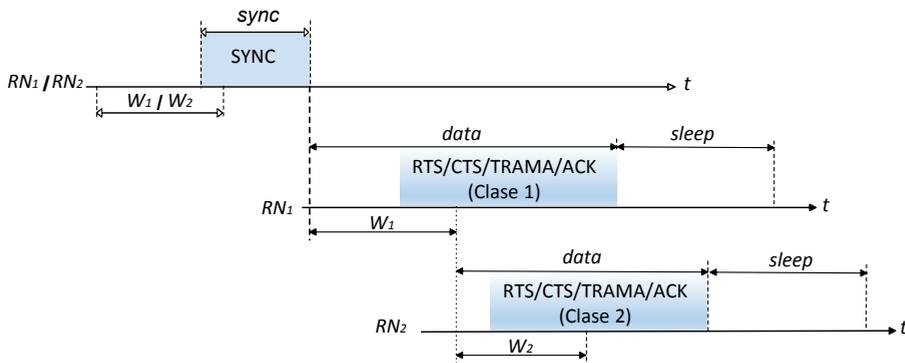


Figura 7.2: Proceso de transmisión. Incluye los periodos de los procedimientos de acceso al medio y de transmisión de los paquetes SYNC

Por otro lado, también se toma en cuenta la contribución durante el periodo *sleep*. En este periodo, los nodos entran en reposo o despiertan para escuchar paquetes SYNC que se hubieran transmitido, según los ciclos correspondientes de operación *normal* o *awake*, respectivamente.

Hay que recordar que durante el periodo *sleep* existen dos posibles ciclos de operación, los ciclos *normal* que ocurre con mayor frecuencia, en los cuales los nodos se ponen en reposo (también denominado modo *sleep*), y los ciclos *awake*, que ocurren con menor frecuencia, en los cuales los nodos permanecen despiertos y sirven para mantener la sincronía entre los nodos (también se le ha denominado modo *awake*).

Finalmente, comentar que el modelado del sistema y su solución, se realiza de la misma manera que el realizado en los apartados 5.4 y 5.4.2, respectivamente. Estos apartados se encuentran en el capítulo 5, referente al Modelado de red WSN heterogénea: Transmisión de paquetes con agregación de tráfico (APT).

7.3.1 Consumo promedio de energía en el período *sync*

Hay que recordar que con el propósito de realizar la sincronización, los nodos consumen energía debido a la transmisión y recepción de paquetes *SYNC*, durante el período *sync* del ciclo transmisión. Las expresiones (7.1) y (7.2), permiten determinar el consumo de energía de RN_1 y RN_2 , durante dicho periodo (E_{sc}):

$$T_{sync} = (W - 1) + t_{SYNC} + D_p. \quad (7.1)$$

$$E_{sc} = \frac{1}{N_{sc}} \cdot [(t_{SYNC} \cdot P_{tx} + (T_{sync} - t_{SYNC}) \cdot P_{rx})] + \frac{N_{sc} - 1}{N_{sc}} \cdot (T_{sync} \cdot P_{rx}). \quad (7.2)$$

donde T_{sync} es la duración del período *sync*, W es el tamaño de la ventana de contienda, t_{sync} es la duración de la transmisión de un paquete *SYNC*, y D_p es el retardo de propagación en un sentido.

Además, P_{rx} y P_{tx} son los niveles de potencia de recepción y transmisión, respectivamente. El parámetro N_{sc} indica la periodicidad en ciclos de la transmisión de los paquetes *SYNC*. Suponemos que el RN , de la clase correspondiente, transmite un paquete *SYNC* cada N_{sc} ciclos, y podría recibir un paquete por ciclo en los ciclos restantes ($N_{sc} - 1$).

7.3.2 Consumo promedio de energía en el período *data*

Todo el proceso necesario para la transmisión de los paquetes *DATA*, que como se ha visto transcurre en el periodo *data*, implica un consumo de energía, que se determina con las expresiones (7.3), (7.4) y (7.5). En esta sección, se muestra el proceso analítico para determinar la energía consumida por los nodos de referencia, RN_1 y RN_2 , en el período *data* del ciclo de transmisión.

Hay que recordar que solo se estudia la energía consumida por el transceptor de radiofrecuencia y, por tanto, no se incluye en el cálculo la energía

consumida debido a eventos relacionados con tareas específicas de detección o monitoreo, dependientes de la aplicación del nodo sensor.

La energía promedio consumida por el RN de la clase correspondiente, durante el período *data* de un ciclo, en lo general, es la suma de la energía consumida cuando el nodo transmite su trama exitosamente ($E_{tx,s}^d$), y la energía utilizada por el nodo cuando este transmite con falla porque encuentra una colisión ($E_{tx,f}^d$).

$$E_d = E_{tx,s}^d + E_{tx,f}^d. \quad (7.3)$$

El consumo por transmisión exitosa, $E_{tx,s}^d$, para los nodos de la clase 1, se obtiene mediante 7.4.

$$\begin{aligned} E_{tx,s}^d &= \sum_{i=1}^{Q_1} \sum_{k=0}^{M_1} \pi_1(i, k) P_{s_1,k} (E_1^d + \alpha_1 t_{DATA} P_{1,tx} + B T_{s_1,k} P_{1,rx}), \\ E_1^d &= t_{RTS} P_{1,tx} + [t_{CTS} + t_{ACK} + 4D_p] P_{1,rx}, \\ \alpha_1 &= \min(i, F_1). \end{aligned} \quad (7.4)$$

donde, t_{RTS} , t_{DATA} , t_{CTS} y t_{ACK} , son los tiempos de transmisión de paquetes correspondientes. Recuerde que el factor α , se define como el número de paquetes agregados para la transmisión cuando el nodo se encuentra en el estado i . Recuerde también, que π es la distribución de probabilidad estacionaria y, por tanto, π_1 es la correspondiente a la clase 1. El consumo de energía debido a colisión ($E_{tx,f}^d$), para los nodos de clase 1, se obtiene mediante 7.5.

$$\begin{aligned} E_{tx,f}^d &= \sum_{i=1}^{Q_1} \sum_{k=0}^{M_1} \pi_1(i, k) P_{f_1,k} (E_2^d + B T_{f_1,k} P_{1,rx}), \\ E_2^d &= t_{RTS} P_{1,tx} + 2D_p P_{1,rx}. \end{aligned} \quad (7.5)$$

Para los nodos de la clase 2, los consumos de energía debido a las transmisiones con éxito (E_s^{tx}) y con colisión (E_f^{tx}), se calculan de igual forma, pero se utiliza en los cálculos, la distribución de probabilidad estacionaria correspondiente a los nodos de clase 2 (π_2). Además, se debe considerar la multiplicación por el factor $R_{1,0} = \pi_1(0, 0)$, siendo este la probabilidad de que no

haya nodos activos de la clase 1 en un ciclo (fracción de ciclos en los que los nodos de clase 1 están inactivos).

Cabe aclarar que, en este capítulo, al estar considerando el consumo de las fases de operación *awake* y *normal*, el cálculo de la contribución del consumo debido al *overhearing*, se realiza más adelante, en los apartados correspondientes al consumo de energía durante los ciclos *awake* y ciclos *normal*, respectivamente.

7.3.3 Consumo medio de energía durante los ciclos *awake*

Hay que recordar que los ciclos *awake* son aquellos en los que los nodos, durante el periodo *sleep*, habrán de permanecer en vigilia, aunque hayan terminado su proceso de transmisión, o se habrán de despertar si no lo estaban.

Cuando un nodo está en modo *awake* se despierta al principio de los ciclos de *awake*, y permanece en modo *awake* hasta que termina el ciclo. Cuando escucha el inicio de una transmisión exitosa, lee el *RTS*, calcula el tiempo que el canal permanecerá ocupado, y pasa al modo de reposo. Cuando la transmisión termina vuelve al estado *awake*.

El objetivo de lo anterior, es que los nodos escuchen la transmisión de los posibles paquetes *SYNC* de los nodos vecinos, y de esa forma, estar actualizados en su calendario de sincronización. Nos referimos a estos ciclos como ciclos *awake*. Se desea calcular la energía consumida por nodo y ciclo de cada clase en los ciclos *awake*. Suponemos que en estos ciclos el nodo activa el modo *awake* al inicio del ciclo (tras el periodo *sync*, el cual es común para las dos clases).

Recuerde que para los ciclos en los que los nodos de clase 1 colisionan, se considera que los nodos de clase 2 detectan la actividad y no realizarán contienda.

7.3.4 Escenario de consumo en estado *awake* para la clase 1

Para los nodos de clase 1, en particular para el RN_1 , se consideran los siguientes ciclos:

- 1A** RN_1 está ACTIVO ($i_1 > 0, k_1 \geq 0$): los nodos de clase 1 acceden al canal en el mismo ciclo que RN_1 está en *awake*. El acceso al canal puede ser del mismo RN_1 , o bien de otros nodos de clase 1. En el primer caso, el RN_1 realiza la detección del canal o el *channel sensing*, y pueden ocurrir los casos que ya se han contemplado con anterioridad: a) el RN_1 realiza una transmisión con éxito; b) el RN_1 colisiona; c) otro nodo realiza una transmisión con éxito; d) otros nodos colisionan.
- 1B** RN_1 está INACTIVO ($i_1 = 0, k_1 > 0$). los nodos de clase 1 acceden al canal en el mismo ciclo que RN_1 está en *awake*. El acceso al canal solo puede ser de otros nodos de clase 1. El RN_1 escucha el canal para decodificar *RTS* y determinar la duración de la trama. Pueden ocurrir los casos que ya se han contemplado con anterioridad: a) otro nodo realiza una transmisión con éxito; b) otros nodos colisionan.
- 1C** RN_1 y el resto de nodos de clase 1 están INACTIVOS ($i_1 = 0, k_1 = 0$). Hay nodos de clase 2 activos que acceden al canal en el mismo ciclo que RN_1 está en *awake*. El RN_1 escucha el canal para decodificar *RTS* y determinar la duración de la trama. Pueden ocurrir los siguientes casos que ya se han contemplado con anterioridad: a) un nodo de clase 2 realiza una transmisión con éxito; b) varios nodos de clase 2 colisionan.
- 1D** RN_1 y el resto de nodos de clase 1 y 2 están INACTIVOS, en el mismo ciclo que RN_1 está en *awake*, $i_1 = k_1 = i_2 = k_2 = 0$.

7.3.5 Energía consumida en *awake* por RN_1

A continuación se expone las expresiones utilizadas en el cálculo de la energía de acuerdo a los escenarios correspondientes a los ciclos mencionados en el apartado anterior.

Consumo energético en los ciclos del tipo 1A

El consumo energético en los ciclos del tipo 1A, se obtiene a partir de la suma de las expresiones (7.7) y (7.8) y (7.9). La adición de los resultados de las expresiones anteriores, nos arroja el consumo energético en el ciclo 1A, tal como se observa en (7.6).

$$E_{aw} [1A] = E_{tx,s}^{aw} [1A] + E_{tx,f}^{aw} [1A] + E_{oh}^{aw} [1A] \quad (7.6)$$

donde $E_{tx,s}^{aw} [1A]$, $E_{tx,f}^{aw} [1A]$ y $E_{oh}^{aw} [1A]$, son los términos de consumo de energía cuando el RN transmite con éxito, transmite con falla (colisión) y escucha transmisiones de otro nodos, respectivamente.

Durante una transmisión exitosa, el consumo $E_{tx,s}^{aw} [1A]$ está dado por,

$$E_{tx,s}^{aw} [1A] = \sum_{i=1}^{Q_1} \sum_{k=1}^{N_1} \pi_1(i, k) P_{s_1, k} [E_1^{aw} - (\alpha_1 t_{DATA} + BT_{s_1, k}) P_{1, rx}] , \quad (7.7)$$

$$E_1^{aw} = [T - T_{sync} - (t_{RTS} + t_{CTS} + t_{ACK} + 4D_p)] P_{1, rx} .$$

donde T es la duración del ciclo.

Cuando ocurren colisiones, la energía $E_{tx,f}^{aw} [1A]$ se obtiene con,

$$E_{tx,f}^{aw} [1A] = \sum_{i=1}^{Q_1} \sum_{k=1}^{N_1} \pi_1(i, k) P_{f_1, k} [E_2^{aw} - BT_{f_1, k} P_{1, rx}] , \quad (7.8)$$

$$E_2^{aw} = [T - T_{sync} - (t_{RTS} + 2D_p)] P_{1, rx} .$$

El consumo de energía debido al *overhearing*, $E_{oh}^{aw} [1A]$, se determina con,

$$E_{oh}^{aw} [1A] = \sum_{i=1}^{Q_1} \sum_{k=1}^{N_1} \pi_1(i, k) k P_{s_1, k} [E_3^{aw} - f_{1, k} t_{DATA} (P_{1, rx} - P_{sl})] \quad (7.9)$$

$$+ \sum_{i=1}^{Q_1} \sum_{k=2}^{N_1} \pi_1(i, k) \hat{P}_{f_1, k} (T - T_{sync}) P_{1, rx} .$$

$$E_3^{aw} = (T - T_{sync}) P_{1, rx} - (t_{CTS} + t_{ACK} + 3D_p) (P_{1, rx} - P_{sl}) , \quad (7.10)$$

$$\hat{P}_{f_1, k} = \sum_{i=1}^{W_1} \left[\sum_{n=2}^k \binom{k}{n} \left(\frac{1}{W_1} \right)^n \left(\frac{W_1 - i}{W_1} \right)^{k-n+1} \right] ,$$

Se supone que $\widehat{P}_{f_{1,k}}$ es la probabilidad de que otros nodos colisionen sus paquetes en ciclos donde el RN_1 está activo. $\widehat{P}'_{f_{1,k}}$ define la probabilidad de que uno de los k nodos, diferente al RN_1 , gane el acceso al canal pero transmita con colisión, cuando el RN_1 está activo. P_{sl} es el nivel de potencia en modo de reposo.

Durante el consumo debido a *overhearing* es necesario saber cuánto tiempo estará en reposo el RN mientras se produce la transmisión de otro nodo. Al terminar dicha transmisión, el RN volverá al estado *awake*. Por eso, es importante estimar la duración de la trama que se está transmitiendo, cuya duración depende del tamaño o cantidad de paquetes agregados.

El parámetro $f_{1,k}$, es el tamaño promedio en paquetes de la trama que el RN_1 , o cualquier otro nodo de la misma clase, transmitiría, condicionado a que contienda con otros k nodos en el mismo ciclo, y se determina con las siguientes expresiones:

$$f_{1,k} = \frac{1}{G_{k_1}} \sum_{i=1}^{Q_1} \alpha_1 \cdot \pi_1(i, k), \quad (7.11)$$

$$G_{k_1} = \sum_{i=1}^{Q_1} \pi_1(i, k).$$

$f_{1,k} = 1$ si se envía un solo paquete por trama (modo de transmisión SPT).

Consumo energético en los ciclos del tipo 1B

El consumo energético en los ciclos del tipo 1B, se obtiene con la expresión (7.12).

$$E_{aw}[1B] = \sum_{k=1}^{N_1} \pi_1(0, k) k P_{s_{1,k-1}} [E_3^{aw} - f_{1,k-1} t_{DATA} (P_{1,rx} - P_{sl})] + \sum_{k=2}^{N_1} \pi_1(0, k) \widehat{P}'_{f_{1,k}} (T - T_{sync}) P_{1,rx}. \quad (7.12)$$

$$\widehat{P}'_{f_{1,k}} = \sum_{i=1}^{W_1} \left[\sum_{n=2}^k \binom{k}{n} \left(\frac{1}{W_1} \right)^n \left(\frac{W_1 - i}{W_1} \right)^{k-n} \right]. \quad (7.13)$$

donde, $\widehat{P}'_{f_1,k}$, define la probabilidad de que uno de los k nodos, diferente al RN_1 , gane el acceso al canal pero transmita con colisión, cuando el RN_1 está inactivo.

Consumo energético en los ciclos del tipo 1C

El consumo energético en los ciclos del tipo 1C, se obtiene con la expresión (7.14). El RN_1 está en *awake* desde el principio de ciclo, se pone en reposo cuando escucha la transmisión de un nodo de clase 2, y se vuelve a despertar al final de esta.

$$\begin{aligned}
 E_{aw}[1C] &= \sum_{i=1}^{Q_2} \sum_{k=1}^{N_2} \pi_2(i, k) (k + 1) P_{s_2,k} [E_3^{aw} - f_{2,k} t_{DATA} (P_{1,rx} - P_{sl})] \\
 &+ \sum_{k=1}^{N_2} \pi_2(0, k) k P_{s_2,k-1} [E_3^{aw} - f_{2,k-1} t_{DATA} (P_{1,rx} - P_{sl})] \\
 &+ \sum_{i=1}^{Q_2} \sum_{k=2}^{N_2} \pi_2(i, k) \widehat{P}'_{f_2,k} (T - T_{sync}) P_{1,rx} \\
 &+ \sum_{k=2}^{N_2} \pi_2(0, k) \widehat{P}'_{f_2,k} (T - T_{sync}) P_{1,rx}.
 \end{aligned} \tag{7.14}$$

Cada uno de los términos de la expresión anterior indican el consumo de energía de acuerdo a los posibles eventos que pueden ocurrir. El primer término expresa la energía consumida cuando uno de los $k + 1$ nodos activos (el RN_2 y otros k) transmite exitosamente; el segundo término define el consumo energético cuando uno de los k nodos activos diferentes al RN_2 ha transmitido con éxito, en un ciclo con el RN_2 inactivo; el tercer y cuarto términos indican el consumo cuando dos o más de los k nodos, diferentes al RN_2 , gane el acceso al canal pero transmita con colisión, cuando el RN_2 está activo o inactivo, respectivamente.

Note que la distribución de probabilidad estacionaria utilizada es $\pi_2(i, k)$, por tanto, el tamaño promedio de la trama, $f_{2,k}$, se calcula como se indica en

la expresión (7.15).

$$f_{2,k} = \frac{1}{G_{2,k}} \sum_{i=1}^{Q_2} \alpha_2 \cdot \pi_2(i, k) ,$$

$$G_{2,k} = \sum_{i=1}^{Q_2} \pi_2(i, k) ,$$
(7.15)

donde $\alpha_2 = \min(i, F_2)$. Note que si $f_{2,k} = 1$, se envía un solo paquete por trama (modo de transmisión SPT).

Las probabilidades de fallo en la transmisión $\hat{P}_{f_{2,k}}$ y $\hat{P}'_{f_{2,k}}$, se calculan con las expresiones (7.10) y (7.13), respectivamente, pero considerando el parámetro de la ventana de contienda de los nodos de clase 2 (W_2).

Consumo energético en los ciclos del tipo 1D

El consumo energético en los ciclos del tipo 1D, se obtiene con la expresión (7.16). En este ciclo se contabiliza el gasto de energía cuando no hay actividad en los nodos.

$$E_{aw}[1D] = \pi_1(0,0)\pi_2(0,0) (T - T_{sync}) P_{1,rx} .$$
(7.16)

Consumo en awake para RN_1

El valor final de energía consumida está dado por las expresiones de (7.17), donde se observa que consiste en la suma de los diferentes consumos energéticos en los ciclos considerados anteriormente.

$$E_{1,aw} = E_{aw}[1A] + E_{aw}[1B] + E_{aw}[1C] R_{1,0} + E_{aw}[1D] ,$$

$$E_{1,aw} = E_{tx,s}^{aw}[1A] + E_{tx,f}^{aw}[1A] + E_{oh}^{aw}[1A] + E_{aw}[1B] + E_{aw}[1C] R_{1,0} + E_{aw}[1D] .$$
(7.17)

Note que $E_{aw}[1C]$ se ha de multiplicar por el factor $R_{1,0}$, que define la fracción de ciclos donde los nodos de la clase 1 están inactivos. Recuerde que las transmisiones, en este ciclo, son debidas a los nodos de clase 2, en consecuencia, los nodos de clase 1 tendrán que estar inactivos durante dicho proceso de transmisión.

7.3.6 Escenario de consumo en estado *awake* para la clase 2

Para los nodos de clase 2, en particular para el RN_2 , se consideran los siguientes ciclos:

- 2A** Los nodos de clase 1 están INACTIVOS ($i_1 = 0, k_1 = 0$), pero RN_2 y otros nodos de clase 2 están activos ($i_2 > 0, k_2 \geq 0$): los nodos de clase 2 acceden al canal en el mismo ciclo que RN_2 está en *awake*. El acceso al canal puede ser del mismo RN_2 , o bien de otros nodos de clase 2. En el primer caso, el RN_2 realiza la detección del canal o el *channel sensing*, y pueden ocurrir los casos que ya se han contemplado con anterioridad: a) el RN_2 realiza una transmisión con éxito; b) el RN_2 colisiona; c) otro nodo de clase 2 realiza una transmisión con éxito; d) otros nodos de clase 2 colisionan.

- 2B** Los nodos de clase 1 están INACTIVOS, el RN_2 está también inactivo, pero otros nodos de clase 2 están activos ($i_2 = 0, k_2 > 0$). Los nodos de clase 2 acceden al canal en el mismo ciclo que RN_2 está en *awake*. El acceso al canal solo puede ser de otros nodos de clase 2. El RN_2 escucha el canal para decodificar *RTS* y determinar la duración de la trama. Pueden ocurrir los casos que ya se han contemplado con anterioridad: a) otro nodo de clase 2 realiza una transmisión con éxito; b) otros nodos de clase 2 colisionan.

- 2C** Los nodos de clase 1 están ACTIVOS ($i_1 \geq 0, k_1 \geq 0$). El RN_2 escucha el canal para decodificar *RTS* y determinar la duración de la trama. Pueden ocurrir los siguientes casos que ya se han contemplado con anterioridad: a) un nodo de clase 1 realiza una transmisión con éxito; b) varios nodos de clase 1 colisionan.

- 2D** RN_2 y el resto de nodos de clase 1 y 2 están INACTIVOS, en el mismo ciclo que RN_2 está en *awake*, $i_1 = k_1 = i_2 = k_2 = 0$. En uno de estos ciclos podrían coincidir el RN_1 y RN_2 en *awake*.

7.3.7 Energía consumida en *awake* por RN_2

A continuación se expone las expresiones utilizadas en el cálculo de la energía de acuerdo a los escenarios correspondientes a los ciclos mencionados en el apartado anterior.

Consumo energético en los ciclos del tipo 2A

El consumo energético en los ciclos del tipo 2A, se obtiene a partir de la suma de las expresiones (7.19) y (7.20) y (7.21). La adición de los resultados de las expresiones anteriores, nos arroja el consumo energético, tal como se observa en (7.18).

$$E_{aw} [2A] = E_{tx,s}^{aw} [2A] + E_{tx,f}^{aw} [2A] + E_{oh}^{aw} [2A] \quad (7.18)$$

donde $E_{tx,s}^{aw} [2A]$, $E_{tx,f}^{aw} [2A]$ y $E_{oh}^{aw} [2A]$, son los términos de consumo de energía cuando el RN transmite con éxito, transmite con falla (colisión) y escucha transmisiones de otro nodos, respectivamente.

Durante una transmisión exitosa, el consumo $E_{tx,s}^{aw} [2A]$ está dado por,

$$E_{tx,s}^{aw} [2A] = \sum_{i=1}^{Q_2} \sum_{k=1}^{N_2} \pi_2(i, k) P_{s_2,k} [E_{1,2}^{aw} - (\alpha_2 t_{DATA} + BT_{s_2,k}) P_{2,rx}] , \quad (7.19)$$

$$E_{1,2}^{aw} = [T - T_{sync} - (t_{RTS} + t_{CTS} + t_{ACK} + 4D_p)] P_{2,rx} ,$$

$$\alpha_2 = \min(i, F_2) .$$

Cuando ocurren colisiones, la energía $E_{tx,f}^{aw} [2A]$ se obtiene con,

$$E_{tx,f}^{aw} [2A] = \sum_{i=1}^{Q_2} \sum_{k=1}^{N_2} \pi_2(i, k) P_{f_2,k} [E_{2,2}^{aw} - BT_{f_2,k} P_{2,rx}] , \quad (7.20)$$

$$E_{2,2}^{aw} = [T - T_{sync} - (t_{RTS} + 2D_p)] P_{2,rx} .$$

El consumo de energía debido al *overhearing*, $E_{oh}^{aw}[2A]$, se determina con,

$$\begin{aligned}
 E_{oh}^{aw}[2A] &= \sum_{i=1}^{Q_2} \sum_{k=1}^{N_2} \pi_2(i, k) k P_{s_2, k} [E_{3,2}^{aw} - f_{2,k} t_{DATA} (P_{2,rx} - P_{sl})] \\
 &+ \sum_{i=1}^{Q_2} \sum_{k=2}^{N_2} \pi_2(i, k) \hat{P}_{f_2, k} (T - T_{sync}) P_{2,rx}, \\
 E_{3,2}^{aw} &= (T - T_{sync}) P_{2,rx} - (t_{CTS} + t_{ACK} + 3D_p) (P_{2,rx} - P_{sl}).
 \end{aligned} \tag{7.21}$$

Se supone que $\hat{P}_{f_2, k}$ es la probabilidad de que otros nodos colisionen sus paquetes en ciclos donde el RN_2 está activo. $\hat{P}'_{f_2, k}$ define la probabilidad de que uno de los k nodos, diferente al RN_2 , gane el acceso al canal pero transmita con colisión, cuando el RN_2 está activo. P_{sl} es el nivel de potencia en reposo.

Como se ha mencionado antes, durante el consumo debido a *overhearing* es necesario saber cuánto tiempo el nodo estará en reposo a la escucha de la transmisión de otro nodo, y en espera de que dicha transmisión concluya para poder despertar durante el resto del ciclo. Por eso, es importante estimar la duración de la trama que se está transmitiendo, cuya duración depende del tamaño o cantidad de paquetes agregados.

El parámetro $f_{2,k}$, es el tamaño promedio en paquetes de la trama que el RN_2 , o cualquier otro nodo de la misma clase, transmitiría, condicionado a que contienda con otros k nodos en el mismo ciclo, y se determina con la expresiones de (7.15). Hay que recordar que con $f_{2,k} = 1$ se envía un solo paquete por trama (modo de transmisión SPT).

Consumo energético en los ciclos del tipo 2B

El consumo energético en los ciclos del tipo 2B, se obtiene con la expresión (7.22).

$$\begin{aligned}
 E_{aw}[2B] &= \sum_{k=1}^{N_2} \pi_2(0, k) k P_{s_2, k-1} [E_{3,2}^{aw} - f_{2,k-1} t_{DATA} (P_{2,rx} - P_{sl})] \\
 &+ \sum_{k=2}^{N_2} \pi_2(0, k) \hat{P}'_{f_2, k} (T - T_{sync}) P_{2,rx}.
 \end{aligned} \tag{7.22}$$

donde, $\hat{P}'_{f_2,k}$, define la probabilidad de que uno de los k nodos, diferente al RN_2 , gane el acceso al canal pero transmita con colisión, cuando el RN_2 está inactivo.

Consumo energético en los ciclos del tipo 2C

El consumo energético en los ciclos del tipo 2C, se obtiene con la expresión (7.23). El RN_2 está en *awake* desde el principio de ciclo, se pone en reposo cuando escucha la transmisión de un nodo de clase 1, y se vuelve a despertar al final de esta.

$$\begin{aligned}
 E_{aw}[2C] = & \sum_{i=1}^{Q_1} \sum_{k=1}^{N_1} \pi_1(i, k) (k + 1) P_{s_1,k} [E_{3,2}^{aw} - f_{1,k} t_{DATA} (P_{2,rx} - P_{sl})] \\
 & + \sum_{k=1}^{N_1} \pi_1(0, k) k P_{s_1,k-1} [E_{3,2}^{aw} - f_{1,k-1} t_{DATA} (P_{2,rx} - P_{sl})] \\
 & + \sum_{i=1}^{Q_1} \sum_{k=2}^{N_1} \pi_1(i, k) \hat{P}_{f_1,k} (T - T_{sync}) P_{2,rx} \\
 & + \sum_{k=2}^{N_1} \pi_1(0, k) \hat{P}'_{f_1,k} (T - T_{sync}) P_{2,rx}.
 \end{aligned} \tag{7.23}$$

Cada uno de los términos de la expresión anterior indican el consumo de energía de acuerdo a los posibles eventos que pueden ocurrir. El primer término expresa la energía consumida cuando uno de los $k + 1$ nodos activos (el RN_1 y otros k) transmite exitosamente; el segundo término define el consumo energético cuando uno de los k nodos activos diferentes al RN_1 ha transmitido con éxito, en un ciclo con el RN_1 inactivo; el tercer y cuarto términos indican el consumo cuando uno de los k nodos, diferente al RN_1 , gane el acceso al canal pero transmita con colisión, cuando el RN_1 está activo o inactivo, respectivamente.

Note que la distribución de probabilidad estacionaria utilizada es $\pi_1(i, k)$, por tanto, el tamaño promedio de la trama, $f_{1,k}$ se determina con la expresión (7.11). Las probabilidades de fallo en la transmisión $\hat{P}_{f_1,k}$ y $\hat{P}'_{f_1,k}$ (expresiones (7.10) y (7.13), respectivamente), se calculan con W_1 .

Consumo energético en los ciclos del tipo 2D

El consumo energético en los ciclos del tipo 2D, se obtiene con la expresión (7.25). En este ciclo se contabiliza el gasto de energía cuando no hay actividad en los nodos.

$$E_{aw}[2D] = \pi_1(0,0)\pi_2(0,0) (T - T_{sync}) P_{2,rx} . \quad (7.24)$$

Consumo en awake para RN₂

El valor final de energía consumida está dado por las expresiones de (7.25), donde se observa que consiste en la suma los diferentes consumos energéticos en los ciclos considerados.

$$\begin{aligned} E_{2,aw} &= (E_{aw}[2A] + E_{aw}[2B]) R_{1,0} + E_{aw}[2C] + E_{aw}[2D] , \\ E_{2,aw} &= \left(E_{tx,s}^{aw}[2A] + E_{tx,f}^{aw}[2A] + E_{oh}^{aw}[2A] + E_{aw}[2B] \right) R_{1,0} \\ &\quad + E_{aw}[2C] + E_{aw}[2D] . \end{aligned} \quad (7.25)$$

Note que $E_{aw}[2A]$ y $E_{aw}[2B]$ se han de multiplicar por el factor $R_{1,0}$, que define la fracción de ciclos donde los nodos de la clase 1 están inactivos. Recuerde que las transmisiones, en estos ciclos, son debidas a los nodos de clase 2, en consecuencia, los nodos de clase 1 tendrán que estar inactivos durante dicho proceso de transmisión.

7.3.8 Consumo promedio de energía durante los ciclos *normal*

Usualmente, para ahorrar energía, los nodos se desactivan y entran en una fase de reposo durante el resto del ciclo de transmisión, después de una transmisión exitosa o fallida. Este tipo de ciclos se le denominan ciclos *normal*. Las siguiente expresión se utilizan para determinar el consumo de energía del RN durante los ciclos *normal*. Además, en este cálculo de consumo energético, se incluye el consumo debido al *overhearing* durante el periodo *data*.

$$E_{nr} = E_{tx,s}^{nr} + E_{tx,f}^{nr} + E_{oh}^{nr} . \quad (7.26)$$

donde $E_{tx,s}^{nr}$, $E_{tx,f}^{nr}$ y E_{oh}^{nr} , son los términos de consumo de energía cuando el RN transmite con éxito, transmite con falla (colisión) e incurre en (overhearing), respectivamente.

Para los nodos de clase 1

Cuando se transmite con éxito, el consumo $E_{tx,s}^{nr}$, para los nodos de clase 1, se determina con,

$$\begin{aligned} E_{tx,s}^{nr} &= \sum_{i=1}^{Q_1} \sum_{k=0}^{M_1} \pi_1(i, k) P_{s_1,k} [E_1^{nr} - (\alpha_1 t_{DATA} + BT_{s_1,k}) P_{sl}] , \\ E_1^{nr} &= [T - T_{sync} - (t_{RTS} + t_{CTS} + t_{ACK} + 4D_p)] P_{sl} , \\ \alpha_1 &= \min(i, F_1) . \end{aligned} \quad (7.27)$$

Cuando ocurre una transmisión fallida, el consumo $E_{tx,f}^{nr}$, para los nodos de clase 1, viene dada por

$$\begin{aligned} E_{tx,f}^{nr} &= \sum_{i=1}^{Q_1} \sum_{k=1}^{M_1} \pi_1(i, k) P_{f_1,k} [E_2^{nr} - BT_{f_1,k} P_{sl}] , \\ E_2^{nr} &= [T - T_{sync} - (t_{RTS} + 2D_p)] P_{sl} . \end{aligned} \quad (7.28)$$

El consumo por *overhearing* (E_{oh}^{nr}), para los nodos de clase 1, se obtiene con

$$\begin{aligned} E_{oh}^{nr} &= \sum_{i=1}^{Q_1} \sum_{k=1}^{M_1} \pi_1(i, k) k P_{s_1,k} [(E_3^{nr} + BT_{s_1,k} P_{1,rx}) + (E_4^{nr} - BT_{s_1,k} P_{sl})] \\ &+ \sum_{i=1}^{Q_1} \sum_{k=2}^{M_1} \pi_1(i, k) \hat{P}_{f_1,k} [(E_3^{nr} + BT_{f_1,k} P_{1,rx}) + (E_4^{nr} - BT_{f_1,k} P_{sl})] \\ &+ \sum_{k=0}^{M_1} \pi_1(0, k) (T - T_{sync}) P_{sl} , \\ E_3^{nr} &= [D_p + t_{RTS}] P_{1,rx} , \\ E_4^{nr} &= [T - T_{sync} - D_p - t_{RTS}] P_{sl} . \end{aligned} \quad (7.29)$$

El RN se va a reposo cuando está inactivo, $i = 0$. Note que en E_{nr} solo se considera la energía consumida adicional a $E_{tx,s}^d$ y $E_{tx,f}^d$ en los ciclos *normal*.

Para los nodos de clase 2

Para los nodos de la clase 2, los consumos de energía debido a las transmisiones con éxito ($E_{tx,s}^{nr}$), con colisión ($E_{tx,f}^{nr}$) y por *overhearing* (E_{oh}^{nr}), se calculan de igual forma, pero se utiliza en los cálculos la distribución de probabilidad estacionaria correspondiente a los nodos de clase 2 (π_2). Además, se debe considerar la multiplicación por el factor $R_{1,0} = \pi_1(0,0)$, siendo este la distribución de probabilidad estacionaria de que no haya nodos activos de la clase 1 en un ciclo (fracción de ciclos en los que los nodos de clase 1 están inactivos).

Cuando se transmite con éxito, el consumo $E_{tx,s}^{nr}$, para los nodos de clase 2, se determina con,

$$\begin{aligned}
 E_{tx,s}^{nr} &= \sum_{i=1}^{Q_2} \sum_{k=0}^{M_2} \pi_1(i,k) R_{1,0} P_{s_2,k} [E_1^{nr} - (\alpha_2 t_{DATA} + BT_{s_1,k}) P_{sl}] , \\
 E_1^{nr} &= [T - T_{sync} - (t_{RTS} + t_{CTS} + t_{ACK} + 4D_p)] P_{sl} , \\
 \alpha_2 &= \min(i, F_2) .
 \end{aligned} \tag{7.30}$$

Cuando ocurre una transmisión fallida, el consumo $E_{tx,f}^{nr}$ para los nodos de clase 2, viene dada por,

$$\begin{aligned}
 E_{tx,f}^{nr} &= \sum_{i=1}^{Q_2} \sum_{k=1}^{M_2} \pi_1(i,k) R_{1,0} P_{f_2,k} [E_2^{nr} - BT_{f_2,k} P_{sl}] , \\
 E_2^{nr} &= [T - T_{sync} - (t_{RTS} + 2D_p)] P_{sl} .
 \end{aligned} \tag{7.31}$$

El consumo por *overhearing* (E_{oh}^{nr}), para los nodos de clase 2, se obtiene con,

$$\begin{aligned}
 E_{oh}^{nr} &= \sum_{i=1}^{Q_2} \sum_{k=1}^{M_2} \pi_1(i, k) R_{1,0} k P_{s_2, k} \left[(E_3^{nr} + BT_{s_1, k} P_{2, rx}) + (E_4^{nr} - BT_{s_2, k} P_{sl}) \right] \\
 &+ \sum_{i=1}^{Q_2} \sum_{k=2}^{M_2} \pi_1(i, k) R_{1,0} \hat{P}_{f_2, k} \left[(E_3^{nr} + BT_{f_1, k} P_{2, rx}) + (E_4^{nr} - BT_{f_2, k} P_{sl}) \right] \\
 &+ \sum_{k=0}^{M_2} \pi_1(0, k) R_{1,0} (T - T_{sync}) P_{sl}, \\
 E_3^{nr} &= [D_p + t_{RTS}] P_{2, rx}, \\
 E_4^{nr} &= [T - T_{sync} - D_p - t_{RTS}] P_{sl}.
 \end{aligned} \tag{7.32}$$

El RN se va a reposo cuando está inactivo, $i = 0$. Note que en E_{nr} solo se considera la energía consumida adicional a $E_{tx, s}^d$ y $E_{tx, f'}^d$ en los ciclos *normal*.

7.3.9 Consumo promedio total de energía

Para calcular la energía promedio total, se suman las contribuciones de consumo de energía de los periodos que se han considerado anteriormente, y se determina con la ecuación (7.33).

$$E = E_{sc} + E_d + E_{sl}. \tag{7.33}$$

En la expresión anterior, E_{sc} se determina de acuerdo a lo visto en el apartado 7.3.1. El consumo E_d se calcula como se ha visto en el apartado 7.3.2.

Para determinar el último término de (7.33), que se refiere al consumo durante el periodo *sleep* (E_{sl}), se utiliza la siguiente expresión:

$$E_{sl} = E_{nr} \frac{(N_{aw} - 1)}{N_{aw}} + E_{aw} \frac{1}{N_{aw}}. \tag{7.34}$$

Recuerde que en el periodo *sleep*, un nodo podrá irse a un modo o una fase de reposo para ahorrar energía, pero también, el nodo podrá no reposar y permanecer en vigilia o despertarse, para recibir paquetes SYNC y mantener

la sincronización con sus nodos vecinos. Observe que N_{aw} es la variable que determina la fracción de ciclos en los cuales el nodo reposará o permanecerá despierto. Finalmente, la suma del gasto energético debido a las actividades mencionadas en dicho periodo, es lo que refleja la expresión (7.34).

7.4 Resultados numéricos

7.4.1 Escenarios y configuración de parámetros

Los resultados analíticos se han obtenido con el modelo de las dos cadenas Markov de dos dimensiones (2D-DTMC). Los resultados de simulación se han obtenido por medio de un simulador de eventos discretos personalizado desarrollado en lenguaje C, que imita el comportamiento físico del sistema (esquemas SPT o APT). Es decir, en cada ciclo un nodo recibe paquetes de acuerdo con una distribución discreta dada, compite por el acceso al canal con otros nodos si tiene paquetes en la cola, y si gana, transmite una trama de acuerdo con el esquema de transmisión (un paquete para SPT o un lote de paquetes para APT). Los resultados de la simulación son completamente independientes de los obtenidos por el modelo analítico.

La configuración de los parámetros para el escenario de la WSN, se realiza de acuerdo a las especificaciones que se muestran en la Tabla 7.1 .

Tabla 7.1: Configuración de parámetros [1].

Duración del ciclo (T)	60 ms	Retardo de propagación (D_p)	0.1 μ s
t_{SYNC} , t_{RTS} , t_{CTS} and t_{ACK}	0.18 ms	Tiempo de slot (t_s)	0.1 ms
t_{DATA}	1.716 ms	Ventana de contienda (W)	128 slots
Tamaño del paquete DATA (S)	50 bytes	Tamaño de la cola (Q)	10 paquetes
Periodo de Tx de paquete SYNC (N_{sc})	20 ciclos	Periodo awake (N_{aw})	80 superciclos
Potencia de transmisión (P_{tx})	52 mW	Potencia de recepción (P_{rx})	59 mW
Potencia consumida en reposo (P_{sl})	$P_{sl} = 3\mu W$		
Tamaño máximo de trama	$F = \{2, 5, 10\}$ paquetes		
Número de nodos	Tasa de arribo de los paquetes (paquetes/s)		
$N_1 = 5$, $N_2 = 20$	$\lambda_1 = \{0.5\}$, $\lambda_2 = [0.5, 4.5]$		

En las siguientes secciones se presentan figuras con los resultados derivados del modelo analítico y de simulación. En las figuras, las líneas con marcadores representan los resultados analíticos, mientras que los resultados de simulación se representan solo con marcadores.

7.4.2 Componentes del consumo energético.

En esta sección se presentan los resultados de las componentes del consumo energético; se realiza un desglose de las contribuciones debidas al consumo por la transmisión de los datos en el periodo *data*, y las contribuciones debidas a las fases de operación *awake* y *normal*, durante el periodo *sleep*.

En la Fig. 7.3, se muestran dichos consumos de energía para los nodos de clase 1, configurados para transmitir en SPT. Se observa un comportamiento constante en el consumo de las tres componentes de energía, y una contribución más significativa de los nodos que entran en fase *awake*, durante el periodo *sleep*, respecto al periodo *data*, y la fase o ciclo de operación *normal*.

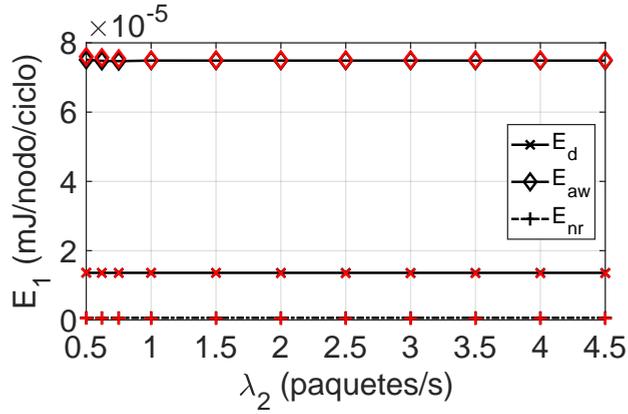


Figura 7.3: Componentes del consumo energético, para la clase 1, durante el periodo *data*, y las fases *awake* y *normal*. Modo de transmisión SPT (ambas clases) y $Q_1 = Q_2 = 10$.

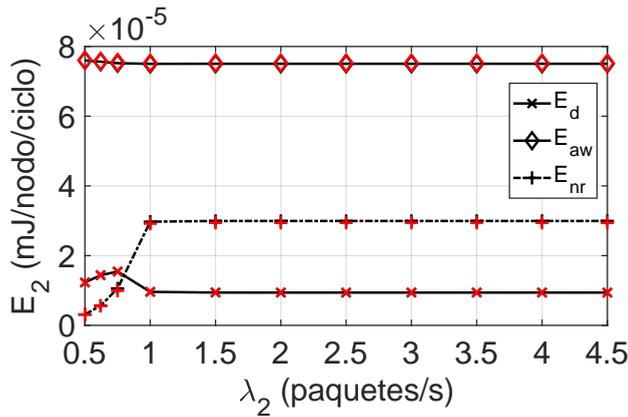


Figura 7.4: Componentes del consumo energético, para la clase 2, durante el periodo *data*, y las fases *awake* y *normal*. Modo de transmisión SPT (ambas clases) y $Q_1 = Q_2 = 10$.

En la Fig. 7.4, se muestran los consumos de energía para los nodos de clase 2, también bajo el esquema de transmisión SPT. En relación con la Fig. 7.3, en esta hay un aumento en el consumo en la fase de operación o ciclo *normal*, que consiste en la energía que gastan los nodos cuando se van a dormir o están en reposo, y la debida al *overhearing*. También hay una disminución en las transmisiones de los datos, evidenciado por una reducción en el consumo de la energía durante el periodo *data*. Se considera, que lo anterior, es el efecto observado como consecuencia de un incremento en la congestión, por el hecho de ser la clase no prioritaria, además de contar con un mayor número de nodos que la clase 1.

En las Figs. 7.5 y 7.6, se muestran las componentes de los consumos de energía cuando se transmite en APT, con un tamaño máximo de $F_1 = F_2 = 2$ paquetes por trama, para los nodos de clase 1 y clase 2, respectivamente. En la Fig. 7.5, se observa que prácticamente no hay cambio en los resultados para la clase 1, al compararlos con los resultados de la misma clase pero con el esquema de transmisión en SPT, que se muestran en la Fig. 7.3.

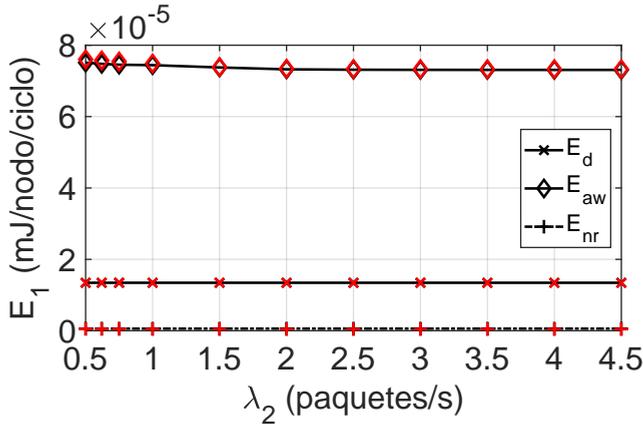


Figura 7.5: Componentes del consumo energético, para la clase 1, durante el periodo *data*, y las fases *awake* y *normal*. Modo de transmisión APT ($F_1 = F_2 = 2$) y $Q_1 = Q_2 = 10$.

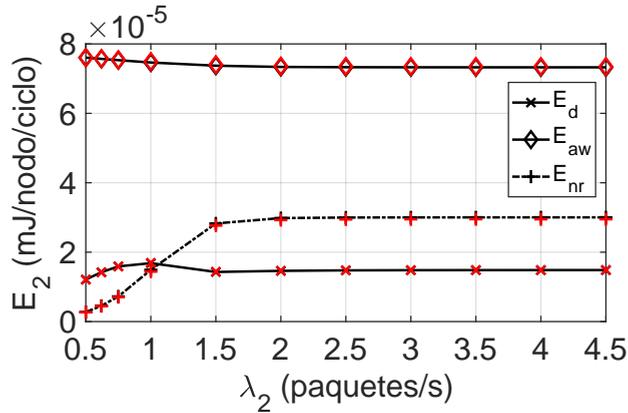


Figura 7.6: Componentes del consumo energético, para la clase 2, durante el periodo *data*, y las fases *awake* y *normal*. Modo de transmisión APT ($F_1 = F_2 = 2$) y $Q_1 = Q_2 = 10$.

Sin embargo, para la clase 2 (Fig. 7.6), se gana en una mayor transmisión de paquetes, puesto que se observa un mayor consumo de energía en el periodo *data*, cuando se compara con la Fig. 7.4, cuyos resultados corresponden al esquema de transmisión SPT. Claramente, el haber incrementado en un paquete ($F_2 = 2$) la transmisión de la información, impacta positivamente en aliviar la congestión del medio de transmisión. En el mismo sentido, comparando con los resultados de la Fig. 7.4, se observa que en la Fig. 7.6 se alcanzan los valores máximos de consumo de energía durante el periodo *data* y la fase *normal*, a tasas mayores de tráfico.

Las Figs. 7.7 y 7.8, muestran el consumo de energía considerando el esquema APT, cuando el tamaño máximo de trama que un nodo puede transmitir es de $F_1 = F_2 = 5$ paquetes, para los nodos de la clase 1 y clase 2, respectivamente.

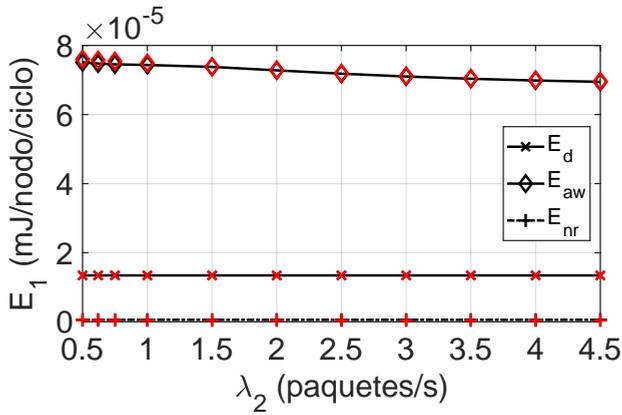


Figura 7.7: Componentes del consumo energético, para la clase 1, durante el periodo *data*, y las fases *awake* y *normal*. Modo de transmisión APT ($F_1 = F_2 = 5$) y $Q_1 = Q_2 = 10$.

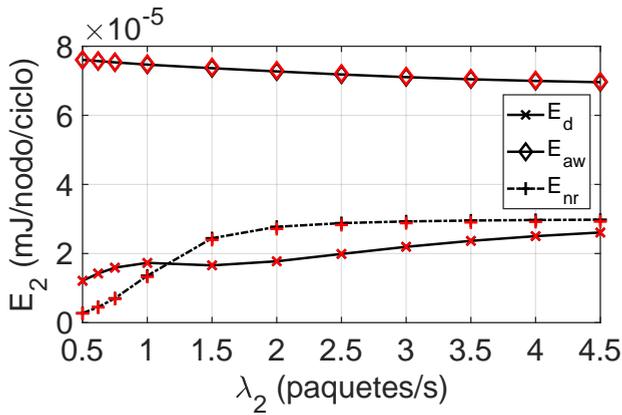


Figura 7.8: Componentes del consumo energético, para la clase 2, durante el periodo *data*, y las fases *awake* y *normal*. Modo de transmisión APT ($F_1 = F_2 = 5$) y $Q_1 = Q_2 = 10$.

En la Fig. 7.7 se observa una disminución del consumo *awake* hacia el final de gráfica, cuando el tráfico se incrementa.

Por otro lado, el consumo debido a la inactivación del nodo en la fase de operación *normal*, es un consumo muy poco significativo. Esta tendencia se ha venido observando en todas las figuras correspondientes a los resultados para la clase 1. Lo anterior, se considera que es debido a que prácticamente no existe contienda, al ser la clase 1 la clase prioritaria y a la poca cantidad de nodos de esta clase. Como prácticamente no existe contienda, el paquete o la trama que llega a la cola, se transmite de inmediato, desactivándose el nodo enseguida durante el resto del ciclo para ahorrar energía, pero durante un tiempo menor, porque al ser una transmisión exitosa, el nodo tiene que esperar a que termine la transmisión de la trama para inactivarse.

Claramente es un consumo menor que cuando se desactivan los nodos posterior a que han fallado en la transmisión o han perdido la contienda. En este último caso, no necesitan esperar para inactivarse, durando más tiempo dormidos y consumiendo por más tiempo esa energía mínima de reposo. En la Fig. 7.8, y en todas las que se han visto correspondientes a los nodos de la clase 2, se observa un consumo significativo para la fase de operación *normal*, cuando los nodos se van a dormir o caen en reposo.

Esto se debe a que existe una mayor contienda, por haber en esta clase una cantidad mayor de nodos, observándose un aumento de la misma, a medida que se incrementa el tráfico. Al haber mayor contienda, es más probable que los nodos pierdan con mayor frecuencia la contienda por el acceso al medio o que los paquetes transmitidos colisionen. Esto implica que más nodos vayan a dormir más veces inmediatamente después de transmitir con fallo o perder la contienda y, en consecuencia, haya un aumento en el consumo de la energía *normal*.

Las Figs. 7.9 y 7.10 muestran el consumo de energía considerando el esquema APT, cuando el tamaño máximo de trama que un nodo puede transmitir, en paquetes, es $F_1 = F_2 = 10$, para los nodos de la clase 1 y de clase 2, respectivamente.

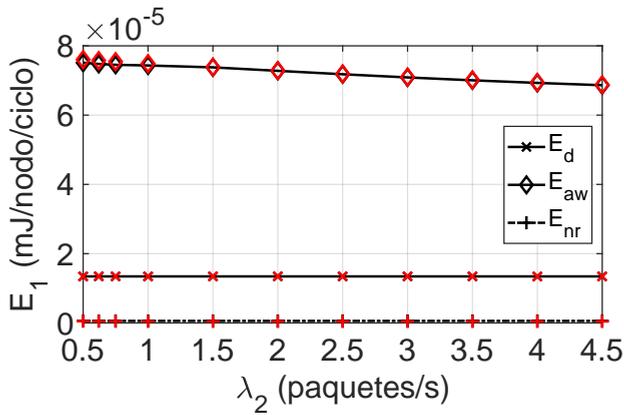


Figura 7.9: Componentes del consumo energético, para la clase 1, durante el periodo *data*, y las fases *awake* y *normal*. Modo de transmisión APT ($F_1 = F_2 = 10$) y $Q_1 = Q_2 = 10$.

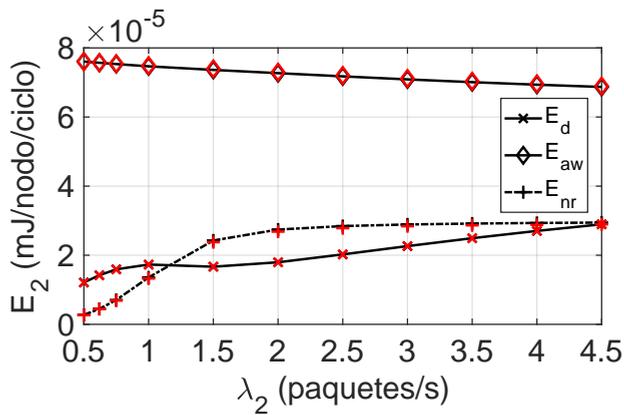


Figura 7.10: Componentes del consumo energético, para la clase 2, durante el periodo *data*, y las fases *awake* y *normal*. Modo de transmisión APT ($F_1 = F_2 = 10$) y $Q_1 = Q_2 = 10$.

De la Fig. 7.9, se puede comentar la disminución de consumo energía cuando el tráfico se incrementa. Esto se observa claramente para los casos donde se utiliza una transmisión con agregación de tráfico (APT), especialmente para $F_1 = \{5, 10\}$.

Se considera que al aumentar la eficiencia en la transmisión de la información, a medida que aumenta el número de paquetes por trama, aumenta también la probabilidad de que los nodos transmitan con éxito sus tramas, porque contribuye a descongestionar el canal de transmisión. De acuerdo al escenario explicado en 7.3.3, un nodo que se encuentra en fase *awake* y que ha transmitido exitosamente, posteriormente consume menos energía que un nodo en fase *awake* que ha transmitido con colisión. Esto, debido a que el tiempo de consumo de energía de recepción es menor cuando ha habido éxito en la transmisión. Cuando un nodo en fase *awake* falla en la transmisión, el nodo enciende su receptor anticipadamente (en comparación con una transmisión exitosa), y lo mantiene encendido durante el resto del ciclo.

Por tanto, al aumentar la frecuencia de transmisión con éxito, los nodos que entran en fase *awake* tenderán a consumir menos energía. Esto ocasiona que disminuya el consumo de energía en la fase *awake*, tal como se observa hacia el final de la curva correspondiente, en la Fig. 7.10. La energía consumida en esta fase es significativa, ya que se necesita de cierta potencia para mantener el receptor encendido (Tabla 7.1).

En la Fig. 7.10, se confirma la tendencia que se ha estado observando en el sentido de un aumento del consumo de la energía debido a la transmisión de los datos (*data*), a medida que aumenta los paquetes que se envían por trama.

7.4.3 Número mínimo de paquetes en cola (b_m) para contener por el medio

Cuando se ha estudiado el modo de de transmisión de paquetes en SPT o con agregación de tráfico (APT), se ha mencionado previo a la definición del

modelo, que los nodos que tienen al menos un paquete en la cola se consideran nodos activos. Esto significa que, al ser nodos activos, participan en el proceso de contienda para intentar transmitir su paquete. Sin embargo, es posible modificar la configuración que determina cuándo un nodo se considera activo, de tal forma, que el nodo espere a tener $b_m \geq 1$ paquetes en cola, para activarse y poder contender por el medio. Así pues, denotamos por b_m al número mínimo de paquetes en cola para que un nodo pase al estado de activo y contienda por el canal al principio de cada ciclo.

Se trata entonces, de ver de qué forma afecta en las prestaciones, cuando el nodo se espera a tener más paquetes en la cola para posteriormente transmitirlos todos en conjunto, utilizando esta nueva forma de activación de los nodos, junto con el modo de transmisión APT. Se realiza un estudio solo por simulación, y se estudian parámetros de prestaciones de consumo promedio de energía, de retardo promedio de los paquetes y probabilidad de pérdida de los paquetes.

La configuración de parámetros corresponde a lo visto en la tabla 7.1, excepto que en este estudio se considera un escenario homogéneo. Por tanto, se establece una sola clase de nodos de $N = 15$, y un número mínimo de paquetes en cola para competir por el medio de $b_m = \{1, 2, 5, 10\}$. La tasa de transmisión se establece en el siguiente en el intervalo $\lambda = [0.5, 4.5]$.

En las siguientes secciones se presentan figuras con los resultados de simulación, los cuales se representan con líneas y marcadores.

Energía Consumida

En este apartado se presentan los resultados de simulación donde se configura la WSN para que transmita paquetes en SPT y APT, considerando un tamaño máximo de trama $F = \{2, 5, 10\}$. Por otro lado, también se ha configurado para que el nodo se active o intente realizar el procedimiento de acceso al medio, cuando b_m toma valores dentro del intervalo $b_m = \{1, 2, 5, 10\}$.

En la figura 7.11, se presenta los valores de consumo energético para una

WSN homogénea que utiliza APT, considerando un número mínimo de paquetes en cola para contender por el medio, de $b_m = 1$.

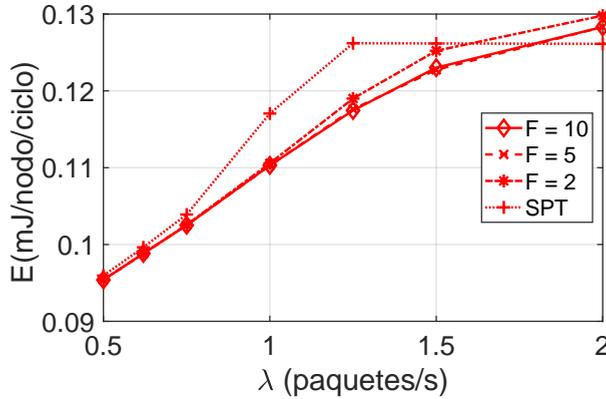


Figura 7.11: Consumo energético al variar el número máximo de paquetes que se transmiten por trama (F). El valor del número mínimo de paquetes en cola para contender por el medio se mantiene en todos los casos ($b_m = 1$). ($N = 15, Q = 10, W = 128$).

No se ve ninguna diferencia en el consumo entre los distintos valores de F , excepto para $F=2$, donde incluso no es tan significativo. Si es mayor la diferencia con respecto al modo SPT, donde el consumo sí es mayor, pero solo en el segundo tercio de la curva. De hecho hacia al final de la curva se estabiliza su consumo energético a valores menores. En esta figura no se observa que haya mucho impacto en términos energéticos al utilizar la transmisión en APT, al menos hasta $\lambda = 2$. En este caso se ha usado $b_m = 1$, por tanto, el nodo intenta transmitir en cuanto tiene un paquete en la cola, de acuerdo al procedimiento de contienda. Esta forma es la que se ha utilizado hasta ahora.

En la figura 7.12, se muestra resultados de haber modificado la configuración del número mínimo de paquetes en cola para contender, variando el

valor de b_m .

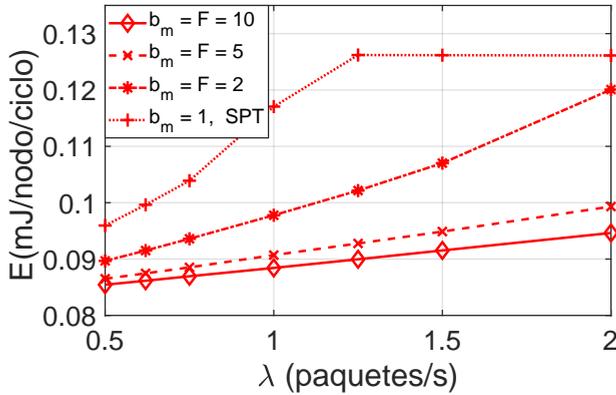


Figura 7.12: Consumo energético al variar el número mínimo de paquetes en cola para contener (b_m) y el número máximo de paquetes que se transmiten por trama (F). ($b_m = F$, $N=15$, $Q=10$, $W=128$).

En este caso, las variaciones de b_m se hicieron coincidir con el número máximo de paquetes que se transmiten por trama (F), de tal manera que $F = b_m$. Como consecuencia, en la figura se observa una disminución significativa del consumo energético, claramente siendo más eficiente el consumo a medida que aumenta F . La curva de la configuración $b_m = 1$ y SPT (un paquete por ciclo), es la misma que la correspondiente de la Fig. 7.11; sin embargo, es muy útil como referencia para ver cómo el resto de las curvas representan valores mucho más bajos de consumo energético, especialmente la curva relativa a la configuración de: $b_m = 10$ y $F = 10$.

En la Fig. 7.13 se presenta el ahorro energético (AE), que es función de b_m y F , expresado como porcentaje de ahorro respecto a la configuración con $b_m = 1$, debido a la modificación b_m y F . Para todos las configuraciones se presentan ahorros significativos, excepto para la configuración de referencia $b_m = 1$ y SPT. Observe que incluso puede lograrse un ahorro o reducción de

consumo energético de más del 30 por ciento.

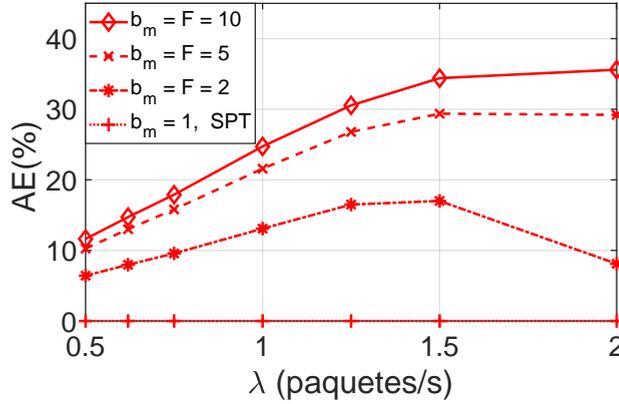


Figura 7.13: Porcentaje de ahorro energético como consecuencia de modificar el número mínimo de paquetes en cola para contener ($b_m = 1$), en combinación con el número máximo de paquetes a transmitir por trama (F). ($N=15$, $Q=10$, $W=128$).

Retardo promedio de los paquetes (D)

En la Fig. 7.14 se observa el retardo promedio de los paquetes para diferentes valores del número máximo de paquetes a transmitir por trama y para $b_m = 1$. Se observa que el retardo disminuye conforme aumenta F , siendo muy significativa la disminución para $F=\{5, 10\}$.

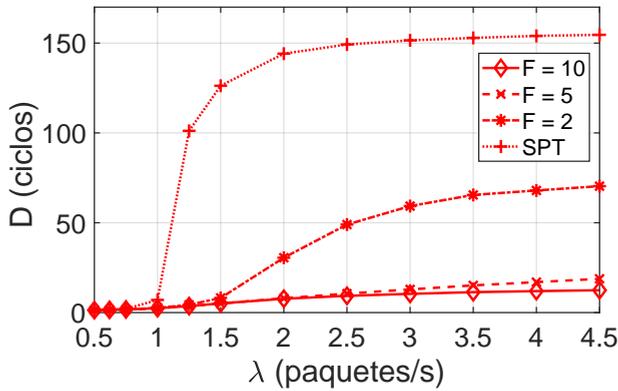


Figura 7.14: Retardo promedio de los paquetes al variar el número máximo de paquetes que se transmiten por trama (F). El valor del número mínimo de paquetes en cola para contener por el medio se mantiene en todos los casos en $b_m = 1$. ($N = 15, Q = 10, W = 128$).

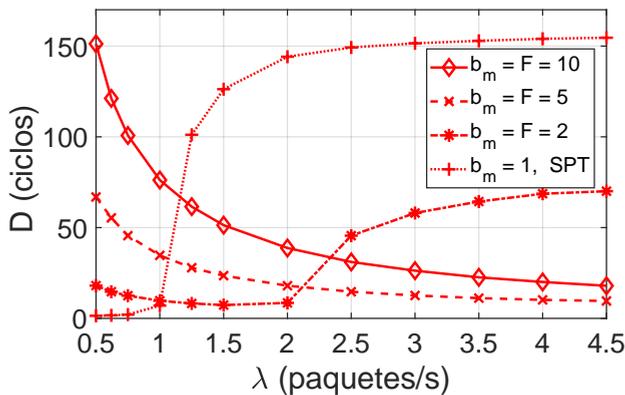


Figura 7.15: Retardo al variar el número mínimo de paquetes en cola para contener (b_m) y el número máximo de paquetes que se transmiten por trama (F). ($b_m = F, N=15, Q=10, W=128$).

En la Fig. 7.15 se muestra el retardo promedio de los paquetes, pero ahora considerando diferentes valores del número mínimo de paquetes para contener por el acceso al canal de transmisión (b_m). Se observa que en las cargas de tráfico bajas, el retardo es significativamente mayor, sobre todo para las configuraciones donde $b_m = \{5, 10\}$ y $F = \{5, 10\}$. Aunque posteriormente, al aumentar la tasa de arribo de los paquetes, el retardo tiende a estabilizarse a niveles similares que en lo observado en la Fig. 7.14. Hay que notar que al ajustar los valores de b_m y F , se logra mejores prestaciones en términos de energía, sin embargo, en términos de retardo de los paquetes, las prestaciones no mejoran, sino que incluso empeoran para cargas de tráfico bajas. Este pudiera ser el costo del efecto de tener que esperar a que se llene la cola del nodo, con 5 o 10 paquetes (dependiendo de la configuración), para dar inicio con el proceso de contienda por el acceso al medio.

Se puede apuntar que b_m podría ajustarse con la carga. Es decir, fijar $F = 10$ (por ejemplo), y ajustar b_m en función de las colisiones encontradas. A medida que disminuyen las colisiones, b_m disminuye. Cuando aumentan las colisiones, b_m aumenta. Este mecanismo adaptativo, no parece muy complejo. Con ello se consigue lo mejor de los dos mundos. Es decir, retardos bajos para bajas y altas cargas.

Probabilidad de pérdida de los paquetes por desbordamiento en el RN (P_L)

Debido a que el canal se supone libre de errores, lo que puede ocasionar pérdidas de los paquetes, es que el paquete encuentre la cola del nodo llena a su llegada, en otras palabras, se descarta el paquete por desbordamiento. El número promedio de paquetes perdidos por ciclo debido al desbordamiento de la cola del nodo es $\lambda T - \gamma_a$, donde λT es el número promedio de paquetes que arriban por ciclo, y γ_a es el número de paquetes transferidos o cursados con éxito por ciclo (definido en las expresiones de 3.5.2).

La probabilidad de pérdida de paquetes por desbordamiento de la cola

del nodo, puede determinarse con la expresión (7.35).

$$P_L = \frac{\lambda T - \gamma_a}{\lambda T} = 1 - \frac{\gamma_a}{\lambda T}. \quad (7.35)$$

Hay que notar que la pérdida de paquetes se debe solo al desbordamiento de la cola del nodo, dado que un paquete transmitido que encuentra colisiones, será retransmitido hasta que sea recibido existosamente en su destino.

En la Fig. 7.16 se muestra la probabilidad de pérdida de los paquetes por desbordamiento en la cola del RN (P_L), al variar el número máximo de paquetes que se transmiten por trama (F). El valor del número mínimo de paquetes en cola para contener por el medio se mantiene en todos los casos ($b_m = 1$).

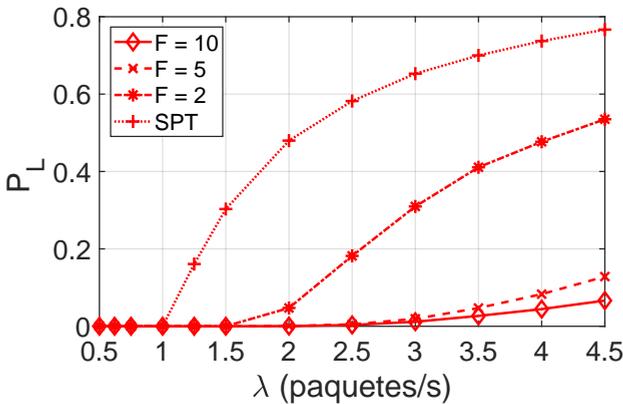


Figura 7.16: Probabilidad de pérdida de los paquetes por desbordamiento en la cola del RN (P_L). $F = \{2, 5, 10\}$ y $b_m = 1$. ($N = 15$, $Q = 10$, $W = 128$).

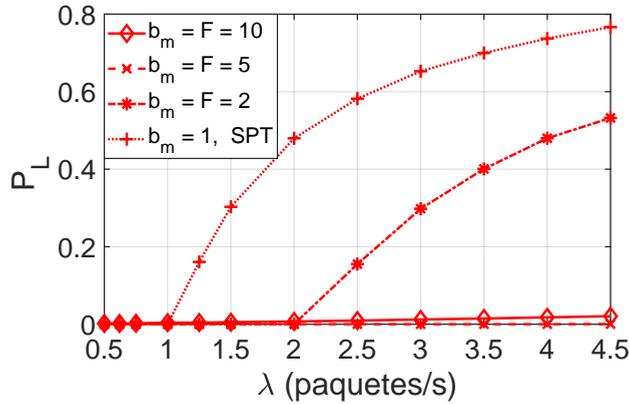


Figura 7.17: Probabilidad de pérdida de los paquetes por desbordamiento en la cola del RN (P_L). $b_m = F = \{2, 5, 10\}$. ($N=15, Q=10, W=128$).

En la Fig. 7.17 se muestra la probabilidad de pérdida de los paquetes por desbordamiento en la cola del RN (P_L), al variar el número mínimo de paquetes en cola para contender (b_m) y el número máximo de paquetes que se transmiten por trama (F). En este caso la variación ha sido: $b_m = F$.

7.5 Conclusiones

Se ha desarrollado un modelo basado en dos 2D-DTMC para analizar el rendimiento del consumo de energía de los dispositivos sensores de una WSN heterogénea que operan con ciclo de trabajo sincronizado, y transmiten con agregación de tráfico (APT).

Se presentan las expresiones que permiten determinar los distintos consumos de energía de los nodos. Se considera todo el ciclo completo de transmisión y las distintas fases de operación, incluyendo el consumo por sincronización, el consumo por la transmisión de los datos, y el debido a las fases de operación *normal* y *awake*, durante el periodo *sleep*.

El modelo considera un protocolo MAC de ciclo de trabajo sincronizado para una red heterogénea con modo de transmisión en APT, y su solución, en términos de la distribución de probabilidad estacionaria, es utilizada por las expresiones para evaluar las prestaciones del consumo energético.

Los resultados de consumo promedio de energía se obtienen del modelo analítico y se validan a través de simulaciones basadas en eventos discretos, obteniéndose resultados muy precisos. En cuanto a los resultados de energía, se realiza un análisis de las distintos componentes del consumo de energía de los nodos.

Por otro lado, se realiza un estudio basado en simulación, del efecto de la variación del número mínimo de los paquetes en la cola del nodo, para que este se considere activo y, por tanto, intente el acceso al medio para la transmisión de sus paquetes. Se presentan para este caso, resultados de consumo promedio de energía, retardo promedio de los paquetes, y pérdida de los paquetes.

Capítulo 8

Conclusiones

De forma general, este trabajo ha consistido en el desarrollo de modelos analíticos que permiten evaluar las prestaciones de redes de sensores inalámbricos (WSNs) en distintos escenarios de operación. En particular, se ha modelado el mecanismo de acceso al medio (MAC) de estos nodos sensores, funcionando con la técnica de ahorro de energía denominada *duty-cycled*, y con existencia de sincronía entre los nodos que componen la WSN. Para el modelado se han desarrollado cadenas de Markov en tiempo discreto, cuya solución han permitido obtener resultados de parámetros de prestaciones, tales como: energía consumida promedio, retardo promedio de los paquetes y caudal cursado. Estos resultados obtenidos de los modelos analíticos se han validado por medio de simulación por computadora basado en eventos discretos.

A continuación se describe con detalle los modelos desarrollados en este trabajo de investigación:

Partiendo de modelos previos, se ha desarrollado un modelo que permite describir el comportamiento de una WSN en un escenario heterogéneo que incorpora dos clases distintas de nodos, que pueden operar con distintas tasas de transmisión de paquetes, y que permite la asignación de prioridades de acceso al medio a una de las clases de nodos que conforman la red.

Se ha propuesto e implementado un procedimiento o protocolo para la operación conjunta entre los nodos de ambas clases, en el cual se establecen prioridades de acceso al medio para la transmisión de información por parte de los nodos. En el procedimiento de operación, que denominamos PSA-MAC (*Priority Sink Access MAC*), la etapa de sincronización de los nodos es común en ambas clases, mientras que la etapa posterior, donde contendrán por el medio para la transmisión de los datos, se inicia primero para una de las clases; de esta manera se otorga prioridad en la transmisión a dicha clase. Para llevar a cabo lo anterior, se propone un modelo que incluya dos cadenas de Markov de 2D, quedando una cadena de 2D por cada clase de nodos. En consecuencia, se implementa la cadena de 2D para que describa el comportamiento de los nodos de la clase 1, y se desarrolla e implementa una segunda cadena de Markov en dos dimensiones (2D-DTMC), que describe la evolución de los paquetes en la cola del nodo de referencia de clase 2 (RN_2), además de describir el número de nodos activos de la misma clase en la WSN.

Una parte fundamental del modelo es la implementación del acoplamiento entre las dos cadenas de Markov de 2D. Es por ello que, en la construcción de las expresiones para las probabilidades de transición que se desarrollan para la 2D-DTMC de la clase 2, se ha definido e incorporado adecuadamente el parámetro $R_{1,0}$. Este parámetro define la fracción de ciclos en los que los nodos de clase 1 están inactivos, y es importante su inclusión para el adecuado acoplamiento entre ambas cadenas de Markov. Otra forma de ver a este parámetro, es como la probabilidad de que no haya nodos activos de clase 1 en la WSN.

Se propone y desarrolla un nuevo método de cálculo de consumo energético de los nodos cuando se encuentran en el periodo *data*. Este método mejora a los métodos previos, tanto en precisión de los resultados conseguidos, como en la sistematización del procedimiento, haciéndolo incluso más intuitivo. Con el método que ahora se propone, se obtiene el consumo promedio de energía con expresiones que incluyen a la distribución de probabilidad estacionaria, la cual indica además de la evolución de los paquetes en la cola de RN , la evolución de los nodos activos de la red. Con lo anterior, se lo-

gra un procedimiento más directo, con menos pérdida de información en los cálculos, mejorándose la precisión.

Se propone un modelo analítico para la evaluación de prestaciones de una WSN, que opera en escenarios heterogéneos, donde los nodos tienen la capacidad de transmitir paquetes en forma agregada; es decir, en cada ciclo de transmisión, los nodos pueden transmitir más de un paquete. Este modo de transmisión se denomina *Aggregated Packet Transmission* (APT) o Transmisión de paquetes con agregación de tráfico. En los modelos anteriores, los nodos de la WSN transmiten solo un paquete por ciclo de transmisión o modo SPT (*Single Packet Transmission*).

Se desarrolla un modelo para determinar el consumo energético de los nodos de una WSN que opera en escenarios homogéneos. Este modelo considera todos los subperiodos del ciclo de transmisión, obteniéndose un resultado más completo de consumo energético, en relación a los anteriores modelos. Los diferentes periodos del ciclo de transmisión consisten en: periodo de sincronización (*sync*), periodo de datos (*data*), el periodo inactivo (*sleep*), además de las fases de operación de reposo y vigilia.

Se presenta un modelo analítico para determinar el consumo energético de los nodos de una WSN que opera en escenarios heterogéneos. El modelo considera los diferentes periodos en la operación de los nodos: periodo de sincronización (*sync*), periodo de datos (*data*), el periodo inactivo (*sleep*), además de las fases de operación de reposo y vigilia. La heterogeneidad implica cierto grado de complejidad, especialmente cuando se determina la energía, ya que además de que se contabiliza todo el ciclo completo, incluyendo los distintos periodos, los nodos participan de distintos modos de operación, tal como el modo *sleep* y *awake* como parte del protocolo para el ahorro energético. Lo anterior, aunado a la existencia de más de una clase, le da un mayor grado de complejidad al modelo. Sin embargo, con el procedimiento de cálculo propuesto en el modelo, se logra sortear y calcular con éxito la complejidad de tener más de una clase de nodos operando en la WSN; esto es especialmente cierto, cuando se determina el consumo considerando el modo

o fase de vigilia (*awake*) de los nodos. En el modo de operación en *awake*, los nodos se *despiertan* y permanecen en vigilia durante un conjunto de ciclos, y lo repiten periódicamente cada cierto número de ciclos. Esto lo realizan para estar a la escucha de posibles paquetes de sincronización (*sync*) en el canal de comunicación, y de esta forma no perder la sincronía. Por otro lado, el modelo también considera los modos de transmisión tanto en SPT como en APT.

Como trabajo futuro se propone una extensión del modelo analítico que se describe a continuación.

En PSA-MAC se establece que los nodos de clase 2 intentan el acceso al medio después de un tiempo igual a W_1 (tamaño máximo de ventana de contienda de clase 1) y que la duración de un paquete transmitido por un nodo de clase 1 es mayor que W_1 .

Con lo anterior, se asegura que los nodos de clase 2 detecten todos los paquetes que transmitan (con éxito o con colisión) los nodos de clase 1, incluso si el valor de *backoff* resultante para el nodo transmisor ha sido el mínimo posible. Sin embargo, dentro del periodo igual a W_1 puede haber casos de nodos de clase 1 que transmitan (con éxito o con colisión) y terminen antes de que los nodos de clase 2 puedan detectar el estado del canal (después de un periodo igual a W_1).

Existe, por tanto, una oportunidad de mejorar el modelo para que tome en cuenta los casos en los que la duración de un paquete transmitido por un nodo de clase 1 sea menor que el valor de W_1 , e incorporar esta información al mecanismo de acoplamiento entre clases (parámetro $R_{1,0}$).

Apéndices

Apéndice A

Notación, variables y parámetros más utilizados

α	Número de paquetes en agregado a transmitir por un nodo
α_1, α_2	Parámetro α para cada clase
η	Caudal cursado por nodo
η_1, η_2	Parámetro η para cada clase
λ	Tasa de arribo de paquetes
λ_1, λ_2	Parámetro λ para cada clase
ξ	Eficiencia considerando consumo energético por <i>bytes</i> transmitidos
ξ_1, ξ_2	Parámetro ξ para cada clase
D	Retardo de los paquetes
D_1, D_2	Parámetro D para cada clase
D_p	Retardo de propagación
E	Energía consumida por nodo
E_1, E_2	Parámetro E para cada clase
EE	Eficiencia
EE_1, EE_2	Parámetro EE para cada clase
F	Número máximo de paquetes por trama que un nodo puede transmitir por ciclo
F_1, F_2	Parámetro F para cada clase

P_{tx}	Potencia de transmisión
$P_{1,tx}, P_{2,tx}$	Parámetro P_{tx} para cada clase
P_{rx}	Potencia de recepción
$P_{1,rx}, P_{2,rx}$	Parámetro P_{rx} para cada clase
Q	Número de paquetes en la cola del nodo
Q_1, Q_2	Parámetro Q para cada clase
RN	Nodo referencia
RN_1, RN_2	Parámetro RN para cada clase
$SC1$	Escenario 1
$SC2$	Escenario 2
T	Duración del ciclo
t_{ACK}	Duración de la transmisión de un paquete ACK
t_{CTS}	Duración de la transmisión de un paquete CTS
t_{DATA}	Duración de la transmisión de un paquete DATA
Th	Caudal cursado en agregado
Th_1, Th_2	Parámetro Th para cada clase
t_{RTS}	Duración de la transmisión de un paquete RTS
ts	Tempo de ranura (<i>slot</i>)
t_{SYNC}	Duración de la transmisión de un paquete SYNC
N	Número de nodos en la red
N_1, N_2	Parámetro N para cada clase
W	Ventana de contienda
W_1, W_2	Parámetro W para cada clase

Apéndice B

Tablas de las expresiones para obtener las probabilidades de transición del modelo 2D (capítulo 2)

La matriz P se define en las Tablas. B.1, B.2 y B.3, donde se denota $M = N - 1$.

A modo de ejemplo, se describe un término genérico de dicha matriz de transición, en este caso $P_{im,jn}$, es decir, la probabilidad de transición del estado (i, m) al estado (j, n) . Ésta viene dada por,

$$\begin{aligned} P_{im,jn} = & P_{s,m} B_{n-m} (M - m) A_{j-i+1} \\ & + m P_{s,m} P_e B_{n-m+1} (M - m) A_{j-i} \\ & + m P_{s,m} \hat{P}_e B_{n-m} (M - m) A_{j-i} \\ & + (1 - (m + 1) P_{s,m}) B_{n-m} (M - m) A_{j-i}; \\ & 1 \leq i \leq j \leq Q - 1, 1 \leq m \leq n < M. \end{aligned}$$

En cada uno de los términos de $P_{im,jn}$ los nodos inactivos aumentan de m hasta n . Los términos de $P_{im,jn}$ corresponden a:

1. El RN transmite con éxito y recibe $j - i + 1$ paquetes.

Tabla B.1: Matriz de probabilidades de transición (I).

$P_{00,jn} = B_n(M) \cdot A_j; 0 \leq j \leq Q-1, 0 \leq n \leq M$
$P_{00,Qn} = B_n(M) \cdot A_{\geq Q}; 0 \leq n \leq M$
$P_{0m,jn} = S_m \cdot P_e \cdot B_{n-m+1}(M-m) \cdot A_j + S_m \cdot \widehat{P}_e \cdot B_{n-m}(M-m) \cdot A_j$ $+ \widehat{S}_m \cdot B_{n-m}(M-m) \cdot A_j; 0 \leq j \leq Q-1, 1 \leq m \leq n < M$
$P_{0m,Qn} = S_m \cdot P_e \cdot B_{n-m+1}(M-m) \cdot A_{\geq Q} + S_m \cdot \widehat{P}_e \cdot B_{n-m}(M-m) \cdot A_{\geq Q}$ $+ \widehat{S}_m \cdot B_{n-m}(M-m) \cdot A_{\geq Q}; 1 \leq m \leq n < M$
$P_{0m,jM} = S_m \cdot \widehat{P}_e \cdot B_{M-m}(M-m) \cdot A_j + \widehat{S}_m \cdot B_{M-m}(M-m) \cdot A_j;$ $0 \leq j \leq Q-1, 1 \leq m \leq M,$
$P_{0m,QM} = S_m \cdot \widehat{P}_e \cdot B_{M-m}(M-m) \cdot A_{\geq Q} + \widehat{S}_m \cdot B_{M-m}(M-m) \cdot A_{\geq Q}; 1 \leq m \leq M,$
$P_{i0,jn} = P_{s,0} \cdot B_n(M) \cdot A_{j-i+1} + (1 - P_{s,0}) \cdot B_n(M) \cdot A_{j-i}; 1 \leq i \leq j \leq Q-1, 0 \leq n \leq M$
$P_{i0,Qn} = P_{s,0} \cdot B_n(M) \cdot A_{\geq Q-i+1} + (1 - P_{s,0}) \cdot B_n(M) \cdot A_{\geq Q-i}; 1 \leq i \leq Q, 0 \leq n \leq M$

2. El RN pierde la contención y recibe $j - i$ paquetes. Un nodo diferente al RN transmite con éxito, y vacía su cola.
3. El RN pierde la contención y recibe $j - i$ paquetes. Un nodo diferente al RN transmite con éxito, y no vacía su cola.
4. Hay una colisión en el canal y el RN recibe $j - i$ paquetes.

Como se observa en las Tablas. B.1, B.2 y B.3, los elementos de P viene dados en función de P_e . El parámetro P_e se define como la probabilidad de que el buffer del RN se vacíe tras una transmisión con éxito, y viene dada por,

$$P_e = \frac{P_s A_0 \pi_1}{P_s (1 - \pi_0)}, \quad (\text{B.1})$$

siendo P_s la probabilidad de que el RN transmita un paquete con éxito en un ciclo arbitrario, condicionado a que esté activo, y π_n la probabilidad estacionaria de encontrar n paquetes en el buffer del RN.

Tabla B.2: Matriz de probabilidades de transición (II).

$$\begin{aligned}
 P_{im,jn} &= P_{s,m} \cdot B_{n-m} (M-m) \cdot A_{j-i+1} + mP_{s,m} \cdot P_e \cdot B_{n-m+1} (M-m) \cdot A_{j-i} \\
 &\quad + mP_{s,m} \cdot \widehat{P}_e \cdot B_{n-m} (M-m) \cdot A_{j-i} + (1 - (m+1) P_{s,m}) \cdot B_{n-m} (M-m) \cdot A_{j-i}; \\
 &\quad 1 \leq i \leq j \leq Q-1, 1 \leq m \leq n < M \\
 P_{im,Qn} &= P_{s,m} \cdot B_{n-m} (M-m) \cdot A_{\geq Q-i+1} + mP_{s,m} \cdot P_e \cdot B_{n-m+1} (M-m) \cdot A_{\geq Q-i} \\
 &\quad + mP_{s,m} \cdot \widehat{P}_e \cdot B_{n-m} (M-m) \cdot A_{\geq Q-i} + (1 - (m+1) P_{s,m}) \cdot B_{n-m} (M-m) \cdot A_{\geq Q-i}; \\
 &\quad 1 \leq i \leq Q, 1 \leq m \leq n < M \\
 P_{im,jM} &= P_{s,m} \cdot B_{M-m} (M-m) \cdot A_{j-i+1} + mP_{s,m} \cdot \widehat{P}_e \cdot B_{M-m} (M-m) \cdot A_{j-i} \\
 &\quad + (1 - (m+1) P_{s,m}) \cdot B_{M-m} (M-m) \cdot A_{j-i}; 1 \leq i \leq j \leq Q-1, 1 \leq m \leq M \\
 P_{im,QM} &= P_{s,m} \cdot B_{M-m} (M-m) \cdot A_{\geq Q-i+1} + mP_{s,m} \cdot \widehat{P}_e \cdot B_{M-m} (M-m) \cdot A_{\geq Q-i} \\
 &\quad + (1 - (m+1) P_{s,m}) \cdot B_{M-m} (M-m) \cdot A_{\geq Q-i}; 1 \leq i \leq Q, 1 \leq m \leq M
 \end{aligned}$$

Tabla B.3: Matriz de probabilidades de transición (III).

$$\begin{aligned}
 P_{0m,jm-1} &= S_m \cdot P_e \cdot B_0 (M-m) \cdot A_j; 0 \leq j \leq Q-1, 1 \leq m \leq M \\
 P_{0m,Qm-1} &= S_m \cdot P_e \cdot B_0 (M-m) \cdot A_{\geq Q}; 1 \leq m \leq M \\
 P_{im,jm-1} &= mP_{s,m} \cdot P_e \cdot B_0 (M-m) \cdot A_{j-i}; 1 \leq i \leq j \leq Q-1, 1 \leq m \leq M \\
 P_{im,Qm-1} &= mP_{s,m} \cdot P_e \cdot B_0 (M-m) \cdot A_{\geq Q-i}; 1 \leq i \leq Q, 1 \leq m \leq M \\
 P_{im,i-1n} &= P_{s,m} \cdot B_{n-m} (M-m) \cdot A_0; 1 \leq i \leq Q, 0 \leq m \leq n \leq M \\
 \hline
 P_{im,jm-1} &= 0; 1 \leq i \leq Q, j < i, 1 \leq m \leq M \\
 P_{im,i-1n} &= 0; 1 \leq i \leq Q, 1 \leq m \leq M, n < m \\
 P_{im,jn} &= 0; 2 \leq i \leq Q, j < i-1, 0 \leq m \leq n \leq M \\
 P_{im,jn} &= 0, 0 \leq i \leq j \leq Q, 2 \leq m \leq M, n < m-1
 \end{aligned}$$

Apéndice C

Procedimiento de cálculo energético previo para las cadenas de 1D y 2D (capítulo 2)

C.1 Retardo y Energía Consumida

C.1.1 Cadena 1D

Suponemos que se utiliza una política de servicio del tipo FIFO y que la política de gestión del espacio en buffer, cuando este está lleno, es del tipo *tail drop*. Denotamos por D al retardo medio de paquete, es decir, el tiempo medio que pasa desde que el paquete llega a la cola hasta que la abandona. Recordemos que en un modelo con infinitas retransmisiones, los paquetes abandonan la cola cuando han sido transmitidos con éxito. Sin embargo, en un modelo sin retransmisiones, lo abandonan cuando el paquete es transmitido por primera vez (con éxito, o colisión).

D puede determinarse por la ecuación de Little,

$$D = \frac{N_{av}}{\gamma_a}, \quad N_{av} = \sum_{n=0}^Q n\pi_n, \quad \gamma_a = \sum_{n=0}^Q b_n\pi_n, \quad (\text{C.1})$$

donde

$$b_0 = \sum_{i=0}^Q iA_i + QA_{\geq Q+1}$$

$$b_n = \sum_{i=0}^{Q-n} iA_i + (Q - n + P_s) A_{\geq Q-n+1}, \quad n > 0.$$

Observe que N_{av} es el número medio de paquetes en el buffer, γ_a es el número medio de paquetes *aceptados* en el buffer por ciclo, y b_n es el número medio de paquetes aceptados por ciclo en estado n . El último término de b_n se obtiene resolviendo $((Q - n + 1) P_s + (Q - n) (1 - P_s)) A_{\geq Q-n+1}$, donde se aplica la suposición de que sólo un paquete puede ser transmitido por ciclo.

Para determinar la energía total consumida por un nodo en un ciclo, sería necesario sumar las energías consumidas en las tres fases de un ciclo: *sync*, *data* y *sleep*. En esta sección sólo se describe la energía media consumida por ciclo en la fase de *data*. Para ello se definen las siguiente constantes:

$$E_{txs} = (t_{RTS} + t_{DATA}) P_{tx} + (t_{CTS} + t_{ACK}) P_{rx},$$

$$E_{rxs} = (t_{RTS} + t_{DATA}) P_{rx} + (t_{CTS} + t_{ACK}) P_{tx},$$

$$E_{txf} = t_{RTS} P_{tx} + t_{CTS} P_{rx}, \quad E_{rxf} = t_{RTS} P_{rx}.$$

donde P_{tx} y P_{rx} son las potencias de transmisión y recepción del nodo, y t_X es el tiempo de transmisión de un paquete de tipo X .

La energía media consumida en un ciclo por el RN en la fase *data*, condicionado a que haya $k + 1$ nodos activos en el ciclo, $k \geq 1$, viene dada por,

$$E_{d,k+1} = q_{1,k} P_{s,k} \cdot [E_{txs} + (4D_p + BT_{s,k}) P_{rx}]$$

$$+ q_{1,k} P_{f,k} \cdot [E_{txf} + (2D_p + BT_{f,k}) P_{rx}]$$

$$+ q_{2,k} P_{s,k} \alpha_1 \cdot [E_{rxs} + (3D_p + BT_{s,k}) P_{rx}] \quad (C.2)$$

$$+ q_{2,k} P_{s,k} \alpha_2 \cdot [E_{rxf} + (D_p + BT_{s,k}) P_{rx}]$$

$$+ q_{3,k} \cdot [E_{rxf} + (D_p + BT_{f,k}) P_{rx}].$$

Los términos de $E_{d,k+1}$ corresponden a la energía consumida por el RN debido a: un paquete transmitido con éxito, uno que colisiona en el canal, uno recibido con éxito, uno transmitido con éxito por un nodo diferente al RN cuyo destinatario no es el RN, y una colisión en el canal de paquetes transmitidos por nodos diferentes al RN.

Por D_p se denota el retardo de propagación de un sólo sentido, y por $\alpha_1 = 1/(N-1)$ y $\alpha_2 = (N-2)/(N-1)$ a las fracciones de paquetes con destino al RN y a otros nodos diferentes de éste. Nótese que α_1 y α_2 podrían depender del protocolo de encaminamiento. Condicionado a que el número de nodos activos en el ciclo sea $k+1$, $q_{1,k}$ es la probabilidad de que el RN esté activo, $q_{2,k}$ es el número medio de nodos activos diferentes del RN, y $q_{3,k}$ es la probabilidad de que dos o más nodos diferentes del RN colisionen en el canal. Éstas vienen dadas por,

$$q_{1,k} = (k+1)/N, \quad (C.3)$$

$$q_{2,k} = kq_{1,k} + (k+1)(1-q_{1,k}), \quad (C.4)$$

$$q_{3,k} = q_{1,k} [1 - (k+1)P_{s,k} - P_{f,k}] + (1-q_{1,k}) [1 - (k+1)P_{s,k}] \quad (C.5)$$

$$= 1 - (k+1)P_{s,k} - q_{1,k}P_{f,k}. \quad (C.6)$$

$E_{d,1}$ y $E_{d,0}$ vienen dados por

$$E_{d,1} = E_{txs} + (4D_p + W/2) P_{rx} \quad (C.7)$$

$$E_{d,0} = E_{rxs} + (W + D_p) P_{rx}. \quad (C.8)$$

La energía media consumida por ciclo por el RN en la fase *data* viene expresada como,

$$E_d = \sum_{n=0}^N R_n E_{d,n}, \quad (C.9)$$

donde R_n se expresa como $R_n = \binom{N}{n} (1 - \pi_0)^n \pi_0^{N-n}$, o bien como $R_n = \pi_n'$.

Apéndice D

**Tablas de las expresiones para obtener las
probabilidades de transición de las
2D-DTMC (capítulo 3)**

Tabla D.1: Probabilidades de transición de la 2D DTMC (nodos de clase 1)

No hay nodos activos. Las transiciones se deben a los nuevos arribos	
$P_{00,jn} = B_n(M_1)A_j; \quad 0 \leq n \leq M_1, 0 \leq j \leq (Q_1 - 1)$	$P_{00,Q_1n} = B_n(M_1)A_{\geq Q_1}; \quad 0 \leq n \leq M_1$
No hay paquetes en cola de RN_1 . Sin transmisiones debido a RN_1 . Las transiciones las causan otros m nodos activos	
$P_{0m,jn} = S_m EB_{n-m+1}(M_1 - m)A_j$ $+ S_m \hat{E}B_{n-m}(M_1 - m)A_j$ $+ \hat{S}_m B_{n-m}(M_1 - m)A_j$ $0 \leq j \leq (Q_1 - 1), 1 \leq m \leq n < M_1$	$P_{0m,Q_1M_1} = S_m \hat{E}B_{M_1-m}(N_1 - m)A_{\geq Q_1}$ $+ \hat{S}_m B_{M_1-m}(M_1 - m)A_{\geq Q_1}$ $1 \leq m \leq M_1$
$P_{0m,Q_1n} = S_m EB_{n-m+1}(M_1 - m)A_{\geq Q_1}$ $+ S_m \hat{E}B_{n-m}(M_1 - m)A_{\geq Q_1}$ $+ \hat{S}_m B_{n-m}(M_1 - m)A_{\geq Q_1}$ $1 \leq m \leq n < M_1$	$P_{0m,jM_1} = S_m \hat{E}B_{N_1-m}(M_1 - m)A_j$ $+ \hat{S}_m B_{M_1-m}(M_1 - m)A_j$ $0 \leq j \leq (Q_1 - 1), 1 \leq m \leq M_1$
$P_{0m,Q_1m-1} = S_m EB_0(M_1 - m)A_{\geq Q_1}$	$P_{0m,jm-1} = S_m EB_0(M_1 - m)A_j$
$1 \leq m \leq M_1$	$0 \leq j \leq (Q_1 - 1), 1 \leq m \leq M_1$
RN_1 es el único nodo activo	
$P_{i0,jn} = P_{s_1,0}B_n(M_1)A_{j-i+1}$ $+ (1 - P_{s_1,0})B_n(M_1)A_{j-i}$ $1 \leq i \leq j \leq Q_1, 0 \leq n \leq M_1$	$P_{i0,Q_1n} = P_{s_1,0}B_n(M_1)A_{\geq Q_1-i+1}$ $+ (1 - P_{s_1,0})B_n(M_1)A_{\geq Q_1-i}$ $1 \leq i \leq Q_1, 0 \leq n \leq M_1$
Transiciones ocasionadas por los $m + 1$ nodos activos incluyendo a RN_1	
$P_{im,jn} = P_{s_1,m}B_{n-m}(M_1 - m)A_{j-i+1}$ $+ mP_{s_1,m}EB_{n-m+1}(M_1 - m)A_{j-i}$ $+ mP_{s_1,m}\hat{E}B_{n-m}(M_1 - m)A_{j-i}$ $+ (1 - (m + 1)P_{s_1,m})B_{n-m}(M_1 - m)A_{j-i}$ $1 \leq i \leq j \leq (Q_1 - 1), 1 \leq m \leq n < M_1$	$P_{im,Q_1M_1} = P_{s_1,m}B_{M_1-m}(M_1 - m)A_{\geq Q_1-i+1} +$ $mP_{s_1,m}\hat{E}B_{M_1-m}(M_1 - m)A_{\geq Q_1-i}$ $+ (1 - (m + 1)P_{s_1,m})B_{M_1-m}(M_1 - m)A_{j-i}$ $1 \leq i \leq j \leq Q_1, 1 \leq m \leq M_1$
$P_{im,Q_1n} = P_{s_1,m}B_{n-m}(M_1 - m)A_{\geq Q_1-i+1}$ $+ mP_{s_1,m}EB_{n-m+1}(M_1 - m)A_{\geq Q_1-i}$ $+ mP_{s_1,m}\hat{E}B_{n-m}(M_1 - m)A_{\geq Q_1-i}$ $+ (1 - (m + 1)P_{s_1,m})B_{n-m}(M_1 - m)A_{\geq Q_1-i}$ $1 \leq i \leq Q_1, 1 \leq m \leq n < M_1$	$P_{im,jN_1} = P_{s_1,m}B_{M_1-m}(M_1 - m)A_{j-i+1}$ $+ mP_{s_1,m}\hat{E}B_{M_1-m}(M_1 - m)A_{j-i}$ $+ (1 - (m + 1)P_{s_1,m})B_{M_1-m}(M_1 - m)A_{j-i}$ $1 \leq i \leq j \leq (Q_1 - 1), 1 \leq m \leq n \leq M_1$
$P_{im,Q_1m-1} = mP_{s_1,m}EB_0(M_1 - m)A_{\geq Q_1-i}$	$P_{im,jm-1} = mP_{s_1,m}EB_0(M_1 - m)A_{j-i}$
$1 \leq i \leq Q_1, 1 \leq m \leq M_1$	$1 \leq i \leq j \leq (Q_1 - 1), 1 \leq m \leq M_1$
$P_{im,i-1n} = P_{s_1,m}B_{n-m}(M_1 - m)A_0$	$P_{im,i-1n} = P_{s_1,m}B_{n-m}(M_1 - m)A_0$
$1 \leq i \leq Q_1, 0 \leq m \leq n \leq M_1$	$1 \leq i \leq Q_1, 0 \leq m \leq n \leq M_1$
Transiciones imposibles	
$P_{im,jm-1} = 0; \quad 1 \leq i \leq Q_1, j < i, \quad 1 \leq m \leq M_1$	$P_{im,jn} = 0; \quad 2 \leq i \leq Q_1, j < i - 1, \quad 0 \leq m \leq n \leq M_1$
$P_{im,i-1n} = 0; \quad 1 \leq i \leq Q_1, 1 \leq m \leq M_1, \quad n < m,$	$P_{im,jn} = 0; \quad 0 \leq i \leq j \leq Q_1, 2 \leq m \leq M_1, \quad n < m - 1$

Tabla D.2: Probabilidades de transición de la 2D DTMC (nodos de clase 2)

No hay nodos activos. Las transiciones se deben a los nuevos arribos	
$P_{00,jn} = B_n(M_2)A_j; \quad 0 \leq n \leq M_2, 0 \leq j \leq (Q_2 - 1)$	$P_{00,Q_2n} = B_n(M_2)A_{\geq Q_2}; \quad 0 \leq n \leq M_2$
No hay paquetes en cola de RN_2 . Sin transmisiones debido a RN_2 . Las transiciones las causan otros m nodos activos	
$P_{0m,jn} = [S_m EB_{n-m+1}(M_2 - m)A_j$ $+ S_m \hat{E}B_{n-m}(M_2 - m)A_j +$ $\hat{S}_m B_{n-m}(M_2 - m)A_j] R_{1,0}$ $+ B_{n-m}(M_2 - m)A_j (1 - R_{1,0})$ $0 \leq j \leq (Q_2 - 1), 1 \leq m \leq n < M_2$	$P_{0m,Q_2M_2} = [S_m \hat{E}B_{M_2-m}(M_2 - m)A_{\geq Q_2}$ $+ \hat{S}_m B_{M_2-m}(M_2 - m)A_{\geq Q_2}]$ $R_{1,0} + B_{M_2-m}(M_2 - m)A_{\geq Q_2} (1 - R_{1,0})$ $1 \leq m \leq M_2$
$P_{0m,Q_2n} = [S_m EB_{n-m+1}(M_2 - m)A_{\geq Q_2}$ $+ S_m \hat{E}B_{n-m}(M_2 - m)A_{\geq Q_2}$ $+ \hat{S}_m B_{n-m}(M_2 - m)A_{\geq Q_2}] R_{1,0}$ $+ B_{n-m}(M_2 - m)A_{\geq Q_2} (1 - R_{1,0})$ $1 \leq m \leq n < M_2$	$P_{0m,jM_2} = [S_m \hat{E}B_{M_2-m}(M_2 - m)A_j$ $+ \hat{S}_m B_{M_2-m}(M_2 - m)A_j] R_{1,0}$ $+ B_{M_2-m}(M_2 - m)A_j (1 - R_{1,0})$ $0 \leq j \leq (Q_2 - 1), 1 \leq m \leq M_2$
$P_{0m,Q_2m-1} = S_m EB_0(M_2 - m)A_{\geq Q_2} R_{1,0} + 0(1 - R_{1,0})$	$P_{0m,jm-1} = S_m EB_0(M_2 - m)A_j R_{1,0} + 0(1 - R_{1,0})$
$1 \leq m \leq M_2$	$0 \leq j \leq (Q_2 - 1), 1 \leq m \leq M_2$
RN_2 es el único nodo activo	
$P_{i0,jn} = [P_{s_2,0} B_n(M_2)A_{j-i+1}$ $+ (1 - P_{s_2,0}) B_n(M_2)A_{j-i}] R_{1,0}$ $+ B_n(M_2)A_{j-i} (1 - R_{1,0})$ $1 \leq i \leq j \leq Q_2, 0 \leq n \leq M_2$	$P_{i0,Q_2n} = [P_{s_2,0} B_n(M_2)A_{\geq Q_2-i+1}$ $+ (1 - P_{s_2,0}) B_n(M_2)A_{\geq Q_2-i}] R_{1,0}$ $+ B_n(M_2)A_{\geq Q_2-i} (1 - R_{1,0})$ $1 \leq i \leq Q_2, 0 \leq n \leq M_2$
Transiciones ocasionadas por los $m + 1$ nodos activos incluyendo a RN_2	
$P_{im,jn} = [P_{s_2,m} B_{n-m}(M_2 - m)A_{j-i+1}$ $+ mP_{s_2,m} EB_{n-m+1}(M_2 - m)A_{j-i}$ $+ mP_{s_2,m} \hat{E}B_{n-m}(M_2 - m)A_{j-i}$ $+ (1 - (m + 1)P_{s_2,m}) B_{n-m}(M_2 - m)A_{j-i}] R_{1,0}$ $+ B_{n-m}(M_2 - m)A_{j-i} (1 - R_{1,0})$ $1 \leq i \leq j \leq (Q_2 - 1), 1 \leq m \leq n < M_2$	$P_{im,Q_2M_2} = [P_{s_2,m} B_{M_2-m}(M_2 - m)A_{\geq Q_2-i+1} +$ $mP_{s_2,m} \hat{E}B_{M_2-m}(M_2 - m)A_{\geq Q_2-i}$ $+ (1 - (m + 1)P_{s_2,m}) B_{M_2-m}(M_2 - m)A_{j-i}]$ $R_{1,0} + B_{M_2-m}(M_2 - m)A_{j-i} (1 - R_{1,0})$ $1 \leq i \leq j \leq Q_2, 1 \leq m \leq M_2$
$P_{im,Q_2n} = [P_{s_2,m} B_{n-m}(M_2 - m)A_{\geq Q_2-i+1}$ $+ mP_{s_2,m} EB_{n-m+1}(M_2 - m)A_{\geq Q_2-i}$ $+ mP_{s_2,m} \hat{E}B_{n-m}(M_2 - m)A_{\geq Q_2-i}$ $+ (1 - (m + 1)P_{s_2,m}) B_{n-m}(M_2 - m)A_{\geq Q_2-i}] R_{1,0}$ $+ B_{n-m}(M_2 - m)A_{\geq Q_2-i} (1 - R_{1,0})$ $1 \leq i \leq Q_2, 1 \leq m \leq n < M_2$	$P_{im,jM_2} = [P_{s_2,m} B_{M_2-m}(M_2 - m)A_{j-i+1}$ $+ mP_{s_2,m} \hat{E}B_{M_2-m}(M_2 - m)A_{j-i}$ $+ (1 - (m + 1)P_{s_2,m}) B_{M_2-m}(M_2 - m)A_{j-i}] R_{1,0}$ $+ B_{M_2-m}(M_2 - m)A_{j-i} (1 - R_{1,0})$ $1 \leq i \leq j \leq (Q_2 - 1), 1 \leq m \leq n \leq M_2$
$P_{im,Q_2m-1} = mP_{s_2,m} EB_0(M_2 - m)A_{\geq Q_2-i} R_{1,0}$	$P_{im,jm-1} = mP_{s_2,m} EB_0(M_2 - m)A_{j-i} R_{1,0}$
$+ 0(1 - R_{1,0}); \quad 1 \leq i \leq Q_2, 1 \leq m \leq M_2$	$+ 0(1 - R_{1,0}); \quad 1 \leq i \leq j \leq (Q_2 - 1), 1 \leq m \leq M_2$
$+ 0(1 - R_{1,0}); \quad 1 \leq i \leq Q_2, 1 \leq m \leq M_2$	$+ 0(1 - R_{1,0}); \quad 1 \leq i \leq Q_2, 0 \leq m \leq n \leq M_2$
Transiciones imposibles	
$P_{im,jm-1} = 0; \quad 1 \leq i \leq Q_2, j < i, \quad 1 \leq m \leq M_2$	$P_{im,jn} = 0; \quad 2 \leq i \leq Q_2, j < i - 1, \quad 0 \leq m \leq n \leq M_2$
$P_{im,i-1n} = 0; \quad 1 \leq i \leq Q_2, 1 \leq m \leq M_2, \quad n < m,$	$P_{im,jn} = 0; \quad 0 \leq i \leq j \leq Q_2, 2 \leq m \leq M_2, \quad n < m - 1$

Apéndice E

Tablas de las expresiones para obtener las probabilidades de transición de las 2D-DTMC con agregación de tráfico (APT)(capítulo 5)

Tabla E.1: Probabilidades de transición de la 2D-DTMC con APT para los nodos de clase 1 (I)

No hay nodos activos. Las transiciones se deben a los nuevos arribos	
$P_{00,jn} = B_n(M_1)A_j; \quad 0 \leq n \leq M_1, 0 \leq j \leq (Q_1 - 1)$	$P_{00,Q_1n} = B_n(M_1)A_{\geq Q_1}; \quad 0 \leq n \leq M_1$
No hay paquetes en la cola de RN_1 . No hay transmisiones debido a RN_1 . Las transiciones las causan otros m nodos activos	
$P_{0m,jn} = S_m EB_{n-m+1}(M_1 - m)A_j$ $+ S_m \hat{E}B_{n-m}(M_1 - m)A_j$ $+ \hat{S}_m B_{n-m}(M_1 - m)A_j$ $0 \leq j \leq (Q_1 - 1), 1 \leq m \leq n < M_1$	$P_{0m,Q_1M_1} = S_m \hat{E}B_{M_1-m}(M_1 - m)A_{\geq Q_1}$ $+ \hat{S}_m B_{M_1-m}(M_1 - m)A_{\geq Q_1}$ $1 \leq m \leq M_1$
$P_{0m,Q_1n} = S_m EB_{n-m+1}(M_1 - m)A_{\geq Q_1}$ $+ S_m \hat{E}B_{n-m}(M_1 - m)A_{\geq Q_1}$ $+ \hat{S}_m B_{n-m}(M_1 - m)A_{\geq Q_1}$ $1 \leq m \leq n < M_1$	$P_{0m,jM_1} = S_m \hat{E}B_{M_1-m}(M_1 - m)A_j$ $+ \hat{S}_m B_{M_1-m}(M_1 - m)A_j$ $0 \leq j \leq (Q_1 - 1), 1 \leq m \leq M_1$
$P_{0m,Q_1n-1} = S_m EB_0(M_1 - m)A_{\geq Q_1}$ $1 \leq m \leq M_1$	$P_{0m,jm-1} = S_m EB_0(M_1 - m)A_j$ $0 \leq j \leq (Q_1 - 1), 1 \leq m \leq M_1$
RN_1 es el único nodo activo	
$P_{i0,jn} = P_{s_1,0} B_n(M_1)A_j$ $1 \leq i \leq F, 0 \leq j \leq i - 1, 0 \leq n \leq M_1$	$P_{i0,jn} = P_{s_1,0} B_n(M_1)A_{j-i+F}$ $F + 1 \leq i \leq Q_1, i - F \leq j \leq i - 1,$ $0 \leq n \leq M_1$
$P_{i0,jn} = P_{s_1,0} B_n(M_1)A_{j-i+\alpha}$ $1 \leq i \leq j < Q_1, 0 \leq n \leq M_1$	$P_{i0,Q_1n} = P_{s_1,0} B_n(M_1)A_{\geq Q_1-i+\alpha}$ $1 \leq i \leq Q_1, 0 \leq n \leq M_1$

Tabla E.2: Probabilidades de transición de la 2D-DTMC con APT para los nodos de clase 1 (II)

Transiciones ocasionadas por los $m + 1$ nodos activos incluyendo a RN_1	
$P_{im,jn} = P_{s_1,m} B_{n-m} (M_1 - m) A_{j-i}$ $1 \leq i \leq F, 0 \leq j \leq i - 1, 0 \leq m \leq n < M_1$	$P_{im,jn} = P_{s_1,m} B_{n-m} (M_1 - m) A_{j-i+F}$ $F + 1 \leq i \leq Q_1, i - F \leq j \leq i - 1,$ $0 \leq m \leq n < M_1$
$P_{im,jn} = P_{s_1,m} B_{n-m} (M_1 - m) A_{j-i+\alpha}$ $+ m P_{s_1,m} E B_{n-m+1} (M_1 - m) A_{j-i}$ $+ m P_{s_1,m} \hat{E} B_{n-m} (M_1 - m) A_{j-i}$ $+ (1 - (m + 1) P_{s_1,m}) B_{n-m} (M_1 - m) A_{j-i}$ $1 \leq i \leq j \leq (Q_1 - 1), 1 \leq m \leq n < M_1$	$P_{im,Q_1 M_1} = P_{s_1,m} B_{M_1-m} (M_1 - m) A_{\geq Q_1-i+\alpha}$ $+ m P_{s_1,m} \hat{E} B_{M_1-m} (M_1 - m) A_{\geq Q_1-i}$ $+ (1 - (m + 1) P_{s_1,m}) B_{M_1-m} (M_1 - m) A_{j-i}$ $1 \leq i \leq Q_1, 1 \leq m \leq M_1$
$P_{im,Q_1 n} = P_{s_1,m} B_{n-m} (M_1 - m) A_{\geq Q_1-i+\alpha}$ $+ m P_{s_1,m} E B_{n-m+1} (M_1 - m) A_{\geq Q_1-i}$ $+ m P_{s_1,m} \hat{E} B_{n-m} (M_1 - m) A_{\geq Q_1-i}$ $+ (1 - (m + 1) P_{s_1,m}) B_{n-m} (M_1 - m) A_{\geq Q_1-i}$ $1 \leq i \leq Q_1, 1 \leq m \leq n < M_1$	$P_{im,j M_1} = P_{s_1,m} B_{M_1-m} (M_1 - m) A_{j-i+\alpha}$ $+ m P_{s_1,m} \hat{E} B_{M_1-m} (M_1 - m) A_{j-i}$ $+ (1 - (m + 1) P_{s_1,m}) B_{M_1-m} (M_1 - m) A_{j-i}$ $1 \leq i \leq j \leq (Q_1 - 1), 1 \leq m \leq M_1$
$P_{im,Q_1 m-1} = m P_{s_1,m} E B_0 (M_1 - m) A_{\geq Q_1-i}$ $1 \leq i \leq Q_1, 1 \leq m \leq M_1$	$P_{im,jm-1} = m P_{s_1,m} E B_0 (M_1 - m) A_{j-i}$ $1 \leq i \leq j \leq (Q_1 - 1), 1 \leq m \leq M_1$
Transiciones imposibles	
$P_{im,jm-1} = 0; 1 \leq i \leq Q_1, j < i, 1 \leq m \leq M_1$ $P_{im,jn} = 0; 0 \leq i \leq j \leq Q_1, 2 \leq m \leq M_1,$ $n \leq m - 2$	$P_{im,jn} = 0; F + 1 \leq i \leq Q_1, j < i - F,$ $0 \leq m \leq n \leq M_1$

Tabla E.3: Probabilidades de transición de la 2D-DTMC con APT para los nodos de clase 2 (I)

No hay nodos activos. Las transiciones se deben a los nuevos arribos	
$P_{00,jn} = B_n(M_2)A_j; \quad 0 \leq n \leq M_2, 0 \leq j \leq (Q_2 - 1)$	$P_{00,Q_2n} = B_n(M_2)A_{\geq Q_2}; \quad 0 \leq n \leq M_2$
No hay paquetes en la cola de RN_2 . No hay transmisiones debido a RN_2 . Las transiciones las causan otros m nodos activos	
$P_{0m,jn} = [S_m EB_{n-m+1}(M_2 - m)A_j$ $+ S_m \hat{E}B_{n-m}(M_2 - m)A_j +$ $\hat{S}_m B_{n-m}(M_2 - m)A_j] R_{1,0}$ $+ B_{n-m}(M_2 - m)A_j (1 - R_{1,0})$ $0 \leq j \leq (Q_2 - 1), 1 \leq m \leq n < M_2$	$P_{0m,Q_2M_2} = [S_m \hat{E}B_{M_2-m}(M_2 - m)A_{\geq Q_2}$ $+ \hat{S}_m B_{M_2-m}(M_2 - m)A_{\geq Q_2}] R_{1,0}$ $+ B_{M_2-m}(M_2 - m)A_{\geq Q_2} (1 - R_{1,0})$ $1 \leq m \leq M_2$
$P_{0m,Q_2n} = [S_m EB_{n-m+1}(M_2 - m)A_{\geq Q_2}$ $+ S_m \hat{E}B_{n-m}(M_2 - m)A_{\geq Q_2}$ $+ \hat{S}_m B_{n-m}(M_2 - m)A_{\geq Q_2}] R_{1,0}$ $+ B_{n-m}(M_2 - m)A_{\geq Q_2} (1 - R_{1,0})$ $1 \leq m \leq n < M_2$	$P_{0m,jM_2} = [S_m \hat{E}B_{M_2-m}(M_2 - m)A_j$ $+ \hat{S}_m B_{M_2-m}(M_2 - m)A_j] R_{1,0}$ $+ B_{M_2-m}(M_2 - m)A_j (1 - R_{1,0})$ $0 \leq j \leq (Q_2 - 1), 1 \leq m \leq M_2$
$P_{0m,Q_2m-1} = S_m EB_0(M_2 - m)A_{\geq Q_2} R_{1,0}$ $+ 0 (1 - R_{1,0}); \quad 1 \leq m \leq M_2$	$P_{0m,jm-1} = S_m EB_0(M_2 - m)A_j R_{1,0} + 0 (1 - R_{1,0})$ $0 \leq j \leq (Q_2 - 1), 1 \leq m \leq M_2$
RN_2 es el único nodo activo	
$P_{i0,jn} = P_{s_2,0} B_n(M_2)A_j R_{1,0} + 0 (1 - R_{1,0})$ $1 \leq i \leq F, 0 \leq j \leq i - 1, 0 \leq n \leq M_2$	$P_{i0,jn} = P_{s_2,0} B_n(M_2)A_{j-i+F} R_{1,0} + 0 (1 - R_{1,0})$ $F + 1 \leq i \leq Q_2, i - F \leq j \leq i - 1, 0 \leq n \leq M_2$
$P_{i0,jn} = P_{s_2,0} B_n(M_2)A_{j-i+\alpha} R_{1,0}$ $+ B_n(M_2)A_{j-i+\alpha} (1 - R_{1,0})$ $1 \leq i \leq j < Q_2, 0 \leq n \leq M_2$	$P_{i0,Q_2n} = P_{s_2,0} B_n(M_2)A_{\geq Q_2-i+\alpha} R_{1,0}$ $+ B_n(M_2)A_{\geq Q_2-i+\alpha} (1 - R_{1,0})$ $1 \leq i \leq Q_2, 0 \leq n \leq M_2$

Tabla E.4: Probabilidades de transición de la 2D-DTMC con APT para los nodos de clase 2 (II)

Transiciones ocasionadas por los $m + 1$ nodos activos incluyendo a RN_2	
$P_{im,jn} = P_{s_2,m} B_{n-m} (M_2 - m) A_{j-i} R_{1,0}$ $+ 0 (1 - R_{1,0}); 1 \leq i \leq F, 0 \leq j \leq i - 1,$ $0 \leq m \leq n < M_2$	$P_{im,jn} = P_{s_2,m} B_{n-m} (M_2 - m) A_{j-i+F} R_{1,0}$ $+ 0 (1 - R_{1,0}); F + 1 \leq i \leq Q_2, i - F \leq j \leq i - 1,$ $0 \leq m \leq n < M_2$
$P_{im,jn} = [P_{s_2,m} B_{n-m} (M_2 - m) A_{j-i+\alpha}$ $+ m P_{s_2,m} E B_{n-m+1} (M_2 - m) A_{j-i}$ $+ m P_{s_2,m} \hat{E} B_{n-m} (M_2 - m) A_{j-i}$ $+ (1 - (m + 1) P_{s_2,m}) B_{n-m} (M_2 - m) A_{j-i}] R_{1,0}$ $+ B_{n-m} (M_2 - m) A_{j-i+\alpha} (1 - R_{1,0})$ $1 \leq i \leq j \leq (Q_2 - 1), 1 \leq m \leq n < M_2$	$P_{im,Q_1 M_2} = [P_{s_2,m} B_{M_2-m} (M_2 - m) A_{\geq Q_2-i+\alpha} +$ $m P_{s_2,m} \hat{E} B_{M_2-m} (M_2 - m) A_{\geq Q_2-i}$ $+ (1 - (m + 1) P_{s_2,m}) B_{M_2-m} (M_2 - m) A_{j-i}] R_{1,0}$ $+ B_{M_2-m} (M_2 - m) A_{\geq Q_2-i+\alpha} (1 - R_{1,0})$ $1 \leq i \leq Q_2, 1 \leq m \leq M_2$
$P_{im,Q_2 n} = [P_{s_2,m} B_{n-m} (M_2 - m) A_{\geq Q_2-i+\alpha}$ $+ m P_{s_2,m} E B_{n-m+1} (M_2 - m) A_{\geq Q_2-i}$ $+ m P_{s_2,m} \hat{E} B_{n-m} (M_2 - m) A_{\geq Q_2-i}$ $+ (1 - (m + 1) P_{s_2,m}) B_{n-m} (M_2 - m) A_{\geq Q_2-i}] R_{1,0}$ $+ B_{n-m} (M_2 - m) A_{\geq Q_2-i+\alpha} (1 - R_{1,0})$ $1 \leq i \leq Q_2, 1 \leq m \leq n < M_2$	$P_{im,j M_2} = [P_{s_2,m} B_{M_2-m} (M_2 - m) A_{j-i+\alpha}$ $+ m P_{s_2,m} \hat{E} B_{M_2-m} (M_2 - m) A_{j-i}$ $+ (1 - (m + 1) P_{s_2,m}) B_{M_2-m} (M_2 - m) A_{j-i}] R_{1,0}$ $+ B_{M_2-m} (M_2 - m) A_{j-i+\alpha} (1 - R_{1,0})$ $1 \leq i \leq j \leq (Q_2 - 1), 1 \leq m \leq M_2$
$P_{im,Q_2 m-1} = m P_{s_2,m} E B_0 (M_2 - m) A_{\geq Q_2-i} R_{1,0}$ $+ 0 (1 - R_{1,0}); 1 \leq i \leq Q_2, 1 \leq m \leq M_2$	$P_{im,j m-1} = m P_{s_2,m} E B_0 (M_2 - m) A_{j-i} R_{1,0}$ $+ 0 (1 - R_{1,0}); 1 \leq i \leq j \leq (Q_2 - 1),$ $1 \leq m \leq M_2$
Transiciones imposibles	
$P_{im,j m-1} = 0; 1 \leq i \leq Q_2, j < i, 1 \leq m \leq M_2$ $P_{im,jn} = 0; 0 \leq i \leq j \leq Q_2, 2 \leq m \leq M_2,$ $n \leq m - 2$	$P_{im,jn} = 0; F + 1 \leq i \leq Q_2, j < i - F,$ $0 \leq m \leq n \leq M_2$

Apéndice F

Tablas de las expresiones para obtener las probabilidades de transición de la 2D-DTMC. Escenario WSN homogénea con SPT (capítulo 6)

Tabla F.1: Probabilidades de transición de la 2D DTMC

No hay nodos activos. Las transiciones se deben a los nuevos arribos	
$P_{00,jn} = B_n(M)A_j; \quad 0 \leq n \leq M, 0 \leq j \leq (Q-1)$	$P_{00,Qn} = B_n(M)A_{\geq Q}; \quad 0 \leq n \leq M$
No hay paquetes en la cola de RN. No hay transmisiones debido a RN. Las transiciones las causan otros m nodos activos	
$P_{0m,jn} = S_m EB_{n-m+1}(M-m)A_j$ $+ S_m \hat{E}B_{n-m}(M-m)A_j$ $+ \hat{S}_m B_{n-m}(M-m)A_j$ $0 \leq j \leq (Q-1), 1 \leq m \leq n < M$	$P_{0m,QM} = S_m \hat{E}B_{M-m}(M-m)A_{\geq Q}$ $+ \hat{S}_m B_{M-m}(M-m)A_{\geq Q}$ $1 \leq m \leq M$
$P_{0m,Qn} = S_m EB_{n-m+1}(M-m)A_{\geq Q}$ $+ S_m \hat{E}B_{n-m}(M-m)A_{\geq Q}$ $+ \hat{S}_m B_{n-m}(M-m)A_{\geq Q}$ $1 \leq m \leq n < M$	$P_{0m,jM} = S_m \hat{E}B_{N-m}(M-m)A_j$ $+ \hat{S}_m B_{M-m}(M-m)A_j$ $0 \leq j \leq (Q-1), 1 \leq m \leq M$
$P_{0m,Qm-1} = S_m EB_0(M-m)A_{\geq Q}$ $1 \leq m \leq M$	$P_{0m,jm-1} = S_m EB_0(M-m)A_j$ $0 \leq j \leq (Q-1), 1 \leq m \leq M$
RN es el único nodo activo	
$P_{i0,jn} = P_{s,0}B_n(M)A_{j-i+1}$ $+ (1 - P_{s,0})B_n(M)A_{j-i}$ $1 \leq i \leq j \leq Q, 0 \leq n \leq M$	$P_{i0,Qn} = P_{s,0}B_n(M)A_{\geq Q-i+1}$ $+ (1 - P_{s,0})B_n(M)A_{\geq Q-i}$ $1 \leq i \leq Q, 0 \leq n \leq M$
Transiciones ocasionadas por los $m+1$ nodos activos incluyendo a RN	
$P_{im,jn} = P_{s,m}B_{n-m}(M-m)A_{j-i+1}$ $+ mP_{s,m}EB_{n-m+1}(M-m)A_{j-i}$ $+ mP_{s,m}\hat{E}B_{n-m}(M-m)A_{j-i}$ $+ (1 - (m+1)P_{s,m})B_{n-m}(M-m)A_{j-i}$ $1 \leq i \leq j \leq (Q-1), 1 \leq m \leq n < M$	$P_{im,QM} = P_{s,m}B_{M-m}(M-m)A_{\geq Q-i+1} +$ $mP_{s,m}\hat{E}B_{M-m}(M-m)A_{\geq Q-i}$ $+ (1 - (m+1)P_{s,m})B_{M-m}(M-m)A_{j-i}$ $1 \leq i \leq j \leq Q, 1 \leq m \leq M$
$P_{im,Qn} = P_{s,m}B_{n-m}(M-m)A_{\geq Q-i+1}$ $+ mP_{s,m}EB_{n-m+1}(M-m)A_{\geq Q-i}$ $+ mP_{s,m}\hat{E}B_{n-m}(M-m)A_{\geq Q-i}$ $+ (1 - (m+1)P_{s,m})B_{n-m}(M-m)A_{\geq Q-i}$ $1 \leq i \leq Q, 1 \leq m \leq n < M$	$P_{im,jM} = P_{s,m}B_{M-m}(M-m)A_{j-i+1}$ $+ mP_{s,m}\hat{E}B_{M-m}(M-m)A_{j-i}$ $+ (1 - (m+1)P_{s,m})B_{M-m}(M-m)A_{j-i}$ $1 \leq i \leq j \leq (Q-1), 1 \leq m \leq n \leq M$
$P_{im,Qm-1} = mP_{s,m}EB_0(M-m)A_{\geq Q-i}$ $1 \leq i \leq Q, 1 \leq m \leq M$	$P_{im,jm-1} = mP_{s,m}EB_0(M-m)A_{j-i}$ $1 \leq i \leq j \leq (Q-1), 1 \leq m \leq M$
	$P_{im,i-1n} = P_{s,m}B_{n-m}(M-m)A_0$ $1 \leq i \leq Q, 0 \leq m \leq n \leq M$
Transiciones imposibles	
$P_{im,jm-1} = 0; \quad 1 \leq i \leq Q, j < i, \quad 1 \leq m \leq M$	$P_{im,jn} = 0; \quad 2 \leq i \leq Q, j < i-1, \quad 0 \leq m \leq n \leq M$
$P_{im,i-1n} = 0; \quad 1 \leq i \leq Q, 1 \leq m \leq M, \quad n < m,$	$P_{im,jn} = 0; \quad 0 \leq i \leq j \leq Q, 2 \leq m \leq M, \quad n < m-1$

Apéndice G

Publicaciones

G.1 Revistas

1. Canek Portillo, Jorge Martinez-Bauset, Vicent Pla and Vicente Casares-Giner.
Modeling of Duty-Cycled MAC Protocols for Heterogeneous WSN with Priorities. Electronics 2020, 9, 467.
2. Vicente Casares-Giner, Jorge Martinez-Bauset and Canek Portillo.
Performance evaluation of framed slotted ALOHA with reservation packets and successive interference cancellation for M2M networks, Computer Networks, 155, 15-30, 2019.

G.2 Congresos

1. Canek Portillo, Jorge Matinez-Bauset and Vicent Pla.
Modelling of S-MAC for Heterogenous WSN, In Proceeding NTMS'18 - 2018 9th IFIP International Conference on New Technologies, Mobility

and Security, Paris, France, 26-28 de febrero, 2018, pp. 1-6.

2. Canek Portillo, Jorge Martinez-Bauset and Vicent Pla.
Energy Modeling and Analysis for IoT Sensor Devices: A DTMC-Based Approach, In Proceeding ITACA-WIICT'18 - 2017 Workshop on Innovation on Information and Communication Technologies, València, España, 2018.

3. Portillo, C., Martinez-Bauset, J., Pla, V., Casares-Giner, V.
A DTMC-Based Energy Analysis for Duty-Cycled WSN with Classes. The V Meeting of PhD Students. Doctoral School of the Technical University of Valencia (UPV). València, España, July 5th, 2018.

4. Canek Portillo, Jorge Martinez-Bauset and Vicent Pla.
Modelling and Performance Analysis of MAC Protocols for Heterogeneous WSN, In Proceeding ITACA-WIICT'17 - 2017 Workshop on Innovation on Information and Communication Technologies, València, España, 2017.

Apéndice H

Proyectos de investigación

Este trabajo se ha desarrollado en el marco de los siguientes proyectos de investigación:

- Platform of Services for Smart Cities with Dense Machine to Machine Networks, PLASMA, TIN2013-47272-C2-1-R.
- New Paradigms of Elastic Networks for a World Radically Based on Cloud and Fog Computing, Elastic Networks, TEC2015-71932-REDT.

Bibliografía

- [1] MICA Data Sheet. Crossbow Technology Incorporated, San Jose, CA, USA. [Online]. Available: <http://www.openautomation.net/uploadsproductos/micaz-datasheet.pdf> (accessed on 19-01-2020).
- [2] T. Adame, A. Bel, B. Bellalta, J. Barcelo, and M. Oliver. IEEE 802.11AH: the WiFi approach for M2M communications. *IEEE Wireless Communications*, 21(6):144–152, Dec. 2014.
- [3] K. Akkaya, M. Demirbas, and R. S. Aygun. The impact of data aggregation on the performance of wireless sensor networks. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 8(2):171–193, 2008.
- [4] M. Alam, O. Berder, D. Menard, T. Anger, and O. Sentieys. A hybrid model for accurate energy analysis of WSN nodes. *EURASIP Journal on Embedded Systems*, 2011:1–16, 2011.
- [5] M. N. Alam and Y.-C. Kim. Efficient MAC Protocol for Hybrid Wireless Network with Heterogeneous Sensor Nodes. *Journal of Sensors*, 2016, 2016.
- [6] B. Alinia, M. H. Hajiesmaili, A. Khonsari, and N. Crespi. Maximum-Quality Tree Construction for Deadline-Constrained Aggregation in WSNs. *IEEE Sensors Journal*, 17(12):3930–3943, June 2017.
- [7] H. M. Ammari, editor. *Signals and Communication Technology The Art of Wireless Sensor Networks. Volume 1: Fundamentals*. Springer, Darnborn, MI, USA, 2014.
- [8] S. Arshad, A. Al-Sadi, and A. Barnawi. Z-MAC: Performance Evaluation and Enhancements. *Procedia Computer Science*, 21:485–490, 2013.

- [9] A. Bachir, M. Dohler, T. Watteyne, and K. K. Leung. MAC Essentials for Wireless Sensor Networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 12(2):222–248, 2010.
- [10] M. Bagaa, Y. Challal, A. Ksentini, A. Derhab, and N. Badache. Data Aggregation Scheduling Algorithms in Wireless Sensor Networks: Solutions and Challenges. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 16(3):1339–1368, Third 2014.
- [11] J. Beaudaux, A. Gallais, J. Montavont, T. Noel, D. Roth, and E. Valentin. Thorough Empirical Analysis of X-MAC Over a Large Scale Internet of Things Testbed. *IEEE Sensors Journal*, 14(2):383–392, Feb. 2014.
- [12] J. Beaudaux, A. Gallais, and T. Noël. Heterogeneous MAC duty-cycling for energy-efficient Internet of Things deployments. *Networking Science*, 3(1-4):54–62, Dec. 2013.
- [13] M. Buettner, G. V. Yee, E. Anderson, and R. Han. X-MAC: a short preamble MAC protocol for duty-cycled wireless sensor networks. In *Proceedings of the 4th international conference on Embedded networked sensor systems - SenSys '06*, pages 307–320, New York, New York, USA, 2006. ACM Press.
- [14] Y. Cho, M. Kim, and S. Woo. Energy efficient IoT based on wireless sensor networks. In *2018 20th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT)*, pages 294–299, Feb 2018.
- [15] M. C. Domingo and R. Prior. Energy analysis of routing protocols for underwater wireless sensor networks. *Computer Communications*, 31(6):1227–1238, 2008. Advanced Location-Based Services.
- [16] L. Galluccio and S. Palazzo. End-to-End Delay and Network Lifetime Analysis in a Wireless Sensor Network Performing Data Aggregation. In *GLOBECOM 2009 - 2009 IEEE Global Telecommunications Conference*, pages 1–6, Nov 2009.
- [17] D. A. Gomes and D. Bianchini. Interconnecting Wireless Sensor Networks with the Internet Using Web Services. *IEEE Latinam. Trans.*, 14(4):1937–1942, 2016.
- [18] L. Guntupalli, J. Martinez-Bauset, and F. Y. Li. Performance of frame transmissions and event-triggered sleeping in duty-cycled WSNs with error-prone wireless links. *Computer Networks*, 134:215–227, 2018.

- [19] L. Guntupalli, J. Martinez-Bauset, F. Y. Li, and M. A. Weitnauer. Aggregated packet transmission in duty-cycled WSNs: Modeling and performance evaluation. *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, 66(1):563–579, 2016.
- [20] X. He, S. Liu, G. Yang, and N. Xiong. Achieving Efficient Data Collection in Heterogeneous Sensing WSNs. *IEEE Access*, 6:63187–63199, 2018.
- [21] P. Huang, L. Xiao, S. Soltani, M. W. Mutka, and N. Xi. The Evolution of MAC Protocols in Wireless Sensor Networks: A Survey. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 15(1):101–120, 2013.
- [22] Injong Rhee, A. Warriier, M. Aia, Jeongki Min, and M. Sichertiu. Z-MAC: A Hybrid MAC for Wireless Sensor Networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 16(3):511–524, June 2008.
- [23] M. Kamarei, M. Hajimohammadi, A. Patooghy, and M. Fazeli. OLDA: An Efficient On-Line Data Aggregation Method for Wireless Sensor Networks. In *2013 Eighth International Conference on Broadband and Wireless Computing, Communication and Applications*, pages 49–53, Oct 2013.
- [24] N. Khalil, M. R. Abid, D. Benhaddou, and M. Gerndt. Wireless sensors networks for Internet of Things. In *2014 IEEE ninth international conference on Intelligent sensors, sensor networks and information processing (ISSNIP), Singapore, Singapore, 21-24 April.*, pages 1–6. IEEE, 2014.
- [25] E. Khorov, A. Lyakhov, A. Krotov, and A. Guschin. A survey on IEEE 802.11ah: An enabling networking technology for smart cities. *Computer Communications*, 58:53–69, 2015.
- [26] M. Kim. Performance analysis of service differentiation for IEEE 802.15.4 slotted CSMA/CA. In *Asia-Pacific Network Operations and Management Symposium*, pages 11–22. Springer, 2006.
- [27] A. Kumar, M. Zhao, K.-J. Wong, Y. L. Guan, and P. H. J. Chong. A comprehensive study of IoT and WSN MAC protocols: Research issues, challenges and opportunities. *IEEE Access*, 6:76228–76262, 2018.
- [28] Y.-W. Kuo, C.-L. Li, J.-H. Jhang, and S. Lin. Design of a wireless sensor network-based IoT platform for wide area and heterogeneous applications. *IEEE Sensors J.*, 18(12):5187–5197, 2018.
- [29] Z. Li, Y. Peng, D. Qiao, and W. Zhang. LBA: Lifetime balanced data aggregation in low duty cycle sensor networks. In *2012 Proceedings IEEE INFOCOM*, pages 1844–1852, March 2012.

- [30] Z. Li, Y. Peng, D. Qiao, and W. Zhang. Joint Aggregation and MAC design to prolong sensor network lifetime. In *2013 21st IEEE International Conference on Network Protocols (ICNP)*, pages 1–10, Oct 2013.
- [31] Z. Libo, H. Tian, and G. Chunyun. Wireless multimedia sensor network for rape disease detections. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2019(1):159, 2019.
- [32] C. Lv and J. Zhu. A new analysis model for IEEE 802.15. 4 MAC with heterogeneous unsaturated conditions. In *Proceedings of 2012 International Conference on Measurement, Information and Control*, volume 1, pages 92–97. IEEE, 2012.
- [33] J. Martinez-Bauset, L. Guntupalli, and F. Y. Li. Performance analysis of synchronous duty-cycled MAC protocols. *IEEE Wireless Commun. Lett.*, 4(5):469–472, 2015.
- [34] J. Mo. *Performance modeling of communication networks with Markov chains*. Morgan & Claypool Publishers, 2010.
- [35] K. Nguyen, U. Meis, and Y. Ji. An energy efficient, high throughput MAC protocol using packet aggregation. In *2011 IEEE GLOBECOM Workshops (GC Wkshps)*, pages 1236–1240, Dec 2011.
- [36] T. D. Nguyen, J. Y. Khan, and D. T. Ngo. An effective energy-harvesting-aware routing algorithm for WSN-based IoT applications. In *2017 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pages 1–6, May 2017.
- [37] T. D. Nguyen, J. Y. Khan, and D. T. Ngo. A Self-Sustainable RF Energy Harvesting Algorithm for WSN-Based IoT Applications. In *GLOBECOM 2017 - 2017 IEEE Global Communications Conference*, pages 1–6, Dec 2017.
- [38] J. Ortín, M. Cesana, A. E. Redondi, M. Canales, and J. R. Gállego. Analysis of unslotted IEEE 802.15.4 networks with heterogeneous traffic classes. *IEEE Wireless Communications Letters*, 8(2):380–383, 2019.
- [39] M. Park. IEEE 802.11ah: sub-1-GHz license-exempt operation for the internet of things. *IEEE Communications Magazine*, 53(9):145–151, Sept. 2015.
- [40] R. Rajagopalan and P. K. Varshney. Data-aggregation techniques in sensor networks: A survey. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 8(4):48–63, Fourth 2006.

- [41] A. Rajandekar and B. Sikdar. A survey of MAC layer issues and protocols for machine-to-machine communications. *IEEE Internet of Things Journal*, 2(2):175–186, 2015.
- [42] P. Ramezani and M. R. Pakravan. Overview of MAC protocols for energy harvesting wireless sensor networks. In *2015 IEEE 26th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, pages 2032–2037. IEEE, 2015.
- [43] N. Saxena, A. Roy, and J. Shin. Dynamic duty cycle and adaptive contention window based QoS-MAC protocol for wireless multimedia sensor networks. *Computer Networks*, 52(13):2532–2542, 2008.
- [44] N. Saxena, A. Roy, and J. Shin. A QoS-based energy-aware MAC protocol for wireless multimedia sensor networks. In *VTC Spring 2008 - IEEE Vehicular Technology Conference*, pages 183–187. IEEE, May 2008.
- [45] X. Shi, X. An, Q. Zhao, H. Liu, L. Xia, X. Sun, and Y. Guo. State-of-the-Art Internet of Things in Protected Agriculture. *SENSORS-BASEL*, 19(8):1833, 2019.
- [46] M. Souil, A. Bouabdallah, and A. E. Kamal. Efficient QoS provisioning at the MAC layer in heterogeneous wireless sensor networks. *Computer Communications*, 43:16–30, 2014.
- [47] U. M. Sridevi S, Priyadharshini R. Survey of MAC Protocols for Heterogeneous Traffic in Wireless Sensor Networks. *International Journal of Computer Science and Business Informatics IJCSBI.ORG ISSN*, 11(1):1694–2108, 2014.
- [48] S. Sudevalayam and P. Kulkarni. Energy Harvesting Sensor Nodes: Survey and Implications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 13(3):443–461, 2011.
- [49] Y. Sun, S. Du, O. Gurewitz, and D. B. Johnson. DW-MAC: A Low Latency, Energy Efficient Demand-Wakeup MAC Protocol for Wireless Sensor Networks. In *Proceedings of the 9th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing - MobiHoc '08*, page 53, New York, New York, USA, 2008. ACM Press.
- [50] S. B. Tom J. Kazmierski, editor. *Energy Harvesting Systems. Principles, Modeling and Applications*. Springer New York Dordrecht Heidelberg London, New York, 2011.

- [51] P. Traynor, R. Kumar, H. Choi, G. Cao, S. Zhu, and T. La Porta. Efficient Hybrid Security Mechanisms for Heterogeneous Sensor Networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 6(6):663–677, June 2007.
- [52] A. S. Wander, N. Gura, H. Eberle, V. Gupta, and S. C. Shantz. Energy analysis of public-key cryptography for wireless sensor networks. In *Third IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications*, pages 324–328, March 2005.
- [53] Y. Wang, M. C. Vuran, and S. Goddard. Stochastic Analysis of Energy Consumption in Wireless Sensor Networks. In *2010 7th Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks (SECON)*, pages 1–9, June 2010.
- [54] O. Yang and W. Heinzelman. Modeling and throughput analysis for SMAC with a finite queue capacity. In *2009 International Conference on Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing (ISSNIP), Melbourne, Australia, 7-10 December.*, pages 409–414. IEEE, 2009.
- [55] O. Yang and W. Heinzelman. Modeling and performance analysis for duty-cycled MAC protocols with applications to S-MAC and X-MAC. *IEEE Trans. Mobile Comput.*, 11(6):905–921, 2012.
- [56] S.-H. Yang. *Wireless Sensor Networks: Principles, Design and Applications*. Signals and Communication Technology. Springer London, London, 2014.
- [57] M. Yarvis, N. Kushalnagar, H. Singh, A. Rangarajan, Y. Liu, and S. Singh. Exploiting heterogeneity in sensor networks. In *Proceedings IEEE 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies.*, volume 2, pages 878–890. IEEE, 2005.
- [58] W. Ye, J. Heidemann, and D. Estrin. An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks. In *Proceedings. Twenty-First Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*, volume 3, pages 1567–1576. IEEE, 2002.
- [59] W. Ye, J. Heidemann, and D. Estrin. Medium access control with coordinated adaptive sleeping for wireless sensor networks. *IEEE/ACM Transactions on networking*, 12(3):493–506, 2004.
- [60] G. Yıldırım and Y. Tatar. On WSN heterogeneity in IoT and CPSs. In *2017 International Conference on Computer Science and Engineering (UBMK)*, pages 1020–1024. IEEE, 2017.

- [61] S. Yinbiao, K. Lee, P. Lanctot, F. Jianbin, H. Hao, B. Chow, and J.-P. Desbenoit. Internet of things: wireless sensor networks. *White Paper, International Electrotechnical Commission*, <http://www.iec.ch>, page 11, 2014.
- [62] Y. Yun Wang, X. Xiaodong Wang, B. Bin Xie, D. Demin Wang, and D. Agrawal. Intrusion Detection in Homogeneous and Heterogeneous Wireless Sensor Networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 7(6):698–711, June 2008.
- [63] H.-Y. Zhou, D.-Y. Luo, Y. Gao, and D.-C. Zuo. Modeling of node energy consumption for wireless sensor networks. *Wireless Sensor Network*, 3(01):18, 2011.