



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

DISEÑO Y EVALUACIÓN DE PROTOCOLO DE ACCESO MÚLTIPLE PARA  
SISTEMA DE IOT NANOSATELITAL

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL ELÉCTRICO

TOMÁS PABLO FERRER BRICEÑO

PROFESOR GUÍA:  
ALEX BECERRA SAAVEDRA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
SANDRA CÉSPEDES UMAÑA  
CLAUDIO ESTÉVEZ MONTERO

SANTIAGO DE CHILE  
2019



RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR  
AL TÍTULO DE INGENIERÍA CIVIL ELÉCTRICA  
POR: TOMÁS PABLO FERRER BRICEÑO  
FECHA: 2019  
PROF. GUÍA: ALEX BECERRA SAAVEDRA

## DISEÑO Y EVALUACIÓN DE PROTOCOLO DE ACCESO MÚLTIPLE PARA SISTEMA DE IOT NANOSATELITAL

El advenimiento de las redes inalámbricas 5G, con el consecuente papel protagonista de la Internet de las cosas (IoT) y las comunicaciones entre máquinas (M2M por sus siglas en inglés), están impulsando a las tecnologías satelitales a desempeñar un papel importante como parte de la infraestructura de telecomunicaciones que soporta los servicios de IoT. En particular, el uso de un satélite, o varios (i.e., una constelación), para servicios IoT permiten una cobertura completa sobre sensores y nodos en áreas remotas que no están cubiertas por redes de acceso terrestre.

Hasta hace algunos años el acceso a los servicios satelitales había sido una solución excesivamente costosa. Sin embargo, actualmente se construye y se despliega una nueva ola de satélites pequeños de bajo costo, conocidos como *CubeSats*. Estas aeronaves brindan cobertura a través de constelaciones a una fracción del costo de los tradicionales, abriendo oportunidades para empresas emergentes y países en desarrollo a hacer uso del espacio.

Considerando lo anterior, se aborda el desafío de comunicar un gran cantidad de nodos terrestres con un satélite *CubeSat* para proveer servicios de conectividad IoT. Las restricciones impuestas por esta tecnología de bajo costo, en conjunto con los requerimientos relacionados a un servicio IoT, plantean un gran reto cuando se afronta desde la perspectiva dar conectividad a una cantidad masiva de usuarios. Lo anterior, se relaciona directamente con la capa de Control de Acceso Múltiple (MAC, por sus siglas en inglés), encargada de gestionar los recursos del canal para la realización de una comunicación eficiente entre muchos interlocutores.

Con esto, el escenario de interés en esta memoria considera el problema del control de acceso al medio en una constelación LEO (satélites de órbita baja, con sus singlas en inglés) de nanosatélites con un único canal *halfduplex* utilizado para recopilar información de miles de sensores en todo el mundo. Sistemas satelitales anteriores (como Argos o Globalstar, por ejemplo) emplean algoritmos MAC simples o poco escalables (como Aloha y CDMA, respectivamente) para la coordinación de las comunicaciones de nodo a satélite. Otras propuestas y adaptaciones de los algoritmos MAC abordan el problema de la escalabilidad sin penalizar la tasa de entrega de datos, sin embargo, esos protocolos están diseñados principalmente para sistemas sin altas restricciones en la capacidad de procesamiento o en el número de canales disponibles.

En el presente trabajo de título se propone un nuevo protocolo MAC, diseñado tomando en cuenta que se cumplan los requerimientos en rendimiento, que mantenga la escalabilidad necesaria para el servicio masivo de sensores/actuadores de IoT y que su implementación se adecúe a las restricciones impuestas por la tecnología utilizada en *CubeSats*.



*Dedicada con amor, a mi hijo,  
Santiago.*



# Agradecimientos

Primero que todo, quiero agradecer a mi madre, Yolanda, por todo su amor, comprensión y apoyo incondicional. A mis amados hermanos, Salva y Palo. A mi querido Talo. A todos los de la familia que me han acompañado y aportado en definir quién soy. Papá, la gran Mamiyola, tío Adolfo, Pali, primos, tíos...

Agradecer también a la Panchi y toda su familia, que considero como mía también. Por todo el apoyo, compañía y buena onda. Pili, Rafa, Javi, Tobal, en fin...gracias a la familia de la casa del Rocky.

A mis amigos de la U; los del Peluka, los de tantas pichangas, laboratorios y otros, gracias por hacer de estos años de estudio mucho más que eso. Mención honrosa para la queridísima Luli, amiga a primera vista, y a la gloriosa Maitane, porque siempre estarán en mi esos bellos momentos que pasamos sin saber...♪

A mis queridos amigos del OPA, por todo.

Gracias a Alex y a la profe Sandra, por el compromiso, profesionalismo, paciencia y buena disposición durante el desarrollo de la memoria. Fue un agrado trabajar con ambos.

A todos, muchas gracias.



# Tabla de Contenido

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Hipótesis . . . . .	2
1.2. Objetivos . . . . .	3
1.2.1. Objetivo General . . . . .	3
1.2.2. Objetivos Específicos . . . . .	3
<b>2. Marco Teórico y Estado del arte</b>	<b>4</b>
2.1. Tecnología Espacial . . . . .	4
2.2. Comunicaciones de tecnologías IoT . . . . .	9
2.3. Protocolos MAC . . . . .	10
2.3.1. Métricas . . . . .	11
2.3.2. Categorías de Protocolos MAC . . . . .	12
2.4. Protocolos MAC para IoT satelital y comunicaciones M2M . . . . .	14
<b>3. Evaluación de Protocolos MAC en IoT Nanosatelital</b>	<b>17</b>
3.1. Definición de Escenario . . . . .	17
3.2. Evaluación de estado del arte . . . . .	18
3.2.1. Análisis de protocolos MAC . . . . .	18
3.2.2. Resumen y conclusiones respecto al estado del arte . . . . .	21
<b>4. Diseño e implementación de nuevo protocolo MAC</b>	<b>22</b>
4.1. Metodología . . . . .	22
4.1.1. Procedimiento . . . . .	22
4.1.2. Análisis matemático . . . . .	23
4.1.3. Simulación . . . . .	23
4.2. Protocolo versión 0 . . . . .	23
4.2.1. Funcionamiento . . . . .	23
4.2.2. Parámetros y Métricas . . . . .	25
4.2.3. Simulación de Protocolo versión 0 . . . . .	27
4.2.4. Análisis matemático preliminar . . . . .	29
4.2.5. Simulaciones y resultados . . . . .	39
4.2.6. Análisis . . . . .	52
4.3. Protocolo versión Mejorada . . . . .	53
4.3.1. Análisis de tiempos de arribo . . . . .	53
4.3.2. Funcionamiento Protocolo mejorado . . . . .	55
4.3.3. Simulaciones y resultados . . . . .	59

4.3.4. Análisis . . . . .	61
4.4. Comparación Protocolo versión 0 y Protocolo mejorado . . . . .	62
<b>5. Análisis de Resultados</b>	<b>64</b>
5.1. Protocolo versión 0 . . . . .	64
5.2. Protocolo Mejorado . . . . .	66
<b>6. Conclusiones</b>	<b>70</b>
6.1. Perspectivas para el futuro . . . . .	71
<b>Anexos</b>	<b>73</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>76</b>

# Índice de Tablas

2.1. Conjunto de constelaciones comerciales que brindan servicios de comunicación. Actualizado a 2019. . . . .	7
2.2. Características principales de algunas tecnologías IoT ampliamente desplegadas hoy en día. . . . .	10
2.3. Comparación de protocolos MAC, considerando el rendimiento en comunicaciones, complejidad de la implementación, eficiencia energética y el impacto de la topología. . . . .	16
3.1. Resumen de características del escenario para IoT nanosatelital. . . . .	18
4.1. Notación de variables y parámetros utilizados para el análisis de la etapa de disputa. . . . .	30
4.2. Rangos para los parámetros de la Simulación 1. . . . .	40
4.3. Rangos para los parámetros de la Simulación 2. . . . .	43
4.4. Combinaciones de parámetros que arrojan mejor rendimiento en cuanto a tiempo medio de disputa para distintas cantidades de nodos. Valores obtenidos a partir de los mínimos de la Figura 4.11. . . . .	46
4.5. Rangos para los parámetros de la Simulación 3. . . . .	47
4.6. Rangos para las variables de la Simulación 3. . . . .	47
4.7. Combinaciones de parámetros que arrojan mejor rendimiento en cuanto a tiempo medio de disputa para distintas cantidades de nodos. Valores obtenidos a partir de los mínimos de la Figura 4.13. . . . .	47
4.8. Resultados Simulación 4. Combinaciones de parámetros que arrojan mejor rendimiento en cuanto a tiempo medio de asignación para distintas cantidades de nodos. . . . .	50
4.9. Resultados Simulación 3. Combinaciones de parámetros que arrojan mejor rendimiento en cuanto a tiempo medio de asignación para distintas cantidades de nodos. . . . .	52
4.10. Rangos para los parámetros de la Simulación 5. . . . .	59
4.11. Resultados Simulación 5. Evaluación protocolo Mejorado, con distintos valores de $f_r$ . . . . .	59
4.12. Comparación de cantidad media de paquetes de solicitud que envía cada nodo durante una etapa de disputa. . . . .	62
5.1. Resultados Simulación 4, Configuración 2. . . . .	65

5.2. Protocolo versión 0 en comparación con protocolos MAC del estado del arte, considerando el rendimiento en comunicaciones, complejidad de la implementación, eficiencia energética y el impacto de la topología. . . . .	65
5.3. Resultados Simulación 5, factor de reducción de tiempo de disputa $f_r = 0,2$ .	67
5.4. Protocolo versión 0 en comparación con protocolos MAC del estado del arte, considerando el rendimiento en comunicaciones, complejidad de la implementación, eficiencia energética y el impacto de la topología. . . . .	68

# Índice de Ilustraciones

2.1.	Satélites activos orbitando la Tierra, separados por país de origen y tipo de órbita, de un total de 2062 satélites activos reportados hasta el 31 de Marzo de 2019. Datos publicados por la UCS en su reporte anual [1]. . . . .	5
2.2.	CubeSats lanzados desde 1998. Datos tomados de [2]. . . . .	8
2.3.	Ejemplo de funcionamiento de CRDSA en un bloque de intervalos. El paquete enviado por el Usuario 4 se recibe sin colisión en el cuarto intervalo. El paquete incluye la posición de su "gemelo", ubicado en el primer intervalo. Luego, se utiliza un método de cancelación de interferencias en dicho intervalo y en los siguientes. En este ejemplo, los paquetes de los Usuarios 1, 2 y 5 pueden ser obtenidos satisfactoriamente, permitiendo alcanzar $S = 0,6$ para una carga de $C = 1$ . . . . .	15
2.4.	Taxonomía de protocolos de acceso múltiple considerados para la evaluación del sistema nanosatelital para conectividad IoT. Protocolos con * no requieren sincronía en el tiempo. . . . .	16
3.1.	Escenario ilustrativo en el que un <i>CubeSat</i> -o una constelación de ellos- provee conectividad para aplicaciones IoT en la modalidad <i>store and forward</i> . . . . .	18
3.2.	Comparación de protocolos MAC en el contexto del escenario para servicio IoT provisto por tecnología nanosatelital. . . . .	20
4.1.	Funcionamiento de Protocolo versión 0. Etapa de disputa exitosa seguida de una etapa de envío de datos. . . . .	25
4.2.	Visualización de protocolo simulado para 10 sensores. En (a), el <i>Satélite</i> envía el mensaje <i>Start</i> . En (b), se realiza la disputa por parte de los objetos <i>Sensor</i> . En (c), se le asigna la etapa de envío de datos a uno de los sensores. Finalmente, en (d), el <i>Sensor</i> elegido realiza el envío de datos. . . . .	29
4.3.	Funciones de probabilidad consideradas para el análisis matemático ( $T_d = 50\ ms$ , $T = 5\ ms$ , $m = 10$ ). . . . .	32
4.4.	Tasa de etapas de disputa exitosas en base a Ecuación 4.6. Las curvas exponenciales son identificadas con su media, $\mu$ . $T_d = 50\ ms$ , $m = 10$ . . . . .	34
4.5.	Rendimiento Normalizado calculado en base a la a Ecuación 4.15. Las curvas exponenciales son identificadas con su media, $\mu$ . $t_{data} = 200\ ms$ , $T_d = 50\ ms$ , $m = 10$ . . . . .	35
4.6.	Modelo teórico de tiempo medio de asignación, $T_{exito}$ , para un escenario con 1000 nodos y distribución exponencial, en función de la media de la distribución y el tiempo total de disputa. . . . .	36

4.7. Simulación en OMNET++ comparado con análisis matemático. Se considera una duración de etapa de disputa $T_d = 50ms$ , $\hat{E}$ corresponde a las curvas calculadas con resultados de la simulación y $E$ las curvas calculadas en base a la formulación teórica. . . . .	37
4.8. Rendimiento normalizado comparando simulación en OMNET++ con análisis matemático. $T_d = 50 ms$ , $t_{data} = 200 ms$ . $\hat{E}$ corresponde a las curvas calculadas con resultados de la simulación y $E$ las curvas calculadas en base a la formulación teórica. . . . .	38
4.9. Simulación 1, resultados para media $\mu = 0,2 \cdot T_d$ . (a) Tasa de etapas exitosas, (b) Tiempo medio de disputa para asignación exitosa, (c) Rendimiento Normalizado , (d) Tasa de pérdida de paquetes indirecta. . . . .	41
4.10. Simulación 1, resultados de tiempo medio de asignación considerando media de la distribución $\mu = 0,2 \cdot T_d$ , para distintos tiempos de etapa de disputa. . . . .	42
4.11. Simulación 2, resultados de tiempo de asignación para las distintas cantidades de nodos en (a), (b), (c) y (d), para 400, 600, 800 y 1000, respectivamente. A la izquierda, un gráfico tridimensional cuya altura representa el tiempo medio de asignación. A la derecha, los mismos datos representados con un mapa de calor. . . . .	45
4.12. Simulación 2, tiempo medio de asignación variando tiempo de etapa de disputa ( $T_d$ ), $\mu = 0,125 \cdot T_d$ . . . . .	46
4.13. Simulación 3, resultados de tiempo de asignación para las distintas cantidades de nodos en (a), (b), (c) y (d), para 400, 600, 800 y 1000, respectivamente. . . . .	49
4.14. Simulación 3, tiempo medio de disputa para asignación exitosa para distintas cantidades de nodos variando $\mu$ , $T_d = 50 ms$ . . . . .	50
4.15. Simulación 4, resultados de las cuatro configuraciones distintas, variando la cantidad de nodos bajo la huella del satélite. (a) Tasa de etapas exitosas, (b) Tiempo medio de asignación, (c) Rendimiento Normalizado y (d) Tasa de pérdida de paquetes. . . . .	51
4.16. Análisis de tiempos de arribo para la Configuración 2. Se muestra un histograma que registra el porcentaje de veces que el mensaje de solicitud llegó en determinado intervalo de tiempo dentro del tiempo de una etapa de disputa, para distintas cantidades de nodos. . . . .	54
4.17. Función de densidad de probabilidad para elección de tiempo de espera de los nodos, considerando Configuración 2. Las curvas muestran la función de distribución tradicional y la distribución exponencial inversa. La variable $x$ representa el tiempo dentro de la etapa de disputa, normalizado con $T_d$ . . . . .	54
4.18. Análisis de tiempos de arribo para la Configuración 2 y exponencial inversa como función de distribución. Se muestra un histograma que registra como se distribuye la llegada de mensajes de solicitud durante una etapa de disputa, para distintas cantidades de nodos. . . . .	55
4.19. Análisis de tiempos de arribo para la Configuración 2. Se muestra el tiempo (normalizado con $T_d$ ) dentro del cual se recibe el $X\%$ de las veces al menos un mensaje de solicitud exitoso, con $X$ igual a 90, 95 y 99 para las distintas curvas. . . . .	56
4.20. Descripción gráfica del algoritmo que define al Protocolo mejorado. . . . .	57

4.21. Descripción gráfica de cambios al protocolo. Bloque rojo representa la etapa de disputa. Bloque negro representa etapa de envío de datos. La curva roja representa la función de densidad de probabilidades para la elección del tiempo de espera de cada nodo. . . . .	58
4.22. Simulación 5, resultados para cinco tiempos mejorados ( $T_m$ ) distintos equivalentes al tiempo de disputa ( $T_d$ ) reducido en el factor $f_e$ , variando la cantidad de nodos bajo la huella del satélite. (a) Tasa de etapas exitosas, (b) Tiempo medio de asignación, (c) Rendimiento Normalizado y (d) Tasa de pérdida de paquetes. . . . .	60
4.23. Comparación entre Protocolo versión 0 (Configuración 2) y Mejorado (tiempo mejorado, $T_m = 0,2 \cdot T_d$ ), variando la cantidad de nodos bajo la huella del satélite. (a) Tasa de etapas exitosas, (b) Tiempo medio de asignación, (c) Rendimiento Normalizado y (d) Tasa de pérdida de paquetes. . . . .	63
5.1. Comparación de Protocolo versión 0 y protocolos MAC del estado del arte en el contexto del escenario para servicio IoT provisto por tecnología nanosatelital.	66
5.2. Comparación de protocolo mejorado y protocolos MAC del estado del arte en el contexto del escenario para servicio IoT provisto por tecnología nanosatelital.	69
6.1. Tiempo medio de asignación para distintos factores de reducción, $f_r$ . Destacada con rojo la curva que minimiza el tiempo medio de asignación para toda cantidad de nodos. . . . .	72
6.2. Protocolo versión 0 vs Mejorado, sin restricción de un paquete de datos por nodo sensor por pasada. . . . .	73
6.3. Comparación de rendimiento, cuando se trunca de manera distinta la distribución exponencial. . . . .	75

# Lista de Acrónimos

Las siguientes abreviaciones son utilizadas en el presente documento:

ACK	Acknowledgement
ADCS	Attitude Determination and Control System
ADS-B	Automatic Dependent Surveillance Broadcast
AIS	Automatic Identification System
CDMA	Code Division Multiple Access
CRSDA	Content Resolution Diversity Slotted Aloha
CSA	Coded Slotted Aloha
CSMA	Carrier Sense Multiple Access
CSMA/CA	CSMA with Collision Avoidance
CSS	Chirp Spread Spectrum
CTS	Clear To Send
DA	Diversity Aloha
DSA	Diversity Slotted Aloha
E-SSA	Enhanced Spread Spectrum Aloha
ESA	European Space Agency
FCC	Federal Communications Commission
FC-TDMA	Fixed Competitive TDMA
FDMA	Frequency Division Multiple Access
GEO	Geosynchronous Equatorial Orbit
GLONASS	Global Orbiting Navigation Satellite System
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
HEO	Highly Elliptical Orbit
ISIC	Iterative Soft Interference Cancellation
IRSA	Irregular Repetition Slotted Aloha
IoT	Internet of Things
ISM	Industrial, Scientific and Medical
LEO	Low Earth Orbit
LPWA	Low Power Wide Area
LPWAN	Low Power Wide Area Network

M2M	Machine to Machine
MarCO	Mars Cube One
MAC	Medium Access Control
MEO	Medium Earth Orbit
MF-CRSDA	Multi Frequency CRSDA
MuSCA	Multi Slot Coded Aloha
NASA	National Agency for Space Administration
OBC	On-Board Computer
OSI	Open System Interconnection
PLR	Packet Loss Ratio
RFTDMA	Random Frequency Time Division Multiple Access
RTS	Request To Send
SNIR	Signal to Noise Plus Interference Ratio
SSA	Spread Spectrum Aloha
SS-CRSDA	Spread Spectrum CRSDA
SIC	Successive Interference Cancellation
TDMA	Time Division Multiple Access
UNB	Ultra Narrowband
WSN	Wireless Sensor Network



# Capítulo 1

## Introducción

El trabajo de tesis documentado en el presente informe se enmarca dentro de dos temáticas de relevancia en el panorama mundial de desarrollo tecnológico: la primera, referente a la nueva generación de tecnologías de comunicación e información, con el rol principal de la Internet de las Cosas (IoT, por su sigla en inglés). La segunda, hace referencia a los avances en materia satelital y las nuevas tendencias en este ámbito, sobre todo a escala país y universitaria, con el lanzamiento del primer nanosatélite, SUCHAI-1, construido en Chile.

Respecto al primero, pronósticos hechos por Cisco, auguran que para el año 2020 el número de dispositivos conectados a Internet superará los 50 mil millones [3], incremento que se debe principalmente al desarrollo de las aplicaciones IoT y las comunicaciones máquina a máquina (M2M, por su sigla en inglés). Cada uno de estos dispositivos conectados estará constantemente monitoreando e interviniendo en la vida cotidiana, idealmente con el fin de ejecutar una toma de decisiones informada y ágil, para tener un ecosistema eficiente y seguro. De la mano de la proliferación de dispositivos, tiene origen el desarrollo de nuevas tecnologías orientadas a proveer conectividad en escenarios más diversos. Por ejemplo; para redes de sensores de bajo consumo, dispuestos en áreas extensas, se cuenta con tecnologías como LoRaWAN [4] o Sigfox [5]; para redes de sensores y actuadores en sectores urbanos existe Wi-Sun [6] o NB-IoT [7]. También, existen redes de sensores autónomos interconectados con el fin de dar solución a aplicaciones y escenarios específicas, concepto que se conoce como redes WSN (*Wireless Sensor Networks*).

En lo que refiere a la segunda temática, vale la pena remontarse a finales de la década del 90, cuando, como fruto del trabajo conjunto entre la Universidad Politécnica de California y la Universidad de Stanford, se empieza a desarrollar el estándar *CubeSat*. Éste consiste en definir la dimensión y forma del contenedor para lanzar un vehículo de bajo costo al espacio, un cubo de arista de 10 *cm*. Como consecuencia, introduce un nuevo paradigma en la construcción de satélites. Contrariamente a la forma tradicional, en donde el vehículo que llevaría la carga útil al espacio se adecuaría como fuere necesario para poder sobrellevar todas las necesidades de la misión, para los *CubeSats*, será la carga útil la que se adecuará a la capacidad estándar del vehículo, con el fin de agilizar el proceso constructivo y además, abaratar los costos de lanzamiento.

Inicialmente se pensó en los *CubeSats* como nanosatélites destinados a probar la carga útil que iría en misiones más serias, sin embargo, hoy en día sus aplicaciones y desarrollos se llevan a cabo por entidades universitarias, gubernamentales, comerciales y militares. Sin ir más lejos, en la región, muchos países han lanzado sus primeros *CubeSats*, como por ejemplo, Libertad-1 en Colombia (Universidad Sergio Arboleda) [21], PUCPSAT en Peru (Universidad Católica de Perú) [22], SUCHAI-1 en Chile (Universidad de Chile) [20], además de proyectos futuros como el SUCHAI-2 y SUCHAI-3 [8].

A raíz del trabajo realizado en la Universidad de Chile, específicamente en el Laboratorio de Exploración Espacial y Planetaria (SPEL, por sus siglas en inglés), se formó entre sus estudiantes el capital humano que luego fundaría la primera empresa chilena con experiencia en la elaboración de nanosatélites, Aurora Space. Es aquí donde las dos temáticas presentadas anteriormente confluyen en un solo proyecto, ya que en los planes de la empresa mencionada se encuentra el despliegue una red de nanosatélites orientada a proveer un servicio mundial de conexión para dispositivos IoT.

El desarrollo de un proyecto como el mencionado debe sortear variadas problemáticas y requerimientos, algunas de ellas inherentes a los servicios IoT, como lo son el bajo costo de los terminales, bajo consumo energético, movilidad de los terminales, escalabilidad de la arquitectura, entre otros factores. Y otros, relacionados a las restricciones propias de un *CubeSat*, como lo son, la baja capacidad de procesamiento y almacenamiento, baja disponibilidad energética, enlaces de comunicaciones de baja tasa de transmisión de datos, entre otros.

Uno de los aspectos de importancia para sobrellevar las restricciones y requerimientos de ambas temáticas, es lo referente a la capa de acceso múltiple al medio (MAC - *Multiple Access Control*), correspondiente a una sub-capa de la capa de enlace según el modelo de interconexión de sistemas abiertos (OSI - *Open System Interconnection*). En esta capa es donde se coordinan y asignan los recursos del medio (tiempo, frecuencia, código) entre los distintos usuarios, con el fin de que la comunicación sea eficiente acorde a los requisitos de cada aplicación.

Dado lo novedoso de los *CubeSats*, a la fecha no existen desarrollos de servicios de comunicación masivos haciendo uso de éstos -para conocimiento del autor-, y menos aún, desarrollos de protocolos MAC específicos para esta tecnología. Por lo tanto, en el proyecto documentado en este trabajo de memoria se presenta el diseño y evaluación de un protocolo MAC que se ajusta, especialmente, a las restricciones de los *CubeSats* y sobrelleva exitosamente los requerimientos de un servicio IoT.

## 1.1. Hipótesis

El presente trabajo se realiza bajo la hipótesis de que los protocolos MAC desarrollados a la fecha no satisfacen los requerimientos para proveer un servicio de recolección de datos de sensores IoT de manera masiva, sobre una tecnología con altas restricciones, como lo son los *CubeSats*. Por lo cual, se hace necesario el desarrollo de un protocolo que considere las restricciones impuestas por estas aeronaves y los requerimientos necesarios para una red IoT.

## 1.2. Objetivos

### 1.2.1. Objetivo General

El objetivo del presente proyecto de investigación es el diseño y evaluación de un protocolo MAC que se adecúe a las restricciones y requerimientos del servicio de conectividad IoT mediante tecnología satelital *CubeSat*, de manera tal que su rendimiento evaluado bajo distintas métricas de desempeño resulte en una contribución respecto al estado del arte.

### 1.2.2. Objetivos Específicos

Los objetivos específicos que se consideran para llevar a cabo el proyecto, son los siguientes:

1. Evaluar el estado del arte de protocolos MAC para acceso satelital, identificando los alcances y su aplicabilidad en un escenario IoT específico, a partir de un conjunto de métricas estándar de desempeño.
2. Diseñar un protocolo MAC considerando las limitaciones de los *CubeSats*, en cuanto a capacidad de procesamiento y capacidad energética.
3. Evaluar el protocolo propuesto de manera analítica y simulada, considerando factores relevantes del entorno satelital, permitiendo realizar una comparación con el estado del arte.
4. Proponer y demostrar mejoras en el rendimiento del protocolo en comparación con el estado del arte, empleando las métricas estándar de desempeño.

# Capítulo 2

## Marco Teórico y Estado del arte

### 2.1. Tecnología Espacial

#### Evolución de la Tecnología Satelital

Durante los años 50, la Unión Soviética lanzó al espacio el Sputnik I, el primer satélite artificial que orbitaría la Tierra. Este hito marca el inicio de la carrera espacial entre las dos potencias mundiales de la época, lo cual conllevó, entre otras cosas, a un acelerado progreso tecnológico en la ciencia aeroespacial. Los satélites creados durante las décadas posteriores fueron diseñados siempre con objetivos muy específicos, y en consecuencia, el desarrollo de todos los subsistemas (energía, control de actitud, manejo de datos, comunicaciones, etc.) se realizaba orientado a suplir las exigencias específicas de la misión. Tal metodología de diseño implicaba un proceso demasiado costoso, debido a las constantes iteraciones que se debían realizar para lograr integrar todos los subsistemas y poder alcanzar los objetivos. Un primer cambio importante en el proceso de diseño ocurrió cuando, debido al uso de sistemas modulares, el bus principal se volvió flexible y reconfigurable de acuerdo con el objetivo de cada misión. Como resultado de la reducción de costos en el desarrollo de una unidad, se empezaron a diseñar y utilizar las constelaciones de estas naves espaciales. Dependiendo de la configuración, estas formaciones podrían aumentar la cobertura global instantánea, reduciendo los tiempos de visita, entre otros beneficios.

Hasta el día de hoy, un gran número de satélites han sido desplegados para diversas aplicaciones, tales como, navegación, imágenes, meteorología, y comunicaciones, entre otros. Algunos ejemplos de las aplicaciones más significativas se presentan a continuación:

1. Sistemas de Posicionamiento: Constelaciones de satélites ubicados en órbitas de media altura (aproximadamente de 20000 kilómetros) que permiten determinar la posición de un objeto sobre la superficie de la Tierra dado un sistema de coordenadas. Algunas de las constelaciones pertenecientes a distintos países son: GPS (E.E.U.U. - 24 satélites), GLONASS (Rusia - 24 satélites operacionales), GALILEO (Union Europea - 24 satélites), BEIDOU (China - 17 satélites operacionales).

2. Observación de la Tierra: Muchos satélites con una gran variedad de cámaras en diferentes bandas espectrales han sido enviados al espacio. Defensa y seguridad, cartografía y meteorología son algunas de las disciplinas que se han beneficiado con este tipo de misiones.
3. Comunicaciones: Sistemas satelitales que brindan servicios de voz, servicio de televisión satelital y conectividad de banda ancha a través de satélites o constelaciones independientes.

La UCS (*Union of Concerned Scientists*) mantiene la cuenta de satélites operacionales orbitando la Tierra. En la Figura 2.1 se ilustra la distribución, respecto al país de origen y al tipo de órbita, para los 2062 satélites activos reportados hasta el 31 de Marzo de 2019 [1].

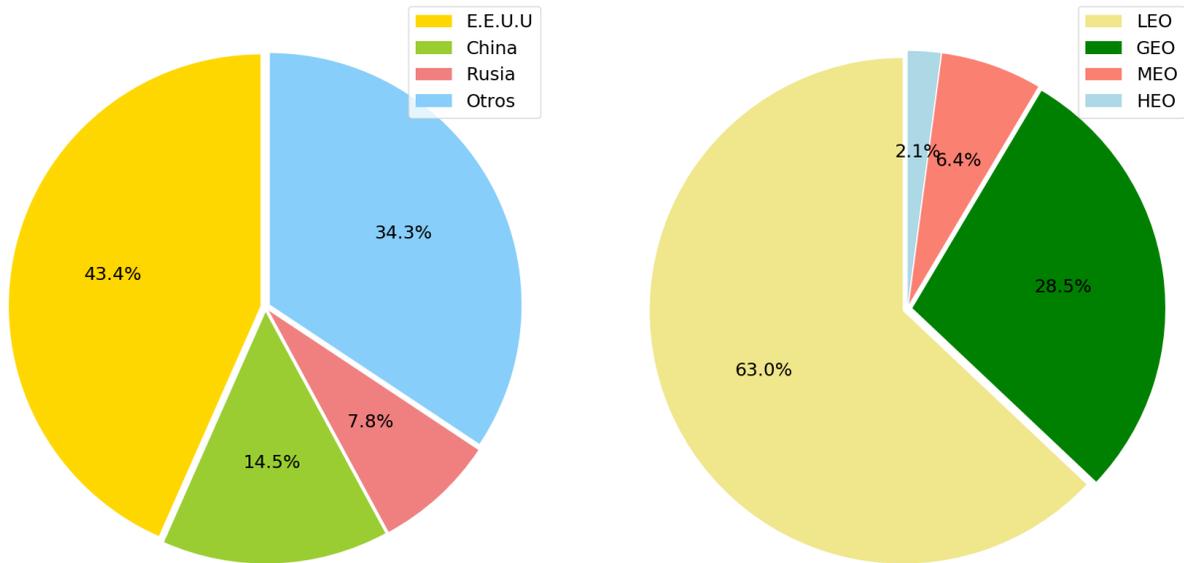


Figura 2.1: Satélites activos orbitando la Tierra, separados por país de origen y tipo de órbita, de un total de 2062 satélites activos reportados hasta el 31 de Marzo de 2019. Datos publicados por la UCS en su reporte anual [1].

## Sistemas de Comunicación Satelital

Una de las áreas de relevancia en la que los satélites han sido partícipes es en la de las redes de comunicación. Debido a la capacidad de estas naves espaciales para cubrir toda la superficie terrestre, los sistemas de satélites pueden proporcionar conectividad a áreas remotas o aisladas que por otros medios son casi imposibles de conectar.

Las principales arquitecturas utilizadas en estos sistemas son tres: *store and forward*, *bent-pipe* y *crosslink* [9]. El primero consiste en un satélite que recupera los datos de un punto, los almacena durante un tiempo y luego los descarga a la primera estación terrestre con la que establece una conexión. En el segundo caso, el satélite actúa como un relevo, tomando datos y retransmitiéndolos a otro punto de la Tierra. La última arquitectura consiste en transmitir los datos inmediatamente a través de enlaces entre las aeronaves.

Los satélites pueden orbitar alrededor de la Tierra a diferentes alturas, ofreciendo un conjunto diferente de servicios de acuerdo con las condiciones del canal/red derivadas de las características de la órbita. Existen las siguientes categorías definidas en función de la altura de ellas:

1. Geostacionario (GEO): Corresponde a una órbita cuyo período de rotación es el mismo que el de la Tierra, en consecuencia, el satélite parece estar "quieto" ante un observador en un punto del planeta. Para lograr este efecto, los satélites se colocan a una distancia de unos 35786 kilómetros. Dada esta extensa distancia, los retrasos de comunicación son considerables, en el orden de 120 *ms*, en la dirección del satélite o viceversa, para el mejor escenario; Además, la potencia de transmisión requerida para establecer enlaces efectivos es alta. Sin embargo, estos sistemas tienen una cobertura excelente y amplia, alcanzando un 30% de la superficie de la Tierra. El proceso de colocación de un satélite en esta órbita es una tarea muy costosa, y para permanecer en esa posición, la tripulación en tierra debe realizar maniobras orbitales con cierta frecuencia.
2. Órbita Baja (LEO): La mayoría de los satélites actualmente en el espacio se colocan en este tipo de órbita. Su altura varía de 300 km a 2000 km y, por lo tanto, el retraso en las comunicaciones es bajo — del orden de las decenas de milisegundos en el peor de los casos—. La potencia de transmisión requerida para establecer los enlaces desde esta órbita es tan baja como cientos de miliwatts [10]. Los satélites en esta categoría tienen una baja cobertura temporal y espacial. Debido a la velocidad, unos 7,5 kilómetros por segundo para un satélite en una órbita de 500 kilómetros de altura, el efecto Doppler es considerable en estos sistemas.
3. Órbita Media (MEO): Las alturas están entre las órbitas bajas y geoestacionarias (2000 – 35786 *km*). Un ejemplo de constelación en esta categoría es la red O3b, la cual se ubica a una altura de 8000 *km* y tiene un retardo teórico mínimo de 26 *ms* de Tierra a satélite, o viceversa. Todas las constelaciones GNSS se colocan en este tipo de órbita.
4. Altamente Elíptica: También llamada órbita Molniya, es un tipo particular de órbita que ofrece una gran cobertura para latitudes altas. Su apogeo es mayor que el de una órbita geoestacionaria (unos 40000 *km*). Los satélites de esta categoría tienen un período aproximado de 12 horas. La Unión Soviética fue el primer país en utilizar este tipo de órbita para proporcionar servicios de comunicación en todo su territorio y también para obtener imágenes meteorológicas.

Los satélites también puede ser divididos respecto a la tarea para la cual son desplegados. Los ejemplos clásicos son los siguientes:

1. Comunicaciones de Banda Ancha: Las redes de satélites comerciales que proporcionan este servicio ofrecen conectividad con velocidades de datos de banda ancha. Por ejemplo, la nueva constelación NEXT de Iridium ofrece conectividad a 1,5 Mbps [11], mientras que el BGAN HDR de Inmarsat ofrece conexiones a 800 kbps [12]). Generalmente, las estaciones terrenas requieren una antena grande junto con una alta potencia de transmisión para establecer enlaces efectivos. Los satélites que sirven comunicaciones de banda ancha principalmente operan en las bandas Ka, Ku, L y C.
2. Servicio de Voz: Usando dispositivos pequeños como los teléfonos satelitales, estos sistemas satelitales ofrecen conectividad de voz en casi cualquier parte del planeta.

3. Servicios de señalización: En esta área, algunos de los servicios destacados son la recepción de las señales del Sistema de Identificación Automática (AIS) y la Transmisión de Vigilancia Dependiente Automática (ADS-B), que permiten rastrear la ruta de los buques y aeronaves, respectivamente.
4. Recopilación de datos de sensores: Sistemas satelitales que ofrecen servicios a bajas tasas de transferencia de datos, que permiten recuperar datos de pequeños sensores colocados en tierra.

En la Tabla 2.1 se provee una lista con algunas de las constelaciones comerciales que proveen distintos servicios de comunicación en diferentes órbitas.

Tabla 2.1: Conjunto de constelaciones comerciales que brindan servicios de comunicación. Actualizado a 2019.

<b>Compañía</b>	<b>Número de satélites</b>	<b>Órbita</b>	<b>Servicios</b>
Inmarsat	13	GEO	Banda Ancha
Viasat	4	GEO	Banda Ancha
Intelsat	52	GEO	Banda Ancha
O3b	16	MEO	Banda Ancha
Iridium	66	LEO	Voz, Banda Ancha
Globalstar	24	LEO	Voz, Banda Ancha

## CubeSats

Tradicionalmente, la mayoría de los proyectos para diseñar y construir satélites habían sido excesivamente caros, implicaron diseños muy complejos y, por consiguiente, largos períodos de desarrollo. Sin embargo, a partir de la década de 1980, se estableció un nuevo paradigma que consistió en una reducción significativa del tamaño de algunos satélites, lo que llevó a la aparición de microsatlélites y, en la década del 2000 la creación de nanosatélites o *CubeSats*: aeronaves que en su forma básica tienen un peso igual o menor a un kilogramo.

El estándar CubeSat fue creado en 1999 en la Universidad Politécnica Estatal de California en conjunto con el Laboratorio de Desarrollo de Sistemas Espaciales de la Universidad de Stanford, con el objetivo de mejorar el acceso al espacio al brindar oportunidades de desarrollo, diseño y construcción de satélites para instituciones que no eran capaces de hacerlo siguiendo el paradigma clásico.

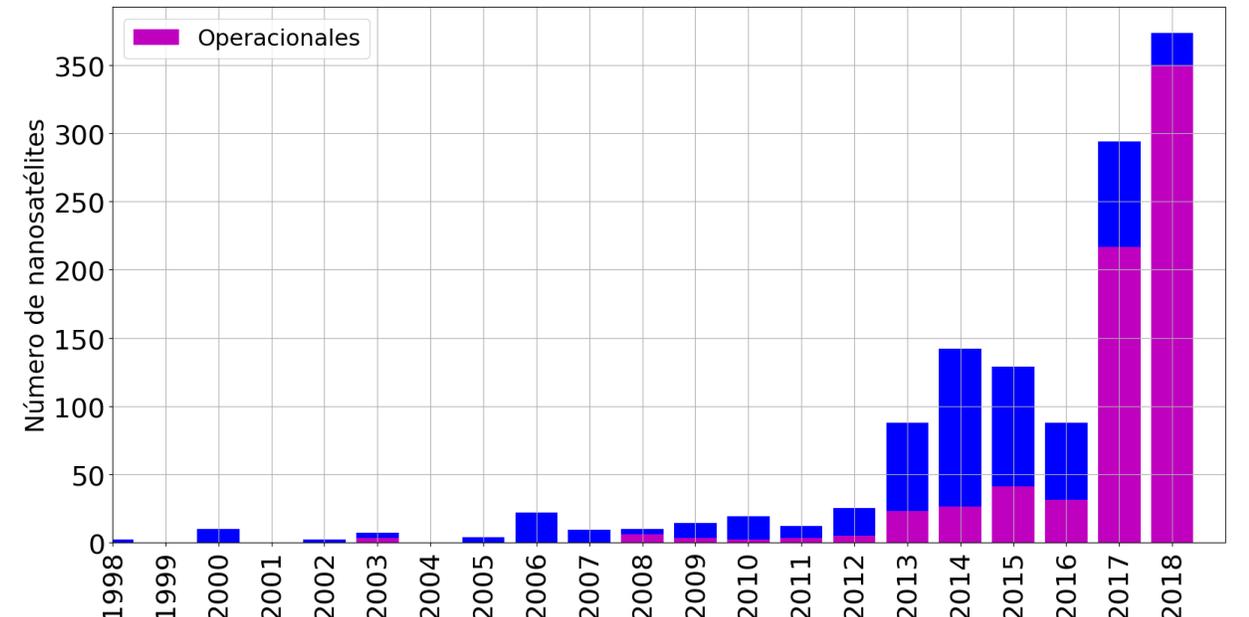


Figura 2.2: CubeSats lanzados desde 1998. Datos tomados de [2].

El diseño básico de un *CubeSat* consiste en una estructura cúbica de 10 centímetros de arista, llamada 1U, que debe contener los subsistemas principales para la operación: un computador a bordo, baterías, transmisores y receptores para la comunicación y sistemas de control de actitud, entre otros. La forma cúbica y el volumen definidos para este nuevo estándar permiten reducir considerablemente los costos de lanzamiento, pero, al mismo tiempo, incorporan grandes restricciones en cuanto a la disponibilidad de recursos computacionales, energía y volumen, entre otros.

Inicialmente, el desarrollo de nanosatélites estaba destinado a probar componentes y estudiar su comportamiento en el entorno espacial. Hoy en día, las aplicaciones se han extendido ampliamente con proyectos liderados por universidades, gobiernos y entidades comerciales. Además, esta tecnología significó una excelente oportunidad para que los países en desarrollo exploten los recursos espaciales, además de proporcionar una herramienta para democratizar

el uso del espacio [13].

En América del Sur, por ejemplo, varios países han aprovechado la tecnología de nanosatélites para promover iniciativas educativas dentro de las universidades, a saber: Libertad-1 en Colombia (Universidad Sergio Arboleda) [14], PUCPSAT en Perú (Universidad Católica del Perú) [15], SUCHAI-1 en Chile (Universidad de Chile) [13], por mencionar algunos. En el campo comercial, nuevas empresas nacieron en el mercado de desarrollo y venta de piezas para *CubeSats*; otras compañías hacen uso de *CubeSats* para aplicaciones como la toma de imágenes satelitales. Las agencias gubernamentales, como la NASA y la ESA, han expresado interés por este nuevo fenómeno, relacionando algunas de sus misiones con el desarrollo de nanosatélites. Uno de los ejemplos más notables es el uso experimental de dos *CubeSats*, MARCO A y B, como relés de comunicación para la sonda InSight-1 que amartizó en noviembre de 2018.

## 2.2. Comunicaciones de tecnologías IoT

### Requerimientos para las comunicaciones M2M e IoT

En las previsiones realizadas por Cisco, se espera que para el año 2020 la cantidad de dispositivos conectados a Internet supere los 50 mil millones [3], un aumento que plantea un desafío de conectividad para estas nuevas redes masivas. Es en este campo que las capacidades de las nuevas redes satelitales de bajo costo podrían ser fundamentales para lograr una conectividad global, como lo exigen las redes de quinta generación.

Las redes de IoT y M2M se caracterizan por su capacidad de cumplir uno o más de los siguientes requisitos:

- Rendimiento eficiente ante tráfico explosivo
- Terminales de baja transmisión de datos
- Eficiencia energética
- Terminales de bajo costo
- Movilidad y escalabilidad
- Minimización del uso del espectro
- Mínima señalización
- Seguridad e integridad de los datos
- Robustez
- Flexibilidad ante distintos escenarios

### Tecnologías IoT terrestres

En el caso de las redes de acceso inalámbrico terrestre, se han desarrollado varias soluciones para cumplir con los requisitos mencionados anteriormente. Para conjuntos de sensores

de bajo consumo desplegados en áreas extensas, están disponibles tecnologías tales como LoRaWAN [4] y Sigfox [5]; Para redes de sensores y actuadores desplegados en entornos urbanos, existen Wi-Sun [6] y NB-IoT [7], por mencionar algunas de las tecnologías disponibles. También hay redes de sensores autónomas interconectadas para proporcionar soluciones a aplicaciones específicas que involucran tecnologías de corto alcance, como IEEE 802.15.4 o redes 6LoWPAN [16]. En la Tabla 2.2 se presentan características de algunas de las tecnologías IoT terrestres comúnmente desplegadas [17, 18, 19].

Tabla 2.2: Características principales de algunas tecnologías IoT ampliamente desplegadas hoy en día.

	LoRaWAN	Sigfox	NB-IoT	6LoWPAN
Banda de frecuencia [MHz]	902-928	902	832-862	2400–2483.5
Ancho de banda [kHz]	125, 250, 500	0.1–1.2	180	600,2000,5000
Tx máxima [kbps]	21.9	0.6	0.56	250
Rango de transmisión [km]	5-15	10-50	2-10	0.01-0.1
Largo de paquetes máximo [B]	250	12	128	127
Duración estimada de batería [años]	<10	<10	<10	1-2

Uno de los desafíos de estas nuevas redes masivas, es hacer que muchos terminales puedan compartir un recurso físico, el canal de comunicaciones de difusión, de manera eficiente y ordenada. Un problema de este tipo implica la capa de control de acceso al medio directamente, que corresponde a una subcapa de la capa de enlace del modelo de interconexión de sistema abierto (*OSI-Open System Interconnection*), con el objetivo de coordinar las transmisiones de tramas en los enlaces de comunicación. El uso de un protocolo MAC específico está estrechamente relacionado con el objetivo que se persigue (por ejemplo, aumentar el rendimiento promedio, lograr una equitativa división del canal, etc.), junto con los recursos, requisitos y limitaciones de la tecnología de acceso en general. Otro aspecto crítico a considerar en la elección de un protocolo MAC es la topología de la red y el conocimiento que los nodos tienen o necesitan de ella.

## 2.3. Protocolos MAC

La capa de Control de Acceso al Medio (MAC) agrupa un conjunto de protocolos y mecanismos destinados a realizar la distribución de recursos para que los nodos hagan un uso eficaz y eficiente del canal de comunicaciones. Los recursos se distribuyen normalmente en términos de asignación de tiempo, asignación de frecuencia o asignación de código. En el caso particular de los enlaces compartidos, el protocolo MAC se encarga de coordinar la transmisión de tramas en el medio físico.

Cada protocolo MAC está diseñado para cubrir diferentes requisitos, y su rendimiento se puede cuantificar con diferentes métricas. En algunos casos, la prioridad se establece en el rendimiento relativo a la eficiencia en transmisión de datos, para lo cual se mide la carga ofrecida normalizada y el rendimiento normalizado. En otros casos, la importancia cae sobre las mediciones de los retrasos en el envío de datos, o la tasa de pérdida de paquetes. En

el caso particular de las aplicaciones de IoT, puede haber limitaciones con respecto a las capacidades de procesamiento, el almacenamiento disponible, la complejidad del *hardware* y el consumo de energía. En esta sección se proporcionan un conjunto de métricas que permiten cuantificar el cumplimiento por parte de los protocolos MAC de los diferentes requisitos de manera objetiva. También se presenta la categorización tradicional empleada para clasificar los protocolos MAC existentes.

### 2.3.1. Métricas

#### Escalabilidad y Eficiencia

##### 1. Carga Ofrecida Normalizada (C)

Es el cociente entre todos los datos inyectados en la red y los datos máximos que podrían enviarse a la velocidad de transmisión del enlace. Este último corresponde al producto de la tasa de transmisión con el tiempo total de transmisión. La carga ofrecida normalizada se calcula de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$C = \frac{\sum D_i}{T_x \cdot t_t}, \quad (2.1)$$

donde  $D_i$  son los datos enviados hacia el satélite por cada sensor  $i$ ,  $T_x$  es la tasa de transmisión del enlace, y  $t_t$  es el tiempo total de transmisión.

##### 2. Rendimiento Normalizado (S)

Es el cociente entre los datos recibidos por el satélite en un tiempo determinado y todos los datos que podrían enviarse continuamente a la velocidad de transmisión del enlace. Puede interpretarse como cuán efectivo es el uso del canal. Siempre es cierto que  $S \leq C$ . El rendimiento normalizado se calcula de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$S = \frac{D_r}{T_x \cdot t}, \quad (2.2)$$

donde  $D_r$  es la cantidad de datos recibidos por el satélite,  $T_x$  es la tasa de transmisión del enlace, y  $t$  es un tiempo arbitrario.

##### 3. Proporción de pérdida de paquetes (PLR-*Packet Loss Ratio*)

Corresponde a la proporción de datos perdidos o recibidos erróneamente debidos a fallas en la transmisión/recepción. El PLR se calcula de la siguiente manera:

$$PLR = \frac{P_l}{P_s}, \quad (2.3)$$

donde  $P_l$  es el número de paquetes perdidos y  $P_s$  el número de paquetes enviados. Esta relación resulta importante cuando se requiere eficiencia energética, ya que un PLR alto puede desencadenar un gran número de retransmisiones al implementar una capa de enlace confiable, lo que puede significar más desperdicio de energía. En general, el rendimiento del canal se analiza examinando la carga del canal admitido para un PLR objetivo, que generalmente se considera en el orden de  $10^{-3}$  en la literatura. En algunos casos, la carga normalizada lograda con un objetivo  $PLR = 10^{-3}$  resulta muy

baja, por lo que es necesario considerar valores PLR peores en el análisis, por ejemplo,  $PLR = 10^{-2}$ .

La relación entre los tres indicadores presentados anteriormente se describe mediante la siguiente ecuación:

$$S = C(1 - PLR). \quad (2.4)$$

## Consumo Energético

Desde el punto de vista de los protocolos MAC, el consumo de energía se ve directamente afectado por la cantidad de tiempo ocupado en enviar y recibir datos. En un factor más relevante, el consumo de energía también se ve afectado por la cantidad de procesamiento requerido por el protocolo. Para evaluar este consumo, se debe comparar la cantidad de tiempo que el transceptor está en los modos de transmisión, recepción e inactividad. El uso de energía en cada estado dependerá específicamente del modelo de transmisor / receptor que se esté utilizando y del protocolo MAC elegido.

En general, la limitación principal de energía se encuentra en los nodos terminales, ya que en la mayoría de los casos la estación receptora tiene una fuente de energía virtualmente infinita (por ejemplo, una estación base en una red celular, un punto de acceso WiFi, etc.). En nuestro escenario de estudio, el caso es diferente, ya que los *CubeSats* también puede tener limitaciones de energía. Sin embargo, se espera que esta restricción en los nodos sensores sea considerablemente mayor que en la nave espacial.

## Complejidad de Implementación

En el contexto de *CubeSats* y las soluciones satelitales de bajo costo, la complejidad de la implementación resulta ser un factor relevante. Por esta razón, se debe considerar que aspectos como la necesidad de una alta disponibilidad de procesamiento, la presencia de *hardware* muy especializado y las grandes cantidades de almacenamiento requerido afectan directamente en la implementación de un protocolo MAC determinado.

Por lo general, los computadores a bordo (OBC, por sus siglas en inglés) empleados en *CubeSats* son microcontroladores como el Microchip PIC24 o el Texas Instruments MSP430, que son muy limitados en términos de recursos computacionales. Los OBC más recientes utilizan la familia ARM Cortex o los dispositivos ATMEL, éstos ya están disponibles en el mercado para nanosatélites, pero aún en la categoría de procesadores modestos.

### 2.3.2. Categorías de Protocolos MAC

A continuación se proporciona una breve categorización de los protocolos MAC [20]:

1. **Asignación Fija:** Se caracterizan por asignar un recurso limitado de manera equitativa y fija entre diferentes interlocutores. El recurso puede ser un canal de frecuencia, un intervalo de tiempo o un código, que se deriva de los mecanismos bien conocidos: acceso múltiple por división de frecuencia (FDMA), acceso múltiple por división de tiempo (TDMA) y acceso múltiple por división de código (CDMA). Estos protocolos se caracterizan por ser fáciles de implementar y eficientes en el uso del enlace cuando se ocupan todos o la mayoría de sus recursos. Sin embargo, los protocolos que siguen una asignación fija no son muy flexibles para los cambios en las tasas de datos, ni son tolerantes a las variaciones en el número de estaciones, ya que requieren una asignación coordinada previamente entre todas las estaciones involucradas.
2. **Acceso Aleatorio:** Se caracterizan por tener un número no fijo de usuarios que, sin coordinación previa, utilizan el mismo canal. Como la asignación de recursos es aleatoria, más de un dispositivo puede ganar el derecho de usar el canal al mismo tiempo, lo que provoca colisiones de paquetes y, por lo tanto, los protocolos en esta categoría no pueden garantizar la llegada exitosa de la información. Dependiendo del escenario, estos protocolos pueden desperdiciar la capacidad del sistema en transmisiones fallidas y retransmisiones, sin embargo, tienen un papel fundamental en las redes cuyas características anteriores (número de nodos, naturaleza del tráfico, etc.) no se conocen de antemano.
3. **Por Demanda:** Diseñados para escenarios en los que los terminales realizan envío de una cantidad de datos variable y desigual; en este caso, los protocolos bajo demanda pueden variar la asignación de recursos según los requisitos de los nodos. Por ejemplo, un protocolo basado en TDMA puede asignar intervalos de tiempo adicionales a los nodos con requisitos más altos con respecto a la velocidad de datos. Para administrar la asignación variable de recursos, estos protocolos generalmente requieren una señalización de control adicional, como por ejemplo, la incorporación de la tasa de generación de paquetes de cada terminal como parte de cada mensaje para realizar la gestión de asignación de recursos.
4. **Adaptativo:** Corresponde a protocolos diseñados para gestionar condiciones de red variables. Están destinados a cambiar la lógica MAC dinámicamente. Por ejemplo, cuando la comunicación se lleva a cabo entre unos pocos terminales, el protocolo MAC emplea un esquema de acceso aleatorio; de manera contraria, cuando aumenta el número de dispositivos, utiliza un esquema de asignación fija.
5. **Por Reserva:** El objetivo de estos es lograr una asignación de recursos sin colisiones. Una forma típica de lograr el esquema libre de colisiones es el uso de un subcanal dedicado a la coordinación del acceso para cada estación, de manera que solo una transmita en un momento dado. En ese subcanal, los dispositivos pueden rotar un testimonio (*token*) que indica quién tiene derecho a transmitir en el canal. La mayoría de estos protocolos hacen uso de TDMA o variaciones de Aloha para asignar el *token*.

Se puede observar que las tres últimas categorías son, en general, híbridos de las dos primeras. Esto se debe principalmente al hecho de que las características de la red (número de nodos, tasas de generación de datos, explosividad de la red, etc.) tienen una naturaleza esencialmente aleatoria o determinista. De esta manera, las categorías dominantes, en general, son las de acceso aleatorio y de asignación fija.

En un escenario masivo y con alta movilidad de los nodos, es evidente la naturaleza aleatoria, considerando la imposibilidad de predecir el estado de congestión del canal en todo momento, además de la incapacidad de predecir cuales y cuántos nodos están bajo la cobertura del nanosatélite, sumado al poco conocimiento de la cantidad de datos que cada nodo quiere transmitir. Por estas razones, los protocolos MAC relevantes para considerar corresponden, principalmente, a los de la categoría de acceso aleatorio y sus derivados.

## 2.4. Protocolos MAC para IoT satelital y comunicaciones M2M

Las soluciones satelitales iniciales tradicionalmente empleaban protocolos basados en asignación fija de recursos (por ejemplo, CDMA, FDMA y TDMA). En algunos casos, los protocolos se combinaron con esquemas de acceso aleatorio para realizar la asignación adaptativa de acuerdo con la demanda de los nodos. Un ejemplo de este caso es el protocolo de Acceso Múltiple de Asignación de Demanda (DAMA, por sus siglas en inglés ) [21]. Sin embargo, como se mencionó anteriormente, considerando la naturaleza del escenario de estudio, los protocolos en la categoría de acceso aleatorio son más relevantes y adecuados para la evaluación comparativa.

Los protocolos elegidos en esta sección incluyen varios derivados del ampliamente utilizado Aloha, ya que éstos están presentes en los sistemas satelitales actuales y en las tecnologías modernas de IoT, como LoRa y Sigfox. La selección también incluye otros protocolos de acceso aleatorio significativos, y más modernos, que se consideran adecuados para el escenario de IoT, aplicables a entornos satelitales. Tales protocolos hacen uso de técnicas avanzadas como la cancelación de interferencias y la adaptabilidad, entre otras.

Los protocolos revisados se presentan en la Figura 2.4. Dichos protocolos se separaron en cuatro categorías según sus características principales:

1. **Derivados directos de Aloha:** En esta categoría se incluyen los protocolos que presentan un variación sutil respecto al clásico Aloha, manteniendo como característica la simpleza en el esquema de acceso y el bajo conocimiento del estado de la red. Por ejemplo, Slotted Aloha [22], consiste en que los distintos terminales escogen tiempos discretos para realizar el envío de datos, Diversity Aloha y Diversity Slotted Aloha [23] son más tolerantes a grandes retardos en la transmisión. Otros protocolos revisados son Spread Spectrum Aloha (SS-Aloha) [24], Enhanced Aloha (E-Aloha) [25] y RFTDMA [26]. De esta categoría, E-Aloha es utilizado en servicios IoT a través de satelites, como Argos. Sin embargo, el de mejor rendimiento es SS-Aloha, ya que utilizando técnicas de espectro ensanchado permite la decodificación de paquetes que se reciben simultáneamente. SS-Aloha alcanza un rendimiento normalizado de  $S = 0,6$ , pero, cuando se presentan diferencias en las potencias de recepción percibidas desde los distintos nodos emisores, este valor cae considerablemente.
2. **Basados en Cancelación de interferencia (IC, por sus siglas en inglés):** Los protocolos basados en IC se originan con CRDSA, presentado en [27] en el año 2007.

Éste consiste en un canal discretizado en intervalos de tiempo (cada uno de duración igual al tiempo de recepción de un paquete), donde  $m$  de estos intervalos son agrupados en bloques. Antes de cada bloque los nodos eligen dos intervalos para realizar en estos el envío de dos paquetes con la misma información, que además tienen la posición del paquete "gemelo". Luego, con una recepción exitosa de un paquete, se realiza una cancelación recurrente en el resto de los intervalos. En la Figura 2.3 se ejemplifica el funcionamiento de este protocolo. Variadas mejoras a CRDSA han sido propuestas, entre ellas: MF-CRDSA [28], SS-CRDSA [28], IRSA [29], y variaciones aún más refinadas como CSA [30], MuSCA [31] y E-SSA [32]. E-SSA es el protocolo que destaca en esta categoría. Se basa en técnicas de espectro ensanchado en conjunto con cancelación de interferencia iterativa. No requiere el envío de dos paquetes por nodo ni sincronización en el canal, además se ve favorecido de desbalances de potencia. Alcanza un rendimiento normalizado de hasta  $S = 1,9$  en condiciones favorables.

3. **De reserva y adaptativos:** Para esta categoría se consideran protocolos con esquemas más elaborados, donde se tienen mecanismos para asignar dinámicamente recursos del canal o donde el esquema se ajusta según el estado de la red. De los protocolos revisados, los que se encuentran en esta categoría son: Reservation Aloha [33], CSMA/CA [34], FC-TDMA [35].
4. **Híbridos:** Algunos de los protocolos revisados aplican variadas técnicas para mejorar el rendimiento. Por ejemplo, aplicar técnicas de IC en canales asignados de manera fija, como en MF-CRDSA, [28], o se mezclan cualidades de protocolos de acceso aleatorio con asignación fija, como se hace en FC-TDMA [35] o Aloha-LoRa [36] y SS-CRDSA [28] que utiliza técnicas de espectro ensanchado en conjunto con cancelación de interferencia.

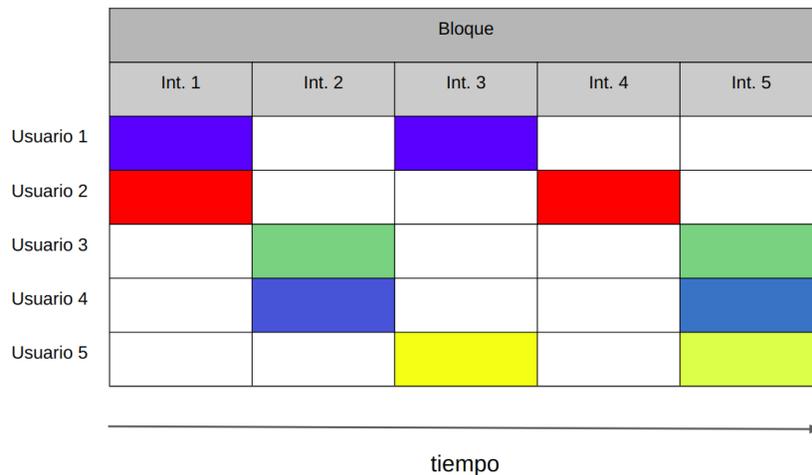


Figura 2.3: Ejemplo de funcionamiento de CRDSA en un bloque de intervalos. El paquete enviado por el Usuario 4 se recibe sin colisión en el cuarto intervalo. El paquete incluye la posición de su "gemelo", ubicado en el primer intervalo. Luego, se utiliza un método de cancelación de interferencias en dicho intervalo y en los siguientes. En este ejemplo, los paquetes de los Usuarios 1, 2 y 5 pueden ser obtenidos satisfactoriamente, permitiendo alcanzar  $S = 0,6$  para una carga de  $C = 1$ .

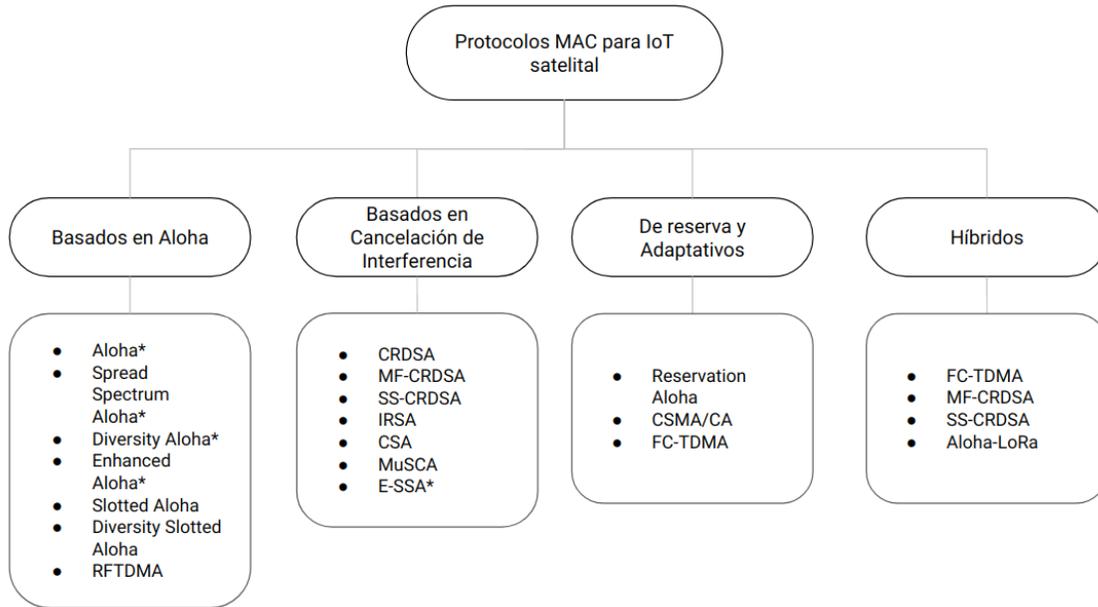


Figura 2.4: Taxonomía de protocolos de acceso múltiple considerados para la evaluación del sistema nanosatelital para conectividad IoT. Protocolos con \* no requieren sincronía en el tiempo.

Estos protocolos fueron sometidos a evaluación por medio de las métricas descritas en la Sección 2.3.1. En la Tabla 2.3 se resumen los principales aspectos de dicha evaluación.

Tabla 2.3: Comparación de protocolos MAC, considerando el rendimiento en comunicaciones, complejidad de la implementación, eficiencia energética y el impacto de la topología.

Protocolo	$S_{max}$	$C_{S_{max}}$	$C_{PLR=10^{-3}}$	Comp.	Ef. Ener.	Topología*
MuSCA	1.4	1.42	1.22	alto	alto	retardos desiguales (-)
E-SSA	1.2	1.25	1.12	alto	alto	desbalance de potencia (+)
FC-TDMA	1	1	-	medio	medio	variabilidad de nodos (-), retardos desiguales (-)
R-Aloha	1	1	-	medio	medio	retardos desiguales (-)
CSA	0.8	0.84	-	alto	alto	retardos desiguales(-)
IRSA	0.8	0.85	0.7	alto	alto	retardos desiguales (-)
CSMA/CA	0.75	0.8	-	bajo	bajo	nodos escondidos (-), retardos diferentes (-)
SS-Aloha	0.6	0.7	0.5	medio	medio	desbalance de potencia (-)
CRDSA	0.52	0.65	0.05	alto	medio	desbalance de potencia (+), retardos diferentes (-)
S-Aloha	0.368	1	$< 10^{-3}$	bajo	medio	desbalance de potencia (+), retardos desiguales (-)
DSA	0.3	0.6	$< 10^{-3}$	bajo	medio	desbalance de potencia (+), retardos desiguales (-)
E-Aloha	0.09	0.1	$< 10^{-3}$	bajo	medio	desbalance de potencia (+)

\* (+) significa que la característica de la topología ayuda a mejorar el rendimiento del protocolo, mientras (-) indica que la característica tiene un impacto negativo.

# Capítulo 3

## Evaluación de Protocolos MAC en IoT Nanosatelital

### 3.1. Definición de Escenario

Ante la existencia de soluciones tecnológicas desplegadas en locaciones remotas, sin conectividad, además de aquellas aplicaciones de monitoreo en lugares aislados que requieren dispositivos con movilidad alta e impredecible para recopilar información sobre la marcha (por ejemplo, monitoreo de animales salvajes en áreas de difícil acceso), los microsátélites y *CubeSats* aparecen como alternativas viables para cubrir la brecha en el suministro de redes de comunicaciones globales totalmente conectadas para IoT.

El escenario que se considera en esta revisión corresponde a una constelación de *CubeSats*, sin conectividad entre satélites, cuyo propósito principal es recuperar pequeñas cantidades de datos de sensores colocados en tierra a una baja velocidad de datos. La constelación se compone de varios planos orbitales pertenecientes a la órbita terrestre baja; cada órbita con una altura que varía entre 500 y 600 kilómetros y con una inclinación cercana a los 97 grados. En particular, consideramos el caso de un nanosatélite — el maestro — que enfrenta el problema de recuperar datos de una red cuyo número de usuarios — los esclavos — y su distribución geográfica es desconocida.

El sistema de comunicación por satélite utiliza la banda de 400 MHz, que tiene bajas pérdidas de propagación en comparación con las bandas típicas empleadas por las empresas comerciales que ofrecen servicios de banda ancha por satélite. Dichas frecuencias se encuentran en el rango de la banda de frecuencia amateur y se comprobó que funcionan en la mayoría de los proyectos *CubeSat* implementados hasta la fecha [10]. Las comunicaciones son *half duplex* y tienen una velocidad de transmisión de datos máxima esperada de 100 kbps, que es similar a la velocidad ofrecida por los desarrollos comerciales de transceptores para nanosatélites [37]. Se supone que las antenas en uso, así como la potencia de transmisión y la sensibilidad de los receptores, son adecuadas para establecer enlaces de datos efectivos para la mayoría de los nodos bajo la cobertura del nanosatélite. Sin embargo, se espera que los nodos más alejados de la aeronave tengan menos probabilidades de generar un enlace

correcto debido a las mayores distancias a cubrir.

Como se mencionó anteriormente, los sensores se distribuyen aleatoriamente en cualquier área geográfica de la Tierra. Un nodo sensor no tiene conocimiento de la topología de la red, y la nave tampoco sabe de antemano cuántos dispositivos necesita servir en un área de cobertura. Cada sensor genera una cantidad de datos independiente de los demás. También se asume que no hay sincronización temporal entre los nodos sensores, ni entre los nodos sensores y el nanosatélite. Un ejemplo de escenario de un *CubeSat* que proporciona conectividad de IoT se ilustra en la Figura 3.1.



Figura 3.1: Escenario ilustrativo en el que un *CubeSat* -o una constelación de ellos- provee conectividad para aplicaciones IoT en la modalidad *store and forward*.

Los parámetros que se derivan del escenario son expuestos en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1: Resumen de características del escenario para IoT nanosatelital.

Característica	Valor	Unidad
Datos a enviar cada pasada del satélite (por sensor)	<250	Bytes
Altura de órbita (LEO)	600	km
Tasa de transmisión	10	kbps
Canales	1	-
Ancho de banda	< 200	kHz
Retardo de transmisiones	2-3	ms

## 3.2. Evaluación de estado del arte

### 3.2.1. Análisis de protocolos MAC

De los protocolos revisados en la sección 2.4, varias opciones ofrecen un alto rendimiento en términos de las métricas de comunicaciones, sin embargo, este buen resultado está asociado

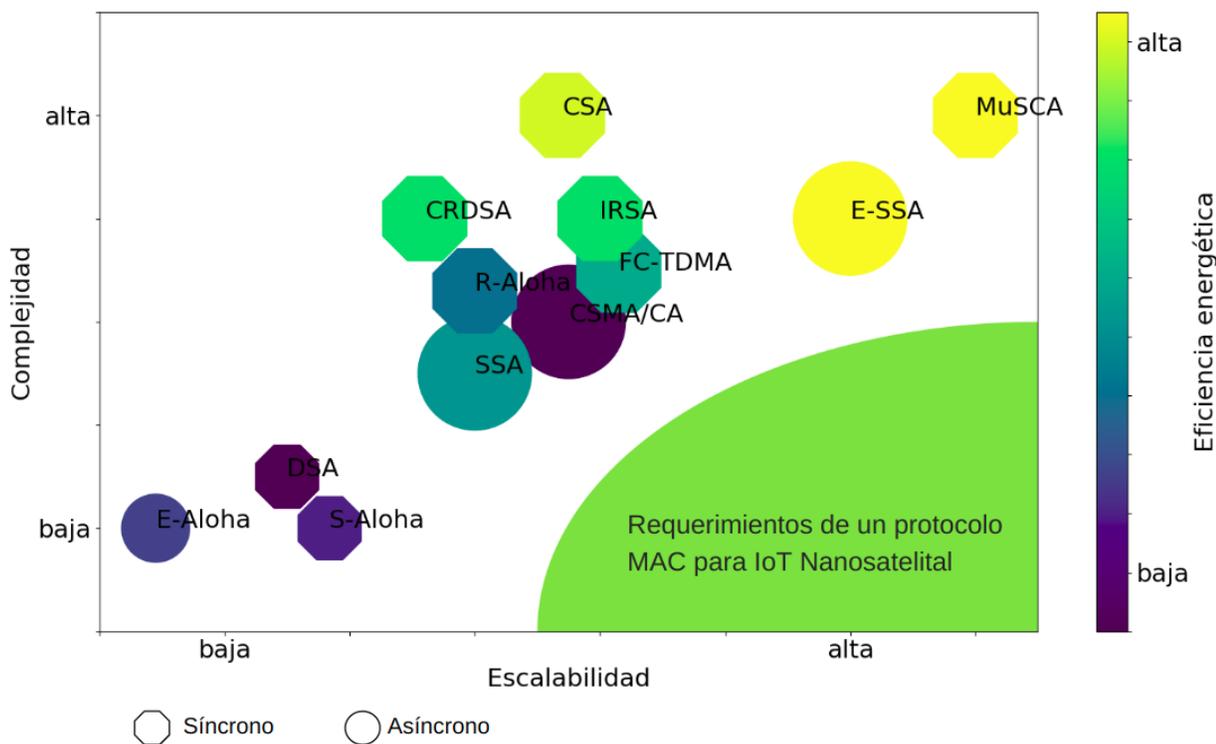
con un costo de medio a alto en términos de complejidad de la implementación y consumo de energía (consultar los primeros cuatro protocolos en la Tabla 2.3). El análisis comparativo de protocolos sugiere que los basados en Aloha son buenos candidatos para la capa MAC en nanosatélites para conectividad IoT, esto se debe principalmente a su simplicidad de implementación y sus requisitos mínimos de *hardware*. Estos también reportan tener una baja sensibilidad al retardo.

En términos de topología de red, los protocolos basados en Aloha pueden beneficiarse del desequilibrio de potencia entre nodos debido al llamado efecto de captura. En tal caso, el receptor recibe correctamente un paquete con una intensidad de señal alta a pesar de la existencia de interferencias con otras transmisiones con niveles de potencia más bajos. Entre los protocolos en esta categoría, E-Aloha es la solución actual para los sistemas comerciales de satélites de telemetría, ha sido ampliamente probado y está operativo. Su rendimiento es similar al de S-Aloha, sin necesidad de sincronización. Sin embargo, el principal problema con E-Aloha es que carece de escalabilidad para aplicaciones masivas debido a su bajo rendimiento incluso para cargas de tráfico moderadas, como se muestra en la Tabla 2.3. SS-Aloha, por otro lado, tiene un rendimiento mucho mejor que otros protocolos basados en Aloha, sin embargo, este mecanismo no se beneficia del efecto de captura, por el contrario, su rendimiento cae a valores similares a los de S-Aloha en una situación de desequilibrio de potencia.

Al examinar los protocolos basados en la cancelación de interferencia (por ejemplo, CRDSA y E-SSA en la Tabla 2.3), las limitaciones en la capacidad de procesamiento en *CubeSats*, junto con las condiciones adversas para realizar la estimación correcta del canal en las órbitas LEO, hacen que el empleo de estos protocolos en el escenario de estudio sea muy complejo. Otros protocolos en esta categoría, como MuSCA, CSA y E-SSA, requieren del intercambio de coordinación o información de estimación de canal entregada por adelantado o por medio de un canal separado, lo que hace que sea más exigente en cuanto a los recursos del canal.

En cuanto a los protocolos que requieren monitorear el canal, como es el caso de CS-MA/CA, se ha demostrado que son altamente ineficientes dada una topología con un número moderado a alto de nodos ocultos ( $> 5\%$ ) [34], lo que será un escenario bastante común dadas las distribuciones aleatorias de sensores en tierra y dispositivos que satisfacen una variedad de requisitos de aplicaciones. El rendimiento de tales protocolos también disminuye cuando los retrasos en las transmisiones entre los nodos son muy desiguales, de hecho, estos retrasos también son críticos para el funcionamiento de los protocolos inspirados en TDMA como R-Aloha y FC-TDMA. La razón es que cada intervalo, para sincronizar el canal, debe incorporar un tiempo de guarda del orden de las desigualdades entre los retardos, lo que puede resultar en un desperdicio considerable de recursos del canal cuando la variabilidad entre los retardos es grande. Además, a pesar del buen rendimiento reportado para el desempeño de FC-TDMA, este requiere un algoritmo especializado que varía dinámicamente el número de intervalos en cada bloque, lo que no se ha determinado en la definición del protocolo proporcionado en [35]. En el caso de R-Aloha, aunque parece tener un rendimiento excelente, solo se mantiene cuando la duración de las reservas es tal que el canal siempre está ocupado; sin embargo, en el caso de un gran número de nodos y tiempos de reserva cortos, la escalabilidad del protocolo disminuye rápidamente.

Figura 3.2: Comparación de protocolos MAC en el contexto del escenario para servicio IoT provisto por tecnología nanosatelital.



Como se puede observar a través del análisis comparativo, el rendimiento del protocolo MAC varía ampliamente cuando se examina en el contexto de *CubeSats* junto con las características de las redes de IoT (número de nodos, naturaleza del tráfico, distribución geográfica, etc.). En la Figura 3.2 se muestra una evaluación visual de la idoneidad de cada protocolo derivado del análisis comparativo realizado. En aquella figura, la ubicación de cada uno de ellos se determina de acuerdo con: 1) su cumplimiento de los requisitos relacionados con IoT, como la escalabilidad (eje x), que se relaciona con el rendimiento de las comunicaciones cuando se atienden redes compuestas por un gran número de nodos; la dependencia de la topología (una figura geométrica de mayor tamaño que encierra cada protocolo indica una mayor dependencia de las ubicaciones de los nodos terminales y el conocimiento de la topología de la red); y la eficiencia energética (los colores más oscuros corresponden a un mayor consumo de energía en la ejecución del protocolo MAC); y 2) su adaptación a las limitaciones de la tecnología de nanosatélites, en cuyo caso se evalúa su complejidad de implementación (eje y). Un nivel de alta complejidad significa la necesidad de recursos costosos como canalización dinámica, mecanismos avanzados de estimación de canales, sincronización, etc.; y (una vez más) la eficiencia energética, ya que es importante mantener el consumo de energía en el lado de la nave dentro de sus capacidades.

La Figura 3.2 muestra una zona de rendimiento ideal, derivada del escenario de IoT junto con las restricciones de los *CubeSats*. En ésta se puede ver que ninguno de los protocolos revisados entra en dicha zona, a pesar de que muchos tuvieron un buen desempeño en términos de escenarios satelitales más tradicionales. Se necesita investigación adicional para el diseño de un protocolo MAC que integra aspectos que le permitan operar con ba-

jas demandas de capacidad de procesamiento y adaptarse a un número variable y dinámico de dispositivos terrestres. Además, mecanismos de mitigación deben considerarse para gestionar las condiciones de desequilibrio de alta potencia en los enlaces de red, los retardos desiguales derivados de longitudes de enlace muy diferentes y la incapacidad de proporcionar estimaciones de canal de alta calidad.

### 3.2.2. Resumen y conclusiones respecto al estado del arte

La evolución de los sistemas satelitales y la introducción de *CubeSats* como tecnología satelital de bajo costo permitirían la prestación de servicios de comunicaciones masivas para aplicaciones de IoT, lo que abre la oportunidad a países sin experiencia en ciencia espacial y pequeñas corporaciones para participar competitivamente en el creciente mercado satelital. Sin embargo, los protocolos existentes en tecnología satelital, en particular para el control de acceso al medio, no fueron diseñados orientados a un escenario de IoT, ni con las limitaciones tecnológicas de bajo costo consideradas en este documento.

Respecto al estado del arte se ha presentado una revisión de los protocolos MAC diseñados para entornos satelitales, teniendo en cuenta las características específicas de las redes de IoT en conjunto con las condiciones de una red inalámbrica provista por *CubeSats* desplegados en una órbita de baja altura. El estudio ha demostrado que muchos de los protocolos revisados no son adecuados para el despliegue en el escenario de interés, aunque se han implementado con éxito en otros sistemas satelitales. A partir de la evaluación comparativa, se muestra que aquellos que emplean técnicas de cancelación de interferencias tienen el mejor rendimiento de comunicaciones, pero se comportan de manera deficiente en relación con las demandas de procesamiento, recursos de canal y consumo de energía. Por otro lado, los basados en Aloha son buenos candidatos para la capa MAC pensando en servicios IoT provisto por nanosatélites debido a su simplicidad de implementación y sus requisitos mínimos de *hardware*. Sin embargo, estos protocolos reportan tener un rendimiento de comunicaciones pobre cuando la carga en el canal, relacionada con el número creciente de nodos esperados en servicios IoT, aumenta, y también cuando los retrasos varían mucho debido a las longitudes de enlace variables.

Un mejor equilibrio entre rendimiento, complejidad, consumo de energía y la sensibilidad a la topología deben impulsar el diseño de futuros protocolos MAC para soluciones nanosatélites orientadas a servicios IoT. Los aspectos relacionados con el diseño del protocolo de red, las capacidades de integración de la conectividad del *CubeSat* con otras tecnologías inalámbricas y la evolución de la industria de nanosatélites son algunos de los desafíos abiertos identificados. Una revisión en extenso de los protocolos aquí discutidos fue publicada como resultado de esta investigación y puede ser consultada en [38].

# Capítulo 4

## Diseño e implementación de nuevo protocolo MAC

### 4.1. Metodología

El auge que han tenido los *CubeSats* en los últimos años ha evidenciado vacíos en algunas áreas de desarrollo, cuando con éstos se quieren implementar diferentes servicios. En el caso de interés para el presente trabajo, el servicio de conectividad IoT masivo a través de la tecnología nanosatelital es infactible con los desarrollos revisados en esta memoria, cuando se analizan desde la perspectiva de la capa de control de acceso al medio. Tomando en cuenta lo expuesto en el Capítulo 3, lo que se puede sintetizar en la Figura 3.2, se destaca la necesidad del diseño de un protocolo MAC que se adecúe satisfactoriamente a las restricciones impuestas por la tecnología, además de los requerimientos del servicio de IoT.

El protocolo a diseñar debe tener un rendimiento de comunicaciones que permita la escalabilidad del servicio, no requiera *hardware* específico o técnicas elaboradas, además de no requerir excesivos datos de control ni retransmisiones, con el fin de que no haya un consumo intensivo de energía.

Una vez diseñado se obtendrán métricas que lo permitan situar dentro de la Figura 3.2.

#### 4.1.1. Procedimiento

1. Definición del protocolo, caracterización de parámetros y métricas de importancia.
2. Cálculo analítico del rendimiento del protocolo.
3. Evaluación del nuevo protocolo MAC en plataforma de simulación y cálculo de métricas. Para una comparación justa con los protocolos revisados en el estado del arte, se tomarán en cuenta las mismas métricas.
4. Determinación de los parámetros que permitan al protocolo operar en zona de mejor rendimiento. Se hará una pseudo-optimización de manera heurística, obteniendo el

rendimiento para una gran combinación de parámetros.

5. Definición y evaluación de posibles mejoras a la primera versión del protocolo.
6. Análisis, diseño e implementación de posibles mejoras al protocolo diseñado.

### 4.1.2. Análisis matemático

Para obtener las métricas de desempeño del protocolo propuesto, se realiza un análisis matemático del proceso, el cual es de naturaleza aleatoria. Para llevarlo a cabo, se hace una discretización en el tiempo que permite obtener resultados sin complicar -en gran medida- el análisis teórico. El alcance del estudio matemático realizado se ve limitado por la incapacidad de recrear analíticamente todos los factores del entorno satelital considerado, sin embargo, permite validar el comportamiento del protocolo implementado de manera simulada.

### 4.1.3. Simulación

Con el fin de evaluar el protocolo propuesto más allá de los alcances teóricos, se realiza la implementación simulada del esquema. La plataforma elegida para realizar esto es OMNeT++ [39]. Este es un simulador modular de eventos discretos orientado a objetos que está basado en C++, especializado para realizar simulaciones de redes de telecomunicaciones. Además, tiene integrado un lenguaje especial para describir y configurar la topología de la red (*NED- Network Description language*). En el ambiente de simulación es posible recrear los aspectos más importantes del entorno satelital que son relevantes para el rendimiento del protocolo (e.g. retardos desiguales en la transmisión).

Haciendo uso de la implementación simulada del protocolo propuesto serán calculadas las métricas de desempeño. Mediante la realización de un gran número de simulaciones con distintos parámetros se encontrará, de manera heurística, la combinación de parámetros que le permiten operar en un punto cercano al óptimo.

## 4.2. Protocolo versión 0

### 4.2.1. Funcionamiento

En referencia a las categorías definidas en la revisión general realizada en la Sección 2.3, el esquema que se propone en este capítulo pertenece a la categoría de híbrido, ya que combina las características de un protocolo de reserva con uno de acceso aleatorio.

En su funcionamiento se definen dos etapas: de disputa y de envío de datos. La etapa de disputa consiste en un período inicial, que comienza luego de que el nanosatélite anuncia en un mensaje de *broadcast* el inicio de la disputa, en donde los nodos en tierra realizan una solicitud para enviar sus datos. Si algún nodo sensor hace llegar exitosamente su solicitud al

satélite, este último le otorgará a un determinado nodo sensor en tierra la autoridad de la etapa de envío de datos, para que el nodo sensor elegido pueda iniciar su transmisión.

El algoritmo que define el protocolo es el siguiente:

1. Al comienzo, todos los nodos en tierra están escuchando.
2. El satélite, previo a cada etapa de disputa envía una señal *broadcast* que indica el inicio de la misma, avisando que está disponible para recibir solicitudes provenientes de los nodos. Una vez enviada la señal, el nanosatélite inicia un temporizador de espera calculado como el tiempo de disputa ( $T_d$ ) más un margen que considera el máximo retardo aceptado debido al tiempo de propagación y al tiempo de procesamiento ( $c$ ),  $T_d + c$ .
3. Cuando un nodo sensor tiene datos para enviar y recibe esta señal, inicia un temporizador que espera un tiempo aleatorio, denominado tiempo de espera  $t_e$  (siempre menor a  $T_d$ ).
4. Una vez expirado el temporizador  $t_e$ , el nodo sensor envía un mensaje de solicitud de envío que contiene su identificación.
5. Una vez finalizado el temporizador  $T_d + c$ , el satélite procesa las señales recibidas durante la espera. Muchas de estas señales presentarán colisiones que harán inviable su decodificación. Existen dos acciones a tomar que dependen de si se recibió (o no) al menos una solicitud de manera exitosa:
  - (a) Si no se recibe ninguna señal de solicitud de envío de datos, ya sea a causa de que no hay sensores bajo la huella o que hubo colisiones entre todas las solicitudes, se vuelve al paso 2.
  - (b) Si una o más señales se reciben correctamente, se elige uno de los nodos en tierra y se procede con el siguiente paso.
6. El satélite envía un mensaje de asignación indicando al nodo sensor elegido que tiene otorgado el canal para enviar datos. Luego, el satélite inicia un temporizador durante un tiempo  $c$  (máximo retardo). Posterior a este paso, hay dos casos posibles:
  - (a) El nodo sensor recibe correctamente el mensaje de asignación y envía sus datos satisfactoriamente al satélite.
  - (b) El nodo sensor no recibe el mensaje de asignación o el satélite no recibe los datos provenientes del sensor. Se agota el temporizador  $c$  y se vuelve al paso 2.
7. Una vez finalizada la Etapa de envío de datos, se vuelve al paso 1.

En la Figura 4.1 se puede ver un ejemplo del funcionamiento del protocolo propuesto de manera gráfica. El esquema descrito es bastante simple, pues no requiere realizar estimación del canal, ni cancelación de interferencias. Se utiliza un canal *half duplex*, no tiene requerimientos específicos sobre *hardware* y tampoco precisa información previa respecto al estado de la red. Esto representa buenas características cuando se compara con la mayoría de los protocolos revisados en el estado del arte. Sin embargo, se debe caracterizar el rendimiento del protocolo en cuanto a métricas relacionadas netamente a la eficiencia para transmitir datos.

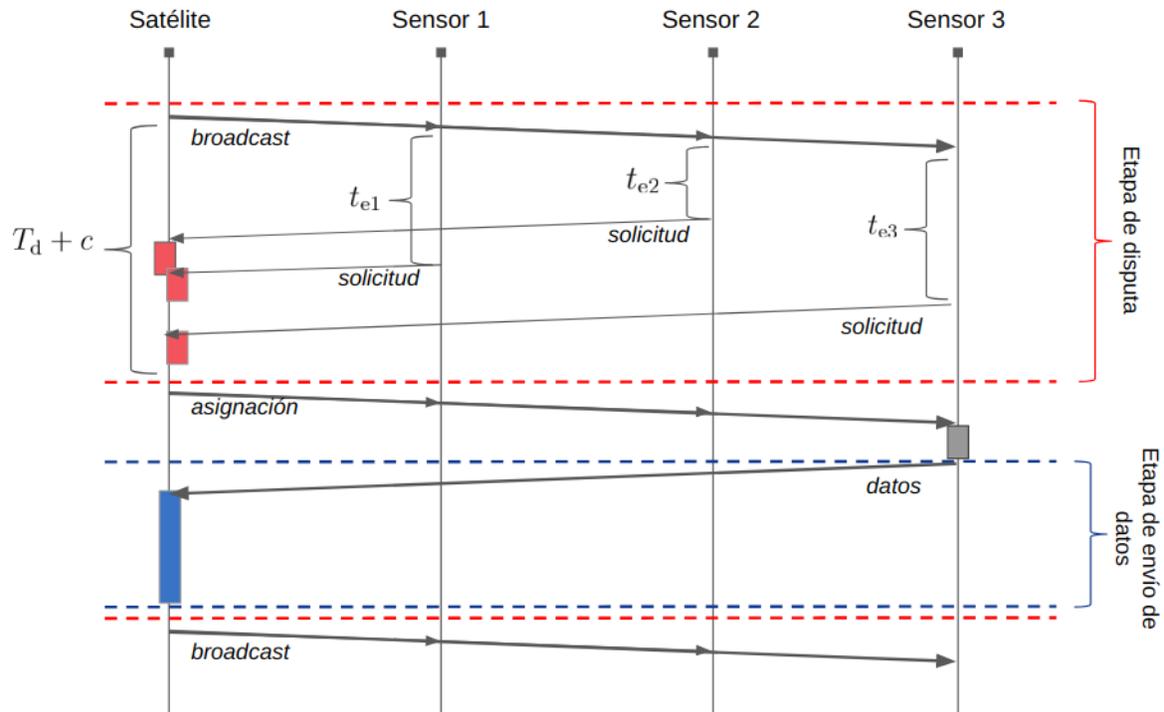


Figura 4.1: Funcionamiento de Protocolo versión 0. Etapa de disputa exitosa seguida de una etapa de envío de datos.

#### 4.2.2. Parámetros y Métricas

Para diseñar de manera completa el protocolo se deben fijar de manera concreta una serie de parámetros, o al menos dar un criterio para la elección de éstos. Además, se deben considerar los que derivan directamente del escenario. En la presente sección se definen todos los parámetros necesarios para definir completamente el protocolo.

#### Parámetros

Relacionados a las especificaciones del escenario:

1. Tasa de transmisión: Valor dado por la calidad del enlace y la tasa de errores tolerables por el servicio. En la Sección 3.1 se fijó como  $10 \text{ kbps}$ .
2. Largo de paquetes ( $t_{data}$ ): Depende de la naturaleza de los datos y de qué forma se provea el servicio, en las simulaciones posteriores se utiliza un largo de  $250 B$ , que a  $10 \text{ kbps}$ , se traduce en  $t_{data} = 200 \text{ ms}$ .
3. Retardos de transmisión: Este valor está dado por la distancia entre el satélite y cada nodo en tierra. La variabilidad de los retardos dependerá del tamaño de la huella de visión. En la Sección 3.1 se fijó entre  $2 - 3 \text{ ms}$ .
4. Tiempo de visión entre satélite y sensor: Depende tanto de la velocidad angular del satélite (relacionada con la altura de la órbita) como de la apertura de las antenas usadas en satélite y sensor.

Relativos al funcionamiento del protocolo:

1. Tiempo de duración de disputa ( $T_d$ ): A mayor valor de tiempo de etapa de disputa es más probable que esta sea exitosa, pero deja menos tiempo para la etapa de envío de datos.
2. Función de distribución para cálculo de tiempo de espera ( $t_e$ ) y parámetros necesarios para dicha función: Se debe seleccionar una función que maximice la probabilidad de que el satélite reciba exitosamente al menos una solicitud, dados un tiempo de disputa y una cantidad de nodos en tierra objetivo.
3. Largo de paquete de solicitud y largo de paquete de asignación: Dependerá de la información que se defina como necesaria en este paquete para el correcto funcionamiento del protocolo.

Para realizar una correcta elección de estos parámetros, se debe primero definir las métricas y los rendimientos que se esperan respecto a éstas.

## Métricas

A priori, se consideran las métricas descritas para la evaluación de los protocolos encontrados en el estado del arte (Sección 2.3.1):

- Carga Ofrecida Normalizada,  $C$  (Ecuación 2.1).
- Rendimiento Normalizado,  $S$  (Ecuación 2.2).
- PLR: Por ser esencialmente un protocolo de reserva en el que no hay pérdida de paquetes de datos a causa de colisiones, el PLR se calcula con la Ecuación 2.4.
- Complejidad de implementación.
- Consumo energético.

Dado el funcionamiento del protocolo, otras métricas resultan relevantes a considerar para caracterizar el funcionamiento del mismo:

- Tasa de etapas exitosas: Es el cociente entre la cantidad de etapas exitosas y las etapas totales. Tiende a la probabilidad de éxito de cada etapa de disputa.
- Tiempo medio de asignación ( $T_{\text{exito}}$ ): Consiste en el tiempo medio de disputa que se requiere para asignar el canal a un nodo sensor. Por ejemplo, si en promedio, se requieren dos etapas de disputa (de duración  $T_d$ ) para que algún nodo sensor gane el acceso al canal (i.e., que se reciba sin colisiones el paquete de solicitud y este nodo sea el elegido para el envío de datos), el tiempo medio de asignación será  $2 \cdot T_d$ . Esta métrica resulta crucial para determinar parámetros que optimizan el protocolo, pues minimizando este tiempo se debería alcanzar el mejor rendimiento.

### 4.2.3. Simulación de Protocolo versión 0

El grueso de la simulación realizada se basa en el funcionamiento de dos clases principales, *Satélite* y *Sensor*. El escenario simulado se compone de un objeto de la clase *Satélite* y  $n$  objetos de la clase *Sensor*, donde  $n$  es un parámetro de la simulación.

La comunicación entre los objetos se realiza a través de un objeto de la clase *cMessage* nativa de OMNET++. Dicho objeto, dentro de la simulación, es llamado *Mensaje* y sólo tiene atributos que definen el tipo de mensaje y la información que este lleva. Los objetos *Satélite* y *Sensor* están dotados con métodos que permiten que el protocolo funcione tal como describe el algoritmo en la Sección 4.2.1.

#### *Mensaje*

Los tipos de mensaje que circulan entre *Satélite* y *Sensor* son los siguientes (con su identificación en la simulación).

- Asignación de etapa de disputa - *CTS*
- Solicitud de envío de datos - *RTS*
- Envío de datos - *Datos*
- Inicio de disputa - *Start*

Además de estos mensajes, cada objeto puede enviar un mensaje a sí mismo (denominados en OMNET++ como *self-messages*), esto con el fin de activar eventos relacionados a sus métodos.

#### *Satélite*

La clase *Satélite* tiene los siguientes métodos principales:

- *initialize*: Da inicio a la clase *Satélite* y a sus variables. Además, en esta inicialización se realiza el primer mensaje *Start* que realiza el satélite indicando que se da inicio a la primera etapa de disputa.
- *handleMessage*: Cada vez que se envía un mensaje a la clase *Satélite* este método se activa. Durante la etapa de disputa, el satélite recibirá mensajes *RTS* provenientes de los nodos *Sensor*. Al final de dicha etapa recibirá un *self-message* indicando que la disputa terminó. La llegada de este último gatilla la acción de enviar el mensaje *CTS*, si es que hubo alguna recepción exitosa, o bien, nuevamente el mensaje *Start*. En la etapa de envío de datos, el objeto *Satélite* recibirá el mensaje *Datos*. Finalizado dicho envío se vuelve a enviar el mensaje *Start*.
- *finalize*: Este método se activa cuando el tiempo de simulación llega a su fin. Acá se recopilan las mediciones.

## *Sensor*

En el caso de la clase *Sensor* los métodos principales son:

- *initialize*: Da inicio al objeto *Sensor* y a sus variables.
- *handleMessage*: Cada vez que se envía un mensaje al objeto *Sensor* este método se activa. El primer mensaje recibido por cada objeto *Sensor* es uno del tipo *Start*, cuando esto ocurre, se inicia la etapa de disputa y los *Sensores* calculan el tiempo que deben esperar para enviar el mensaje *RTS*. Luego, este método se activará con la llegada de un mensaje *CTS*, o bien, con la llegada de un mensaje *Start*. En el primer caso, el *Sensor* verá dentro del contenido del mensaje *CTS*, si es que él recibió la asignación para el envío de datos, y de ser así, envía el mensaje *Datos*, de lo contrario espera el mensaje *Start*.
- *finalize*: Este método se activa cuando el tiempo de simulación llega a su fin. Acá se recopilan las mediciones.

En la simulación realizada se considera un canal *half duplex*, donde las colisiones entre paquetes son destructivas. Cada mensaje enviado por el *Satélite* es recibido por todos los objetos *Sensor*, mientras que los mensajes enviados por los objetos *Sensor* sólo son recibidos por el *Satélite*.

Para definir la topología de la red y la configuración gráfica se definen archivos *NED*. Gracias a esto, se puede visualizar el protocolo tal como muestra la Figura 4.2.

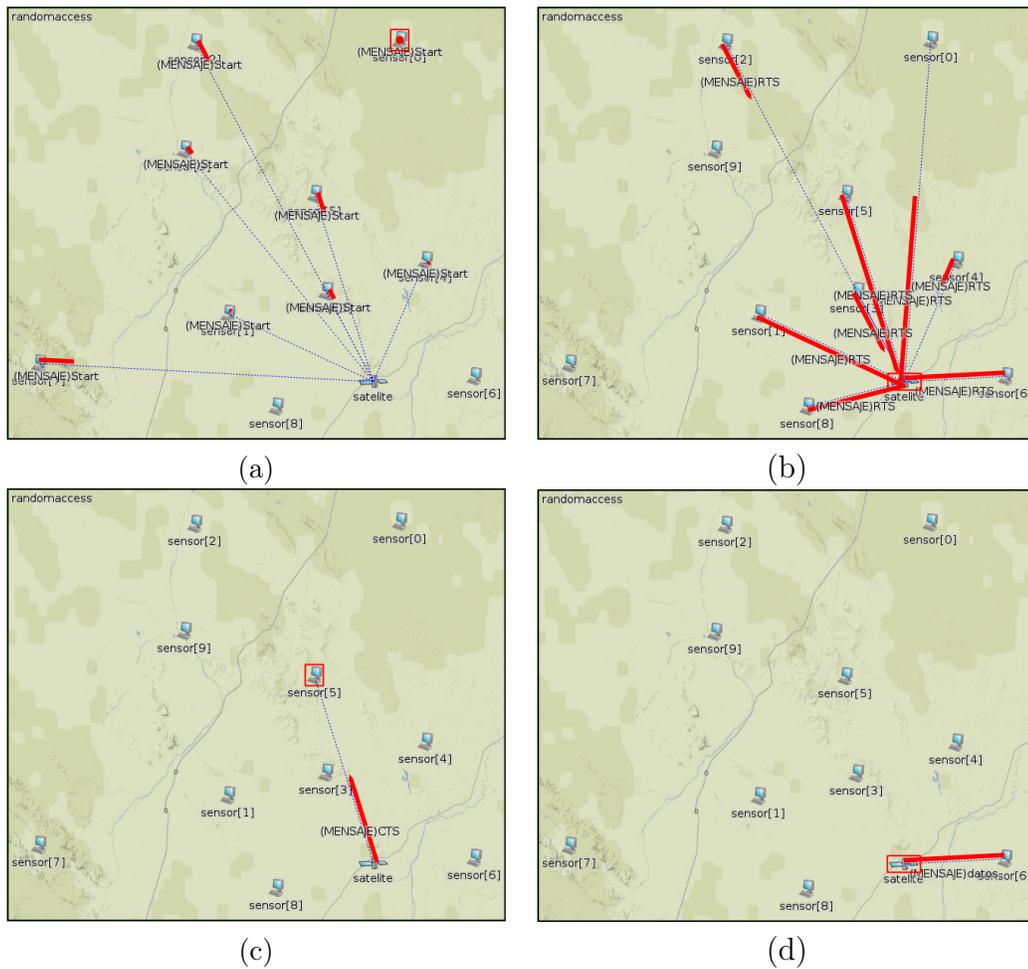


Figura 4.2: Visualización de protocolo simulado para 10 sensores. En (a), el *Satélite* envía el mensaje *Start*. En (b), se realiza la disputa por parte de los objetos *Sensor*. En (c), se le asigna la etapa de envío de datos a uno de los sensores. Finalmente, en (d), el *Sensor* elegido realiza el envío de datos.

#### 4.2.4. Análisis matemático preliminar

En este análisis se identifica cómo afectan las variaciones de algunos parámetros en las métricas de mayor interés. Para ello se caracteriza teóricamente el comportamiento del protocolo para tiempo discreto, obteniendo una expresión para la probabilidad de éxito de una etapa de disputa y para el rendimiento normalizado, estudios similares al realizado se pueden encontrar en [40, 41]. Análisis matemáticos más acabados del protocolo (por ejemplo, análisis para tiempo continuo) escapan del alcance de esta memoria.

Una parte clave para el funcionamiento del protocolo es la eficiencia en la etapa de disputa. Idealmente, para obtener el máximo desempeño, la cantidad de etapas de disputa fallidas debe ser cero y el tiempo de cada etapa de disputa,  $T_d$ , el mínimo posible. Para este análisis preliminar se calcula la probabilidad de éxito de una etapa de disputa, donde éxito se define como el evento de que *al menos un paquete de solicitud llegue sin colisiones al satélite*.

## Modelo de la etapa de disputa

Para modelar la etapa de disputa se considera tiempo discreto, donde el largo de tiempo de cada unidad discreta es igual al largo de un paquete para solicitar el canal. La duración de la etapa de disputa es de  $m$  unidades discretas o intervalos. Se debe recordar que cada nodo en tierra envía la solicitud por el canal luego de transcurrido un tiempo de espera aleatorio, calculado a partir de una función de densidad de distribución de probabilidades. Para el análisis se toma como supuesto que en cada etapa de disputa la cantidad de nodos bajo la huella de visión del nanosatélite es constante.

Con el fin de facilitar la lectura del análisis presentado se provee la Tabla 4.1 con las variables y parámetros utilizados y su definición.

Tabla 4.1: Notación de variables y parámetros utilizados para el análisis de la etapa de disputa.

Notación	Definición
$m$	Cantidad de intervalos en los que se divide el tiempo de una etapa de disputa $T_d$
$T$	Tiempo de duración de un intervalo
$P_{\text{exito}}$	Prob. de éxito de una etapa de disputa
$P_{\text{falla}}$	Prob. de falla de una etapa de disputa
$p_{\text{exito} k}$	Prob. de éxito en el $k$ -ésimo intervalo
$p_{\text{falla} k}$	Prob. de éxito en el $k$ -ésimo intervalo
$p_{\text{envio} k}$	Prob. de que un nodo sensor envíe un mensaje en el $k$ -ésimo intervalo
$F(\cdot)$	Función de probabilidad acumulada
$f(\cdot)$	Función de distribución de densidad de probabilidades

La probabilidad de éxito está definida como el complemento de que ningún mensaje de solicitud llegue de forma exitosa en la etapa de disputa, por lo tanto se calcula como:

$$P_{\text{exito}} = 1 - P_{\text{falla}}, \quad (4.1)$$

donde  $P_{\text{falla}}$  es la probabilidad de que ningún paquete haya llegado correctamente en toda la etapa de disputa. Luego,  $P_{\text{falla}}$  consiste en que en cada uno de los  $m$  intervalos no se haya obtenido una recepción exitosa de un mensaje de solicitud.

$$P_{\text{falla}} = \prod_{k=1}^m p_{\text{falla}|k} = \prod_{k=1}^m [1 - p_{\text{exito}|k}] \quad (4.2)$$

Donde  $p_{\text{exito}|k}$  ( $p_{\text{falla}|k}$ ) es la probabilidad de que llegue un paquete exitoso (fallido) en el  $k$ -ésimo intervalo.

En resumen, la probabilidad de éxito está dada por:

$$P_{\text{exito}} = 1 - \prod_{k=1}^m [1 - p_{\text{exito}|k}] \quad (4.3)$$

El problema se reduce a calcular la probabilidad de éxito en un intervalo,  $p_{\text{exit}o|k}$ .

Para esto, se considera la probabilidad de envío en el  $k$ -ésimo intervalo, correspondiente a la probabilidad de que un nodo sensor en tierra envíe su solicitud en el intervalo  $k$  y que está dada por:

$$p_{\text{envio}|k} = F(T \cdot (k)) - F(T \cdot (k - 1)) \quad (4.4)$$

Donde  $F(\cdot)$  es la función de probabilidad acumulada y  $T$  es el tiempo de duración de un intervalo.

Luego, la probabilidad de éxito en el  $k$ -ésimo intervalo esta dada por la probabilidad de que llegue sólo un paquete en dicho intervalo. Considerando esto, se tienen  $m$  ensayos de Bernoulli con probabilidad  $p_{\text{envio}|k}$ , en los cuales, para el éxito se requiere un envío y  $m - 1$  sin enviar. Esto corresponde a una distribución geométrica, donde se cumple:

$$p_{\text{exit}o|k} = n \cdot p_{\text{envio}|k} (1 - p_{\text{envio}|k})^{(n-1)} \quad (4.5)$$

Donde  $n$  es la cantidad de nodos en tierra que estan participando en la etapa de disputa.

Finalmente, la probabilidad de que una etapa de disputa sea exitosa es:

$$P_{\text{exit}o} = 1 - \prod_{k=1}^m [1 - n \cdot p_{\text{envio}|k} (1 - p_{\text{envio}|k})^{(n-1)}] \quad (4.6)$$

Con  $p_{\text{envio}|k}$  dada en Ecuación 4.4, que depende de la distribución elegida.

## Funciones de distribución de probabilidad

Para la elección de la función de distribución de probabilidades se consideran dos alternativas:

1. Distribución Uniforme:

$$f(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x < 0 \\ \frac{1}{T_{\text{total}}} & \text{si } 0 \leq x \leq T_{\text{total}} \\ 0 & \text{si } x > T_{\text{total}} \end{cases} \quad (4.7)$$

2. Distribución exponencial:

$$f(x) = \begin{cases} \lambda e^{-\lambda x} & \text{si } 0 \leq x \\ 0 & \text{en caso contrario} \end{cases} \quad (4.8)$$

En el caso de la función exponencial, la probabilidad de envío existe para cualquier tiempo positivo. Sin embargo, en el protocolo la etapa de disputa tiene una duración limitada, denominada  $T_d$ . Por lo tanto, la función exponencial considerada para el esquema propuesto es una exponencial truncada, de la forma que sigue:

$$f(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x < 0 \\ \lambda e^{-\lambda x} & \text{si } 0 \leq x < T_d \\ \lambda e^{-\lambda x} + \int_{T_d}^{\infty} (\lambda e^{-\lambda y} dy) & \text{si } x = T_d \\ 0 & \text{si } x > T_d \end{cases} \quad (4.9)$$

La distribución exponencial descrita en la Ecuación 4.9 se trunca de manera que si un nodo sensor obtiene un tiempo  $t_e$  mayor a  $T_d$ , se igualará  $t_e$  a  $T_d$ . En Anexos se presenta el análisis con la función exponencial truncada hacia el inicio, luego de la elección de parámetros.

Por razones prácticas, en lo que sigue, la función de distribución exponencial se caracteriza por su media, la cual cumple la siguiente relación:

$$\lambda = \frac{1}{\mu}, \quad (4.10)$$

donde  $\mu$  es la media de la distribución exponencial.

En la Figura 4.3, se puede ver un ejemplo de las funciones de densidad de probabilidad para el modelo discreto, con la exponencial truncada, en donde se considera a modo de ejemplo,  $T_d = 50 \text{ ms}$  y la discretización de  $m = 10$  intervalos de duración  $T = 5 \text{ ms}$ .

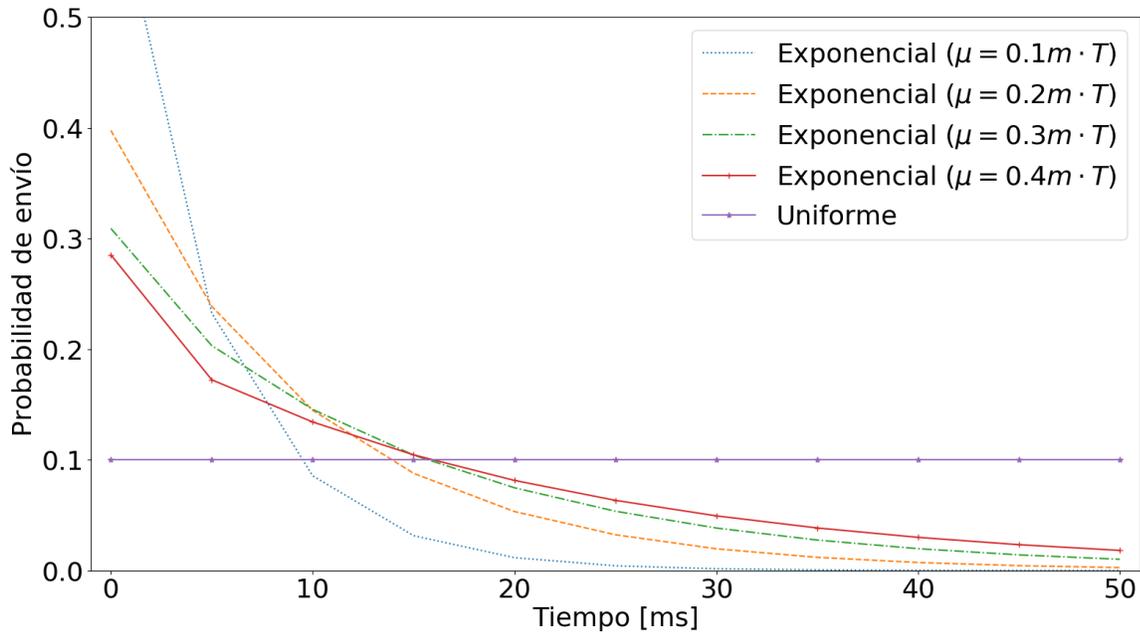


Figura 4.3: Funciones de probabilidad consideradas para el análisis matemático ( $T_d = 50 \text{ ms}$ ,  $T = 5 \text{ ms}$ ,  $m = 10$ ).

## Estimación de métricas

En este análisis preliminar, se calcula la expresión para la tasa de ciclos exitosos, el rendimiento normalizado del protocolo y el tiempo de disputa total requerido para realizar una asignación exitosa.

1. El valor de la tasa de ciclos exitosos se obtiene a partir de la Ecuación 4.6. Para un alto número de muestras se cumple que la proporción de ciclos exitosos sobre los totales ( $\frac{C_{ex}}{C_{tot}}$ ) tiende a  $P_{exito}$ ,  $\lim_{C_{total} \rightarrow \infty} \frac{C_{ex}}{C_{tot}} = P_{exito}$ .
2. Para el rendimiento normalizado se debe considerar que luego de cada ciclo exitoso se realiza envío de datos. Además, si durante un tiempo total arbitrario de funcionamiento de protocolo,  $T_{total}$ , cada nodo demora la transmisión de sus datos en un tiempo  $t_{data}$  y la duración de la etapa de disputa es de  $T_d$ , sin considerar pérdida de paquetes, retardos de procesamiento o de transmisión (los cuales se pueden considerar dentro de cada intervalo), el tiempo  $T_{total}$  se distribuye de la manera mostrada en la Ecuación 4.11:

$$T_{total} = (C_{exito} + C_{falla}) \cdot T_d + C_{exito} \cdot t_{data}, \quad (4.11)$$

donde  $C_{exito}$  es la cantidad de ciclos exitosos,  $C_{falla}$  la cantidad de ciclos fallidos, ambos durante el tiempo  $T_{total}$ . Además, considerando los ciclos totales,  $C_{total}$ , se cumple que:

$$C_{exito} + C_{falla} = C_{total} \quad (4.12)$$

$$P_{exito} = \frac{C_{exito}}{C_{total}}. \quad (4.13)$$

Reemplazando en la Ecuación 4.11, se cumple que:

$$T_{total} = \frac{C_{exito}}{P_{exito}} \cdot T_d + C_{exito} \cdot t_x = C_{exito} \left( \frac{1}{P_{exito}} T_d + t_{data} \right). \quad (4.14)$$

Luego, el rendimiento normalizado del protocolo, estaría dado por:

$$S = \frac{C_{exito} \cdot t_{data}}{T_{total}} = \frac{P_{exito} \cdot t_{data}}{T_d + P_{exito} \cdot t_{data}}. \quad (4.15)$$

3. Para el tiempo medio de asignación ( $T_{exito}$ ) se considera que el tiempo total transcurrido en etapas de disputa es  $C_{total} \cdot T_d$  y que la cantidad de etapas exitosas son  $C_{total} \cdot P_{exito}$ . Con esto, se cumple lo siguiente:

$$T_{exito} = \frac{C_{total} \cdot T_d}{C_{total} \cdot P_{exito}} = \frac{T_d}{P_{exito}}. \quad (4.16)$$

En la Figura 4.4 se grafica la tasa de etapas de disputa exitosas en función del número de nodos, considerando  $T_d = 50 \text{ ms}$  y  $m = 10$ . En la Figura 4.5 se grafica el rendimiento normalizado calculado con la Ecuación 4.15. En la Figura 4.6 el tiempo medio de asignación para 1000 nodos en función del tiempo de disputa y de la media de la función de distribución, considerando una distribución exponencial.

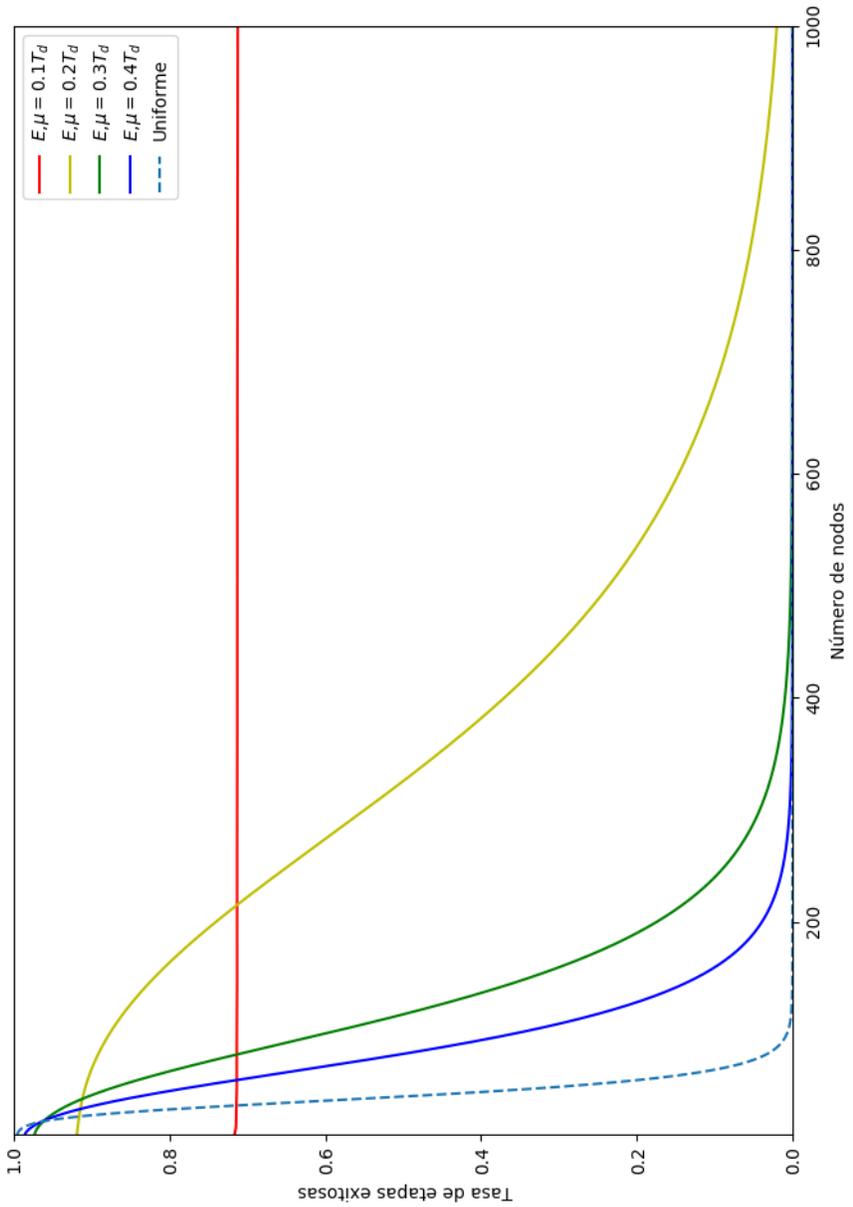


Figura 4.4: Tasa de etapas de disputa exitosas en base a Ecuación 4.6. Las curvas exponenciales son identificadas con su media,  $\mu$ .  $T_d = 50 \text{ ms}$ ,  $m = 10$ .

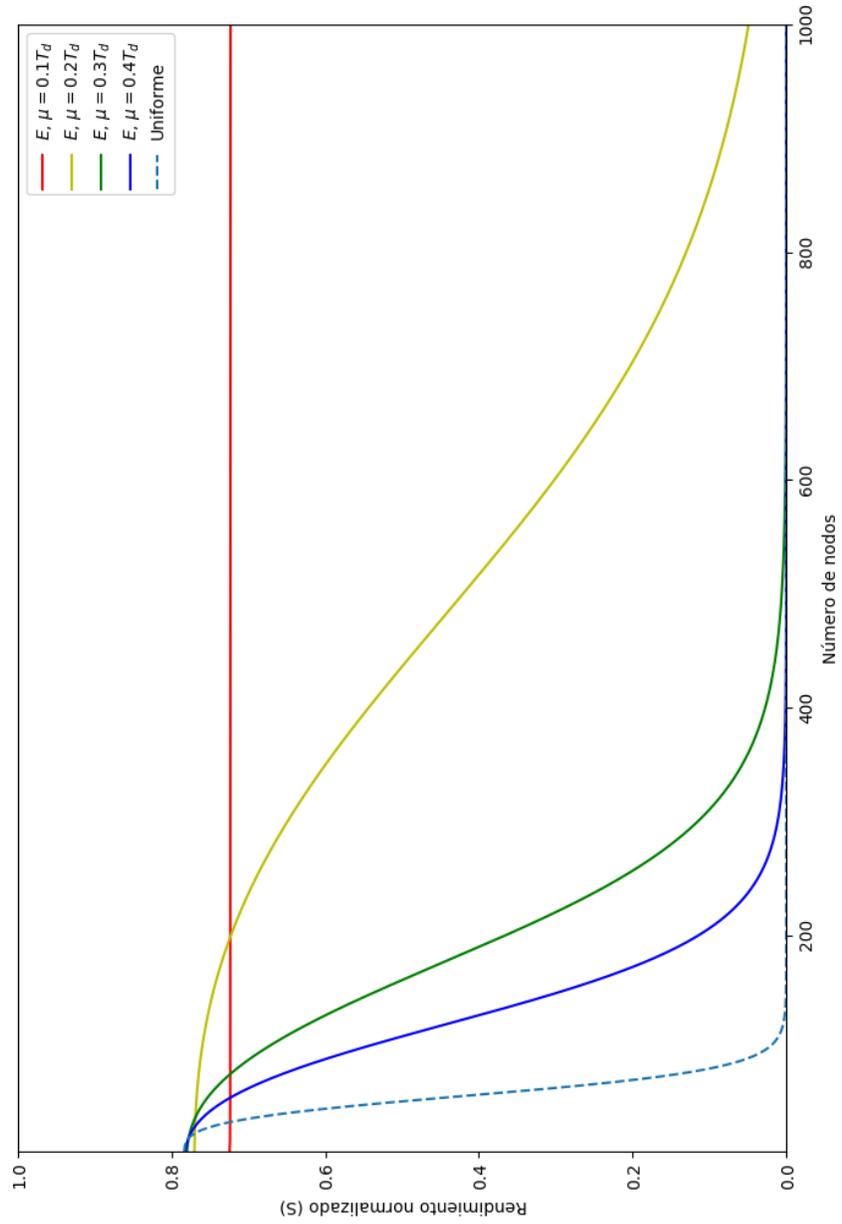


Figura 4.5: Rendimiento Normalizado calculado en base a la Ecuación 4.15. Las curvas exponenciales son identificadas con su media,  $\mu$ .  $t_{data} = 200 \text{ ms}$ ,  $T_d = 50 \text{ ms}$ ,  $m = 10$ .

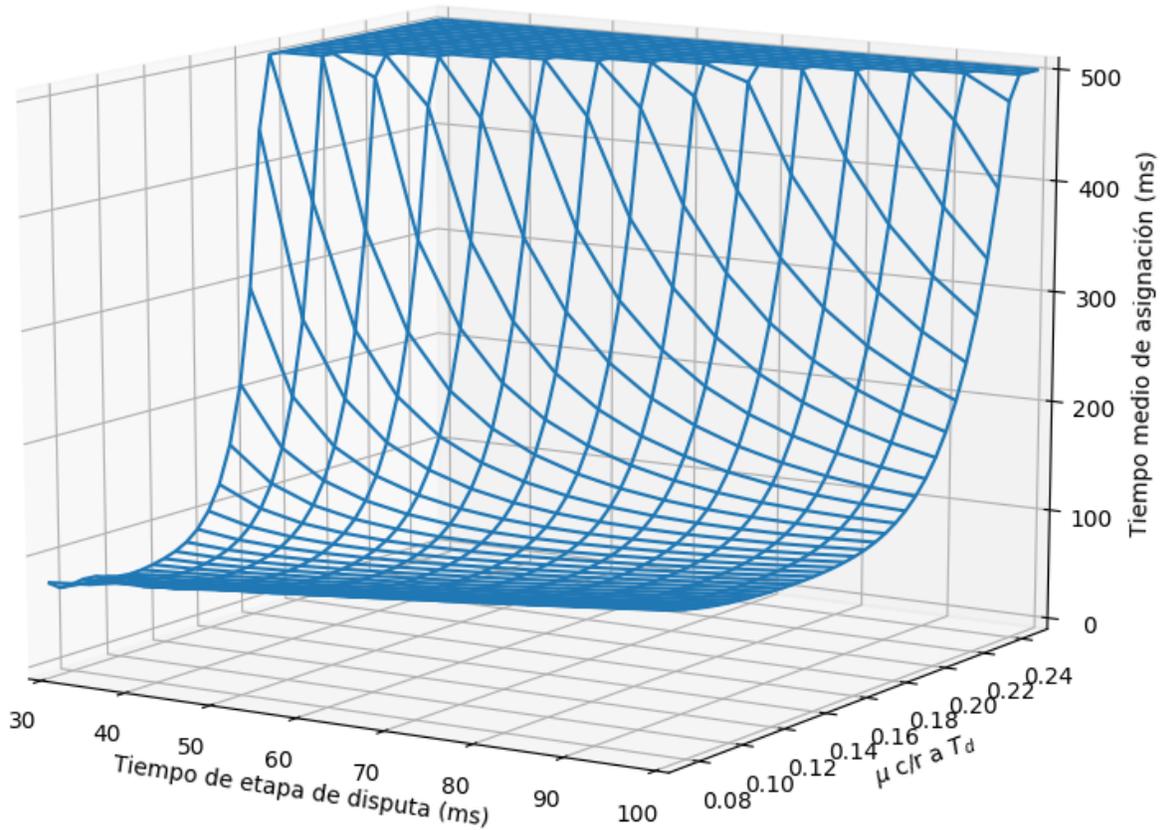


Figura 4.6: Modelo teórico de tiempo medio de asignación,  $T_{exito}$ , para un escenario con 1000 nodos y distribución exponencial, en función de la media de la distribución y el tiempo total de disputa.

### Validación análisis matemático

Con el fin de corroborar el correcto funcionamiento de la implementación de la simulación y analizar la coherencia con el análisis matemático, se configura el escenario con los parámetros análogos a los utilizados en el modelo teórico. Para esto, se discretiza el tiempo con unidad mínima igual al tiempo que tarda la transmisión de los paquetes, el tiempo de disputa es  $T_d = 50 \text{ ms}$  y el tiempo de cada intervalo es de  $5 \text{ ms}$  ( $m = 10$ ).

Los resultados simulados de la probabilidad de éxito son calculados como la cantidad de etapas de disputa exitosas sobre el total de las realizadas, para 10 repeticiones de simulaciones con 1000 etapas de disputa, es decir 10,000 en total. Las Figuras 4.7 y 4.8 muestran los resultados simulados en conjunto con los teóricos de la probabilidad de éxito y el rendimiento normalizado, respectivamente. La comparación realizada muestra resultados coherentes entre las métricas simuladas con las calculadas teóricamente.

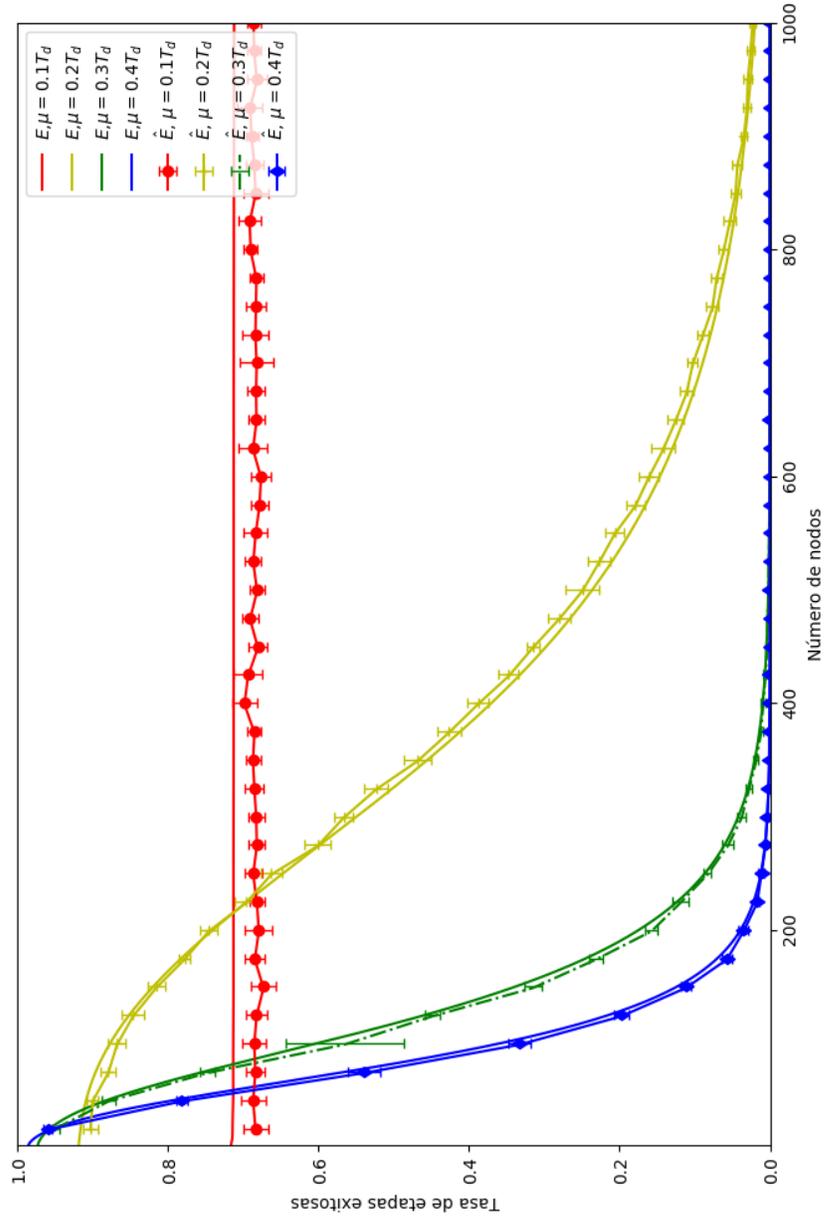


Figura 4.7: Simulación en OMNET++ comparado con análisis matemático. Se considera una duración de etapa de disputa  $T_d = 50ms$ ,  $\hat{E}$  corresponde a las curvas calculadas con resultados de la simulación y  $E$  las curvas calculadas en base a la formulación teórica.

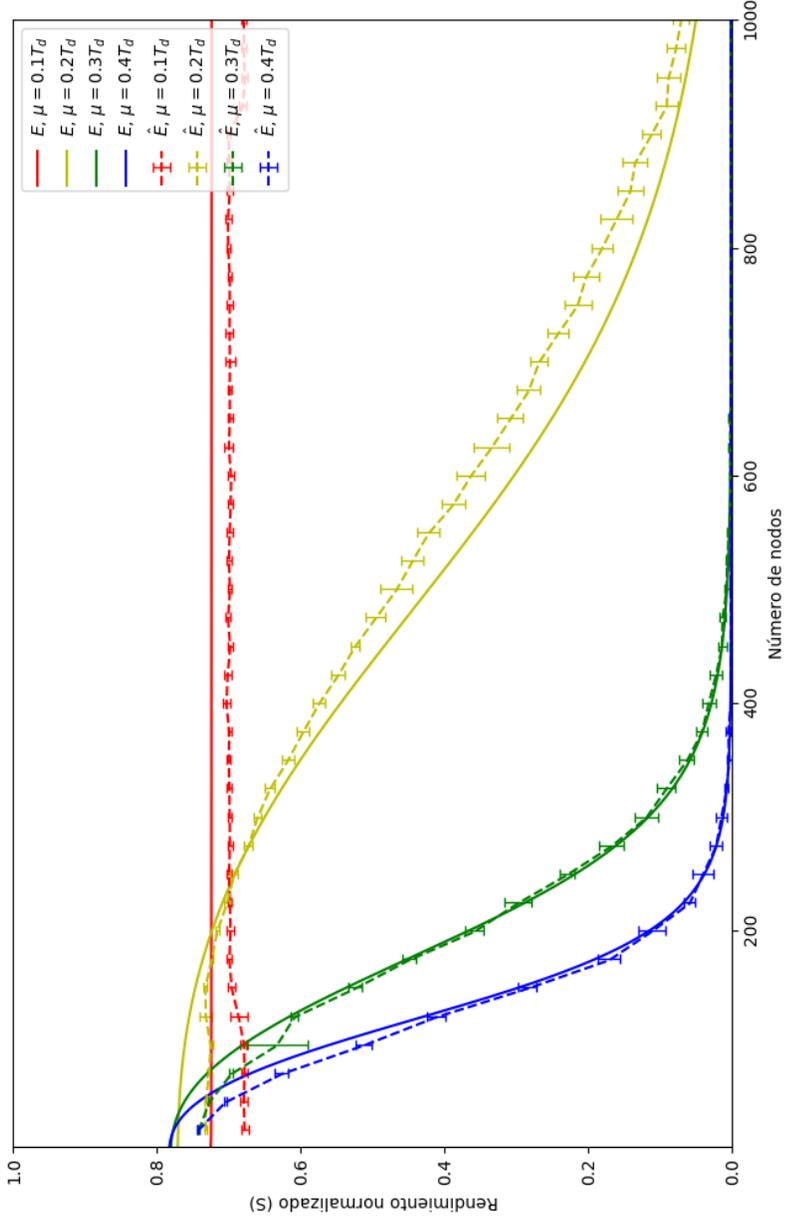


Figura 4.8: Rendimiento normalizado comparando simulación en OMNET++ con análisis matemático.  $T_d = 50 \text{ ms}$ ,  $t_{data} = 200 \text{ ms}$ .  $\hat{E}$  corresponde a las curvas calculadas en base a la formulación teórica.

## 4.2.5. Simulaciones y resultados

A continuación se describen las simulaciones realizadas en la herramienta OMNeT++ y el objetivo buscado con cada simulación.

1. **Simulación 1 - Evaluación general:** En esta simulación se observa el rendimiento del protocolo versión 0 según las métricas expuestas: tasa de etapas exitosas, tiempo medio de disputa para asignación del canal, rendimiento normalizado y PLR. Lo anterior, para un rango de valores amplio, variando el número de nodos y el tiempo de etapa de disputa.
2. **Simulación 2 - Determinación de zona óptima:** En este caso, se observa el tiempo medio de disputa para asignación exitosa, para un rango de valores amplio, variando la media de la exponencial y el tiempo de etapa de disputa. Además, se exponen los valores que alcanzan un mejor rendimiento y la combinación de parámetros que las logra.
3. **Simulación 3 - Evaluación en zona óptima:** En este caso, se realiza una exploración del desempeño del protocolo alrededor de los parámetros que arrojan mejor rendimiento, obtenidos de la Simulación 2. Se utiliza una división de valores más fina, con el fin de acercarse a los parámetros que presentan el mejor rendimiento de manera más certera.
4. **Simulación 4 - Caracterización Protocolo versión 0:** Con los parámetros obtenidos de las simulaciones anteriores, se caracterizan las métricas de desempeño, y con ello el protocolo versión 0 queda definido con todos sus parámetros.

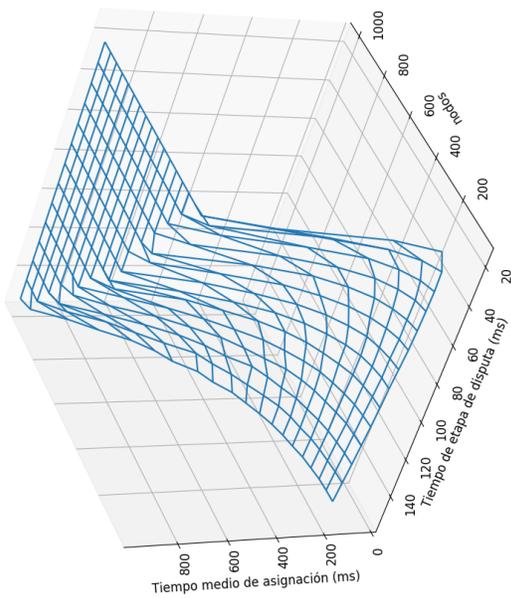
## Simulación 1 - Evaluación general

Para la realización de la simulación aquí descrita se utilizaron los parámetros de la Tabla 3.1 y la Tabla 4.2, fijando la media de la distribución exponencial en  $\mu = 0,2 \cdot T_d$  (valor arbitrario para fijar un corte en el gráfico tridimensional), con  $T_d$  correspondiente al tiempo de una etapa de disputa.

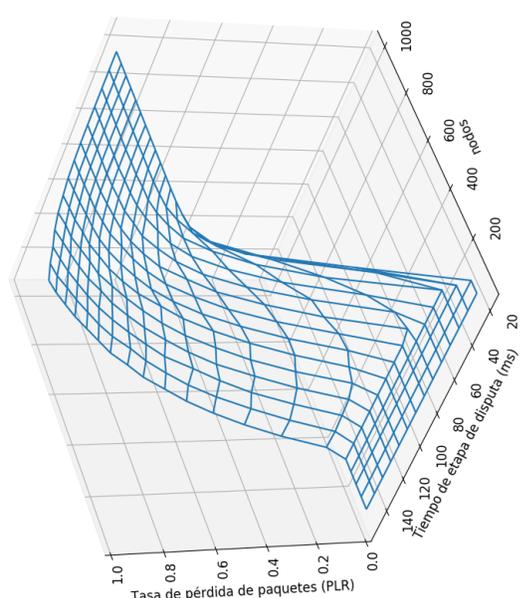
Tabla 4.2: Rangos para los parámetros de la Simulación 1.

<b>Parámetros</b>	<b>Valor</b>	<b><math>\Delta</math></b>	<b>Unidad</b>
Tiempo de etapa de disputa ( $T_d$ )	0.01-0.1	0.01	seg
Número de nodos ( $n$ )	25-1000	25	-
Cantidad total de etapas de disputa en una simulación	500	-	-
Cantidad total de simulaciones para cada configuración	10	-	-

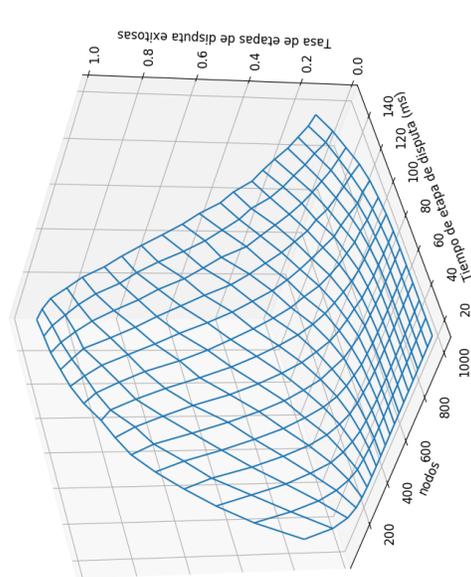
En la Figura 4.9, se muestran los resultados obtenidos para la tasa de etapas exitosas, tiempo medio de asignación, rendimiento normalizado y PLR, en las imágenes (a), (b), (c) y (d), respectivamente. Luego, la Figura 4.10 muestra un corte al gráfico (b) de la Figura 4.9, para distintos valores de tiempos de etapa de disputa, donde además se puede apreciar la magnitud de la desviación estándar de los resultados.



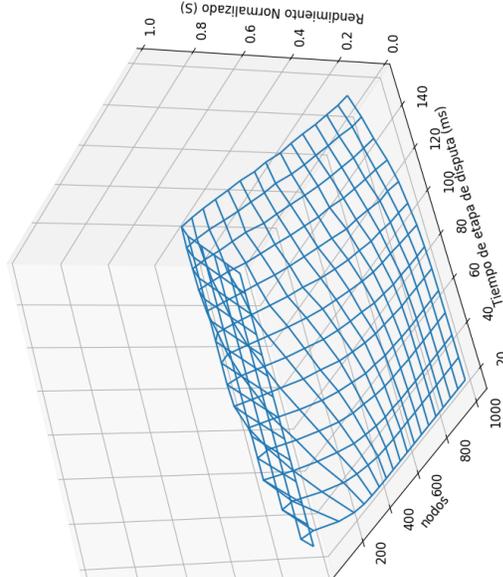
(b) Tiempo medio de disputa para un éxito



(d) Tasa de pérdida de paquetes (PLR)



(a) Tasa de etapas exitosas



(c) Rendimiento Normalizado

Figura 4.9: Simulación 1, resultados para media  $\mu = 0,2 \cdot T_d$ . (a) Tasa de etapas exitosas, (b) Tiempo medio de disputa para asignación exitosa, (c) Rendimiento Normalizado, (d) Tasa de pérdida de paquetes indirecta.

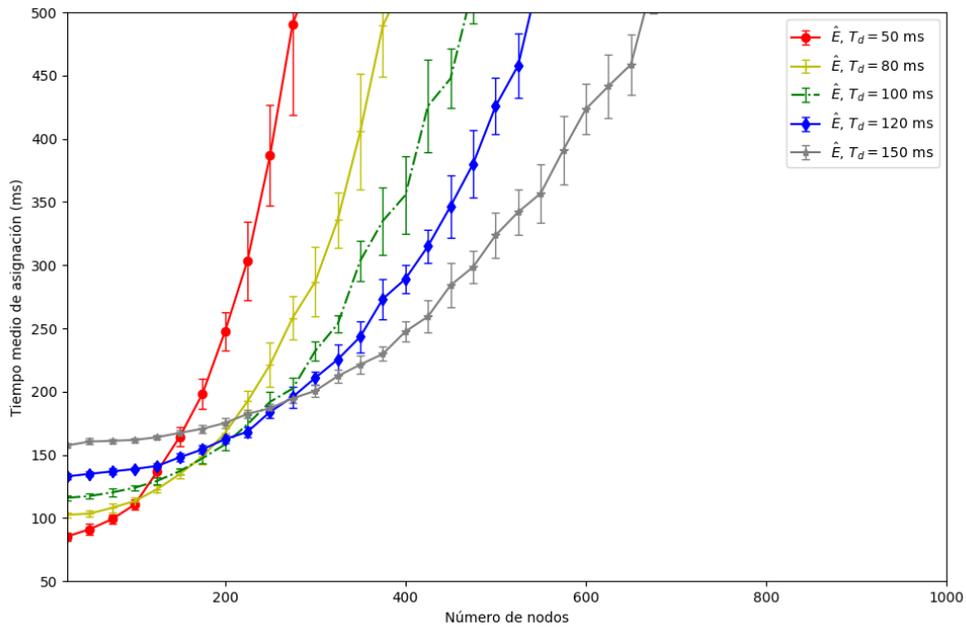


Figura 4.10: Simulación 1, resultados de tiempo medio de asignación considerando media de la distribución  $\mu = 0,2 \cdot T_d$ , para distintos tiempos de etapa de disputa.

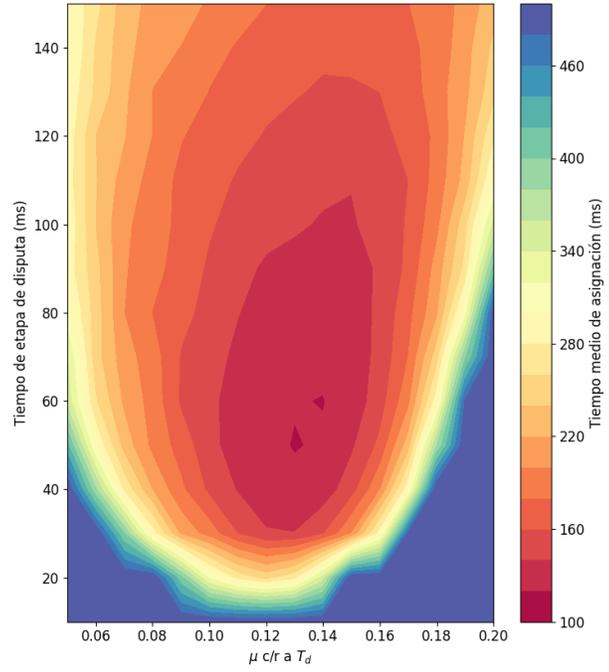
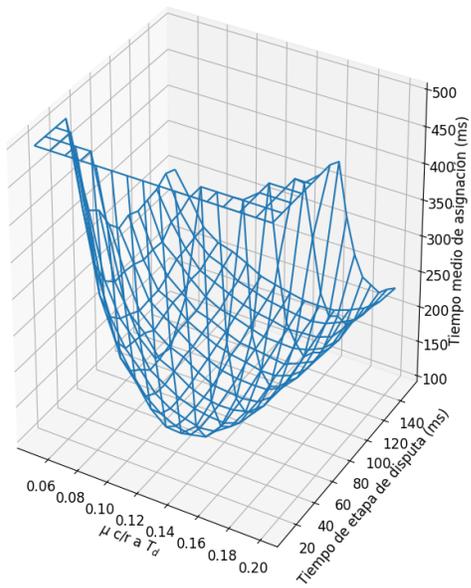
## Simulación 2 - Determinación de zona óptima

En esta simulación se obtienen y muestran los resultados para el tiempo medio de asignación obtenidos utilizando los parámetros de la Tabla 3.1 y la Tabla 4.3.

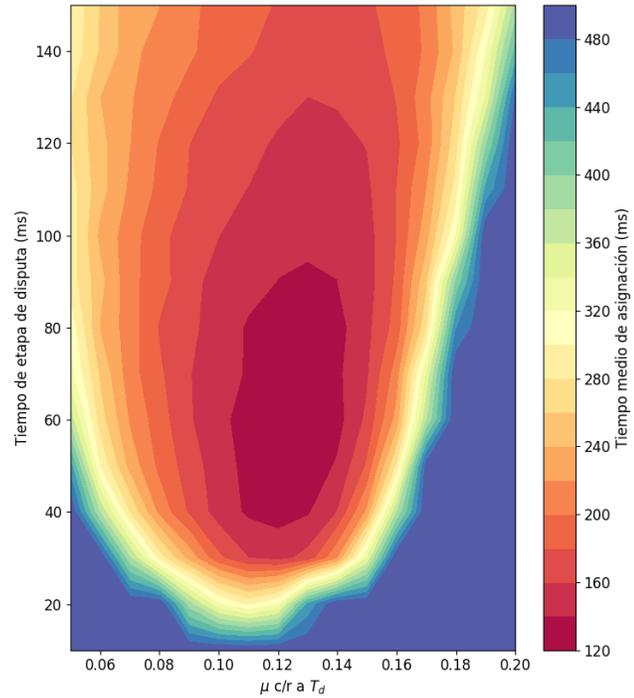
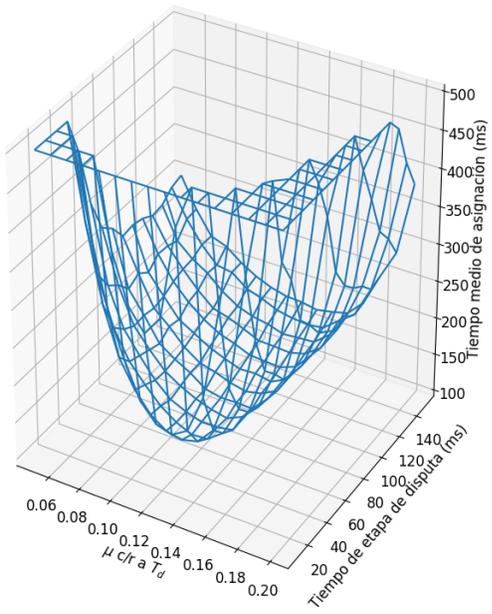
Tabla 4.3: Rangos para los parámetros de la Simulación 2.

<b>Parámetros</b>	<b>Valor</b>	<b><math>\Delta</math></b>	<b>Unidad</b>
Tiempo de etapa de disputa ( $T_d$ )	0.01-0.1	0.01	seg
Número de nodos ( $n$ )	400-1000	200	-
Media de exponencial $c/r$ a tiempo de disputa ( $\mu$ )	0.05-0.2	0.01	$T_d$
Cantidad total de etapas de disputa en una simulación	500	-	-
Cantidad total de simulaciones para cada configuración	10	-	-

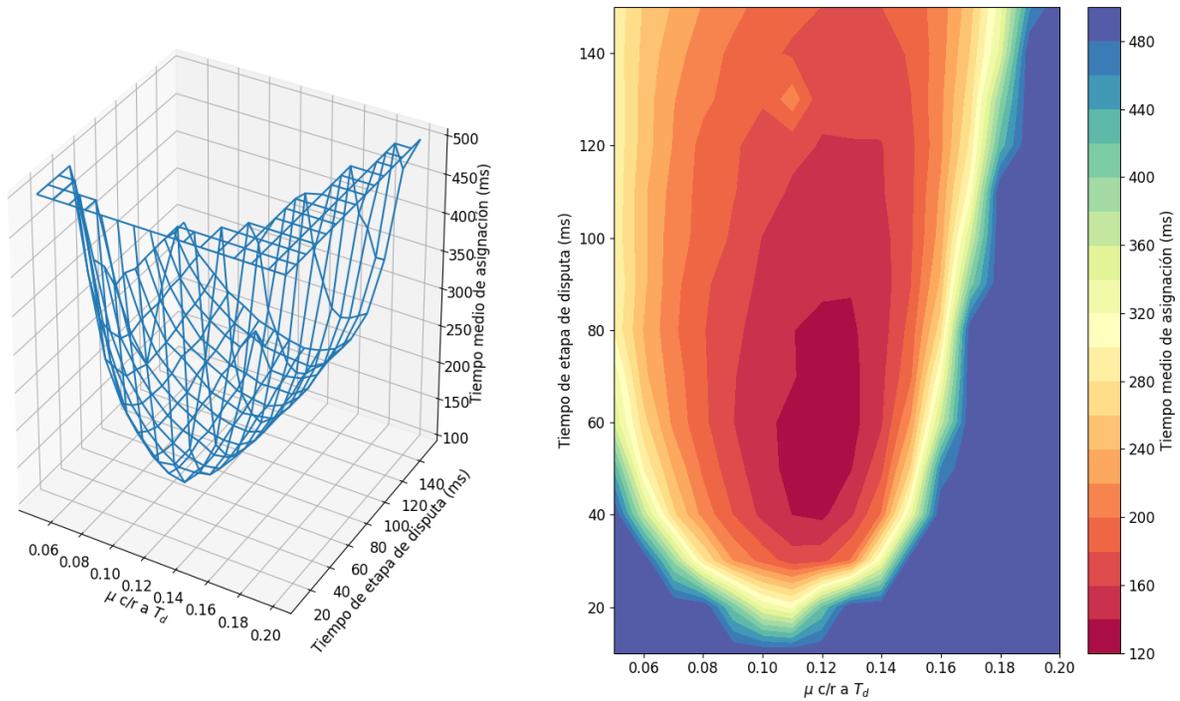
Los resultados de esta simulación, para las distintas cantidades de nodos se muestran en la Figura 4.11. Como se puede ver, existe un mínimo en el tiempo medio de asignación, para cada configuración. En la Tabla 4.4, se muestran las combinaciones de parámetros que minimizan este tiempo para las distintas cantidades de nodos simuladas (400, 600, 800, 1000). En la Figura 4.12 se muestra el tiempo medio de asignación en función del tiempo de etapa de disputa ( $T_d$ ) para distintos valores de nodos, manteniendo la media de la exponencial en  $\mu = 0,125 \cdot T_d$ .



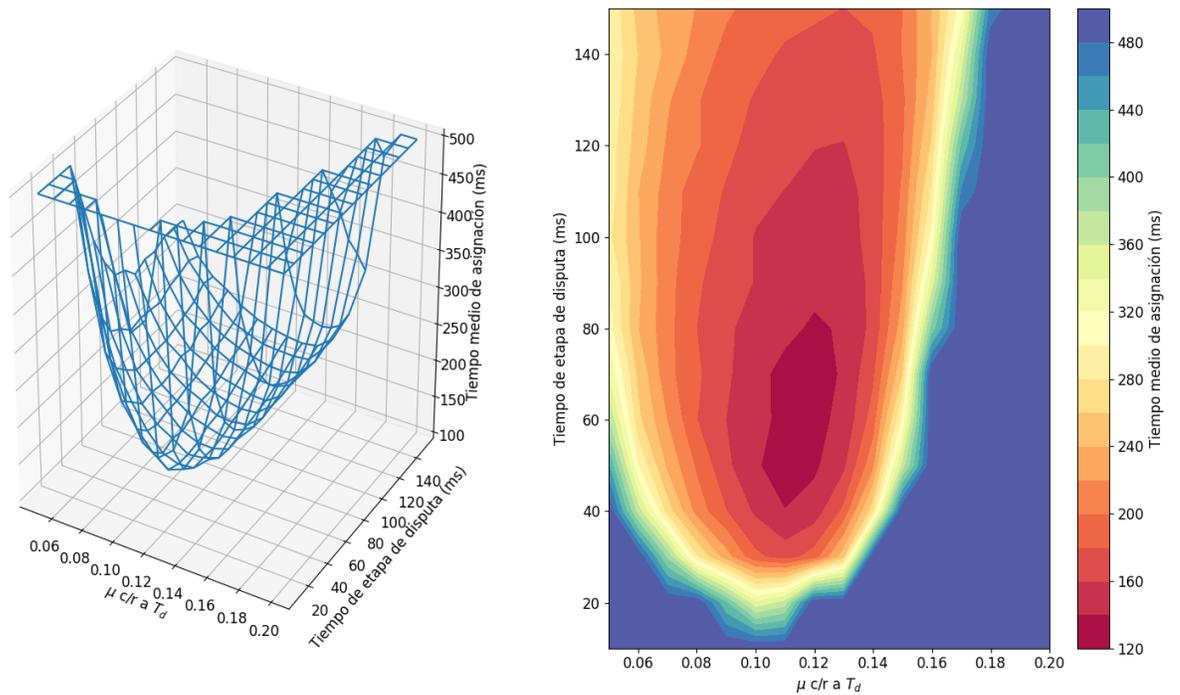
(a) 400 nodos



(b) 600 nodos



(c) 800 nodos



(d) 1000 nodos

Figura 4.11: Simulación 2, resultados de tiempo de asignación para las distintas cantidades de nodos en (a), (b), (c) y (d), para 400, 600, 800 y 1000, respectivamente. A la izquierda, un gráfico tridimensional cuya altura representa el tiempo medio de asignación. A la derecha, los mismos datos representados con un mapa de calor.

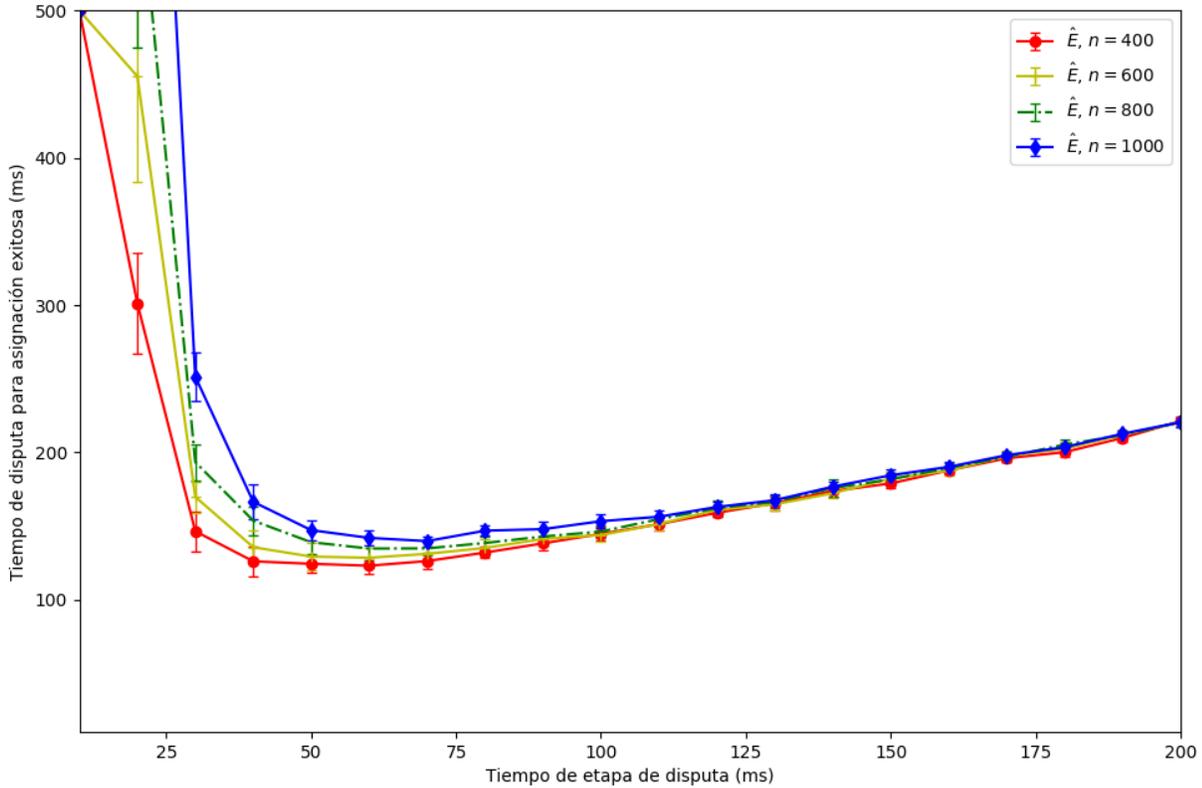


Figura 4.12: Simulación 2, tiempo medio de asignación variando tiempo de etapa de disputa ( $T_d$ ),  $\mu = 0,125 \cdot T_d$ .

Tabla 4.4: Combinaciones de parámetros que arrojan mejor rendimiento en cuanto a tiempo medio de disputa para distintas cantidades de nodos. Valores obtenidos a partir de los mínimos de la Figura 4.11.

$N^\circ$ de nodos	$T_d$ (ms)	$\mu$ c/r $T_d$	Tiempo medio de asignación (ms)
400	50	0.13	122.91
600	60	0.13	128.05
800	60	0.12	132.36
1000	60	0.12	137.03

### Simulación 3 - Evaluación en zona óptima

Considerando que para la Simulación 2 se obtuvo que los valores de los parámetros que minimizaron el tiempo medio de disputa se encontraron alrededor de  $T_d \simeq 60$  (ms) para el tiempo de una etapa de disputa, y para la media de la distribución exponencial alrededor de  $\mu \simeq 0,12 \cdot T_d$ , los valores de parámetros utilizados en esta simulación son los expuestos en la Tabla 4.6.

Los resultados de la simulación se exponen en las Figuras 4.13 y 4.14. En la primera, se ve de manera tridimensional como varía el tiempo medio de asignación en función de la media de la distribución exponencial y el tiempo de etapa de disputa, para valores cercanos al óptimo,

Tabla 4.5: Rangos para los parámetros de la Simulación 3.

<b>Parámetros</b>	<b>Valor</b>	$\Delta$	<b>Unidad</b>
Tiempo de etapa de disputa ( $T_d$ )	0.04-0.1	0.005	seg
Número de nodos ( $n$ )	400-1000	200	-
Media de exponencial c/r a tiempo de disputa ( $\mu$ )	0.1-0.14	0.002	$T_d$
Cantidad total de etapas de disputa en una simulación	5000	-	-
Cantidad total de simulaciones para cada configuración	10	-	-

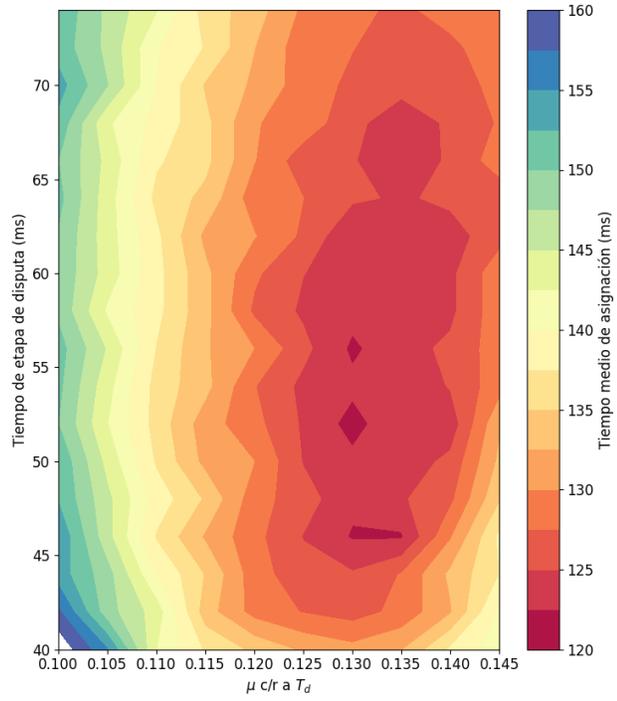
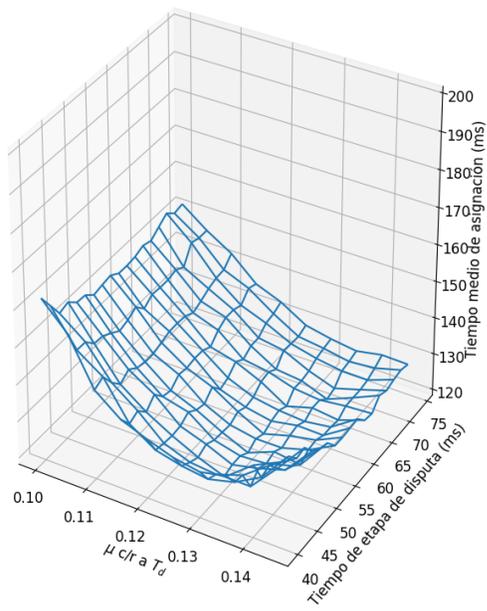
Tabla 4.6: Rangos para las variables de la Simulación 3.

para las distintas cantidades de nodos disputando. En la segunda, un corte transversal de la primera para un valor de  $\mu = 0,125 \cdot T_d$ , comparando para 400, 600, 800 y 1000 nodos.

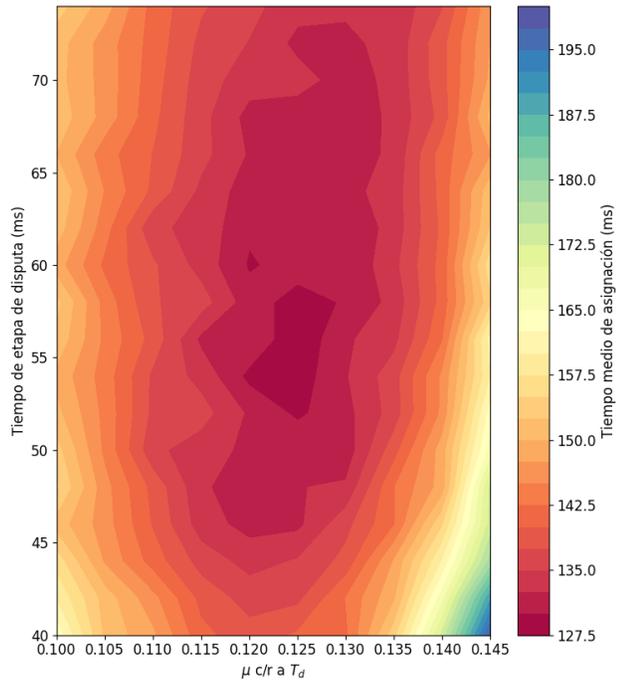
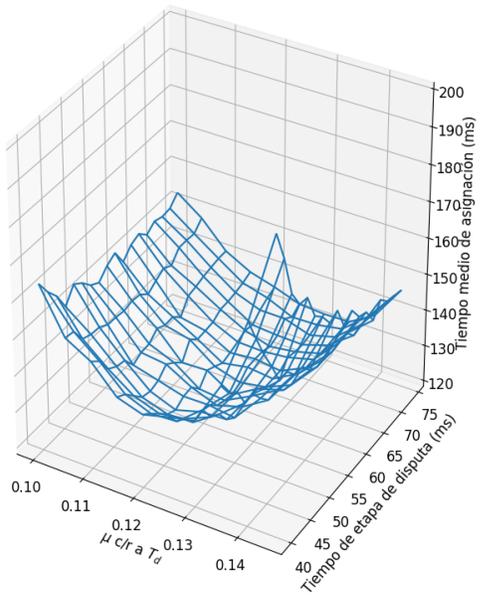
Para las distintas cantidades de nodos se estima la combinación óptima de parámetros. Los resultados se exponen en la Tabla 4.7.

Tabla 4.7: Combinaciones de parámetros que arrojan mejor rendimiento en cuanto a tiempo medio de disputa para distintas cantidades de nodos. Valores obtenidos a partir de los mínimos de la Figura 4.13.

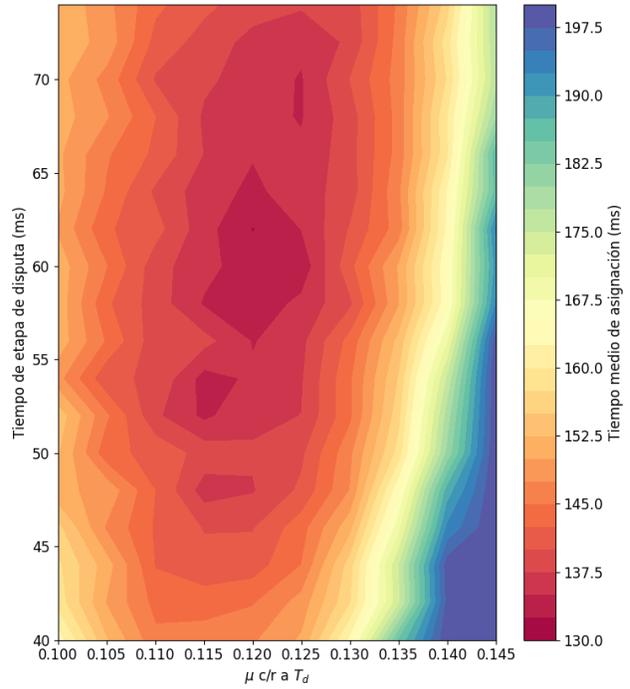
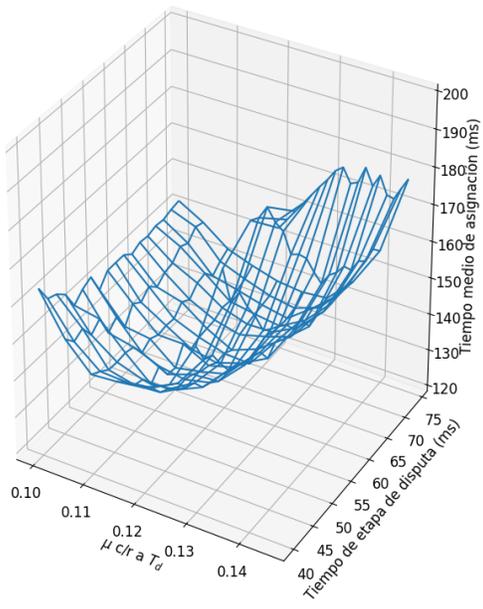
$N^\circ$ de nodos	$T_d$ (ms)	$\mu$ c/r $T_d$	Tiempo medio de asignación (ms)
400	52	0.13	121.57
600	56	0.125	127.86
800	62	0.12	132.34
1000	64	0.115	136.2



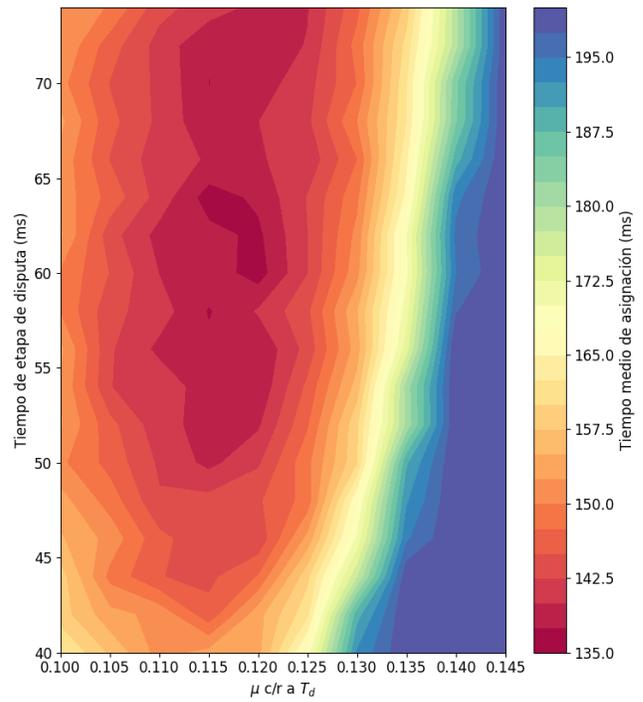
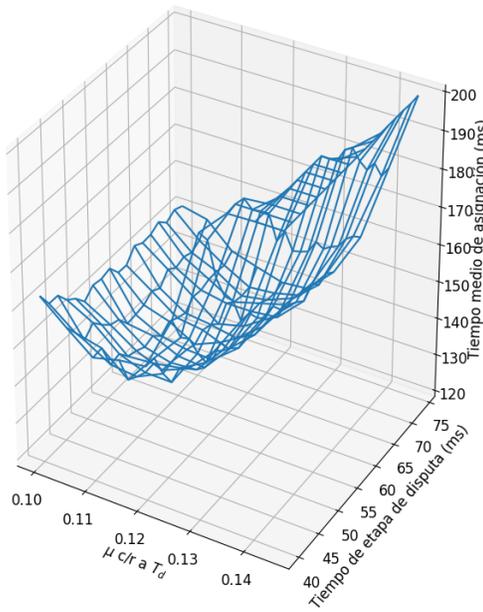
(a) 400 nodos



(b) 600 nodos



(c) 800 nodos



(d) 1000 nodos

Figura 4.13: Simulación 3, resultados de tiempo de asignación para las distintas cantidades de nodos en (a), (b), (c) y (d), para 400, 600, 800 y 1000, respectivamente.

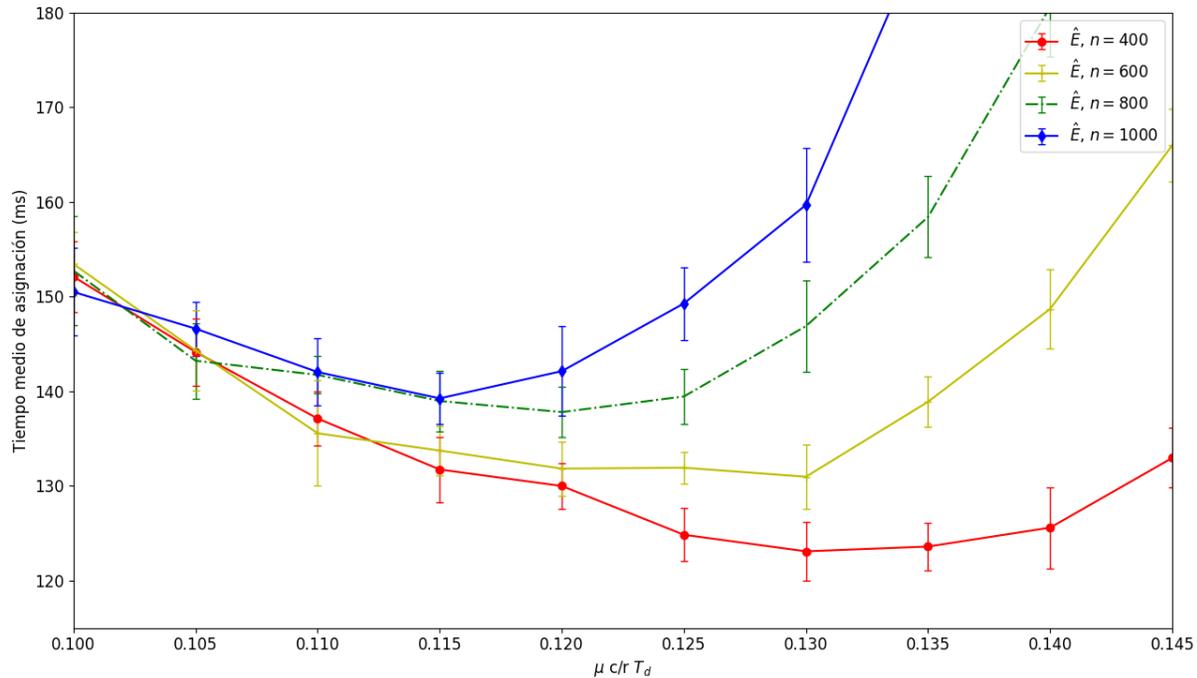


Figura 4.14: Simulación 3, tiempo medio de disputa para asignación exitosa para distintas cantidades de nodos variando  $\mu$ ,  $T_d = 50$  ms.

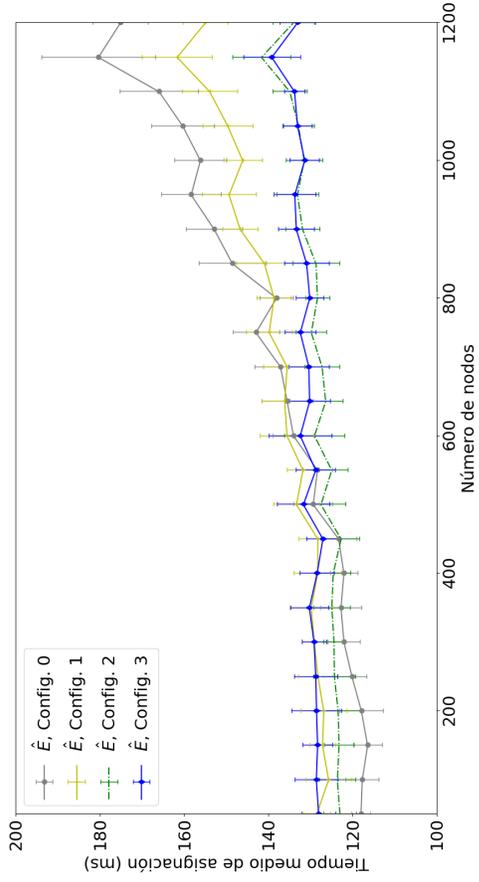
#### Simulación 4 - Caracterización Protocolo Estado 0

Considerando los resultados derivados de la Simulación 3, expuestos en la Tabla 4.7, se definen cuatro configuraciones que optimizan el tiempo medio empleado en disputar el canal para las distintas cantidades de nodos bajo la huella del satélite. Con dichas configuraciones, se realiza esta simulación. Los detalles de cada configuración se presentan en la Tabla 4.8.

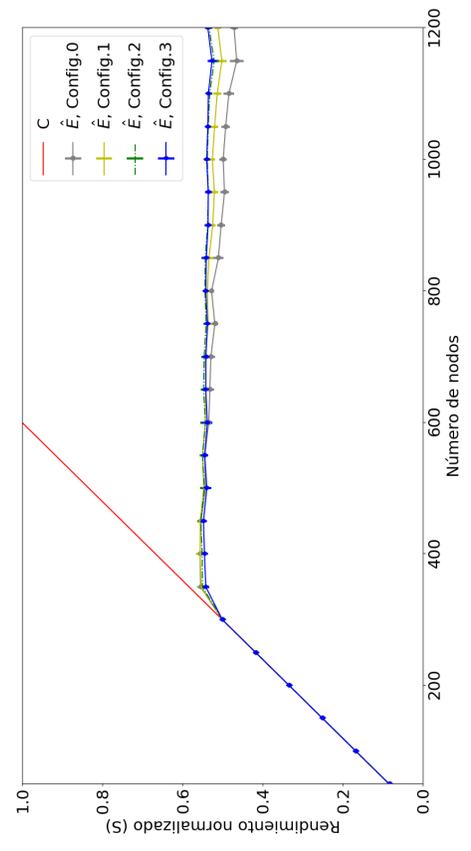
Tabla 4.8: Resultados Simulación 4. Combinaciones de parámetros que arrojan mejor rendimiento en cuanto a tiempo medio de asignación para distintas cantidades de nodos.

Config. $N^o$	$T_d$ (ms)	$\mu c/r T_d$	$N^o$ de nodos para optimizar
0	52	0.13	400
1	56	0.125	600
2	62	0.12	800
3	64	0.115	1000

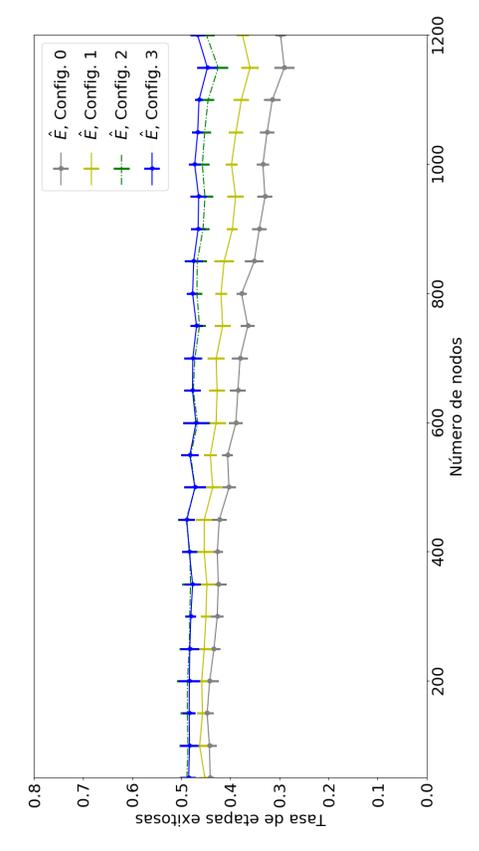
Para las simulaciones realizadas de cada configuración se calcula: Tasa de etapas exitosas, Tiempo medio de disputa para un éxito, Rendimiento normalizado y tasa de pérdida de paquetes. Dichos resultados se exponen en la Figura 4.15 y además, se resumen en la Tabla 4.9.



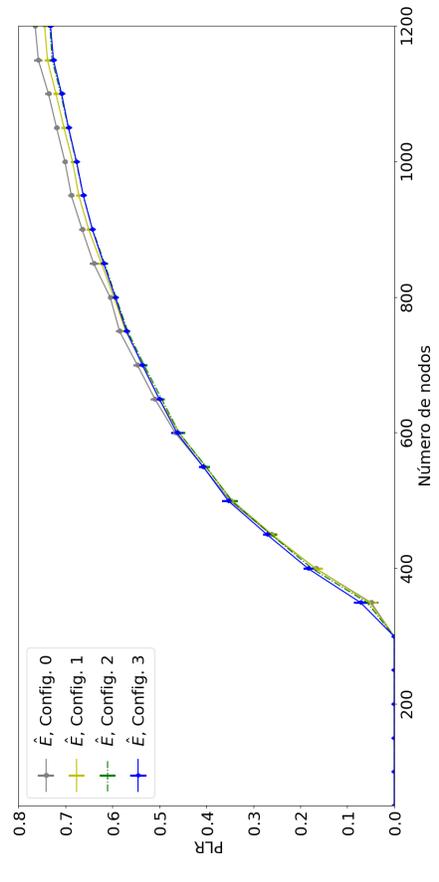
(a) Tasa de etapas exitosas



(b) Rendimiento Normalizado



(c) Tiempo medio de asignación



(d) Tasa de pérdida de paquetes (PLR)

Figura 4.15: Simulación 4, resultados de las cuatro configuraciones distintas, variando la cantidad de nodos bajo la huella del satélite. (a) Tasa de etapas exitosas, (b) Rendimiento Normalizado y (c) Tiempo medio de asignación y (d) Tasa de pérdida de paquetes.

Tabla 4.9: Resultados Simulación 3. Combinaciones de parámetros que arrojan mejor rendimiento en cuanto a tiempo medio de asignación para distintas cantidades de nodos.

Config. $N^o$	$S_{max}$	$C_{S_{max}}$	$N^o$ de nodos	$C_{PLR=10^{-3}}$
0	0.556	0.666	400	0.583
1	0.555	0.666	400	0.583
2	0.554	0.75	450	0.583
3	0.547	0.75	450	0.583

#### 4.2.6. Análisis

Las simulaciones realizadas permiten identificar el comportamiento del Protocolo versión 0 para un amplio rango de parámetros. Los resultados obtenidos muestran una curva convexa para el tiempo medio de asignación, posibilitando una optimización al modelo. En consecuencia, a través del análisis heurístico se determinó la combinación de parámetros ( $\mu$  y  $T_d$ ) que permite operar el Protocolo versión 0 con un alto rendimiento. Por otro lado, los resultados arrojan una dependencia entre el par,  $\mu$  y  $T_d$ , con el número de nodos bajo la huella. Cada análisis con un valor de  $n$  (i.e., número de nodos sensores bajo la huella de visión) distinto arrojó un nuevo par para operar en un pseudo-óptimo, lo que define las cuatro configuraciones de la Simulación 4.

Se puede ver, además, que en los resultados expuestos en la Simulación 4, las curvas de rendimiento para las distintas configuraciones muestran resultados estables y con pequeñas variaciones.

En resumen, el Protocolo versión 0 obtiene un máximo de rendimiento normalizado alrededor de  $S = 0,55$ . Opera con una carga normalizada de hasta  $C = 0,58$  teniendo una pérdida de paquetes inferior al 0,1%. Además, para cargas normalizadas mucho mayores que 1, se mantiene un rendimiento normalizado sobre 0,45.

## 4.3. Protocolo versión Mejorada

### 4.3.1. Análisis de tiempos de arribo

En esta sección se define y analiza la alternativa de implementar una mejora al Protocolo versión 0. Esta, consiste en acortar el tiempo que se está disputando por el canal, definiendo una estrategia que deriva de analizar los tiempos de llegada de los paquetes exitosos durante la disputa. Las mejoras a realizar se implementarán y simularán sobre una de las configuraciones pseudo-óptimas mostradas en la Simulación 4. Por la estabilidad presentada en el desempeño y dado que alcanza un máximo rendimiento normalizado para un número alto de nodos, se escoge la Configuración 2 ( $T_d = 62 \text{ ms}$ ,  $\mu = 0,12 \cdot T_d$ ).

#### Tiempos de llegada de primer paquete

En primera instancia, se registran los tiempos de llegada del primer paquete de solicitud que arriba de manera exitosa al satélite para el Protocolo versión 0. Los resultados se presentan en la Figura 4.16, donde se puede ver en qué intervalo de tiempo se acumulan los primeros paquetes exitosos para distintas cantidades de nodos disputando, durante una etapa de disputa ( $T_d = 62 \text{ ms}$ ).

Los resultados expuestos en la Figura 4.16, sugieren que la mayoría de las recepciones exitosas se concentran desde la mitad del tiempo de disputa en adelante, y que para un mayor número de nodos disputando los tiempos de primer éxito se concentran aún más hacia el final del tiempo de disputa.

#### Exponencial inversa

Considerando los resultados anteriores se implementa como función de distribución para la elección de tiempos de espera la inversa a la utilizada en el Protocolo versión 0. Para obtener la función de densidad de distribución de probabilidades de la exponencial inversa se debe realizar una transformación de la distribución original, un desplazamiento en el eje X y una inversión en el mismo eje, de la forma  $f(-(x + T_d))$ . En la Ecuación 4.17 se define la función de densidad de probabilidades a utilizar y se muestra en la Figura 4.17.

$$f(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x < 0 \\ \lambda e^{\lambda(x+T_d)} + \int_{T_d}^{\infty} (\lambda e^{\lambda(y+T_d)} dy) & \text{si } x = 0 \\ \lambda e^{\lambda(x+T_d)} & \text{si } 0 < x \leq T_d \\ 0 & \text{si } x > T_d \end{cases} \quad (4.17)$$

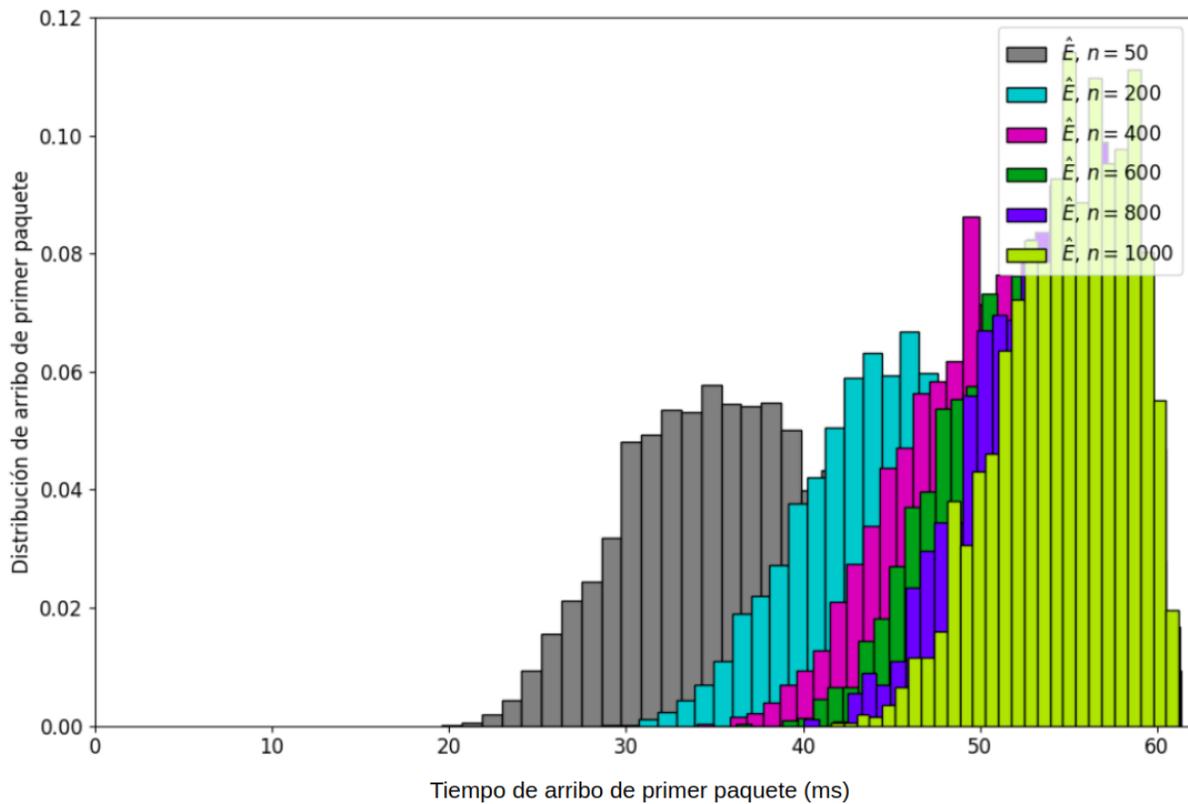


Figura 4.16: Análisis de tiempos de arribo para la Configuración 2. Se muestra un histograma que registra el porcentaje de veces que el mensaje de solicitud llegó en determinado intervalo de tiempo dentro del tiempo de una etapa de disputa, para distintas cantidades de nodos.

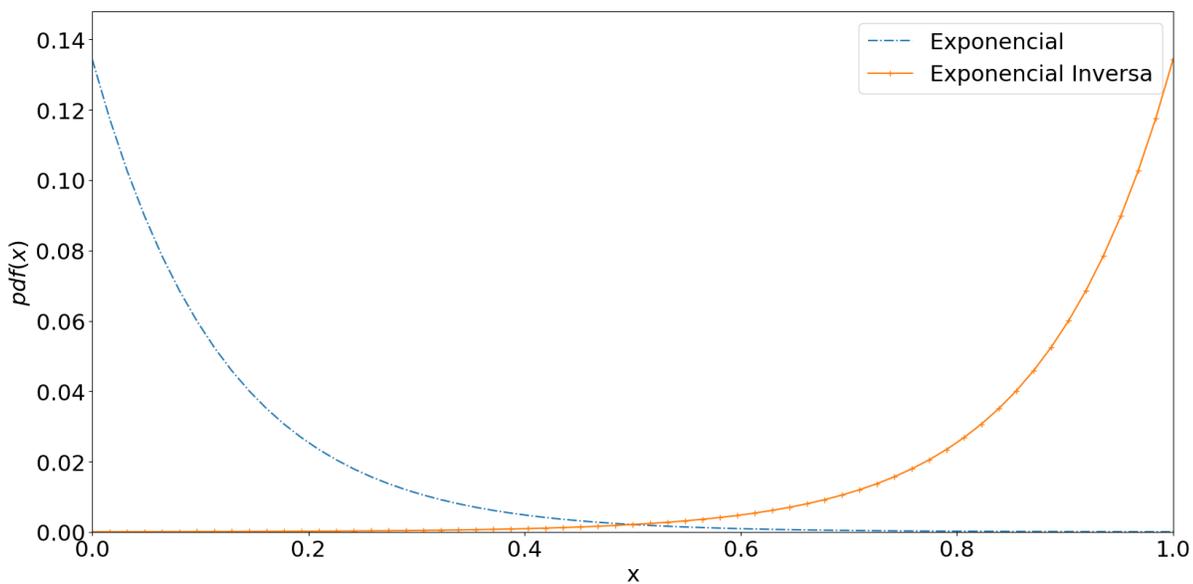


Figura 4.17: Función de densidad de probabilidad para elección de tiempo de espera de los nodos, considerando Configuración 2. Las curvas muestran la función de distribución tradicional y la distribución exponencial inversa. La variable  $x$  representa el tiempo dentro de la etapa de disputa, normalizado con  $T_d$ .

En la Figura 4.18 se exponen los tiempos de llegada del primer paquete exitoso para la simulación realizada considerando la distribución  $pdf(x)$ .

En la Figura 4.19, se observa dentro de qué intervalo de tiempo se alcanza un 90 %, 95 % y 99 % de las veces la recepción del primer paquete exitoso, para distintas cantidades de nodos bajo la huella. Los resultados sugieren que la gran mayoría de las recepciones exitosas se dan al comienzo del tiempo de disputa, más aún para un gran número de nodos. Por esto, como mejora al Protocolo versión 0, se propone acortar el tiempo de efectivo de disputa.

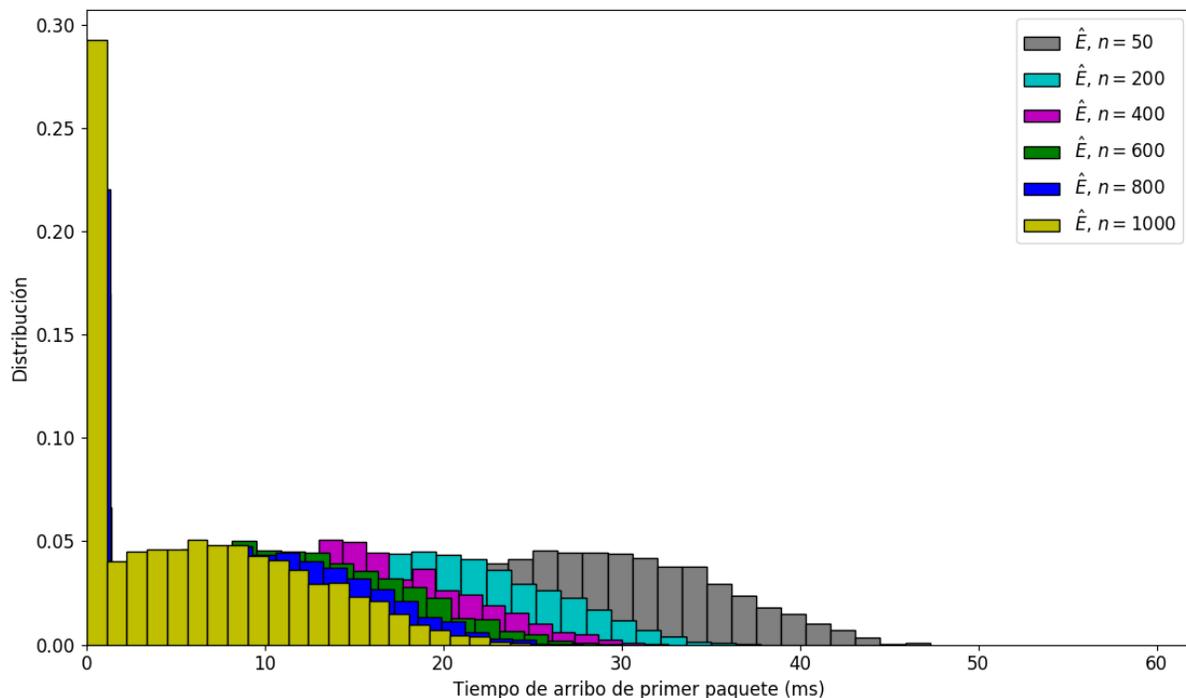


Figura 4.18: Análisis de tiempos de arribo para la Configuración 2 y exponencial inversa como función de distribución. Se muestra un histograma que registra como se distribuye la llegada de mensajes de solicitud durante una etapa de disputa, para distintas cantidades de nodos.

### 4.3.2. Funcionamiento Protocolo mejorado

En esta nueva versión, los cálculos de tiempos de espera para enviar el mensaje de solicitud de cada nodo serán idénticos, sin embargo, se definirá un umbral que opera de la siguiente forma: si el tiempo de espera de un nodo es mayor al umbral, dicho nodo no enviará el mensaje de solicitud, es decir, no participará de la etapa de disputa.

El umbral se define como el tiempo mejorado,  $T_m$ , y es equivalente al tiempo de disputa multiplicado por un factor de reducción,  $f_r$ , siguiendo la expresión de la Ecuación 4.18.

$$T_m = f_r \cdot T_d \quad (4.18)$$

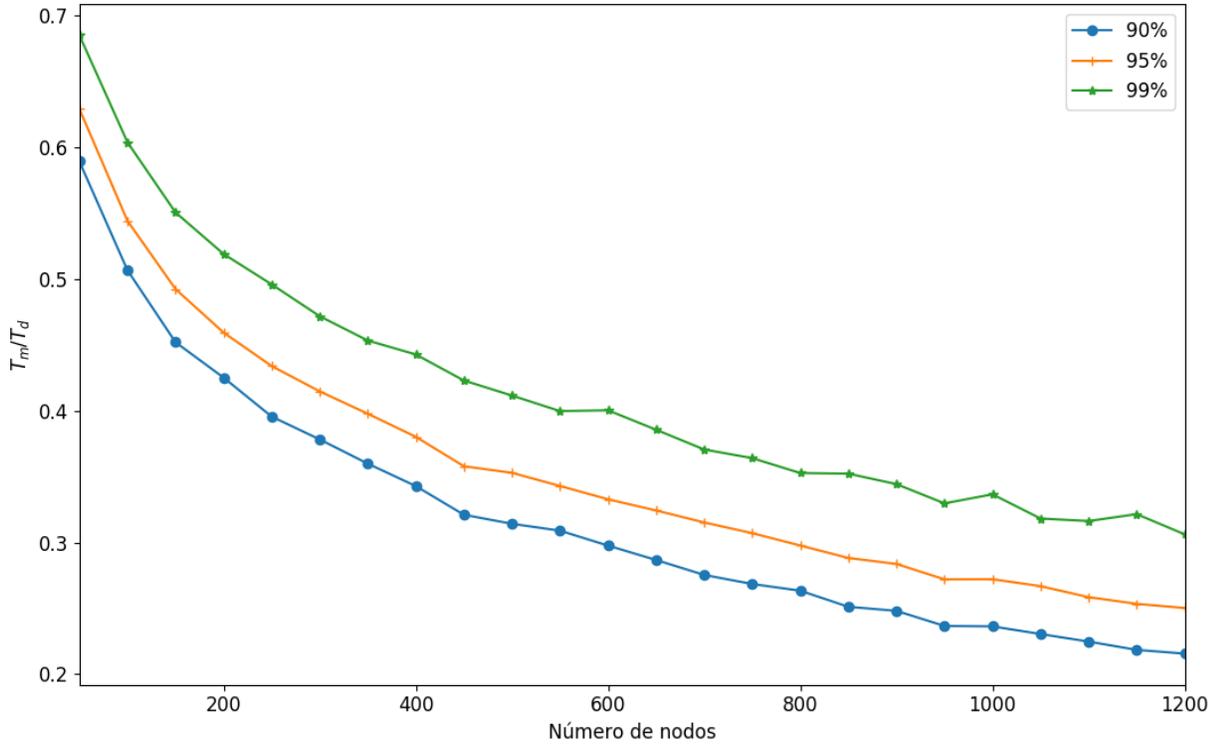


Figura 4.19: Análisis de tiempos de arribo para la Configuración 2. Se muestra el tiempo (normalizado con  $T_d$ ) dentro del cual se recibe el  $X\%$  de las veces al menos un mensaje de solicitud exitoso, con  $X$  igual a 90, 95 y 99 para las distintas curvas.

Finalmente, el funcionamiento del Protocolo mejorado queda definido con el siguiente algoritmo:

1. Al comienzo, todos los nodos en tierra están escuchando.
2. El satélite, previo a cada etapa de disputa envía una señal *broadcast* que indica el inicio de la misma y contiene el valor de  $T_m$ , avisando que está disponible para recibir solicitudes provenientes de los nodos y por cuanto tiempo. Una vez enviada la señal, el nanosatélite inicia un temporizador de espera calculado como el tiempo de disputa **mejorado** ( $T_m$ ) más un margen que considera el máximo retardo aceptado debido al tiempo de propagación y al tiempo de procesamiento ( $c$ ),  $T_m + c$ .
3. Cuando un nodo sensor tiene datos para enviar y recibe esta señal, inicia un temporizador que espera un tiempo aleatorio, denominado tiempo de espera  $t_e$  (siempre menor a  $T_d$ , no necesariamente menor a  $T_m$ ). Dependiendo del valor de  $t_e$ , existen dos acciones a tomar por el nodo sensor:
  - (a) Si  $t_e > T_m$ , el nodo sensor no participará de la disputa.
  - (b) Si  $t_e \leq T_m$ , una vez expirado el temporizador  $t_e$ , el nodo sensor envía un mensaje de solicitud de envío que contiene su identificación.
4. Una vez finalizado el temporizador  $T_m + c$ , el satélite procesa las señales recibidas durante la espera. Muchas de estas señales presentarán colisiones que harán inviable su decodificación. Existen dos acciones a tomar que dependen de si se recibió al menos una solicitud de manera exitosa:

- (a) Si no se recibe ninguna señal de solicitud de envío de datos (ya sea a causa de que no hay sensores bajo la huella o que hubo colisiones entre todas las solicitudes), se vuelve al paso 2.
  - (b) Si una o más señales se reciben correctamente, se elige uno de los nodos en tierra y se procede con el siguiente paso.
5. El satélite envía un mensaje de asignación indicando al nodo sensor elegido que tiene otorgado el canal para enviar datos. Luego, el satélite inicia un temporizador durante un tiempo  $c$  (máximo retardo). Posterior a este paso, hay dos casos posibles:
- (a) El nodo sensor recibe correctamente el mensaje de asignación y envía sus datos satisfactoriamente al satélite.
  - (b) El nodo sensor no recibe el mensaje de asignación o el satélite no recibe los datos provenientes del sensor. Se agota el temporizador  $c$  y se vuelve al paso 2.
6. Una vez finalizada la Etapa de envío de datos, se vuelve al paso 1.

En la Figura 4.20 se ilustra el algoritmo del protocolo mejorado, y en la Figura 4.21 se muestran los cambios principales entre el Protocolo versión 0 y el mejorado.

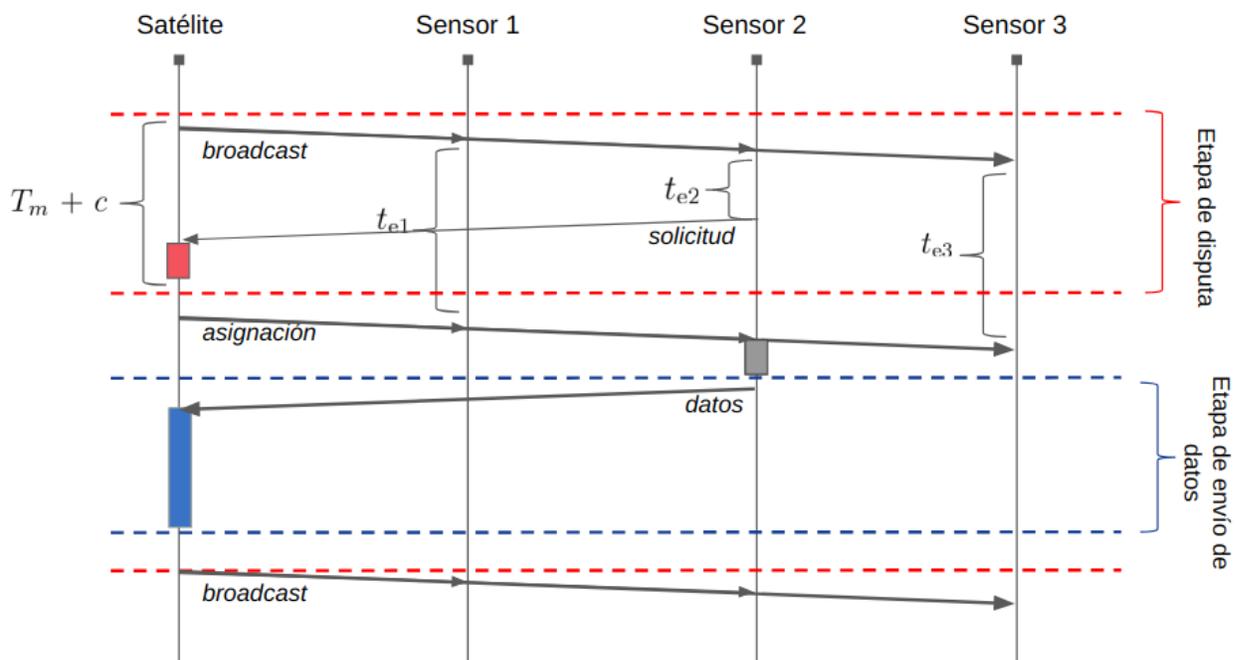
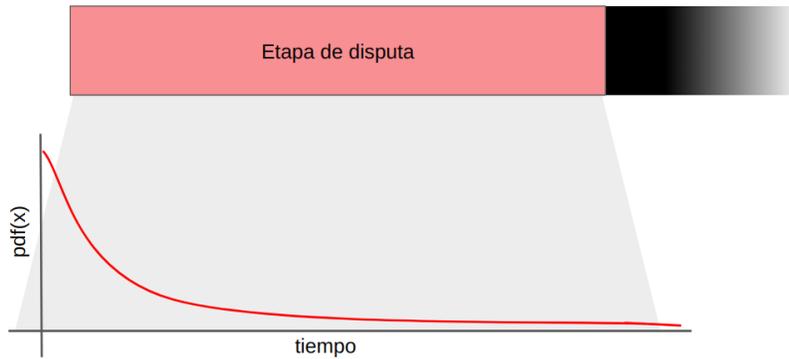


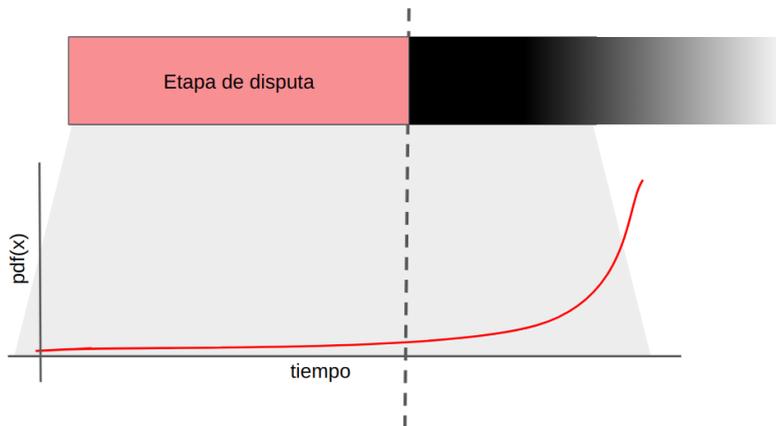
Figura 4.20: Descripción gráfica del algoritmo que define al Protocolo mejorado.



(a) Protocolo versión 0



(b) Protocolo con distribución exponencial inversa



(c) Protocolo mejorado

Figura 4.21: Descripción gráfica de cambios al protocolo. Bloque rojo representa la etapa de disputa. Bloque negro representa etapa de envío de datos. La curva roja representa la función de densidad de probabilidades para la elección del tiempo de espera de cada nodo.

### 4.3.3. Simulaciones y resultados

#### Simulación 5 - Evaluación de mejora al protocolo versión 0

En la Tabla 4.10 se muestran los parámetros utilizados para la Simulación 5, realizada para evaluar el protocolo con las mejoras realizadas. El tiempo mejorado para la simulación se varía reduciendo el tiempo de disputa en factores que van desde 0,1 a 0,8. En la Figura 4.22 se muestran los resultados de la misma.

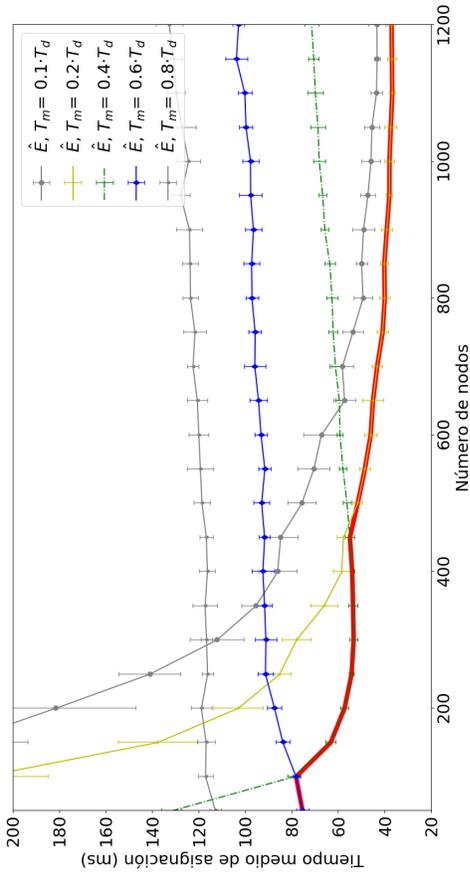
Tabla 4.10: Rangos para los parámetros de la Simulación 5.

<b>Parámetros</b>	<b>Valor</b>	$\Delta$	<b>Unidad</b>
Tiempo de etapa de disputa ( $T_{disputa}$ )	0.062	-	seg
Número de nodos ( $n$ )	0-1200	25	-
Media de exponencial c/r a tiempo de disputa ( $\mu$ )	0.12	-	$T_{disputa}$
Factor de reducción de $T_d$ ( $f_r$ )	0.1-0.8	0.1	-
Cantidad total de etapas de disputa en una simulación	1000	-	-
Cantidad total de simulaciones para cada configuración	10	-	-

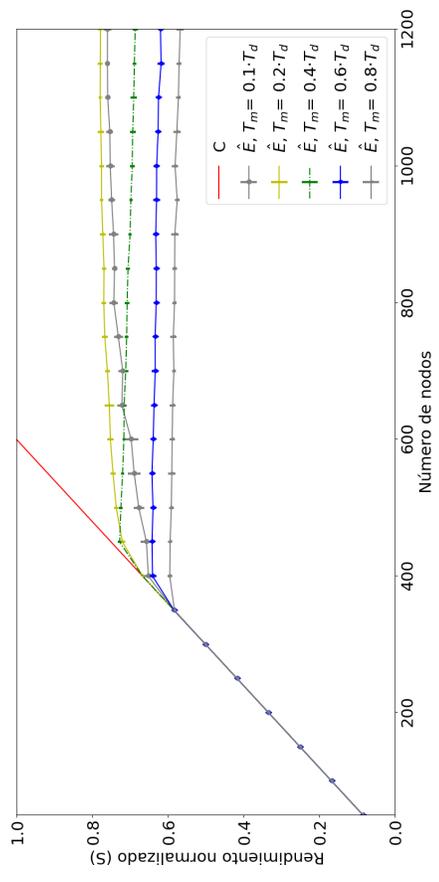
Para los distintos factores de reducción se obtuvieron los rendimientos expuestos en la Tabla 4.11.

Tabla 4.11: Resultados Simulación 5. Evaluación protocolo Mejorado, con distintos valores de  $f_r$ .

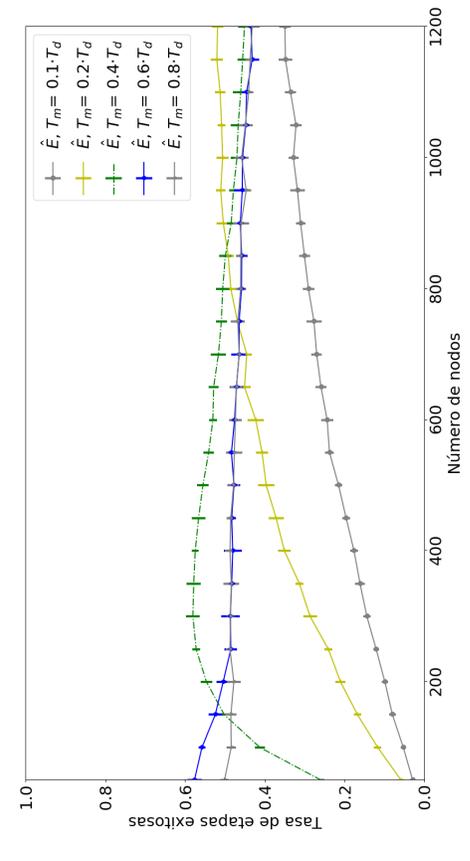
$f_r$	$S_{max}$	$C_{S_{max}}$	$N^o$ de nodos	$C_{PLR=10^{-3}}$
0.1	0.76	2	1200	0.625
0.2	0.78	1.91	1150	0.667
0.4	0.72	0.75	450	0.667
0.6	0.64	0.91	550	0.625
0.8	0.59	0.667	400	0.625



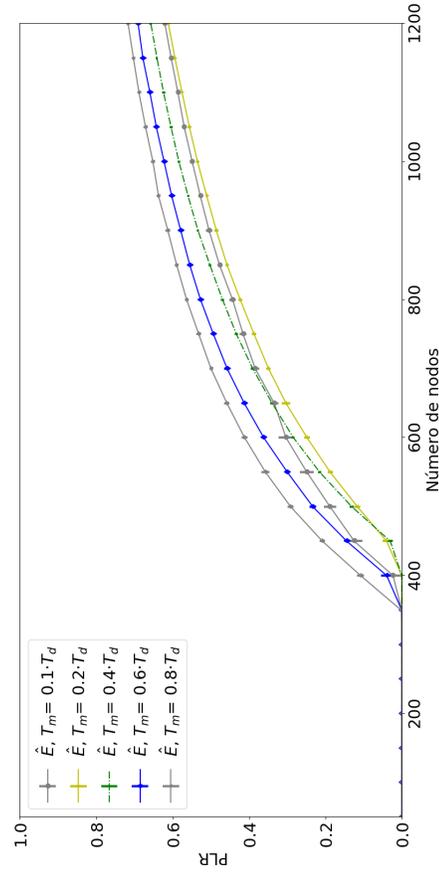
(a) Tasa de etapas exitosas



(b) Rendimiento Normalizado



(c) Tasa de etapas exitosas



(d) Tasa de pérdida de paquetes (PLR)

Figura 4.22: Simulación 5, resultados para cinco tiempos mejorados ( $T_m$ ) distintos equivalentes al tiempo de disputa ( $T_d$ ) reducido en el factor  $f_e$ , variando la cantidad de nodos bajo la huella del satélite. (a) Tasa de etapas exitosas, (b) Tiempo medio de asignación, (c) Rendimiento Normalizado y (d) Tasa de pérdida de paquetes.

#### 4.3.4. Análisis

Al realizar el análisis de los tiempos de llegada del primer mensaje de solicitud exitoso en la Sección 4.3.1, en conjunto con la implementación de la exponencial inversa como función de distribución de probabilidades, se evidencia la capacidad de mejorar el Protocolo versión 0. Como se puede ver en los resultados de la Simulación 5, la implementación de la mejora muestra un incremento en el rendimiento normalizado de alrededor del 40%. Además, se puede operar con una carga normalizada de  $C = 0,667$  con pérdidas de paquetes de menos del 0,1%.

Al igual que para la elección de parámetros realizada en la Sección 4.2, donde se encontró que el par  $\mu$  y  $T_d$  que arroja un mejor rendimiento depende de la cantidad de nodos bajo la huella, para el Protocolo mejorado, también se encuentra una dependencia entre  $f_r$  y el número de nodos. Para una cantidad baja de nodos, es conveniente un  $f_r$  alto, mientras que para un alto número de nodos un bajo  $f_r$  arroja un rendimiento mayor. De todas maneras, la curva que muestra un mayor rendimiento normalizado en términos generales es para un valor  $f_r = 0,2$ .

## 4.4. Comparación Protocolo versión 0 y Protocolo mejorado

En la Figura 4.23 se exponen los resultados del Protocolo versión 0 considerando la Configuración 2, en comparación con los resultados del protocolo mejorado implementando un factor  $f_r = 0,2$ .

Finalmente, para cuantificar la mejora respecto a la eficiencia energética del protocolo, se compara cuántos paquetes de solicitud envían en promedio los nodos bajo la huella durante cada etapa de disputa. Por definición, para el Protocolo versión 0, cada nodo envía 1 paquete de solicitud por etapa de disputa, mientras que para la el protocolo mejorado, se calcula este valor en la Simulación 5. Resultados en Tabla 4.12.

Tabla 4.12: Comparación de cantidad media de paquetes de solicitud que envía cada nodo durante una etapa de disputa.

	Paquetes de solicitud/nodo/etapa de disputa
Versión 0	1
Mejorado	0.00127

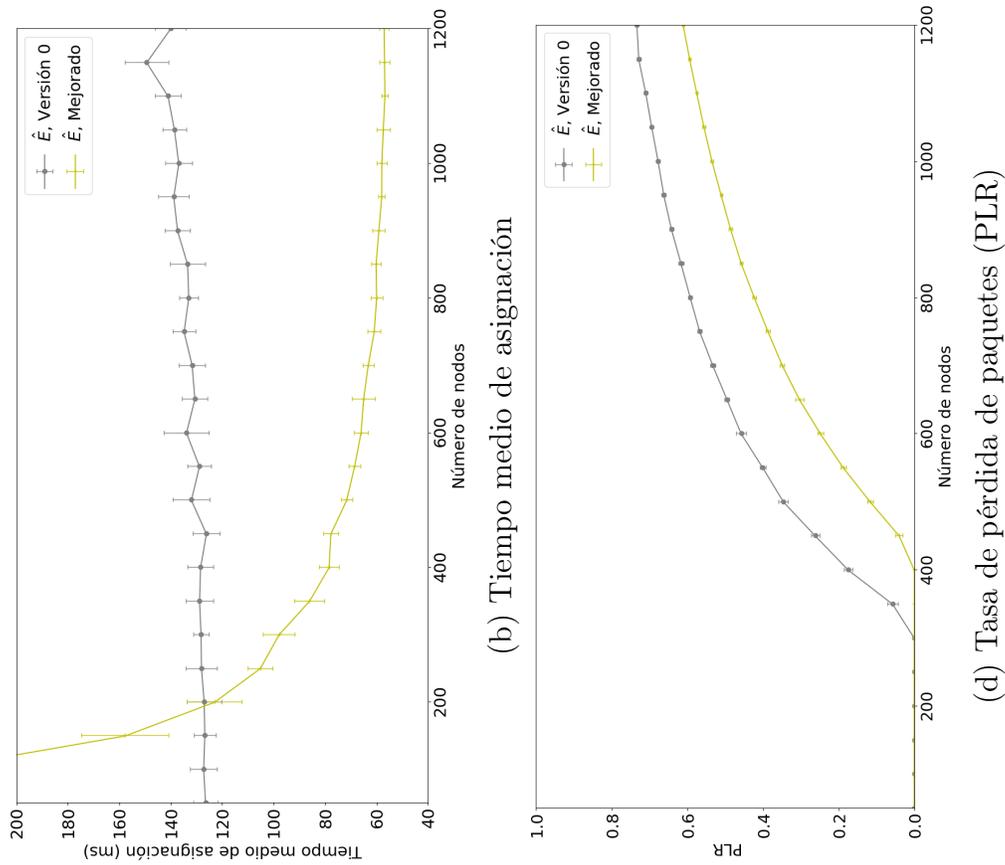


Figura 4.23: Comparación entre Protocolo versión 0 (Configuración 2) y Mejorado (tiempo mejorado,  $T_m = 0,2 \cdot T_d$ ), variando la cantidad de nodos bajo la huella del satélite. (a) Tasa de etapas exitosas, (b) Tiempo medio de asignación, (c) Rendimiento Normalizado y (d) Tasa de pérdida de paquetes.

# Capítulo 5

## Análisis de Resultados

Para llevar a cabo el análisis de los resultados obtenidos se considera el estudio realizado sobre el estado del arte en la Sección 2.4. En este último, se presentan dos comparaciones; primero, en la Tabla 2.3, se exponen los máximos rendimientos reportados en la respectiva documentación de cada protocolo; luego, en la Figura 3.2, se presenta un diagrama que compara de manera gráfica el rendimiento de cada protocolo cuando se toman en cuenta consideraciones del escenario descrito en la Sección 3.1. Ambas comparaciones se utilizarán para identificar la contribución del protocolo desarrollado.

En primera instancia se analiza el rendimiento general del Protocolo versión 0 y se compara con los del estado del arte. Lo mismo se realiza para el Protocolo mejorado. Finalmente, se comentan aspectos y oportunidades para mejorar el rendimiento del protocolo.

### 5.1. Protocolo versión 0

La evaluación realizada en el Capítulo 4, en la Sección 4.2.5, permitió encontrar de manera heurística los parámetros que permiten operar el protocolo dentro de la zona de rendimiento óptimo.

Como resultados de la Simulación 4, se obtienen los rendimientos de cuatro configuraciones para el Protocolo versión 0 (expuestos en Tabla 4.9), en el mismo formato que los expuestos en la Tabla 2.3. Las cuatro configuraciones presentaron sutiles diferencias en las métricas expuestas en la Figura 4.15:

- Configuraciones 0 y 1, muestran un mejor rendimiento para baja cantidad de nodos disputando por el canal, en sacrificio de un decaimiento más pronunciado cuando se aumenta el número de nodos bajo la huella.
- Configuraciones 2 y 3, requieren un mayor tiempo medio de asignación para un bajo número de nodos, sin embargo, su rendimiento no decae considerablemente a medida aumenta el número de nodos bajo la huella.

De estas, se selecciona la Configuración 2 dado su equilibrio entre rendimiento para alto número de nodos y tiempo medio de asignación para bajo número de nodos. Las métricas obtenidas para la comparación del Protocolo versión 0 se presentan en la Tabla 5.1

Tabla 5.1: Resultados Simulación 4, Configuración 2.

Config. $N^o$	$S_{max}$	$C_{S_{max}}$	$N^o$ de nodos	$C_{PLR=10^{-3}}$
2	0.554	0.75	450	0.583

Considerando que la implementación no requiere *hardware* específico, estimación precisa del canal o altas capacidades de procesamiento y almacenamiento, se concluye que la complejidad de implementación del Protocolo versión 0 es baja. Por otro lado, el protocolo requiere que los nodos estén continuamente enviando paquetes de solicitud, pues en cada etapa de disputa, los nodos envían sí o sí uno de estos paquetes, y considerando que un nodo debe participar en varias etapas de disputa, el rendimiento energético del protocolo será bajo.

Con lo anterior, es posible situar el Protocolo versión 0 en la Tabla 2.3, con lo que se obtiene la Tabla 5.2.

Tabla 5.2: Protocolo versión 0 en comparación con protocolos MAC del estado del arte, considerando el rendimiento en comunicaciones, complejidad de la implementación, eficiencia energética y el impacto de la topología.

Protocolo	$S_{max}$	$C_{S_{max}}$	$C_{PLR=10^{-3}}$	Comp.	Ef. Ener.	Topología*
MuSCA	1.4	1.42	1.22	alto	alto	retardos desiguales (-)
E-SSA	1.2	1.25	1.12	alto	alto	desbalance de potencia (+)
FC-TDMA	1	1	-	medio	medio	variabilidad de nodos (-), retardos desiguales (-)
R-Aloha	1	1	-	medio	medio	retardos diferentes (-)
CSA	0.8	0.84	-	alto	alto	retardos desiguales(-)
IRSA	0.8	0.85	0.7	alto	alto	retardos desiguales (-)
CSMA/CA	0.75	0.8	-	bajo	bajo	nodos escondidos (-), retardos diferentes (-)
SS-Aloha	0.6	0.7	0.5	medio	medio	desbalance de potencia (-)
<b>Versión 0</b>	0.554	0.75	0.583	bajo	bajo	desbalance de potencia (+)
CRDSA	0.52	0.65	0.05	alto	medio	desbalance de potencia (+), retardos diferentes (-)
S-Aloha	0.368	1	$< 10^{-3}$	bajo	medio	desbalance de potencia (+), retardos diferentes (-)
DSA	0.3	0.6	$< 10^{-3}$	bajo	medio	desbalance de potencia (+), retardos diferentes (-)
E-Aloha	0.09	0.1	$< 10^{-3}$	bajo	medio	desbalance de potencia (+)

\* (+) significa que la característica de la topología ayuda a mejorar el rendimiento del protocolo, mientras (-) indica que la característica tiene un impacto negativo.

Como se puede ver, la primera iteración del protocolo supera en rendimiento a los protocolos más básicos de acceso aleatorio y supera también a CRDSA, protocolo pionero en técnicas de cancelación de interferencia. Sin embargo, la comparación expuesta en la tabla

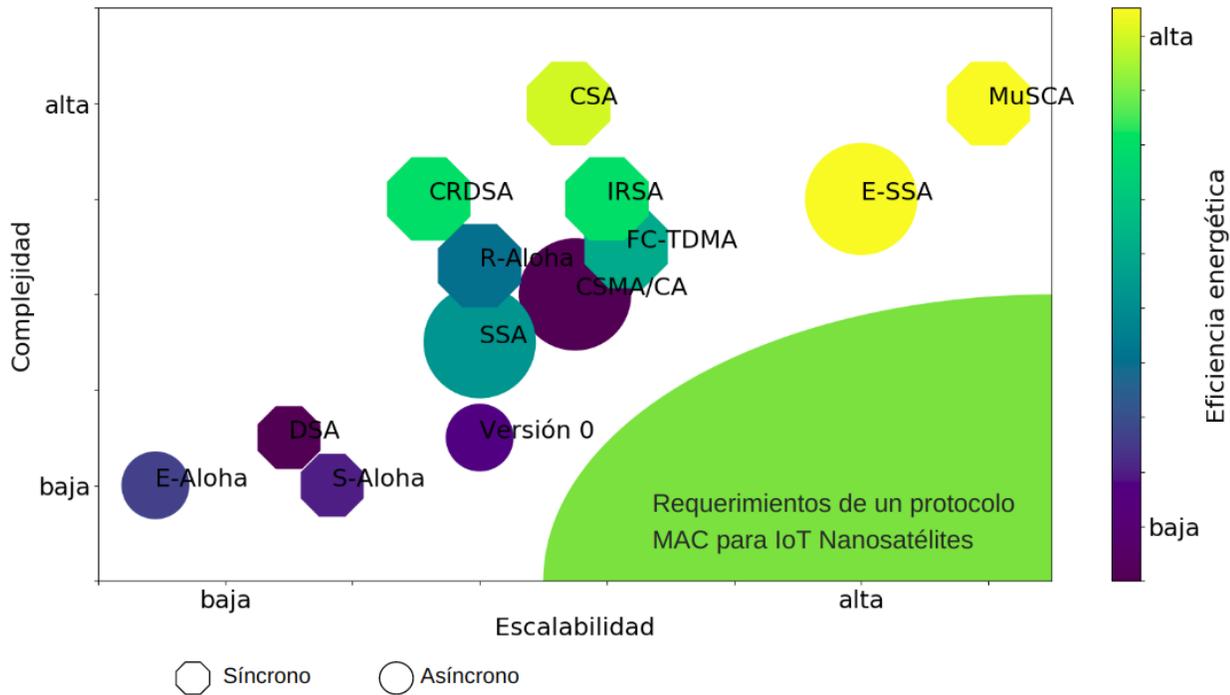


Figura 5.1: Comparación de Protocolo versión 0 y protocolos MAC del estado del arte en el contexto del escenario para servicio IoT provisto por tecnología nanosatelital.

no considera el rendimiento de los protocolos en relación al escenario, esto sí se hace en el diagrama de la Figura 5.1.

El rendimiento obtenido para el Protocolo versión 0, si bien, se acerca un poco más al rendimiento esperado considerando los requerimientos necesarios para proveer un servicio de IoT a través de nanosatélites, no muestra una contribución importante respecto al estado del arte, tal como se puede apreciar en la Tabla 5.2 y en la Figura 5.1.

## 5.2. Protocolo Mejorado

Considerando lo anterior, en la Sección 4.3 se define la mejora a realizar sobre el Protocolo versión 0, además, se lleva a cabo un análisis y evaluación de la mejora consistente en la reducción del tiempo de disputa, con la motivación de que el rendimiento encaje con los requerimientos del escenario.

Como resultado de la implementación de una distribución exponencial inversa para la elección de los tiempos de espera de los nodos y la reducción del tiempo efectivo de disputa, se obtuvieron los resultados expuestos en la Figura 4.22, los cuales se resumen en la Tabla 4.11.

Para los distintos valores de  $f_r$  se tienen importantes diferencias en el rendimiento general del protocolo:

- $f_r$  bajo: implica que el tiempo de una etapa de disputa disminuye de manera considerable, impactando desfavorablemente a la probabilidad de éxito de cada etapa. Sin embargo, el tiempo medio de asignación disminuye en gran medida cuando el número de nodos es alto.
- $f_r$  alto: Tiene un mejor rendimiento para un bajo número de nodos, ya que el tiempo medio de asignación no aumenta de manera dramática.

De la Figura 4.22b, se puede ver que para un número de nodos entre 100 y 400 es conveniente  $f_r = 0,4$ , mientras que para una cantidad mayor de nodos, la mejor opción es  $f_r = 0,2$ . Sin embargo, al comparar rendimiento normalizado (S), la configuración que sobresale es con un  $f_r = 0,2$ , cuyo rendimiento se muestra en la Tabla 5.3.

Tabla 5.3: Resultados Simulación 5, factor de reducción de tiempo de disputa  $f_r = 0,2$ .

$f_r$	$S_{max}$	$C_{S_{max}}$	$N^\circ$ de nodos	$C_{PLR=10^{-3}}$
0.2	0.78	1.91	1150	0.667

En la Figura 4.23b, se puede observar que el protocolo mejorado, para un número de nodos menor a 175, presenta un tiempo medio de asignación más alto. Sin embargo, en la Figura 4.23c, se observa una notable mejora en el rendimiento normalizado, mostrando un aumento de hasta un 40 %.

La mejora diseñada no significa ningún costo en términos de complejidad de implementación para el protocolo, más aún, gracias a la mejora, se obtiene un rendimiento energético considerablemente mayor. En el Protocolo versión 0, todos los nodos bajo la huella envían el paquete de solicitud en cada etapa de disputa, lo cual impacta de manera desfavorable la eficiencia energética. En el Protocolo mejorado los nodos bajo la huella sólo hacen el envío de datos cuando su tiempo es menor al umbral ( $T_m = f_r \cdot T_d$ ), es decir, sólo envían un paquete de solicitud cuando la probabilidad de que este paquete tenga una recepción exitosa por parte del satélite sea alta. Esto se puede ver cuantificado en la Tabla 4.12, muestra una reducción en más de un 99 % de la cantidad de mensajes de solicitud enviados por los nodos.

Con estas consideraciones, se procede a ubicar al Protocolo Mejorado en la Tabla 5.4. Donde se puede ver que se supera el rendimiento máximo de SS-Aloha y del ampliamente desarrollado CSMA/CA. Más aún, si se analizan los rendimientos de cada protocolo en el escenario de IoT a través de nanosatélites, el protocolo Mejorado es el que encaja de mejor manera, tal como se puede ver en la Figura 5.2.

Tabla 5.4: Protocolo versión 0 en comparación con protocolos MAC del estado del arte, considerando el rendimiento en comunicaciones, complejidad de la implementación, eficiencia energética y el impacto de la topología.

Protocolo	$S_{max}$	$C_{S_{max}}$	$C_{PLR=10^{-3}}$	Comp.	Ef. Ener.	Topología*
MuSCA	1.4	1.42	1.22	alto	alto	retardos diferentes (-)
E-SSA	1.2	1.25	1.12	alto	alto	desbalance de potencia (+)
FC-TDMA	1	1	-	medio	medio	variabilidad de nodos (-), retardos diferentes (-)
R-Aloha	1	1	-	medio	medio	retardos diferentes (-)
CSA	0.8	0.84	-	alto	alto	retardos diferentes(-)
IRSA	0.8	0.85	0.7	alto	alto	retardos diferentes (-)
Mejorado	0.78	1.91	0.667	bajo	alto	desbalance de potencia (+)
CSMA/CA	0.75	0.8	-	bajo	bajo	nodos escondidos (-), retardos diferentes (-)
SS-Aloha	0.6	0.7	0.5	medio	medio	desbalance de potencia (-)
Versión 0	0.554	0.75	0.583	bajo	medio	desbalance de potencia (+)
CRDSA	0.52	0.65	0.05	alto	medio	desbalance de potencia (+), retardos diferentes (-)
S-Aloha	0.368	1	$< 10^{-3}$	bajo	medio	desbalance de potencia (+), retardos diferentes (-)
DSA	0.3	0.6	$< 10^{-3}$	bajo	medio	desbalance de potencia (+), retardos diferentes (-)
E-Aloha	0.09	0.1	$< 10^{-3}$	bajo	medio	desbalance de potencia (+)

\* (+) significa que la característica de la topología ayuda a mejorar el rendimiento del protocolo, mientras (-) indica que la característica tiene un impacto negativo.

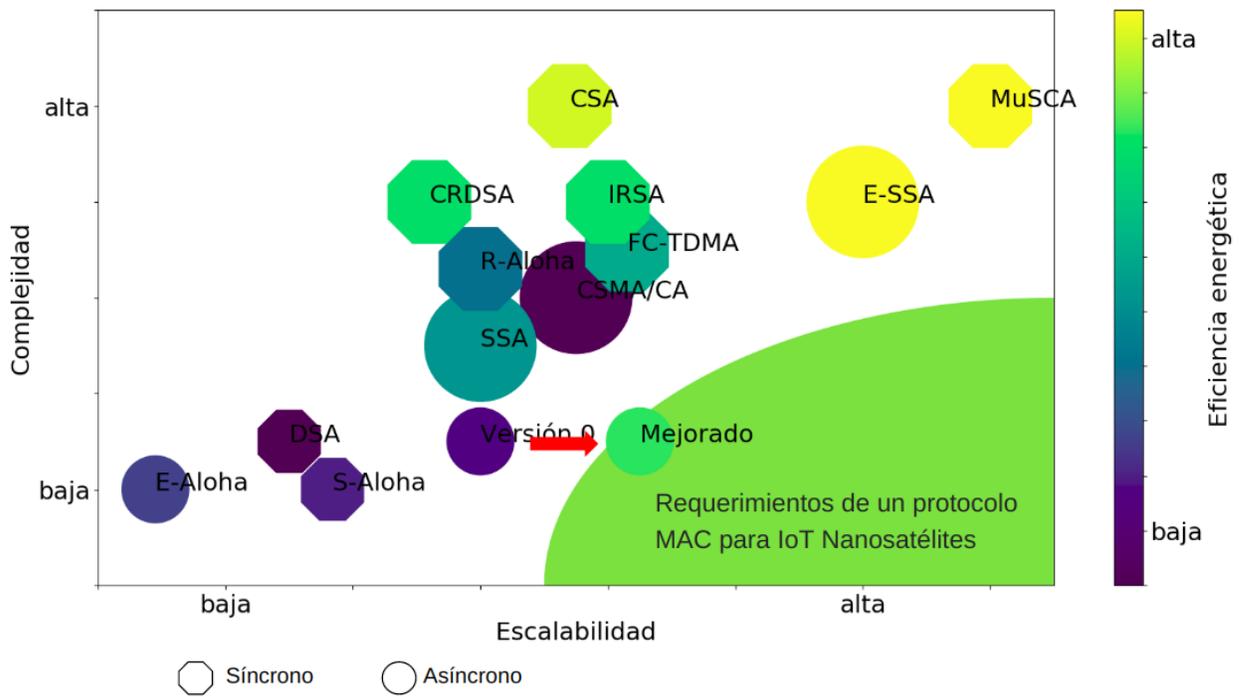


Figura 5.2: Comparación de protocolo mejorado y protocolos MAC del estado del arte en el contexto del escenario para servicio IoT provisto por tecnología nanosatelital.

# Capítulo 6

## Conclusiones

Para concluir, se consideran los objetivos específicos planteados en la Sección 1.2.2 del Capítulo 1, para llevar a cabo el objetivo general planteado en la Sección 1.2.1.

El primer objetivo presentado se aborda en el Capítulo 3.2, en el cual se evalúan los protocolos MAC desarrollados hasta la fecha que son pertinentes para el escenario de IoT satelital que se plantea, principalmente, aquellos de acceso aleatorio. En este capítulo se verifica la hipótesis planteada en la Sección 1.1 del Capítulo 1, ya que se muestra que para el escenario de interés, caracterizado por las restricciones impuestas por la tecnología nanosatelital en conjunto con los requerimientos del servicio IoT, no existen protocolos MAC adecuados que sean compatibles con el escenario en la escalabilidad, complejidad requerida para la implementación y en la eficiencia energética necesaria para un despliegue de sensores IoT. Lo anterior deja abierto el camino para el desarrollo de la solución para el objetivo número dos.

En los resultados de la revisión del estado del arte, se muestra la necesidad de un nuevo protocolo para dar cumplimiento a los requerimientos del servicio. El diseño del nuevo esquema se presenta en el Capítulo 4. En el mismo, se aborda el tercer objetivo, en el cual se evalúa el protocolo propuesto tanto de manera analítica como de manera simulada, presentando las métricas de evaluación de desempeño que permiten realizar la comparación con los protocolos considerados en el estado del arte.

Los resultados obtenidos de la primera iteración del protocolo, denominado en el documento como Protocolo versión 0, no arrojan rendimientos satisfactorios respecto al estado del arte. Sin embargo, en la Sección 4.3, donde se describe y evalúa la implementación de la mejora al protocolo, se obtienen rendimientos que superan a los protocolos del estado del arte cuando son comparados para el escenario de interés.

El protocolo mejorado mostró resultados que alcanzan un rendimiento comparable con los desarrollados para tecnologías con restricciones menores, como por ejemplo, satélites geostacionarios. Además, el protocolo propuesto demostró no decaer su desempeño de manera importante a medida que el número de nodos bajo la huella de visión aumenta, característica deseable y poco frecuente entre los protocolos de acceso aleatorio.

En conclusión, se cumple el objetivo general planteado en la Sección 1.2.1, obteniendo un protocolo que significa una contribución respecto de los desarrollos previos. Además, se plantea el incipiente y restringido escenario de comunicaciones usando como infraestructura a los *Cubesats*.

## 6.1. Perspectivas para el futuro

Como principales mejoras al protocolo se mencionan principalmente dos: optimización rigurosa y mecanismo adaptativo.

- Optimización: Para el Protocolo versión 0, la búsqueda de parámetros para operar en la zona óptima de rendimiento del protocolo se llevo a cabo de manera heurística, evaluando una gran combinación para los valores de  $T_d$  y  $\mu$ , mientras que para el protocolo mejorado, no se realizó una búsqueda exhaustiva de los valores para  $f_r$  que arrojaran mejores resultados en rendimiento.

Considerando lo anterior, para encontrar un óptimo global se debe llevar a cabo una optimización considerando los tres parámetros relevantes para el rendimiento:  $T_d$ ,  $\mu$  y  $f_r$ . Para realizar dicho proceso se deben encontrar las curvas de rendimiento de manera teórica, o bien, aplicar otros métodos de optimización, como por ejemplo, un algoritmo evolutivo.

- Mecanismo adaptativo: Tal como se puede observar en el gráfico (b) de la Figura 4.22, el tiempo medio de asignación mínimo varía entre cada factor de reducción, con lo cual, se puede definir una curva que adecúe los parámetros del esquema según la cantidad de nodos bajo la huella, tal como muestra la Figura 6.1.

El protocolo propuesto expone la necesidad de nuevos esquemas y abre el camino para mejorar el rendimiento del mismo, ya sea con una optimización precisa o con un mecanismo exploratorio más elaborado. Además, evaluaciones que consideren aspectos de capa física servirán para dimensionar las cualidades del protocolo de manera aún más realista y así vislumbrar oportunidades para desarrollar estrategias que permitan mejorar el rendimiento.

Adicionalmente, se puede agregar que los resultados obtenidos para el rendimiento del protocolo sugieren que podría ser utilizado en escenarios diferentes al satelital y obtener mejores rendimientos que aquellos actualmente desplegados.

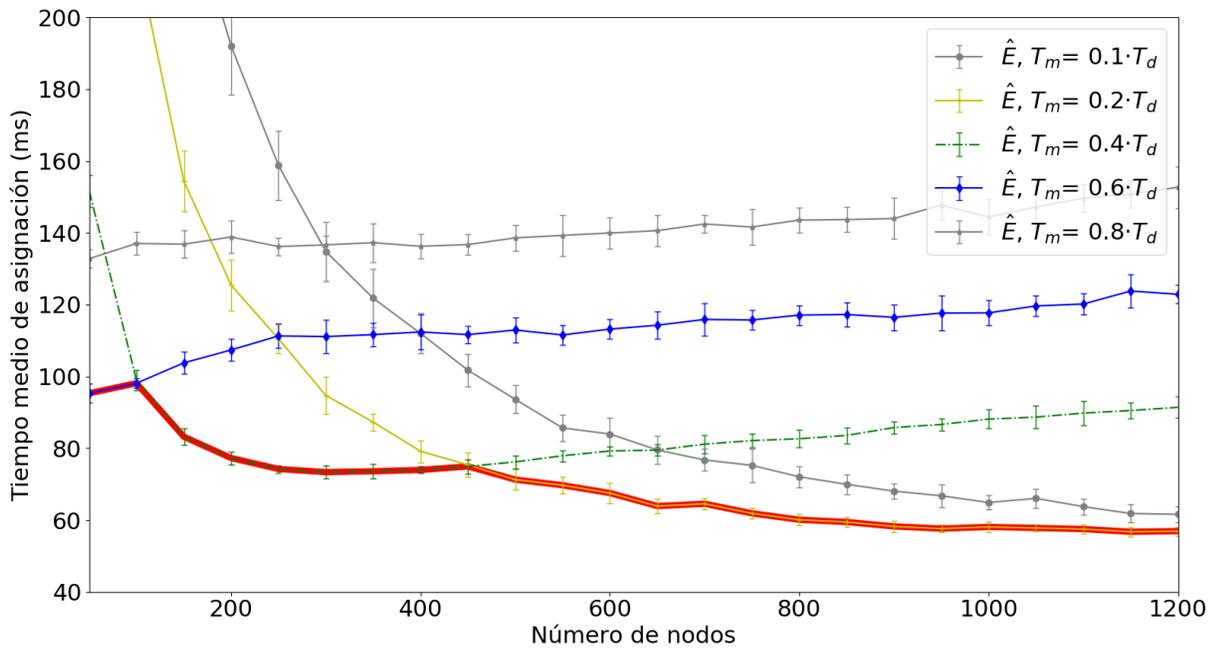


Figura 6.1: Tiempo medio de asignación para distintos factores de reducción,  $f_r$ . Destacada con rojo la curva que minimiza el tiempo medio de asignación para toda cantidad de nodos.

# Anexos

## Rendimiento sin cota de carga ofrecida

Para las simulaciones realizadas se asume que cada nodo sensor bajo la huella de visión del satélite tiene para transmitir un paquete de datos por pasada. Con esta asunción, se tiene una dependencia en la carga ofrecida con el número de nodos, la cual se expresa en la Ecuación 2.1, de la Sección 2.3.1. Si es que se omite la limitación de que cada nodo tenga para enviar a lo más un paquete de datos por pasada, los resultados de rendimiento normalizado comparando Protocolo Versión 0 con el mejorado, se muestran en la Figura 6.2.

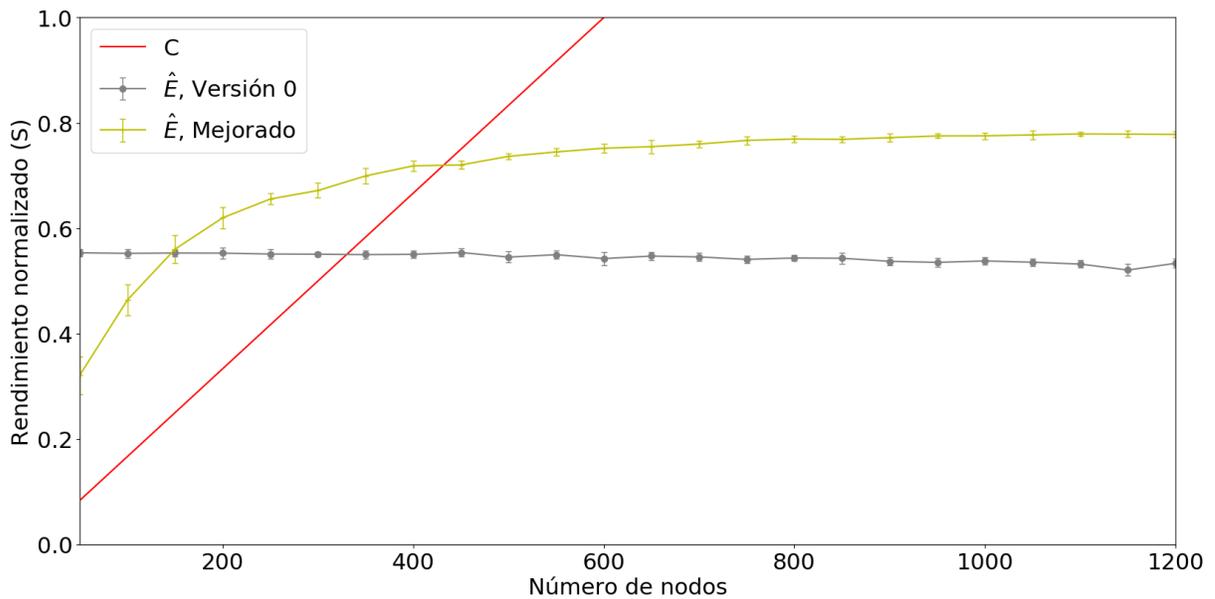


Figura 6.2: Protocolo versión 0 vs Mejorado, sin restricción de un paquete de datos por nodo sensor por pasada.

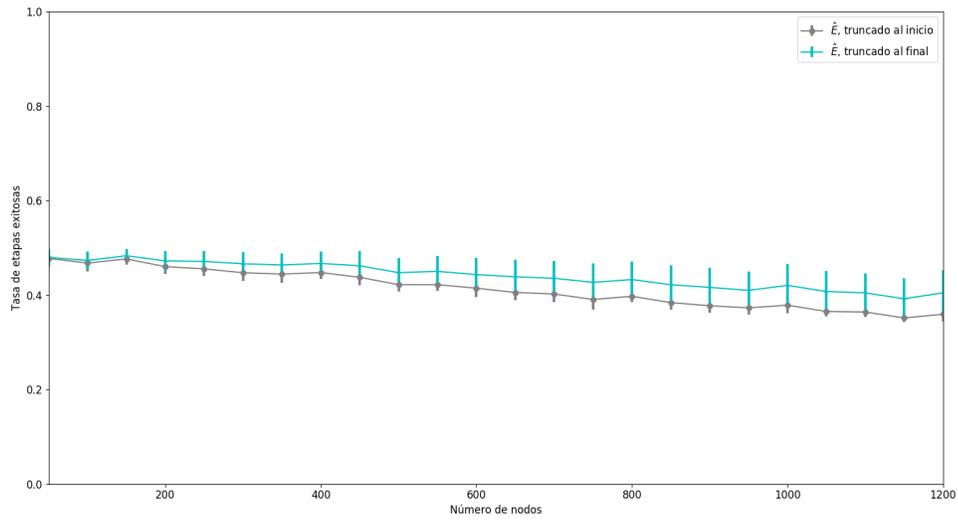
## Truncado de exponencial al final

En el Capítulo 4, se describe la función de distribución a utilizar para la elección de tiempos de espera de cada nodo, esta función se trunca de manera que los tiempos que

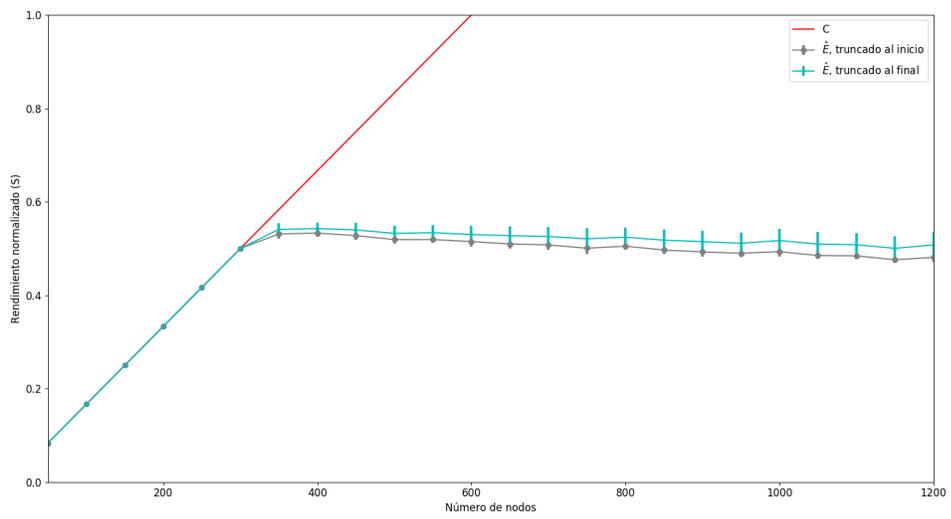
exceden el tiempo máximo se aproximen al máximo tiempo permitido,  $T_d$ . En la presente sección, se describe y compara el caso en el cual se aproximan los tiempos que exceden  $T_d$  hacia el inicio, con el fin de mostrar que la forma elegida es una mejor opción. Por lo tanto, la función exponencial considerada para el esquema presentado en esta sección, tiene una distribución definida como se presenta en la Ecuación 6.1 :

$$f(x) = \begin{cases} 0 & \text{para } x < 0 \\ \lambda e^{-\lambda T_d} + \int_{T_d}^{\infty} (\lambda e^{-\lambda y} dy) & \text{para } x = 0 \\ \lambda e^{-\lambda x} & \text{para } 0 < x \leq T_d \\ 0 & \text{para } x > T_d \end{cases} \quad (6.1)$$

Para la evaluación se consideran los parámetros determinados luego de las simulaciones realizadas en el Capítulo 4, Sección 4.2. La comparación de ambos rendimientos se presentan en la Figura 6.3, donde se puede notar que realizando el truncado de la función de distribución exponencial al final, se obtienen mejores resultados.



(a)



(b)

Figura 6.3: Comparación de rendimiento, cuando se trunca de manera distinta la distribución exponencial.

# Bibliografía

- [1] Ucs satellite database | union of concerned scientist. <https://www.ucsusa.org/nuclear-weapons/space-weapons/satellite-database>. (visitada el 12 de Julio del 2019).
- [2] Erik Kulu. Nanosatellite & cubesat database | missions, constellations, companies, technologies and more. <https://www.nanosats.eu/index.html#database>. (visitada el 12 de Julio del 2019).
- [3] Dave Evans. The internet of things: How the next evolution of the internet is changing everything. *CISCO white paper*, 1(2011):1–11, 2011.
- [4] Jonathan de Carvalho Silva, Joel JPC Rodrigues, Antonio M Alberti, Petar Solic, and Andre LL Aquino. Lorawan—a low power wan protocol for internet of things: A review and opportunities. In *Computer and Energy Science (SpliTech), 2017 2nd International Multidisciplinary Conference on*, pages 1–6, 2017.
- [5] Usman Raza, Parag Kulkarni, and Mahesh Sooriyabandara. Low power wide area networks: An overview. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 19(2):855–873, 2017.
- [6] Ryota Okumura, Keiichi Mizutani, and Hiroshi Harada. A broadcast protocol for ieee 802.15. 4e rit based wi-sun systems. In *2017 IEEE 85th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, pages 1–5, 2017.
- [7] Rapeepat Ratasuk, Benny Vejlgaard, Nitin Mangalvedhe, and Amitava Ghosh. Nb-iot system for m2m communication. In *2016 IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, pages 1–5, 2016.
- [8] Spel — space and planetary exploration laboratory. <https://spel.eng.uchile.cl/projects.html>. (visitada el 14 de Julio del 2019).
- [9] Jennifer Alvarez and Buddy Walls. Constellations, clusters, and communication technology: Expanding small satellite access to space. In *IEEE Aerospace Conference Proceedings*, 2016.
- [10] Cubesat communications system table. <https://www.klofas.com/comm-table/>. (visitada el 12 de Julio del 2019).
- [11] Iridium next | iridium satellite communications. <https://www.iridium.com/file/>

24033/. (visitada el 12 de Julio del 2019).

- [12] Bgan hdr | high data rate broadcasting | inmarsat. <https://www.inmarsat.com/service/bgan-hdr/>. (visitada el 12 de Julio del 2019).
- [13] M.A. Diaz, J.C. Zagal, C. Falcon, M. Stepanova, J.A. Valdivia, M. Martinez-Ledesma, J. Diaz-Pena, F.R. Jaramillo, N. Romanova, E. Pacheco, and et al. New opportunities offered by cubesats for space research in latin america: The suchai project case. *Advances in Space Research*, 58(10):2134–2147, 2016.
- [14] José Gregorio Portilla. La órbita del satélite libertad 1. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 36(141):491–500, 2012.
- [15] Avid Roman-Gonzalez and Natalia Indira Vargas-Cuentas. Aerospace technology in peru. In *66th International Astronautical Congress-IAC 2015*, page 6, 2015.
- [16] Ieee standard for local and metropolitan area networks—part 15.4: Low-rate wireless personal area networks (lr-wpans). *IEEE Std 802.15.4-2011 (Revision of IEEE Std 802.15.4-2006)*, pages 1–314, Sep. 2011.
- [17] Mads Lauridsen, Huan Nguyen, Benny Vejlgaard, István Z Kovács, Preben Mogensen, and Mads Sorensen. Coverage comparison of gprs, nb-iot, lora, and sigfox in a 7800 km<sup>2</sup> area. In *2017 IEEE 85th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, pages 1–5. IEEE, 2017.
- [18] Lishan Bao, Lei Wei, Chengling Jiang, Weiwei Miao, Bo Guo, Wei Li, Xiangdong Cheng, Rui Liu, and Jun Zou. Coverage analysis on nb-iot and lora in power wireless private network. *Procedia computer science*, 131:1032–1038, 2018.
- [19] Hayder AA Al-Kashoash and Andrew H Kemp. Comparison of 6lowpan and lpwan for the internet of things. *Australian Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 13(4):268–274, 2016.
- [20] Hassan Peyravi. Medium access control protocols performance in satellite communications. *IEEE Communications Magazine*, 37(3):62–71, 1999.
- [21] Gérard Maral and Michel Bousquet. *Satellite communications systems: systems, techniques and technology*. John Wiley & Sons, 2011.
- [22] Raphael Rom and Moshe Sidi. *Multiple access protocols: performance and analysis*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [23] Gagan Choudhury and Stephen Rappaport. Diversity aloha -a random access scheme for satellite communications. *IEEE Transactions on Communications*, 31(3):450–457, 1983.
- [24] Norman Abramson. Multiple access in wireless digital networks. *Proceedings of the IEEE*, 82(9):1360–1370, 1994.

- [25] Haoling Ma and Lin Cai. Performance analysis of randomized mac for satellite telemetry systems. In *2010 5th International ICST Conference on Communications and Networking in China*, pages 1–5, 2010.
- [26] Claire Goursaud and Jean-Marie Gorce. Dedicated networks for iot: Phy/mac state of the art and challenges. *EAI endorsed transactions on Internet of Things*, 2015.
- [27] Enrico Casini, Riccardo De Gaudenzi, and Oscar Del Rio Herrero. Contention resolution diversity slotted aloha (crdsa): An enhanced random access scheme for satellite access packet networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 6(4):1408–1419, 2007.
- [28] Alberto Mengali, Riccardo De Gaudenzi, and Pantelis-Daniel Arapoglou. Enhancing the physical layer of contention resolution diversity slotted aloha. *IEEE Transactions on Communications*, 65(10):4295–4308, 2017.
- [29] Gianluigi Liva. Graph-based analysis and optimization of contention resolution diversity slotted aloha. *IEEE Transactions on Communications*, 59(2):477–487, 2011.
- [30] Enrico Paolini, Gianluigi Liva, and Marco Chiani. Coded slotted aloha: A graph-based method for uncoordinated multiple access. *IEEE Transactions on Information Theory*, 61(12):6815–6832, 2015.
- [31] Huyen Chi Bui, Jérôme Lacan, and Marie Laure Boucheret. An enhanced multiple random access scheme for satellite communications. In *Wireless Telecommunications Symposium 2012*, pages 1–6, 2012.
- [32] Oscar Del Rio Herrero and Riccardo De Gaudenzi. High efficiency satellite multiple access scheme for machine-to-machine communications. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 48(4):2961–2989, 2012.
- [33] W Crowther, R Rettberg, D Walden, S Ornstein, and F Heart. A system for broadcast communication: Reservation-aloha. *International Conference on Systems Sciences*, pages 371–374, 1973.
- [34] Giuseppe Bianchi, Luigi Fratta, and Matteo Oliveri. Performance evaluation and enhancement of the csma/ca mac protocol for 802.11 wireless lans. In *Proceedings of PIMRC '96 - 7th International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Communications*, volume 2, pages 392–396, 1996.
- [35] Peng Luan, Jiang Zhu, and Kai Gao. An improved tdma access protocol in leo satellite communication system. In *2016 IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing (ICSPCC)*, pages 1–4, 2016.
- [36] Luiz Oliveira, Joel JPC Rodrigues, Sergei A Kozlov, Ricardo AL Rabêlo, and Victor Hugo C de Albuquerque. Mac layer protocols for internet of things: A survey. *Future Internet*, 11(1):16, 2019.
- [37] Gomspace | nanocom ax100. <https://gomspace.com/shop/subsystems/>

[communication-\(1\)/nanocom-ax100.aspx](#). (visitada el 12 de Julio del 2019).

- [38] Tomás Ferrer, Sandra Céspedes, and Alex Becerra. Review and evaluation of mac protocols for satellite iot systems using nanosatellites. *Sensors*, 19(8):1947, 2019.
- [39] Andras Varga. Omnet++. In *Modeling and tools for network simulation*, pages 35–59. Springer, 2010.
- [40] A Carleial and M Hellman. Bistable behavior of aloha-type systems. *IEEE transactions on Communications*, 23(4):401–410, 1975.
- [41] Deepak Sant. Throughput of unslotted aloha channels with arbitray packet interarrival time distributions. *IEEE Transactions on Communications*, 28(8):1422–1425, 1980.