



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

**OPTIMIZACIÓN DEL TIEMPO DE UTILIZACIÓN DEL CANAL PARA  
MÚLTIPLES NODOS EN UN SISTEMA AUTO-SOSTENIBLE USANDO  
VST-TDMA EN REDES DE ONDA MILIMÉTRICA**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERA CIVIL ELÉCTRICA

**FRANCISCA PAZ HERRERA ROJAS**

PROFESOR GUÍA:  
CLAUDIO IGNACIO ESTÉVEZ MONTERO

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
SANDRA LORENA CÉSPEDES UMAÑA  
MARCOS EDUARDO ORCHARD CONCHA

SANTIAGO DE CHILE  
2020

## OPTIMIZACIÓN DEL TIEMPO DE UTILIZACIÓN DEL CANAL PARA MÚLTIPLES NODOS EN UN SISTEMA AUTO-SOSTENIBLE USANDO VST-TDMA EN REDES DE ONDA MILIMÉTRICA

En el último tiempo, producto de la masificación de los dispositivos que pueden acceder a la red, se ha abierto un abanico de posibilidades en términos de procesamiento, recolección de datos, así como el control de procesos en áreas tan diversas como la salud y la industria. En particular, los dispositivos capaces de utilizar ondas milimétricas pueden ser fijos o móviles, son de pequeño tamaño, tienen bajo consumo energético siendo su principal fuente energética las baterías y tienen gran potencial para ser auto-sostenibles si se hace uso de técnicas de *Energy Harvesting*, EH, para la obtención de energía. El uso de dispositivos con EH se vuelve atractivo si se tiene en consideración la posibilidad de tener múltiples nodos desplegados en lugares de difícil acceso.

Este trabajo tiene como objetivo optimizar el tiempo de utilización del canal mediante un protocolo de acceso inalámbrico orientado a redes de ondas milimétricas en escenarios que existen múltiples nodos en un sistema auto-sostenible. Tomando como base el protocolo VST-TDMA, *Variable Slot Time-Time Division Multiple Access*, que le asigna espacios de tiempo variable a los nodos de la red, a diferencia de su contra parte , que le asigna espacios de tiempo fijos y que repercute en la utilización de los tiempos donde no existen transmisiones. Se propone una función de asignación de tiempo, *Schedule Time Function*, la cual de acuerdo a los modos de operación, adapta la manera en que las transmisiones son programadas. Además de la adaptación de los tiempos de transmisión, se implementa un ajuste del *Time sleep*, tiempo de reposo, de cada uno de los nodos dependiente del nivel energético de la batería. Este tiempo de reposo se ajusta utilizando la información de la batería que entregan los nodos. Las simulaciones están enfocadas en evaluar el desempeño que tiene el protocolo respecto a la ocupación del canal, *throughput*, tiempo de descanso de los nodos, escalabilidad y adaptación a la entrada de los nodos, evitando colisiones y pérdidas de paquetes. Los resultados obtenidos dan cuenta que las mejoras propuestas aumentan la ocupación del canal por parte de los nodos cuando uno de ellos se encuentra en modo de ahorro de energía, alcanzando un valor máximo de 99.5587% de la ocupación de canal. Por otro lado, los tiempos de reposo, presentan reducciones considerables alcanzando valores 3 veces inferior al protocolo tradicional. El *throughput* obtenido se mantiene relativamente constante para todos los escenarios de simulación. También resulta ser un protocolo escalable a un número mayor de nodos con una gran capacidad de adaptabilidad al ingreso de la red.

*I refuse to accept other people's ideas of happiness for me.  
As if there's a 'one size fits all' standard for happiness.*

**-K. West**

# Agradecimientos

Y así como Gustavo Cerati antes del gracias totales, 'No solo no hubiéramos sido nada sin ustedes, sino con toda la gente que estuvo a nuestro alrededor desde el comienzo; algunos siguen hasta hoy'.

Quiero partir agradeciendo a la profesora Sandra Céspedes y al profesor Marcos Orchard por sus observaciones y comentarios, y consejos en el desarrollo de este trabajo y por haber formado parte de mi proceso formativo. Y agradecer, especialmente, a mi profesor guía, Claudio Estévez, por su gran disposición, disponibilidad para despejar dudas y consejos.

Agradecer a mis padres, Claudia y Francisco, por todo su amor, apoyo incondicional, por darme el mejor regalo que pueden dejar los padres a sus hijos; por nunca poner límites a lo que me interesaba y dejarme ser tal como quiero ser.

A mi hermana, Graciela, por ser un apoyo y motivación constante en mi vida. Estoy muy orgullosa de ti y estoy segura que serás una gran médico. Gracias también por ser mi curadora de memes personal.

A mi primo, Felipe, por ser casi un hermano para mí desde siempre y por todo el apoyo brindado en esta etapa en Santiago, especialmente después de álgebra lineal coordinado con el puma (agarrense de las manos). A mi tía Titi, tío JP, primos Pablo y Diego; por todo su amor desde siempre y los panoramas de primos.

A Florencia, gracias por darme todo tu apoyo y amor durante todo este tiempo desde nuestra ventanita. Gracias Paul, gracias Carlitos Tévez y gracias Manchester United.

A Teresa, por esperar todos estos años a que vaya verte a Taiwan. Ahora sí que sí.

A mis amigos de la U, a los de primer año: Leo, Mario, Marcela, Ángela, Diego, Chepi, Ivan, Gustavo, Dani, Nico, Mario y Guille; gracias por esos los viernes, almuerzos, cafés de la Sonia en las bancas y salidas al karaoke a cantar Camilo Sesto. A mis amigos de eléctrica: Babe (gracias por aguantar mis rants y no gracias por no despertarme antes de que me pegue con la mesa), Don Pablo, Dupouy (iqq represent), Daniboi (La da di la di da), Joaquín, Ñaña, Matt, Camilo, Rodrigo, Jp, Rodrimen, Mati, Mauri, Ale, Diego, Gfazo. También a toda las personas maravillosas que conocí durante esta etapa universitaria. Gracias a todos por acompañarme y hacerme aguante durante este tiempo. Espero estar siempre para ustedes.

A Luis Miguel, Raffaella Carra, Camilo Sesto y Kanye West.

# Tabla de Contenido

<b>Glosario</b>	<b>1</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>3</b>
1.1. Motivación . . . . .	3
1.2. Definición del problema . . . . .	4
1.3. Hipótesis . . . . .	4
1.4. Objetivos . . . . .	5
1.4.1. Objetivo general . . . . .	5
1.4.2. Objetivos específicos . . . . .	5
1.5. Estructura de la memoria . . . . .	5
<b>2. Marco Teórico</b>	<b>6</b>
2.1. Introducción . . . . .	6
2.2. Conceptos Básicos . . . . .	6
2.2.1. Ondas milimétricas . . . . .	6
2.2.1.1. Propagación de ondas milimétricas . . . . .	6
2.3. Energy Harvesting . . . . .	8
2.4. Protocolos MAC . . . . .	9
2.4.1. TDMA . . . . .	9
2.4.2. FDMA . . . . .	10
2.4.3. CDMA . . . . .	11
2.4.4. PSMA . . . . .	11
2.4.5. VST-TDMA . . . . .	13
2.4.5.1. Topología del protocolo . . . . .	13
2.4.5.2. Funcionamiento del Protocolo . . . . .	13
2.4.5.3. Puntero de Tiempo Global . . . . .	14
2.4.5.4. Encapsulado de Paquetes . . . . .	14
2.4.5.5. Funcionamiento de la Comunicación del Protocolo VST-TDMA . . . . .	14
2.4.5.6. Termino de la Sesión en VST-TDMA . . . . .	15
2.4.5.7. Formato Paquete VST-TDMA . . . . .	16
2.5. Perfil de descarga . . . . .	16
2.5.1. <i>State of Charge</i> - (SOC) . . . . .	16
2.5.2. <i>Depth of Discharge</i> - (DOD) . . . . .	16
2.6. Estado del Arte . . . . .	17
2.6.1. IEEE 802.15.3C . . . . .	17
2.6.2. Estándar ECMA-387 . . . . .	18
2.6.3. Aplicaciones . . . . .	18

2.6.3.1.	5G . . . . .	18
2.6.3.2.	Aplicaciones <i>Wireless Sensor Networks</i> . . . . .	19
<b>3.</b>	<b>Metodología</b>	<b>20</b>
3.1.	Introducción . . . . .	20
3.2.	VST-TDMA orientado a la autosostenibilidad . . . . .	20
3.2.1.	OPNET . . . . .	21
3.3.	Componentes y módulos del código . . . . .	21
3.3.1.	Modulo Estación Base . . . . .	22
3.3.2.	Módulo Nodo . . . . .	24
3.4.	Punteros y modos de operación . . . . .	25
3.5.	Ajuste de Time Sleep y perfil de descarga . . . . .	30
<b>4.</b>	<b>Análisis y discusión a los resultados obtenidos del protocolo VST-TDMA 2.0</b>	<b>33</b>
4.1.	Introducción . . . . .	33
4.2.	Caso de estudio y configuración principal . . . . .	33
4.3.	Funcionamiento general . . . . .	34
4.3.1.	Ingreso del primer nodo a la red . . . . .	34
4.3.2.	Ingreso del segundo nodo . . . . .	35
4.3.3.	Ingreso del tercer nodo . . . . .	37
4.4.	Auto-sostenibilidad de la energía . . . . .	38
4.4.1.	Funcionamiento modo ahorro de energía . . . . .	40
4.4.2.	Escalabilidad . . . . .	41
4.4.2.1.	Uso del canal . . . . .	45
4.4.3.	Recuperación en un escenario más extenso . . . . .	46
4.4.4.	Ocupación del canal, tiempo de reposo y <i>throughput</i> . . . . .	46
4.5.	Discusión de resultados . . . . .	54
<b>5.</b>	<b>Conclusiones y trabajo futuro</b>	<b>56</b>
5.1.	Conclusiones . . . . .	56
5.2.	Trabajo Futuro . . . . .	57
	<b>Bibliografía</b>	<b>58</b>
<b>6.</b>	<b>Anexos</b>	<b>60</b>
6.1.	Caso 2 nodos VST-TDMA 2.0 . . . . .	62
6.2.	Caso 2 nodos VST-TDMA 2.0 (Zona de interés) . . . . .	63
6.3.	Caso 3 nodos VST-TDMA 2.0 . . . . .	64
6.4.	Caso 3 nodos VST-TDMA 2.0 (Zona de interés) . . . . .	65
6.5.	Caso 2 nodos VST-TDMA tradicional . . . . .	66
6.6.	Caso 3 nodos VST-TDMA tradicional . . . . .	67

# Índice de Tablas

2.1.	Atenuación para bandas no licenciadas para una distancia de 10 m . . . . .	8
2.2.	Fuentes de EH con sus respectivas densidades de potencia [11] . . . . .	9
2.3.	Formato del paquete VST-TDMA . . . . .	16
2.4.	Asignación de bandas en ECMA-387 . . . . .	18
4.1.	Atributos de configuración . . . . .	34
4.2.	Variables del sistema . . . . .	38
4.3.	Consumo de energía de nodo . . . . .	38
4.4.	Eficiencia del uso del canal para ambos escenarios de 10 nodos . . . . .	46
4.5.	Tabla de resultados de área de interés de 2 nodos con VST-TDMA 2.0 . . . . .	49
4.6.	Tabla de resultados de área de interés de 3 nodos con VST-TDMA 2.0 . . . . .	49
4.7.	Tabla de simulación de 2 nodos con VST-TDMA tradicional . . . . .	51
4.8.	Tabla de simulación de 2 nodos con VST-TDMA optimizado . . . . .	51
4.9.	Tabla de simulación de 3 nodos con VST-TDMA tradicional . . . . .	53
4.10.	Tabla de simulación de 3 nodos con VST-TDMA 2.0 . . . . .	54

# Índice de Ilustraciones

2.1.	Diagrama de dos antenas . . . . .	7
2.2.	Atenuación de la onda en distintas condiciones atmosféricas [10] . . . . .	8
2.3.	TDMA . . . . .	9
2.4.	Problema con TDMA . . . . .	10
2.5.	Distribución del canal utilizando FDMA . . . . .	10
2.6.	Distribución del canal utilizando CDMA . . . . .	11
2.7.	Comparación de la asignación de tiempo entre PSMA y TDMA [13][12] . . . . .	12
2.8.	Topología de red WPAN que utiliza VST-TDMA . . . . .	13
2.9.	Diagrama del encapsulador . . . . .	14
2.10.	Ingreso del primer nodo a la red . . . . .	15
2.11.	Conexión de segundo nodo a la red . . . . .	15
2.12.	Arquitectura de una piconet . . . . .	17
2.13.	Estructura del <i>superframe</i> . . . . .	18
2.14.	Frecuencia de operación y asignación de bandas para ECMA-387 . . . . .	18
2.15.	Escenarios de uso de 5G [23] . . . . .	19
3.1.	Diagrama de flujo de capítulo . . . . .	20
3.2.	Estados forzados y no forzados al interior del bloque de procesos . . . . .	21
3.3.	Diagrama <i>Broadcast-Hello-Sync</i> . . . . .	22
3.4.	Módulos estación base . . . . .	22
3.5.	Atributos bloque transmisión . . . . .	22
3.6.	Atributos bloque recepción . . . . .	22
3.7.	Bloque de proceso de <i>base_station</i> . . . . .	23
3.8.	Módulos nodo . . . . .	24
3.9.	Bloque de procesos <i>queue</i> . . . . .	24
3.10.	Bloque de procesos <i>encap</i> . . . . .	24
3.11.	Bloque de procesos <i>node</i> . . . . .	25
3.12.	Bloque de procesos <i>energy</i> . . . . .	25
3.13.	Formato de paquete . . . . .	25
3.14.	Esquema de paquetes con punteros <i>global_ptr</i> y <i>p_in - p_out</i> . . . . .	26
3.15.	Escenario de paquetes enviados por nodos usando puntero global sujeto al cambio a modo de ahorro energético de un nodo . . . . .	27
3.16.	Ampliación de gráfico de paquetes enviados por nodos usando puntero global. . . . .	27
3.17.	Escenario choque entre paquetes con referencia de carga . . . . .	28
3.18.	Regla $t_{reserve}/2$ para punto de colisión cercana a <i>p_in</i> . . . . .	29
3.19.	Regla $t_{reserve}/2$ para punto de colisión cercana a <i>p_out</i> . . . . .	29
3.20.	Flujo correspondiente al código <i>Smart Schedule Time Function</i> . . . . .	30
3.21.	Evolución del final del voltaje v/s ciclos DOD. Ciclos realizados a una temperatura constante de 60°[18]. . . . .	32



3.22.	Perfil de descarga variable SOC . . . . .	32
4.1.	Escenario a simular . . . . .	34
4.2.	Ingreso del primer nodo a la red . . . . .	35
4.3.	Detalle del paquete <i>hello</i> al ingreso del primer nodo a la red . . . . .	35
4.4.	Ingreso del segundo nodo a la red . . . . .	36
4.5.	Detalle del ingreso al segundo nodo a la red . . . . .	36
4.6.	Detalle de los paquetes <i>broadcast-hello</i> al ingreso del segundo nodo a la red . . . . .	36
4.7.	Ingreso del tercer nodo a la red . . . . .	37
4.8.	Ingreso del tercer nodo a la red . . . . .	37
4.9.	Detalle de ingreso del tercer nodo a la red . . . . .	38
4.10.	Tiempos de reposo necesarios para la auto-sostenibilidad para distintos valores de Energy Harvesting Rate . . . . .	39
4.11.	<i>Throughput</i> de acuerdo a tiempos de reposo con <i>Energy Harvesting Rate</i> de 0.1 mJ/s . . . . .	39
4.12.	<i>Throughput</i> de acuerdo a tiempos de reposo con <i>Energy Harvesting Rate</i> de 3 mJ/s . . . . .	40
4.13.	Escenario de 3 nodos conectados a la red con carga de batería <i>max battery charge</i> . . . . .	40
4.14.	Indicadores de SOC de batería en escenario <i>max battery charge</i> con 3 nodos conectados a la red . . . . .	41
4.15.	Detalle de Indicadores SOC de batería en escenario <i>max battery charge</i> con 3 nodos conectados a la red . . . . .	41
4.16.	Escenario de 10 nodos conectados a la red con <i>max battery charge</i> . . . . .	42
4.17.	Escenario de 10 nodos conectados a la red con <i>max battery charge</i> . . . . .	42
4.18.	Indicadores de SOC batería de 10 nodos conectados a la red con <i>max battery charge</i> . . . . .	43
4.19.	Funcionamiento de VST-TDMA 2.0 con 10 nodos en la red en modo de ahorro energético-3 nodos con SOC iniciales distintos . . . . .	43
4.20.	Detalle de funcionamiento de VST-TDMA 2.0 con 10 nodos en la red en modo de ahorro energético-3 nodos con SOC iniciales distintos . . . . .	44
4.21.	Detalle de funcionamiento de VST-TDMA 2.0 con 10 nodos en la red en modo de ahorro energético-3 nodos con SOC iniciales distintos . . . . .	44
4.22.	Indicadores de SOC batería de 10 nodos conectados a la red-3 nodos con SOC iniciales distintos . . . . .	45
4.23.	Detalle de indicadores de SOC batería de 10 nodos conectados a la red-3 nodos con SOC iniciales distintos . . . . .	45
4.24.	Detalle de SOC de batería <i>mAh</i> para escenario de 2 nodos en red en modo de ahorro energético-1 nodo con niveles cercanos a umbral . . . . .	46
4.25.	Área de interés-VST-TDMA 2.0 con Energy Harvesting Rate de 1 mJ/s . . . . .	47
4.26.	VST-TDMA 2.0 con Energy Harvesting Rate de 1 mJ/s . . . . .	48
4.27.	Detalle de la zona de interés-VST-TDMA 2.0 con Energy Harvesting Rate de 1 mJ/s . . . . .	48
4.28.	<i>Throughput</i> respecto a Energy Harvesting Rate para 2 nodos usando VST-TDMA 2.0 . . . . .	49
4.29.	<i>Throughput</i> respecto a Energy Harvesting Rate para 3 nodos usando VST-TDMA 2.0 . . . . .	49
4.30.	Uso del canal para escenario de 2 nodos . . . . .	50
4.31.	VST-TDMA 2.0 con <i>Energy Harvesting Rate</i> de 1.5 mJ/s . . . . .	51
4.32.	VST-TDMA tradicional con <i>Energy Harvesting Rate</i> de 1.5 mJ/s . . . . .	51

4.33.	<i>Throughput</i> respecto a Energy Harvesting Rate para 2 nodos usando VST-TDMA 2.0 . . . . .	52
4.34.	<i>Throughput</i> respecto a Energy Harvesting Rate para 2 nodos usando VST-TDMA tradicional . . . . .	52
4.35.	Eficiencia del uso del canal para escenario de 3 nodos . . . . .	53
4.36.	VST-TDMA 2.0 con Energy Harvesting Rate de 1.5 mJ/s . . . . .	53
4.37.	VST-TDMA tradicional con Energy Harvesting Rate de 1.5 mJ/s . . . . .	53
4.38.	<i>Throughput</i> respecto a EHR para 3 nodos usando VST-TDMA 2.0 . . . . .	54
4.39.	<i>Throughput</i> respecto a EHR para 3 nodos usando VST-TDMA tradicional . .	54
6.1.	Simulación VST-TDMA 2.0 de 2 nodos con Energy Harvesting Rate de 0.1 mJ/s	62
6.2.	Simulación VST-TDMA 2.0 de 2 nodos con Energy Harvesting Rate de 1 mJ/s	62
6.3.	Simulación VST-TDMA 2.0 de 2 nodos con Energy Harvesting Rate de 2 mJ/s	62
6.4.	Simulación VST-TDMA 2.0 de 2 nodos con Energy Harvesting Rate de 0.1 mJ/s	63
6.5.	Simulación VST-TDMA 2.0 de 2 nodos con Energy Harvesting Rate de 1 mJ/s	63
6.6.	Simulación VST-TDMA 2.0 de 2 nodos con Energy Harvesting Rate de 2.5 mJ/s	63
6.7.	Simulación VST-TDMA 2.0 de 2 nodos con Energy Harvesting Rate de 3 mJ/s	64
6.8.	Simulación VST-TDMA 2.0 de 3 nodos con Energy Harvesting Rate de 0.1 mJ/s	64
6.9.	Simulación VST-TDMA 2.0 de 3 nodos con Energy Harvesting Rate de 1 mJ/s	64
6.10.	Simulación VST-TDMA 2.0 de 3 nodos con Energy Harvesting Rate de 0.1 mJ/s	65
6.11.	Simulación VST-TDMA2.0 de 3 nodos con Energy Harvesting Rate de 1 mJ/s	65
6.12.	Simulación VST-TDMA 2.0 de 3 nodos con Energy Harvesting Rate de 1.5 mJ/s	65
6.13.	Simulación VST-TDMA 2.0 de 3 nodos con Energy Harvesting Rate de 3 mJ/s	66
6.14.	Simulación VST-TDMA tradicional de 2 nodos con Energy Harvesting Rate de 0.1 mJ/s . . . . .	66
6.15.	Simulación VST-TDMA tradicional de 2 nodos con Energy Harvesting Rate de 0.5 mJ/s . . . . .	66
6.16.	Simulación VST-TDMA tradicional de 2 nodos con Energy Harvesting Rate de 1 mJ/s . . . . .	67
6.17.	Simulación VST-TDMA tradicional de 2 nodos con Energy Harvesting Rate de 2 mJ/s . . . . .	67
6.18.	Simulación VST-TDMA tradicional de 3 nodos con Energy Harvesting Rate de 0.1 mJ/s . . . . .	67
6.19.	Simulación VST-TDMA tradicional de 3 nodos con Energy Harvesting Rate de 1 mJ/s . . . . .	68
6.20.	Simulación VST-TDMA tradicional de 3 nodos con Energy Harvesting Rate de 2 mJ/s . . . . .	68

# Glosario

- Broadcast** Broadcast emitido por la BS con la finalidad de conocer la existencia de nodos con intención de enviar paquetes.. 56
- BS** Base Station (Estación Base). 1, 14, 15, 21–23, 28, 34, 35
- CDMA** Code Division Multiple Access. vii, 11
- DOD** Depth of Charge. 16, 17, 31, 32
- ECMA** European Computer Manufacturers Association. vii, 18
- EH** Energy Harvesting. i, vi, 3, 4, 9
- EHD** Energy Harvesting Device. 3, 4, 12, 31, 38, 39, 55
- eMBB** Enhanced Mobile Broadband. 19
- Energy Harvesting Rate** Tasa de recolección de energía. viii, ix, 38–40, 46–55, 62–68
- FDMA** Frequency Division Multiple Access. vii, 10
- IEEE** Institute of Electrical and Electronics Engineers. 7
- IoT** Internet of Things. 3, 18, 19
- ITU** International Telecommunication Union. 19
- MAC** Medium Access Protocol. 3, 4, 9, 17, 26
- OPNET** OPTimized Network Engineering Tool. 5, 21, 30, 33, 56
- PSMA** Process-Stacking Multiplexing Access. vii, 11, 12, 21
- SOC** State of Charge. viii, 16, 31, 32, 41–46, 55–57
- Sync** Sync emitido por la BS con el propósito de sincronizar el envío de paquetes por parte del nodo.. 35
- TDMA** Time Division Multiple Access. vii, 4, 9–13
- uRLLC** Ultra Reliable Low Latency Communication. 19

**VST-TDMA** Variable Slot Time-Time Division Multiple Access. i, v, vi, viii, ix, 3–5, 13, 14, 20, 21, 33, 35, 41–45, 47–56, 62–68

**WPAN** Wireless Personal Area Networks. 11, 13, 17

**WSN** Wireless Sensor Network. 19

# Capítulo 1

## Introducción

VST-TDMA es un protocolo diseñado para operar en celdas de 60 GHz por nodos inalámbricos alimentados por fuentes de energía independientes, baterías y EHD. Diseñado por la Dra. Vanessa Quintero para su trabajo de tesis en la Universidad de Chile [1], donde los nodos ajustan las tasas de transmisión de manera proporcional a la energía disponible en su batería. La desventaja presentada por este protocolo se encontraba, principalmente, en la manera en la que los nodos eran agendados. Los nodos que tienen baja energía, por tanto largos períodos de transmisión, eran agendados de manera consecutiva a los que contaban con un nivel de energía mayor, forzándolos a tener largos períodos de transmisión; en lugar de permitir que estos sean programados de manera asíncrona. La propuesta de solución a esta problemática es la que se aborda en este trabajo de título.

### 1.1. Motivación

A partir del incremento exponencial de los terminales móviles, la aparición de los dispositivos IoT y diversos sensores inalámbricos, la cantidad de aparatos que pueden acceder a la red ha aumentado y por lo tanto el tráfico de datos en las redes de telecomunicaciones. Más aún, la aparición de la tecnología 5G supone un aumento mayor en el espectro de tipos de dispositivos que pueden acceder a las redes móviles y las funciones realizables, esto se debe a las altas tasas de transferencia de datos que permiten los rangos de frecuencias [2]. Estos últimos, en particular, los correspondientes a las redes 5G, se pueden separar en bandas de frecuencia de 600 MHz-6 GHz y la banda de ondas milimétricas que se encuentran entre los 30-300 GHz [3]. El gran volumen de datos y las altas tasas de transmisión requieren de protocolos MAC eficientes al momento de asignar el ancho de banda, con tal de utilizarlo en su totalidad.

En particular, los dispositivos que utilizan ondas milimétricas pueden ser fijos o móviles, son de pequeño tamaño, tienen bajo consumo energético siendo su principal fuente energética las baterías y tienen potencial para ser auto-sostenibles si se hace uso de técnicas de *Energy Harvesting* para la obtención de energía [4]. El uso de dispositivos con EH se vuelve atractivo si se tiene en consideración la posibilidad de tener múltiples nodos desplegados en lugares difícil acceso.

A lo que respecta VST-TDMA, este protocolo tiene el problema que radica principalmente en que los nodos que se encuentran en estado de ahorro energético fuerzan a los nodos que

no necesitan ahorro de energía a entrar en este modo. Los nodos que no requieren modo de ahorro energético operan a mayores velocidades que sus contrapartes, y son obligados a bajar sus tasas de transmisión. Por una parte, se requiere diseñar un protocolo que permita a los nodos con suficiente energía de operar a altas velocidades en paralelo a los nodos con baja energía que requieren operar a velocidades más bajas para conservar la energía como tal.

La motivación es diseñar un protocolo de acceso que permita agendar en forma asíncrona los nodos, de forma que los nodos con más energía en la batería puedan ser agendados más frecuentemente que aquellos que están en estado de ahorro energético, también llamado estado auto-sostenible, donde la frecuencia de transmisión intenta balancear la energía consumida con la energía almacenada por el dispositivo de EH.

## 1.2. Definición del problema

El protocolo de capa de control de acceso (protocolo MAC, del inglés: *Media Access Control*), en telecomunicaciones, actúa como un organizador entre varios dispositivos móviles para realizar una división de un canal o medio de transmisión común, como por ejemplo: fibra óptica, o bien para comunicaciones inalámbricas donde se hace uso de una banda de frecuencias determinada [5].

Una de las técnicas utilizadas para realizar el reparto de un canal en comunicaciones inalámbricas es TDMA, *Time Division Multiple Access*, que consiste en asignar una frecuencia determinada, dentro de un ancho de frecuencias, durante un intervalo de tiempo fijo (*time slot*) donde se debe realizar la transmisión [5].

El problema surge en el caso en que se tienen 2 o más usuarios donde cada uno tiene un *time slot* determinado en una cierta frecuencia y uno de los interlocutores hace un cese de transmisión, quedando un *time slot* sin utilizar. A nivel de usuario final estos episodios pueden pasar inadvertidos pero si se desea hacer un uso eficiente del canal de comunicación, estos problemas deben ser resueltos.

Dentro de las propuestas para reducir estos tiempos muertos se encuentra VST-TDMA, *Variable Slot Time-TDMA*, su funcionamiento es similar al de TDMA con la novedad de uso de un organizador de tiempo. El organizador de tiempo revisa las solicitudes que envían los dispositivos, registrando el orden y el tiempo, para utilizar el canal de transmisión y en relación al volumen de datos que desea enviar se le designa un *time slot* variable. Una de las ventajas de VST-TDMA es la capacidad de incorporar fácilmente algún proceso que requiere reservar acceso al canal. En el caso de nodos con dispositivos de *Energy Harvesting*, EHD, es posible planificar un proceso para que sea posible la recarga del dispositivo.

## 1.3. Hipótesis

Las mejoras implementadas al protocolo VST-TDMA, la cual implementa multiplexación de tiempo, optimizan el uso del canal en redes de onda milimétrica que utilizan auto-sostenibilidad, ya que mejoran la incorporación de los nodos a la red y optimizan el tiempo de reposo del nodo. Para optimizar el uso del canal se entiende que los nodos que no re-

quieren estar en estado auto-sostenible, ya que cuentan con energía suficiente en base al criterio implementado, pueden ser agendados de manera más frecuente; rompiendo la sincronía relativa a los nodos que sí requieren estar en estado auto-sostenible. De esta manera, es necesario agendar con menor frecuencia, por consiguiente se aumenta la utilización del canal, resultando ser más eficiente.

## 1.4. Objetivos

### 1.4.1. Objetivo general

Optimizar el tiempo de utilización del canal mediante un protocolo de acceso inalámbrico orientado a redes de ondas milimétricas en escenarios que existen múltiples nodos en un sistema auto-sostenible.

### 1.4.2. Objetivos específicos

- Implementar un sistema de programación de los tiempos de envío de paquetes que considere el uso de la información proveniente de la batería del nodo, y que se adapte a la existencia de otros nodo en estado auto-sostenible con el fin de mejorar el desempeño de VST-TDMA.
- Comparar las mejoras propuestas al protocolo VST-TDMA con el VST-TDMA tradicional mediante simulaciones en múltiples escenarios utilizando OPNET.
- Demostrar que con las mejoras implementadas se aumenta la eficiencia del uso del canal por parte de los nodos respecto al protocolo VST-TDMA tradicional.

## 1.5. Estructura de la memoria

La estructura de este trabajo de memoria está conformada por 5 capítulos, siendo la introducción el primero. A continuación se detallan los capítulos siguientes:

- **Capítulo 2** - Marco Teórico: Se revisan los conceptos que son utilizados en la propuesta.
- **Capítulo 3** - Metodología: Se contextualizan las componentes y las propuestas del protocolo.
- **Capítulo 4** - Resultados: Se presentan los resultados obtenidos mediante simulaciones y se realiza una discusión de los resultados.
- **Capítulo 5** - Conclusiones: Se verifican los resultados obtenidos con la hipótesis planteada.
- **Bibliografía**
- **Apéndices**

# Capítulo 2

## Marco Teórico

### 2.1. Introducción

En esta sección se hará una revisión de los conceptos de telecomunicaciones más utilizados en la realización de esta memoria a modo de contextualizar el problema planteado.

### 2.2. Conceptos Básicos

#### 2.2.1. Ondas milimétricas

El espectro electromagnético es dividido en bandas con un rango de frecuencias característico. En particular, la banda de ondas milimétricas, también denominado *millimeter-wave*, se encuentran entre la frecuencia de 30 GHz a 300 GHz y poseen una longitud de onda entre los rangos de 10 mm y 1 mm [3].

En esta banda de frecuencias solo es posible la propagación directa y aun así es susceptible, en mayor medida, al fenómeno de absorción atmosférica debido al oxígeno, vapor y la lluvia [6]. El tamaño reducido de las longitudes de onda y el efecto que tiene la atmósfera sobre la propagación de estas ondas obliga que la región de operación sea de menor tamaño en comparación a la región de operación de redes que usan frecuencias de mayor longitud de onda.

A pesar de las restricciones que puedan tener estas redes, resultan bastante atractivas debido a sus altas tasas de transmisión que están en el orden de los Gigabits por segundo (Gbps). Se ha probado que los sistemas de ondas milimétricas son capaces de transmitir a una tasa de 2.5 Gbps [7].

##### 2.2.1.1. Propagación de ondas milimétricas

La atenuación de las señales puede ser calculada a partir de la ecuación de pérdidas de espacio libre, derivada de la ecuación de *transmisión de Friis*, presentada en la Ecuación 2.1. La distancia entre las antenas de transmisión y recepción es determinante en el cálculo de la atenuación [3].

La ecuación de la pérdida en el espacio libre en dB se muestra a continuación:

$$P_r = G_t G_r \left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 P_t \quad (2.1)$$



- $\lambda$ : Longitud de onda
- $d$ : Distancia entre antenas de transmisión y recepción.
- $G_t, G_r$ : Ganancias de la antena de transmisión y recepción, respectivamente.
- $P_t, P_r$ : Potencias de la antena de transmisión y recepción, respectivamente.

En el caso de antenas isotrópicas ( $G_r = G_t = 1$ ) se tiene que el factor de pérdida de espacio libre:

$$FSPL = \frac{P_t}{P_r} = \left( \frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 \quad (2.2)$$

En la Ecuación 2.2, a medida de que se aumenta la frecuencia de operación del sistema, la pérdida de espacio libre incrementa. Por esta razón las ondas milimétricas tienen un mejor funcionamiento a distancias cortas.

Con respecto a cómo se realiza la transmisión de manera inalámbrica. La antena, de acuerdo a la definición de la IEEE, “es la parte de un sistema receptor o transmisor que está diseñada para radiar o recibir ondas electromagnéticas” [8]. En la Figura 2.1 se muestra un diagrama básico de un par de antenas.

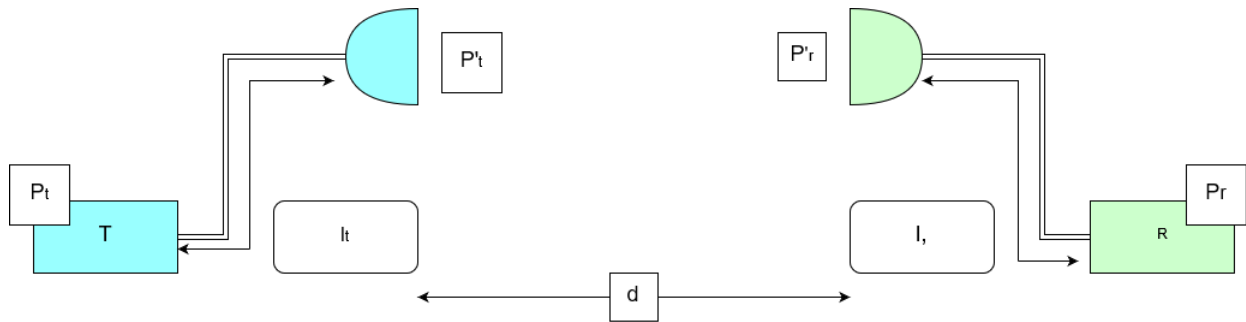


Figura 2.1: Diagrama de dos antenas

De la Figura 2.1 se pueden desprender los elementos correspondientes a la antena transmisora y la receptora.

- $P_t$ : Potencia del transmisor
- $l_t$ : Largo desde el transmisor a la antena
- $\alpha_t$ : Constante de atenuación de la línea del transmisor
- $P_t'$ : Potencia irradiada de la antena
- $P_r$ : Potencia recibida por el receptor
- $P_r'$ : Potencia recibida por la antena del receptor
- $l_r$ : Largo desde el receptor a la antena
- $\alpha_r$ : Constante de atenuación de la línea por el receptor

- d: Distancia antena transmisora y antena receptora

Tabla 2.1: Atenuación para bandas no licenciadas para una distancia de 10 m

Bandas no licenciadas [GHz]	Pérdidas de espacio libre [dB]
2.4	60.045
5	66.421
60	88.05

Es importante mencionar que las ondas milimétricas también sufren pérdidas por factores atmosféricos, como muestra la Figura 2.2. Donde en valores cercanos a los 60 GHz se tiene una mayor atenuación tanto para el caso a nivel del mar como para el caso en altura. Las pérdidas de transmisión suceden cuando las ondas milimétricas son absorbidas por moléculas de oxígeno, vapor de agua y otros gases atmosféricos mientras viajan por la atmósfera. Existen ciertas frecuencias en que las pérdidas son mayores debido a que coinciden con las frecuencias de resonancia de las moléculas de gases [9].

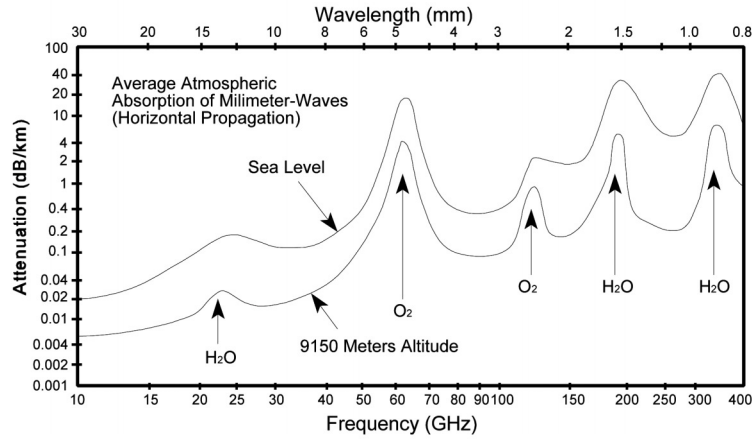


Figura 2.2: Atenuación de la onda en distintas condiciones atmosféricas [10]

### 2.3. Energy Harvesting

También conocido como cosechamiento energético, se define como un proceso de obtención de energía vía fuentes externas tales como térmica, mecánica y solar. Ha tomado relevancia en el último tiempo debido a las mejoras en términos de eficiencia de obtención de energía y la diversidad de dispositivos que pueden proporcionar energía de manera continua [11].



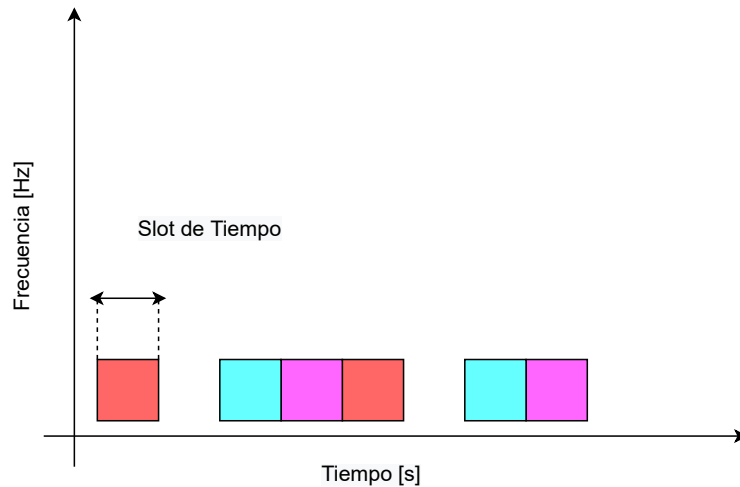


Figura 2.4: Problema con TDMA

En la Figura 2.4 se muestra uno de los inconvenientes que puede presentar este método de multiplexación en caso de existir múltiples usuarios y uno de estos usuarios deja de transmitir. Al dejar de transmitir el usuario verde, el espacio queda bloqueado y sin posibilidad de ser asignado nuevamente a otro usuario por lo que en término de uso de canal es ineficiente, aunque ésta es compensada por su simplicidad.

### 2.4.2. FDMA

El Acceso Múltiple por División de Frecuencia, o por sus siglas en inglés FDMA, divide el ancho de banda del canal en *slots* de frecuencia. A diferencia de TDMA, los *slots* de frecuencia son asignados sin un límite de tiempo.

Una de las ventajas que tiene este protocolo es que no es necesario coordinar los distintos usuarios, ya que cada uno utiliza una banda de frecuencia ya asignada. Por otro lado, también supone una inflexibilidad debido a que la asignación de las bandas de frecuencia no dependen de la demanda en el momento, mas bien éstas se encuentran asignadas previamente. Si una banda de frecuencia no se encuentra en uso, no puede ser asignada a otros usuarios o compartir su capacidad a otras bandas [5].

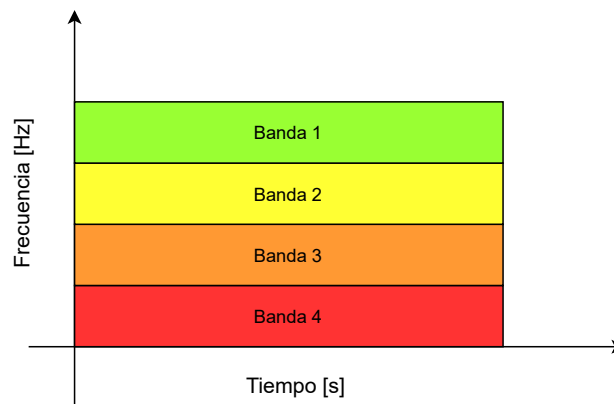


Figura 2.5: Distribución del canal utilizando FDMA

### 2.4.3. CDMA

El Acceso Múltiple por División de Código, o por sus siglas en inglés CDMA, habilita a los usuarios de una red compartir el canal de transmisión de una manera continua usando todo el espectro de frecuencia disponible. En este caso, cada una de las señales de los usuarios/equipos tiene consigo un código de secuencia pseudo aleatorio que es compartida por el receptor para transmitir mensaje de manera simultánea en un canal. Una de las grandes ventajas de CDMA es la posibilidad de acomodar una gran cantidad de usuarios si cada uno de estos transmite durante un corto periodo de tiempo [5].

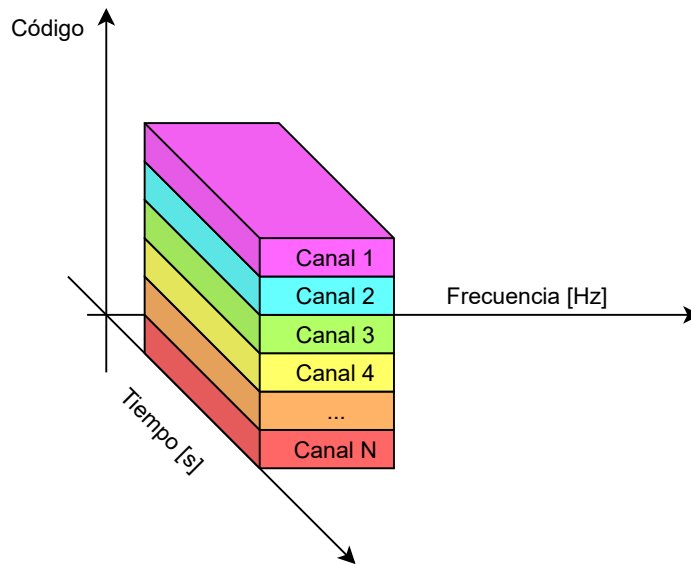


Figura 2.6: Distribución del canal utilizando CDMA

### 2.4.4. PSMA

El protocolo PSMA es un protocolo de capa de acceso basado en TDMA pero orientado exclusivamente a las WPAN [12]. Una de las diferencia más evidentes entre TDMA y PSMA es que la asignación del tiempo depende de la prioridad del proceso a ejecutar y del tamaño de dicho proceso, a diferencia de TDMA que asigna un tiempo constante. Así de esta manera es posible agendar transmisión de información de forma más frecuente, ya que la estación base asigna el tiempo requerido por cada nodo para enviar sus paquetes y aumenta la disponibilidad del canal para otros nodos dentro de la red. Recordando que TDMA, le asigna una porción de tiempo fija a cada nodo para transmitir sus paquetes.

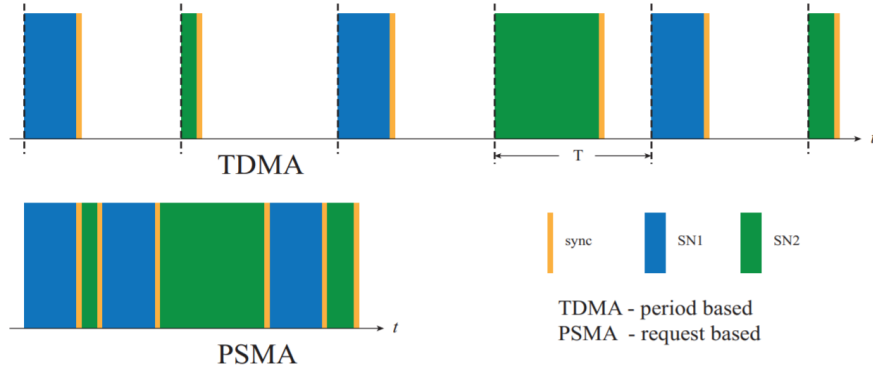


Figura 2.7: Comparación de la asignación de tiempo entre PSMA y TDMA [13][12]

El protocolo PSMA está diseñado para ser compatible con nodos que cuenten con sistemas de cosechamiento de energía, EHD. Para que un dispositivo se considere auto-sostenible debe cumplir con la siguiente condición:

$$E_{harvested} \geq E_{consumed} \quad (2.3)$$

$$(2.4)$$

Donde la energía cosechada por el dispositivo debe ser mayor o igual a la energía consumida. En particular el protocolo PSMA se adapta de acuerdo al nivel energético del dispositivo. Los tiempos de descanso,  $T^{sleep}$  (Ecuación 2.5), de los nodos operando en PSMA se determinan teniendo en consideración la potencia consumida por los estados durante la recepción, la transmisión, *idle*, *sleep* representados por  $P^{rx}$ ,  $P^{tx}$ ,  $P^{idle}$  y  $P^{sleep}$ , respectivamente.

$$T^{sleep} = \frac{(P^{tx} - P^h)T^{tx} + (P^{rx} - P^h)T^{rx} + (P^{idle} - P^h)T^{idle}}{P^h - P^{sleep}} \quad (2.5)$$

El consumo de energía es determinado por la Ecuación 2.6 donde  $E_{batería}$  corresponde a la energía disponible en la batería en el instante  $k$ ,  $E_{available}$  es la energía disponible en el instante  $k-1$ . También se consideran el consumo de energía para los estados de transmisión, recepción y *sleep* representados por  $E_{tx}$ ,  $E_{rx}$  y  $E_{sleep\ time}$ , respectivamente. La energía cosechada por el dispositivo EHD se representa por  $E_{harv}$ .

$$E_{batería} = E_{available} + T(E_{harv} - E_{tx} - E_{rx}) \quad (2.6)$$

$$E_{batería} = E_{available} + T(E_{harv} - E_{sleep\ time}) \quad (2.7)$$

El funcionamiento del protocolo PSMA contempla el uso de un punto de acceso, denominado *relay master*, que actúa como organizador de las transmisiones de los nodos. El *relay master* lleva registros de los tiempos de iniciación de cada proceso de transmisión de los nodos, respectivos. Los procesos son agendados por el *relay master* utilizando un puntero global que avanza en el tiempo de acuerdo a los procesos agendados. Cuando un nodo ingresa a la red, envía un *broadcast* que contiene la dirección MAC y el tamaño del primer

proceso a transmitir por el nodo. Una vez que este *broadcast* es recibido por el *relay master*, éste responde con un *sync* que junto a la dirección MAC del *relay master* envía el tiempo en que se debe iniciar el primer proceso enviado por el nodo. Una vez que este paquete *sync* es recibido por el nodo, la conexión queda establecida en la WPAN y la transmisión de paquetes puede llevarse a cabo.

## 2.4.5. VST-TDMA

El protocolo VST-TDMA tiene un funcionamiento similar al del protocolo TDMA donde se distribuye el tiempo de uso del medio de transmisión [14]. La diferencia radica en que TDMA divide el tiempo en *slots* de tiempo constante. VST-TDMA por su parte requiere saber el proceso que se desea ejecutar y el tamaño de dicho proceso [15] [14].

A continuación se detallan la disposición y los elementos del funcionamiento del protocolo.

### 2.4.5.1. Topología del protocolo

La topología utilizada por el protocolo VST-TDMA considera 2 tipos de dispositivos. Por un lado los puntos de acceso a la red, denominados estación base (*Base station*, BS) y los nodos que representan a los terminales de usuario.

Cabe señalar que las estaciones base envían las transmisiones recibidas desde los nodos hacia una red mayor, la cual se accede mediante una fibra óptica.

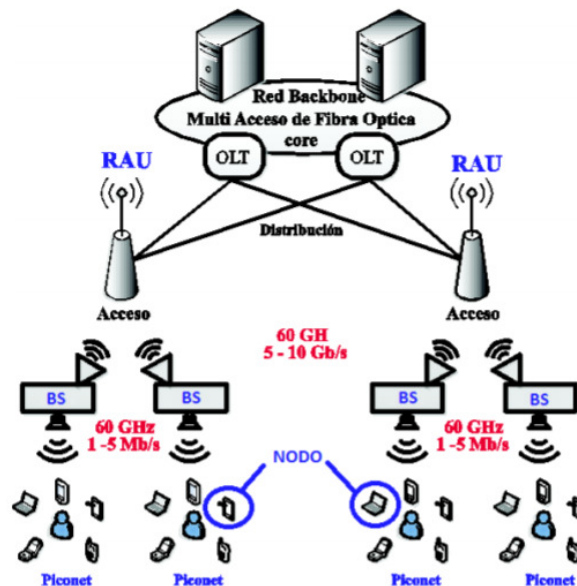


Figura 2.8: Topología de red WPAN que utiliza VST-TDMA

### 2.4.5.2. Funcionamiento del Protocolo

Como se mencionó anteriormente, el funcionamiento del protocolo VST-TDMA distribuye el tiempo de acceso al medio de acuerdo a dos criterios: el proceso a ejecutar y el tamaño de este proceso. Estos requerimientos son de acuerdo a la necesidad que tiene el nodo. A continuación se definen los elementos de funcionamiento del protocolo:

### 2.4.5.3. Puntero de Tiempo Global

A medida que van ingresando las transmisiones a la estación base desde los nodos, esta es encargada de almacenar los tiempos de inicio de transmisión de los procesos. La estación base va registrando los tiempos de ingreso y, posteriormente, son enviados nuevamente al nodo que generó el proceso. Se utiliza un puntero de tiempo global que se desplaza en el tiempo cada vez que un nuevo proceso es registrado. Este puntero de tiempo global se mueve de acuerdo a la de cantidad de tiempo requerido para la ejecución del proceso.

Cuando el puntero global coincide con el tiempo actual del sistema, significa que no hay procesos pendientes en la agenda. En esta etapa el puntero de tiempo entra en una etapa de escucha, a la espera de nuevos procesos.

### 2.4.5.4. Encapsulado de Paquetes

Cuando entran nuevos procesos desde lo nodos hacia la estación base y esta registra su llegada, lo que hace es crear una *queue* o cola de procesos. El propósito de la *queue* es unir los paquetes llegados desde instantes anteriores con los recién llegados y entregarlos a un procesador principal. Cuando estos son requeridos, la *queue* envía lo que tiene almacenado en su *buffer*.

La tarea del encapsulador es reunir estos paquetes y formar un *frame*. En el funcionamiento del protocolo VST-TDMA, el encapsulador toma todos los paquetes que forman la *queue* y los encapsula en *jumbo frame*. Luego de realizar esta tarea, el tamaño del *frame* es convertido a un *slot* de tiempo.

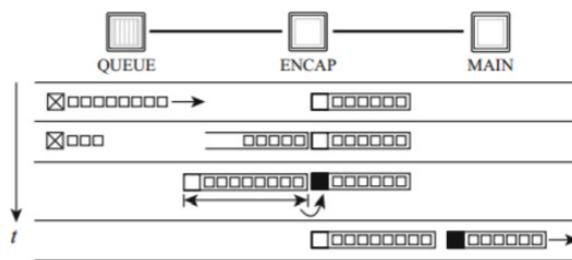


Figura 2.9: Diagrama del encapsulador

### 2.4.5.5. Funcionamiento de la Comunicación del Protocolo VST-TDMA

A diferencia de otros protocolos, VST-TDMA no tiene muchas diferencias en cuanto a lo que se refiere el número de nodos conectados.

La BS no se encontrará en constante estado de escucha, si no que cada cierto intervalo de tiempo emitirá un *broadcast* para saber si existe en el área cercana algún dispositivo que requiere enviar información, o bien, conocer si existe algún dispositivo que debe recibir algún paquete destinado para él en la *queue* de la BS.

Cuando existe un nodo con información que transmitir y recibe el *broadcast* de la BS, el nodo responde con un *hello*, donde enviará su *MAC* y el tamaño del mensaje a enviar. La BS recibe el *hello* con la información del nodo y envía de vuelta un paquete de sincronización



(*sync*). De manera inmediata, una vez que se ha recibido el *sync* por parte de la BS, se da inicio a la transmisión de datos.

En la Figura 2.10 se muestra un diagrama de como es el ingreso del primer nodo a la red.

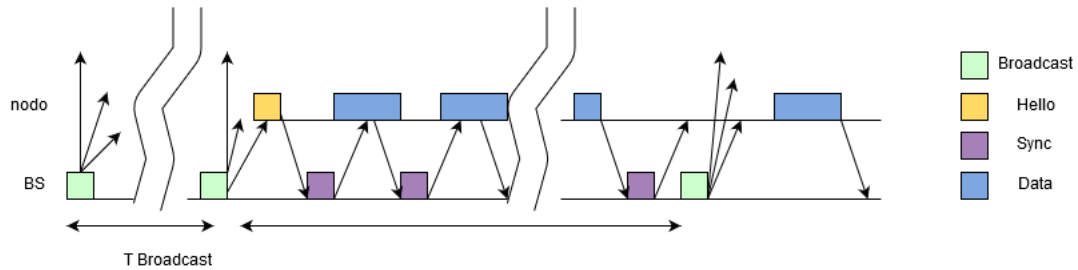


Figura 2.10: Ingreso del primer nodo a la red

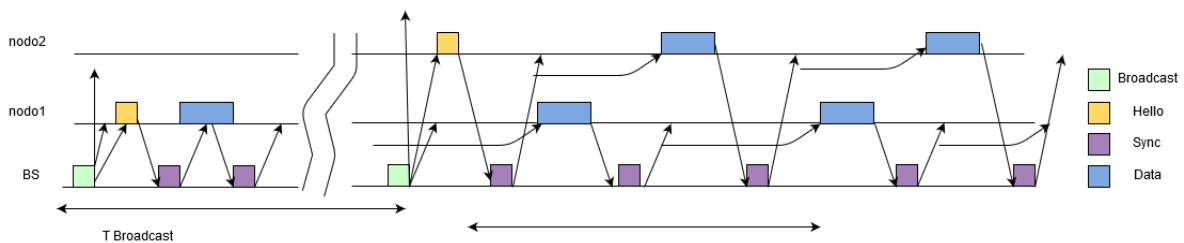


Figura 2.11: Conexión de segundo nodo a la red

En la Figura 2.11 se muestra el caso donde se conecta un segundo nodo a la red. En los instantes previos a la segunda conexión, la BS se encontraba realizando envíos de *broadcast* para verificar la existencia de otro nodo con necesidades de enviar o recibir información. La periodicidad de los *broadcast* puede ser definido previamente en la BS.

#### 2.4.5.6. Termino de la Sesión en VST-TDMA

El término de la sesión en el protocolo VST-TDMA ocurre cuando se cumplen los siguiente criterios:

- La BS no tiene más datos en *queue* para enviar al nodo
- El nodo finaliza el envío de datos a la BS

El cierre de sesión para el caso 1, la BS le envía un paquete con el campo *flag close* con un valor 1. La estructura del paquete se indica en la Tabla 2.3. Esto le indica al nodo que no es necesario seguir con la transmisión porque ya no existen datos por recibir. En el caso 2, de manera análoga del caso 1, el nodo le envía a la BS un paquete con el campo *flag close* con un un valor 1. Así la BS tiene la señal por parte del nodo que es necesario reorganizar el tiempo de sincronización asignado a los demás nodos de la red.

La BS sigue siempre activa, aunque no existan nodos conectados a la red, enviando *broadcast* en caso de encontrar un nodo para enviar o recibir información.

### 2.4.5.7. Formato Paquete VST-TDMA

El paquete tiene el siguiente formato donde se encuentran los siguientes campos:

Tabla 2.3: Formato del paquete VST-TDMA

<i>Source</i> (8bits)	<i>Destination</i> (8bits)	<i>Flags</i> (16bits)
	<i>Sequence</i> (32bits)	
	<i>Synch</i> (32bits)	
	<i>Reserve</i> (32bits)	
	<i>Data</i> (32bits)	

- *Source*: Indica la dirección MAC de origen del paquete enviado.
- *Destination*: Señala la dirección MAC de destino del paquete.
- *Flags*: Este campo está reservado para identificar el tipo de paquete. Dentro de los tipos de paquetes se puede encontrar: *broadcast*, *hello* y *close*
- *Synch*: En este campo se registra el tiempo de sincronización.
- *Sequence*: Este campo lleva registro de qué lugar en la secuencia se encuentra.
- *Reserve*: Este campo especifica el tiempo que el nodo debería reservar en caso de enviar información.
- *Data*: Campo reservado para los datos a enviar.

## 2.5. Perfil de descarga

### 2.5.1. *State of Charge* - (SOC)

El concepto de estado de carga, SOC, se define como el nivel de carga de una batería relativa a su capacidad, una relación entre la capacidad en un momento dado,  $Q(t)$  y la capacidad nominal representada por  $Q_n$  en la Ecuación 2.8.

$$SOC(t) = \frac{Q(t)}{Q_n} \quad (2.8)$$

Se representa por porcentajes y se utiliza para referirse al estado actual de la batería, a diferencia de DOD que se usa cuando se discute la vida de útil de la batería [16].

### 2.5.2. *Depth of Discharge* - (DOD)

El concepto de profundidad de descarga, DOD, se refiere al grado en que la batería se ha descargado respecto a su capacidad total. Cuando la batería se encuentra totalmente descargada, esta tiene una DOD del 100% [17].

A su vez, la profundidad de descarga está relacionada con la vida útil de la batería. Un ciclo de batería se considera como el ciclo de carga y descarga de la batería, este ciclo se completa cuando la batería se descarga al 100%. Es posible que una batería cuente con más

ciclos para DOD inferiores. Además, tener ciclos de carga y descarga total acortan la vida de la batería [18].

## 2.6. Estado del Arte

### 2.6.1. IEEE 802.15.3C

Este estándar IEEE 802.15.3C establece las especificaciones técnicas para redes inalámbricas personales (WPAN) compuestas de varios . Las redes WPAN se caracterizan por su número reducido de nodos conectados a ella y las cortas distancias que abarca. Está enfocada principalmente para proveer una conexión inalámbrica de alta velocidad y bajo consumo energético.

En el estándar IEEE 802.15.3 se especifican los requerimientos de la capa física y MAC para las WPAN en relación a los dispositivos portátiles. Para esto se definen las *piconet* y el concepto de *frames* con los que se realiza la comunicación entre dispositivos [19].

Una *piconet* es una red inalámbrica que se caracteriza por ser de un tamaño reducido, con un límite de alcance de no más de 10 m.

Los principales componentes de una *piconet* son señalados a continuación:

- PNC (*piconet coordinator*)
- DEV(device)

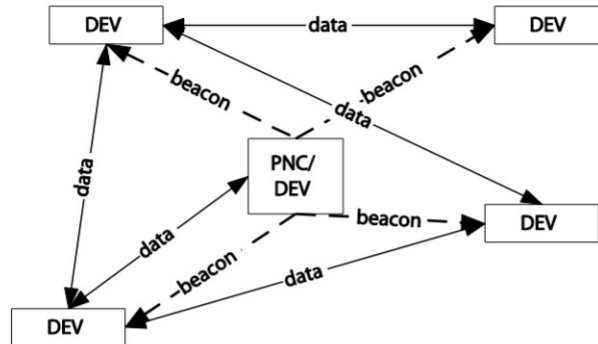


Figura 2.12: Arquitectura de una piconet

El *superframe* que es utilizado en la *piconet* se compone de los siguientes elementos:

- *Beacon*: configura los tiempos.
- *Contention Access Period (CAP)*.
- *Channel Time Allocation Period (CTAP)*.

El año 2009 se realizó una actualización al estándar IEEE 802.15.3 donde se incluyeron las bandas de operación de frecuencia de 60 GHz. El denominado estándar IEEE 802.15.3C-2009, realiza una adaptación al *frame* modificando el *beacon* para que pueda operar con PNC no omnidireccionales. Cabe señalar que las antenas que operan en 60 GHz son altamente direccionales [20].



Figura 2.13: Estructura del *superframe*

## 2.6.2. Estándar ECMA-387

La *European Computer Manufacturers Association* fue conformada en 1960 a partir de la necesidad de estandariza las técnicas operacionales utilizada en la computadoras. Estos estándares harían posibles que la data utilizada para un computador podría ser utilizada en otro computador, fabricada por otra compañía, con el mínimo de alteración. Además se evitaría la existencia de múltiples lenguajes computacionales dependiendo del fabricante.

Este estándar divide el rango de operación de frecuencias (57.24-65.88 GHz) en 4 bandas de operación, como es posible apreciar en la Figura 2.14 [21].

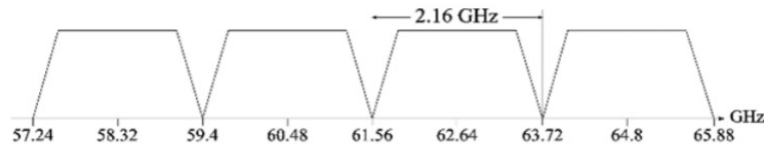


Figura 2.14: Frecuencia de operación y asignación de bandas para ECMA-387

Tabla 2.4: Asignación de bandas en ECMA-387

Identificación de la banda	Canales usados	Frecuencia central [GHz]
5	1-2	61560
6	2-3	63720
7	3-4	65880
8	1-2-3	63720
9	2-3-4	65880
10	1-2-3-4	65880

Este estándar puede utilizar 2 tipos de *frames*:

- *Unaggregate MAC*: Consiste en *MAC Header* de tamaño fijo y un cuerpo, opcional, de tamaño variable.
- *Aggregated MAC*: Consta de un *MAC Header* y un cuerpo de tamaño variable.

## 2.6.3. Aplicaciones

### 2.6.3.1. 5G

Una tecnología que promete revolucionar la manera en como nos comunicamos, o bien, la manera de como se comunican los dispositivos entre sí es la tecnología 5G [22]. Entre las proyecciones para la tecnología 5G, se encuentran: el aumento de los dispositivos IoT

y la variedad de estos para el año 2020, un aumento del volumen de tráfico producto de los dispositivos IoT adicionales y el aumento de la diversidad de casos de uso, como por ejemplo la comunicación entre vehículos. Dentro de los requerimientos de la redes 5G se encuentran las tasas de transmisión que se encontrarán en rangos de 1-10 Gbps. Estas tasas de transmisión son posibles utilizando ondas milimétricas. Sin embargo, como se mencionó anteriormente, las transmisiones utilizando frecuencias de ondas milimétricas tienen un alta pérdida de propagación y tendrían mejor desempeño en distancias cortas.

Una de las soluciones para compensar estas pérdidas es aumentar la densidad de antenas en un área determinada.

De acuerdo a los lineamientos establecidos por la ITU, el alcance de la tecnología 5G se puede separar en 3 grandes alcances:

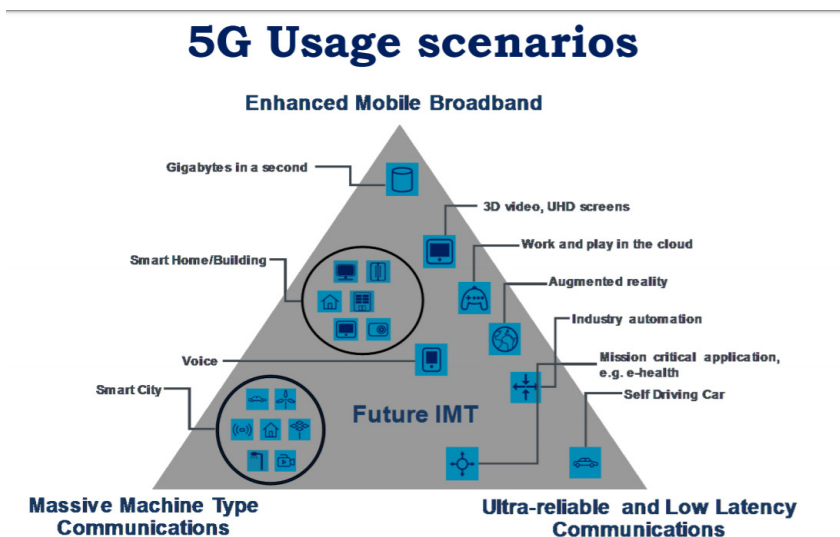


Figura 2.15: Escenarios de uso de 5G [23]

Como se mencionó anteriormente, las redes 5g tendrán grandes tasas de transferencia, eMBB, por lo que serán posibles aplicaciones en áreas tan diversas como el *streaming* de contenido digital de alta resolución, videojuegos, etc.

Aunque una de las aplicaciones 5G más esperadas es la completa implementación de vehículos autónomos. Específicamente está ligada al uRLLC, la latencia de comunicación entre vehículos o vehículos a otros objetos por lo que el tiempo en toma de decisiones por parte de los vehículos autónomos se reduciría drásticamente y, junto con esto, la cantidad de accidentes protagonizados por vehículos autónomos.

### 2.6.3.2. Aplicaciones *Wireless Sensor Networks*

Las WSN son una red de adquisición de datos y también de distribución de los mismos. La red está compuesta de múltiples nodos diseminados que son administrados por una estación central. Dentro de las características de las WSN incluyen recolección de energía vía *Energy Harvesting*, movilidad de nodos, habilidad de superar el mal funcionamiento de algún nodo, escalabilidad a despliegues de gran escala [24].

# Capítulo 3

## Metodología

### 3.1. Introducción

Este capítulo contiene las cuatro secciones mostradas en la Figura 3.1. La primera sección corresponde a una breve contextualización del trabajo y descripción de las mejoras implementadas. En la segunda sección se realiza una descripción de los componentes más relevantes que integran el código, junto al funcionamiento de los módulos de estación base y nodos. La tercera sección, detalla el funcionamiento de los punteros al interior del código y su importancia al momento de designar el tiempo, además se detalla la estrategia abordada respecto a los modos de operación de estos. Por último, la cuarta sección aborda el ajuste de tiempo de reposo con el propósito de optimizar el uso de la batería.

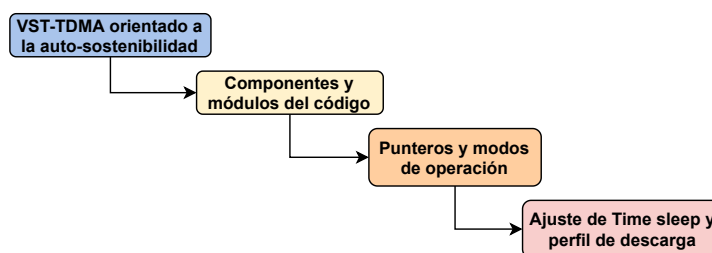


Figura 3.1: Diagrama de flujo de capítulo

### 3.2. VST-TDMA orientado a la autosostenibilidad

Como etapa previa a la propuesta de mejoras al protocolo VST-TDMA se realizó una revisión al estado de trabajos de tesis predecesores a este, pertenecientes a Dra. Vanessa Quintero [1] y Sr. Boris Torres [14], con el propósito de comprender el funcionamiento del protocolo, visualizar las mejoras a realizar y seguir en la misma línea de trabajo ya que esta memoria constituye una continuación a la labor realizada por ambos. El protocolo con las propuestas ya incorporadas se denominara VST-TDMA 2.0 a lo largo del presente documento.

Las mejoras propuestas al protocolo VST-TDMA están focalizadas principalmente en optimizar el uso del canal de una red conformada por nodos que dependen de la energía provista por su batería interna. Un bajo nivel energético en un nodo puede afectar de manera significativa su funcionamiento y su capacidad de transmitir de manera efectiva. Si este caso se repite para múltiples nodos en una red, esta se podría considerar como una red no operativa.

Actualmente existen maneras de extender el funcionamiento óptimo de los nodos en la red, tales como minimizar la energía consumida por estos. Esto se logra encendiendo los nodos cuando tengan la necesidad de transmitir información y no estar escuchando al canal de manera continua y a su vez permitirles recargar baterías. Este modo de operación es denominado **modo autosostenible**. VST-TDMA, como su predecesor PSMA, ajusta el tiempo de uso del canal dependiendo del tamaño de la información que necesita ser enviada. A nivel de red, la BS toma el tamaño del paquete y calcula cuánto tiempo es necesario utilizar en el canal para transmitir la información de manera exitosa. De esta manera es posible hacer uso del canal de información de manera eficiente. Como se mencionó anteriormente, los nodos son principalmente alimentados por baterías por lo que es vital, para el funcionamiento de la red, tener el estado de estas al momento de realizar las transmisiones.

### 3.2.1. OPNET

La implementación está realizada en el software OPNET para modelar y simular sistemas de comunicaciones e incorpora diversas librerías para facilitar el modelado de la topologías de redes. La versión utilizada para la realización de esta memoria corresponde a la versión educacional, OPNET 14.5.

En OPNET existen 3 estados básicos, como se puede apreciar en la Figura 3.2: *initial state*, *forced state*, *unforced state*. Los *unforced states* corresponde a un estado, una vez iniciado le permite tener pausa mientras se ejecute el proceso. El *initial state*, que también es considerado un *unforced state*, corresponde al lugar en que la ejecución del proceso comienza.

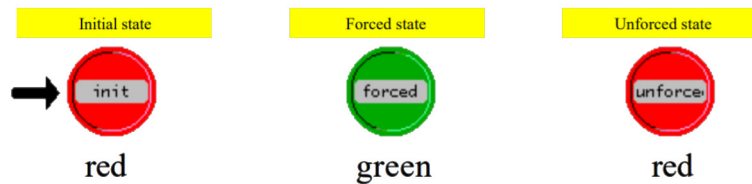


Figura 3.2: Estados forzados y no forzados al interior del bloque de procesos

Finalmente, los *forced states* no permiten pausas mientras son ejecutados. Cada uno de estos estados son programables conteniendo variables de estado, funciones, y variables de tiempos que son ejecutadas.

Tanto para el módulo del nodo como para la estación base, existen bloques que controlan los procesos que ejecuta cada uno. Las componentes importantes al interior de los bloques de proceso son los estados.

### 3.3. Componentes y módulos del código

Antes de la revisión de las componentes del código, se realizara una revisión a un diagrama que muestra las interacciones entre los nodos y la BS con la finalidad de complementar la revisión de los módulos de estación base, BS, y nodos. Cabe mencionar que los cambios realizados para las mejoras del protocolo VST-TDMA fueron realizadas a nivel de modulo de BS. La interacción entre los nodos y la BS se muestra en el diagrama de la Figura 3.3,

en donde se puede apreciar que la BS envía un paquete de *Broadcast* de manera periódica con el propósito de encontrar algún nodo que requiera realizar una transmisión. Si existe algún nodo en las inmediaciones de la red, la señal de *Broadcast* será respondida por el nodo y este enviará un paquete *Hello* hacia la BS. El paquete *Hello* es recibido por la BS la cual envía un paquete *Sync* el cual sincroniza el inicio de la transmisión de paquetes de data. La generación y contenido de los paquetes *Broadcast-Hello-Sync* serán abordados en la subsección 3.3.1 y subsección 3.3.2.

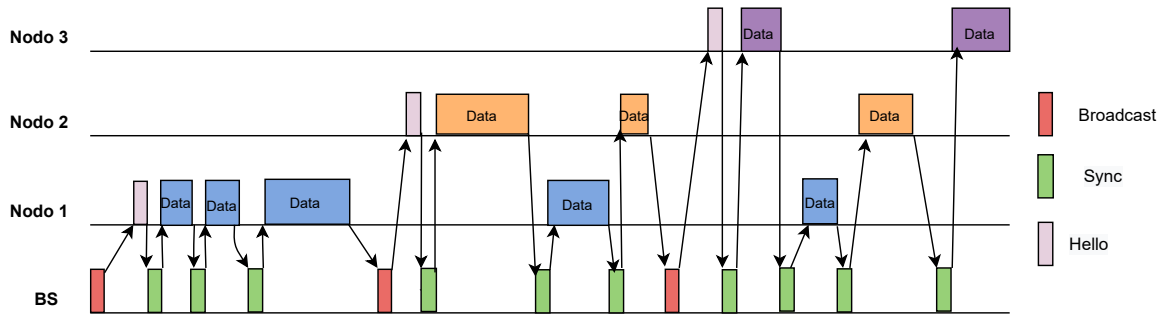


Figura 3.3: Diagrama *Broadcast-Hello-Sync*

### 3.3.1. Módulo Estación Base

La estación base está compuesta de bloques de transmisión y recepción donde se configuran parámetros como el ancho de banda, el tipo de modulación y la frecuencia de recepción. El bloque *base\_station* corresponde al bloque que contiene todos los procesos a ejecutar.

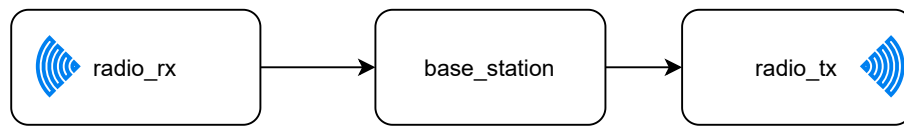


Figura 3.4: Módulos estación base

Attribute	Value
- name	radio_tx
- channel	(...)
- Number of Rows	1
Row 0	
- data rate (bps)	1,000,000,000
- packet formats	all formatted, unformatted
- bandwidth (kHz)	7,000,000
- min frequency (MHz)	57,000
- spreading code	disabled
- power (W)	100
- bit capacity (bits)	infinity
- pk capacity (pks)	1,000
- modulation	bpsk
- rxgroup model	dra_rxgroup
- txdel model	dra_txdel
- closure model	dra_closure
- chanmatch model	dra_chanmatch
- taqain model	dra_taqain

Figura 3.5: Atributos bloque transmisión

Attribute	Value
- name	radio_rx
- channel	(...)
- Number of Rows	1
Row 0	
- data rate (bps)	1,000,000,000
- packet formats	all formatted, unformatted
- bandwidth (kHz)	7,000,000
- min frequency (MHz)	57,000
- spreading code	disabled
- processing gain (dB)	channel bw/dr
- modulation	bpsk
- noise figure	1.0
- ecc threshold	0.0
- ragain model	dra_ragain
- power model	dra_power
- bkgnoise model	dra_bkgnoise
- inoise model	dra_inoise
- snr model	dra_snr

Figura 3.6: Atributos bloque recepción

En la Figura 3.7 se puede apreciar los estados al interior del bloque *base\_station*. Por un



lado el estado *init* contiene todas las variables iniciales tales como el *buffer time*, *travel time*, intervalos a los que se emite la señal de *Broadcast*, *hello interval* y, por ultimo, la inicialización de los punteros mediante un puntero global denominado *global\_ptr*.

La señal de *Broadcast* es creada en el estado *bcast\_trigger*. Este paquete creado contiene, solamente, información relativa a la dirección MAC de la estación base; los demás campos correspondiente a una dirección MAC en específico de un nodo y el campo de que indica el tiempo que se requiere transmitir tienen como valor 0. Otro tarea del estado *bcast\_trigger* es actualizar los tiempos de envío de la señal de *Broadcast* tomando en cuenta el *travel\_time*, *bufer\_time* y el tiempo que toma enviar el paquete de *broadcast*. La señal de *Broadcast* generada por *bcast\_trigger* es enviada por el estado de *broadcast*.

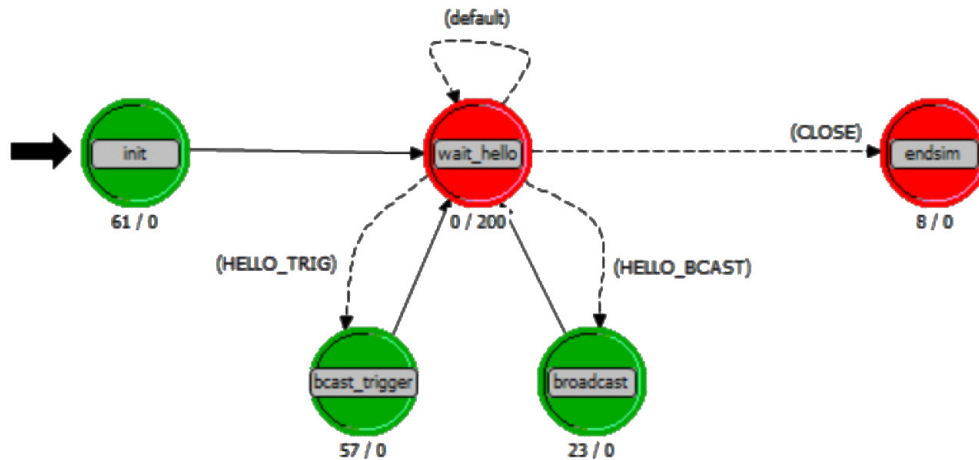


Figura 3.7: Bloque de proceso de *base\_station*

El estado *wait\_hello* puede ser considerado como el estado más activo dentro del modulo de estación base. Una vez que el paquete *Hello* es recepcionado por la BS, el estado *wait\_hello* extrae del paquete la dirección MAC del nodo de origen y realiza una verificación de la dirección MAC para cerciorarse de que no se trata de un eco. Si se verifica que este paquete proviene de un nodo, se registra en la lista de nodos activos; luego se extraen los campos relativos a la energía que tienen el nodo y el tiempo necesario que requiere para la transmisión.

El estado *wait\_hello* evalúa la energía del nodo de acuerdo a que si cumple la condición de ajuste de batería explicada en la Sección 3.5. Esta condición determina si es que el nodo en cumple con la condición para entrar a modo de ahorro energético. En esta etapa también se calcula la variable  $t_{sleep}$  señalada en la Sección 3.5 que corresponde al tiempo de reposo que debería ser designado al nodo y que es ingresada a la función *Smart Schedule Time Function* como una variable. Se actualiza el puntero global, *global\_ptr*, utilizado para el, y de acuerdo a la función *Smart Schedule Time Function* se realiza una evaluación de condiciones, especificadas en la Sección 3.4. La función *Smart Schedule Time Function* tiene como variable de salida *schedule\_time* que es utilizado dentro del paquete *Sync* que envia la BS en conjunto con la dirección MAC de la BS y la dirección MAC del nodo de destino. Finalmente el estado *endsim* finaliza la labor realizada por la BS.

### 3.3.2. Módulo Nodo

Los nodos cuentan con 5 bloques adicionales a los bloques de transmisión y recepción.

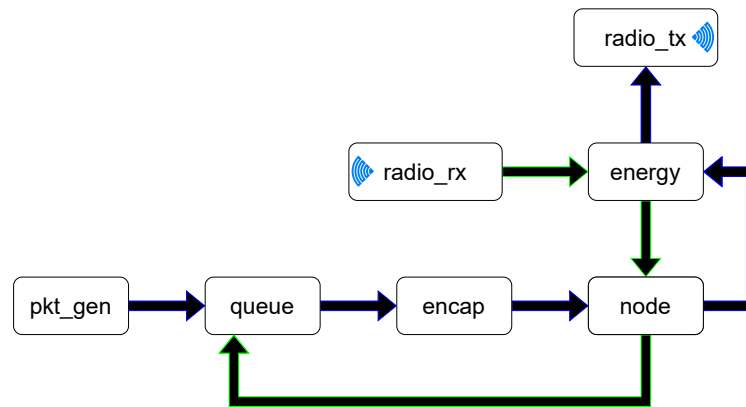


Figura 3.8: Módulos nodo

La información a enviar es creada en el bloque generador de paquetes, *pkt\_generator*, donde se establece el tamaño que tendrá, el tiempo de inicio y término, y cuánto tiempo existirá entre paquetes. Esta última variable puede ser constante o bien estar definida a partir una distribución probabilística. El paquete luego de ser generado es enviado al bloque *queue*, donde se almacenan a la espera de ser enviados. La señal requerida por el bloque *queue* debe ser procesada por el bloque *node* que a su vez depende del bloque *energy*. El bloque *energy* maneja la información del estado de la batería del nodo e indica si este está posibilitado a realizar labores de recepción o transmisión. Si el nodo está en condiciones de transmitir los paquetes generados, el conjunto de bloques *energy-node* envían una señal al bloque *queue* para enviar los paquetes en espera hacia el bloque *encap*. Este bloque encapsula los paquetes de acuerdo al formato definido, indicado en la Figura 3.13.

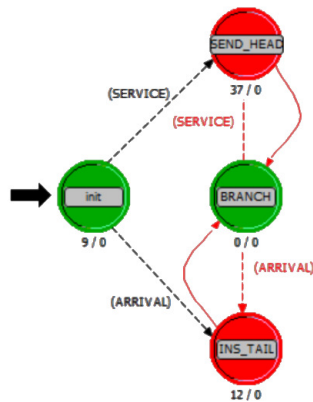


Figura 3.9: Bloque de procesos *queue*

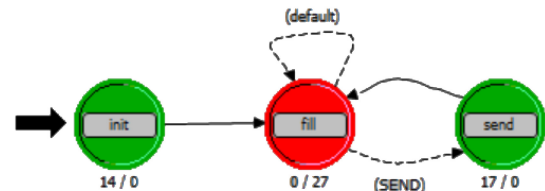


Figura 3.10: Bloque de procesos *encap*

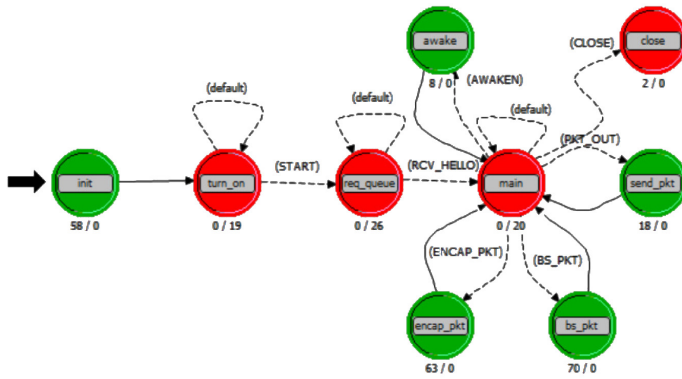


Figura 3.11: Bloque de procesos *node*

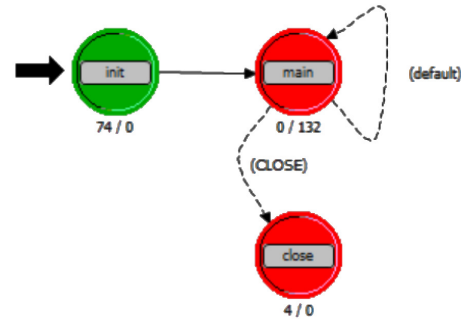


Figura 3.12: Bloque de procesos *energy*

El formato del paquete encapsulado utilizado en el protocolo, mostrado en la Figura 3.13, tiene 5 campos en su estructura.

Source 12 bits	Destination 12 bits	Flags 8 bits	Pointer Info 16 bits	Energy 16 bits
Data packets Inherited bits				

Figura 3.13: Formato de paquete

A continuación se realiza un desglose de cada uno de los campos del formato del paquete.

- *Source*: Contiene la dirección MAC del nodo de origen.
- *Destination*: Contiene la dirección MAC del nodo de destino.
- *Flags*: Indica si el paquete corresponde a un paquete de control.
- *Pointer*: Tiempo asignado para transmitir.
- *Energy*: Contiene la información del estado de batería del nodo.

### 3.4. Punteros y modos de operación

El puntero, dentro del protocolo, constituye una parte importante dentro del código ya que indica los tiempos en que los nodos deben transmitir en la red. Se propone una estrategia basada en utilizar 2 tipos de puntero (global e individual) de manera conjunta y dependiente de que si el nodo, o los nodos, entran en modo de **auto-sostenibilidad**.

También se introduce el concepto de **continuidad** que está relacionado con el orden inicial de ingreso de los nodos a la red y el orden de los tiempos de transmisión. Un nodo rompe **continuidad** si es que transmite en un orden que no corresponde a su lugar de ingreso a la red. Se debe aclarar que un nodo no necesariamente rompe **continuidad** si es que ingresa a un modo **auto-sostenible**.

Primero se hará referencia a los punteros utilizados y luego se abordarán los objetivos de la estrategia y su modo de operación.

En la Figura 3.14 se pueden apreciar 2 paquetes de información a modo de ejemplificar la ubicación de los punteros en el paquete. Los punteros  $global\_ptr$  y  $p\_in$  comparten la misma ubicación en el paquete pero dependerá del modo de funcionamiento si es que se toma en cuenta el uno o el otro.

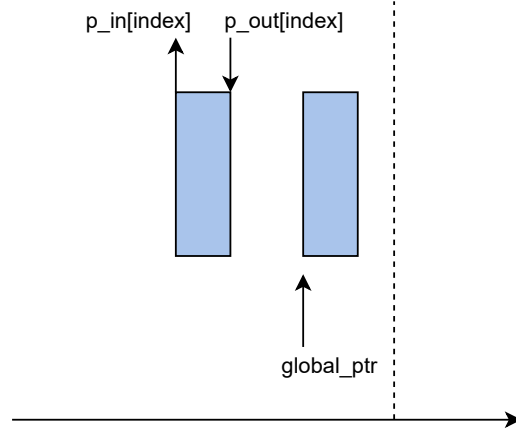


Figura 3.14: Esquema de paquetes con punteros  $global\_ptr$  y  $p\_in - p\_out$

El puntero  $global\_ptr$  corresponde al puntero global para todos los nodos de la red (también es utilizado en la programación del *Sync* y *Broadcast*) este se mueve siempre hacia el futuro y contempla el tiempo de vuelo,  $t\_travel$ , tiempo de *buffer*,  $t\_buffer$  y el *sleep time*,  $t\_sleep$ . La Ecuación 3.1 señala la forma general que tiene el  $global\_ptr$ , donde  $sleep\_time[index]$  indica el tiempo de descanso para cada nodo de manera individual.

$$global\_ptr = sleep\_time[index] + t\_reserve + buffer\_time + travel\_time \quad (3.1)$$

Además este se actualiza con el tiempo contemplado para el envío del mensaje, el cual se denominará  $t\_reserve$ , y con el tamaño del paquete a enviar sobre la tasa de transmisión (valores los cuales serán especificados en el siguiente capítulo).

$$t\_reserve = \frac{tamaño\_paquete}{throughput} \quad (3.2)$$

El par de punteros  $p\_in[index]$  y  $p\_out[index]$  corresponden a los punteros individuales de los nodos los cuales señalan el inicio y final del paquete, respectivamente. A cada uno de los nodos al ingresar a la red se le asigna un  $index$  propio para su identificación, este  $index$  se relaciona con la dirección MAC del nodo fuente. A diferencia del puntero global que agenda de manera consecutiva, al tener registro de los inicio y final de los paquetes se pueden realizar otro tipos de asignación del tiempo.

La actualización de los punteros individuales será llevada a cabo por la función **Smart Schedule Time Function** de acuerdo a una serie de condiciones explicadas más adelante. Tal como en el caso del puntero global,  $global\_ptr$ , la relación entre el par de punteros  $p\_in - p\_out$  se puede ejemplificar de manera general en la Ecuación 3.3, donde la diferencia de  $p\_in$  y  $p\_out$  corresponde a  $t\_reserve$  más los tiempos de vuelo y *buffer*,  $t\_travel$  y  $t\_buffer$ , respectivamente.

$$p\_out[index] - p\_in[index] = t\_reserve + buffer\_time + travel\_time \quad (3.3)$$

En conjunto a la revisión bibliográfica, se realizó una revisión del protocolo funcionando exclusivamente con *global\_ptr*. Uno de los comportamientos que fue posible observar en el funcionamiento del protocolo solo con punteros globales, *global\_ptr*, fue que estos funcionan de buena manera cuando todos los nodos se encuentran operando de manera normal y ninguno ha entrado en el modo de ahorro energético. Una vez que cualquiera de los nodos entra en modo energético, éste obliga a los demás nodos a seguir su comportamiento, tal como se muestra en la Figura 3.15.

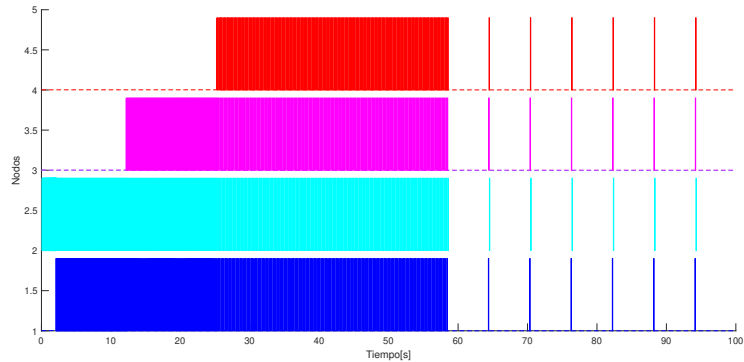


Figura 3.15: Escenario de paquetes enviados por nodos usando puntero global sujeto al cambio a modo de ahorro energético de un nodo

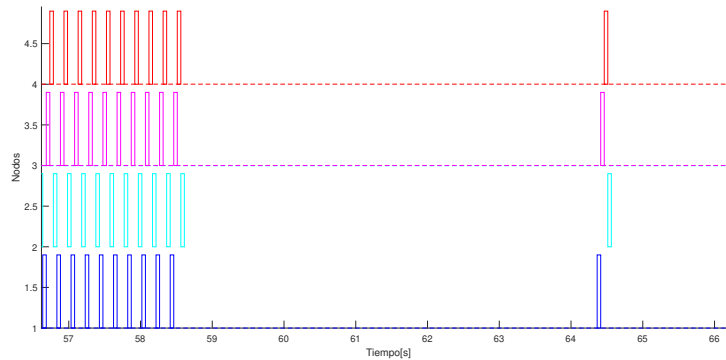


Figura 3.16: Ampliación de gráfico de paquetes enviados por nodos usando puntero global.

Con una ampliación se puede ver de mejor forma, Figura 3.16, de como el nodo 1, representado por el azul, es el primero en entrar en modo de ahorro energético e impulsa a los demás a seguir su comportamiento sin importar el nivel de batería que tienen los demás nodos. Este comportamiento, en términos del uso del canal, es ineficiente ya que se podría redistribuir el envío de paquetes en el espacio libre.

Otra situación a evitar es la colisión y, eventual, pérdida de paquetes. Como se mencionó anteriormente es de suma importancia que la red se mantenga operativa y tanto la colisión como la pérdida de paquetes son situaciones que ponen en riesgo el funcionamiento normal de la red.

En el escenario simulado presentado en la Figura 3.17 se visualiza que el nodo cian y el nodo

magenta tienen una colisión entre sus paquetes lo que produce una aparente finalización de sus transmisiones. Si se toma en cuenta el nivel de batería de referencia para cada nodo, representado por las líneas punteadas en sus respectivos colores, se advierte que luego del choque entre sus paquetes se produce un agotamiento sostenido de la batería. Este agotamiento de la batería es debido a que los nodos entran en un estado de espera y no logran establecer contacto con la BS nuevamente. Por un lado, la red pierde a dos de sus componentes y se pierde la información contenida en los paquetes extraviados.

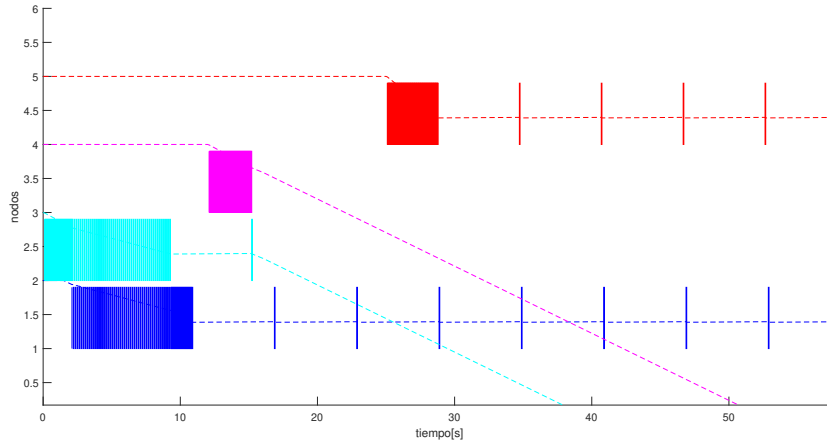


Figura 3.17: Escenario choque entre paquetes con referencia de carga

Para evitar los escenarios expuestos, y otros posibles, se ha diseñado la función **Smart Schedule Time Function**, la cual tiene los siguientes objetivos principales adicionales a evitar colisiones de todo tipo:

- Agendar con un mínimo espacio entre nodos (umbral) con el propósito de optimizar el uso del canal.
- Preferir postponer un nodo antes de adelantar, ya que se podría perjudicar el nivel de batería necesaria para alcanzar la **autosostenibilidad**.
- Evitar perjudicar a un nodo en particular por el orden de ingreso a la red. Este punto está relacionado a los nodos que tardíamente a la red y tienen una menor prioridad en relación a los nodos que tiene un ingreso al principio.
- Evitar perjudicar el desempeño de los nodos producto de una limitante. Este punto está relacionado con la Figura 3.15

Mientras todos los nodos no estén en modo de ahorro energético quien determina el tiempo en que son agendados los nodos es el puntero global, *global\_ptr*. Si un nodo entra en modo de ahorro energético, el puntero global se mantiene justo detrás del puntero *p\_out* del nodo. Una condición importante de la función es la de la mantención de la continuidad. Si al agendar un nodo este no rompe con la continuidad, todos los nodos son agendados de acuerdo al orden de ingreso y el *global\_ptr* se actualiza. Si se llega a romper la continuidad, el puntero *global\_ptr* no se actualiza en el tiempo y se procede a revisar todos los espacios disponibles y si es que existen choques. Es decir, se revisan que los *p\_in[index]* y *p\_out[index]* por agendar

no choquen con los  $p\_in[index]$  y  $p\_out[index]$  ya agendados.

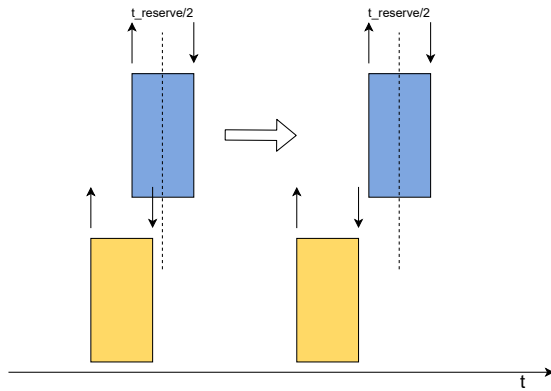


Figura 3.18: Regla  $t_{reserve}/2$  para punto de colisión cercana a  $p\_in$

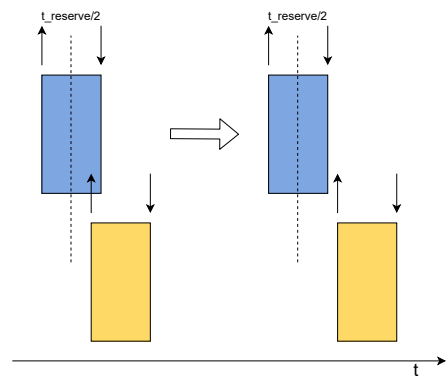


Figura 3.19: Regla  $t_{reserve}/2$  para punto de colisión cercana a  $p\_out$

Si llega a colisionar se debe revisar si se cumple la regla de  $t_{reserve}/2$ , señalada en la Figura 3.4. Esta regla consiste en que separar en 2 el paquete ya agendado y verificar en qué porción cae el paquete sin agendar. Si este cae en la sección cercana al puntero  $p\_in$ , se agenda antes del nodo con que presenta la colisión (también haciendo una revisión si es que existe el espacio en esa porción para realizar la operación), mostrado en la Figura 3.18. En cambio si el paquete cae en la porción cercana a  $p\_out$ , se agenda en el futuro (Figura 3.19).

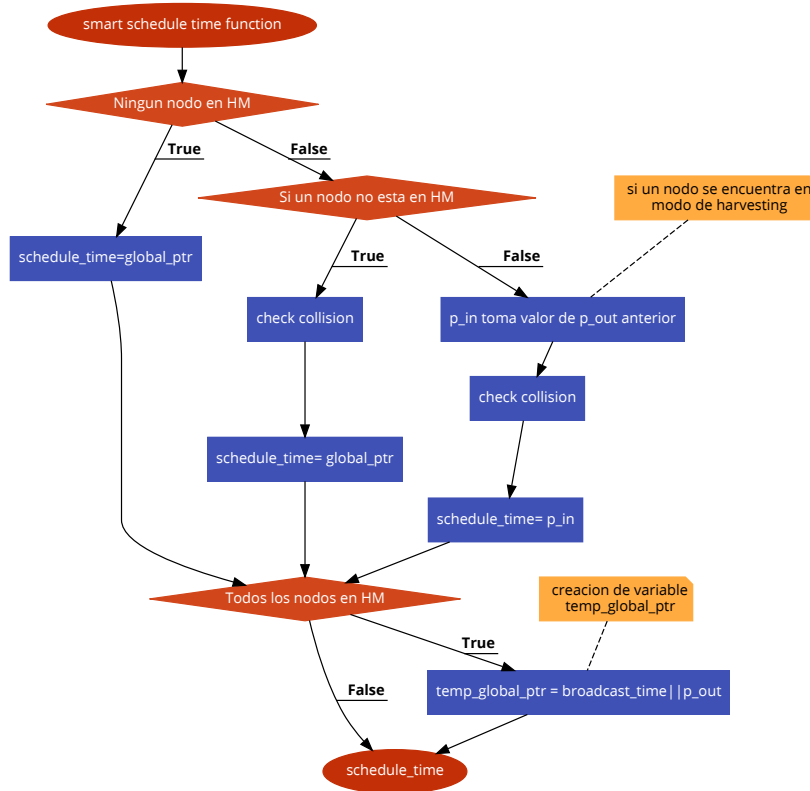


Figura 3.20: Flujo correspondiente al código *Smart Schedule Time Function*

La Figura 3.20 corresponde al flujo correspondiente de la función *Smart Schedule Time Function* incluida en el código. Como se menciono anteriormente en la Subsección 3.3.1, la función *Smart Schedule Time Function* realiza una serie de verificación de condiciones antes de entregar la programación del nodo. Primero se verifica si es que existe algún nodo en modo de ahorro de energía. Si no existe nodo alguno la variable de salida *schedule\_time* toma el mismo valor que el *global\_ptr* después de realizar un nueva verificación. Si existe un nodo en modo de ahorro energético y es el único, se evalúa la función *check\_collision* de acuerdo a la regla  $t_{reserve}/2$  y *schedule\_time* sigue tomando el mismo valor que *global\_ptr*. En el caso que todos los nodos se encuentren en modo de ahorro energético, el puntero *p\_in* toma el valor del *p\_out* anterior y se evalúa si existe colisión de acuerdo a la regla  $t_{reserve}/2$ .

### 3.5. Ajuste de Time Sleep y perfil de descarga

Otro de los puntos importantes en la optimización del protocolo es el uso eficiente de la energía en conjunto con agendar de manera óptima los nodos. En la Ecuación 3.3 se incluye la variable *time\_sleep* que corresponde al tiempo de descanso que toma el nodo para recargar la energía de su batería. En el caso a simular en OPNET no existe recepción, por ende, no existe tiempo de recepción representado por  $T^{rx}$  y asumiendo todos los voltajes iguales se



obtiene la siguiente expresión derivada de la Ecuación 2.5.

$$T^{sleep} = \frac{(P^{t_x} - P^h)T^{t_x}}{P^h - P^{sleep}} \quad (3.4)$$

$$T^{sleep} = \frac{V(I^{t_x} - I^h)T^{t_x}}{V(I^h - I^{sleep})} \quad (3.5)$$

$$T^{sleep} = \frac{(I^{t_x} - I^h)T^{t_x}}{(I^h - I^{sleep})} \quad (3.6)$$

$$T^{sleep} = K_{currents} \cdot T^{t_x} \quad (3.7)$$

$$T^{sleep} = \frac{(I^{t_x} - I^h)T^{t_x}}{(I^h - I^{sleep})} = K_{currents} \cdot T^{t_x} \quad (3.8)$$

Donde  $T^{t_x}$  corresponde al tamaño del paquete transmitido dividido en el *throughput*, lo que también corresponde al  $t_{reserve}$  definido anteriormente. Otro cambio de notación será el de  $T^{sleep}$ , que corresponde al tiempo necesario que debe tener el nodo para recargar su batería, el cual será reemplazado por  $t_{sost-sleep}$ . Siendo  $K_{currents}$ , una constante conformada por las corrientes de transmisión, cosechamiento y de reposo. Por lo tanto:

$$t_{sost-sleep} = K_{currents} \cdot t_{reserve} \quad (3.9)$$

Para poder definir un  $t_{sleep}$  variable en función del nivel de batería del nodo (SOC), es necesario conocer cuáles son los requerimientos mínimos con los que debe contar  $t_{sleep}$  [1][25].

- $t_{sleep}$  considerando la potencia mínima que puede ser suministrada por el EHD.
- El valor mínimo de  $t_{sleep}$  está sujeto a las siguientes restricciones:

$$T_{sleep} \geq T_{tx} + T_{trx} + T_{idle} \quad (3.10)$$

$$P_h > P_{sleep} \quad (3.11)$$

Otro concepto a tener en consideración es el de la profundidad de descarga, DOD y el del estado de carga, SOC. Es necesario encontrar un nivel en que el SOC no repercuta en la degradación de la batería.

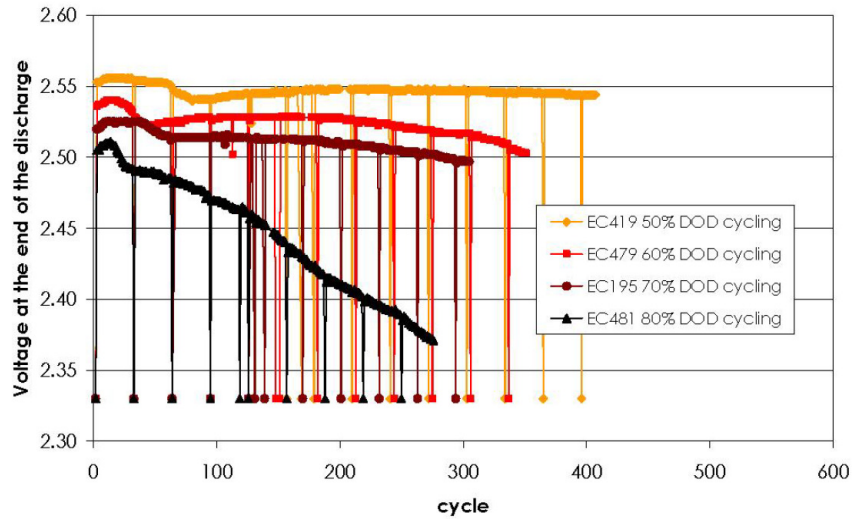


Figura 3.21: Evolución del final del voltaje v/s ciclos DOD. Ciclos realizados a una temperatura constante de  $60^{\circ}$ [18].

Se ha decidido optar por un límite de DOD del 60 %, es decir, la batería se debe descargar un 60 % antes de entrar en modo de ahorro energético, o bien, el nodo debe informar que su nivel de batería es de un 40 % SOC [18].

El tiempo,  $t_{sleep}$ , queda definido por una expresión de tiempo variable:

$$t_{sleep} = t_{sostsleep} \cdot \frac{SOC_{max} - SOC(k)}{SOC_{max} \cdot 60\%} \quad (3.12)$$

Donde  $SOC_{max}$  corresponde a la carga máxima y  $SOC(k)$  es el nivel de carga informado por el nodo en un momento dado. La continuación de la línea punteada roja más allá del valor  $SOC_{min}$  indica la posibilidad alcanzar niveles inferiores al determinado originalmente.

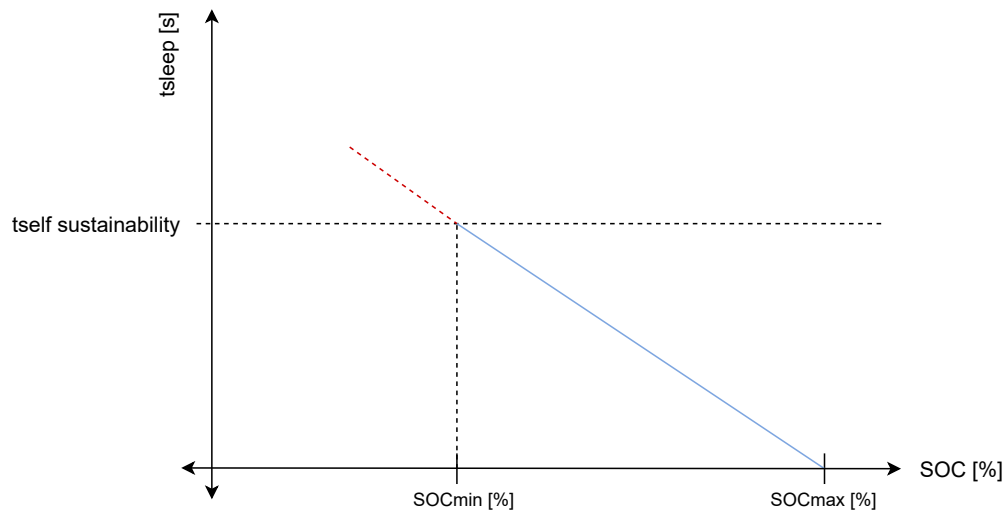


Figura 3.22: Perfil de descarga variable SOC

# Capítulo 4

## Análisis y discusión a los resultados obtenidos del protocolo VST-TDMA 2.0

### 4.1. Introducción

En el presente capítulo se evalúa el desempeño de las mejoras propuestas al protocolo VST-TDMA, denominado VST-TDMA 2.0, mediante distintas pruebas simuladas en OPNET. Este capítulo se divide en las siguientes secciones:

- Caso de estudio y configuración principal: Se realiza una presentación de la configuración principal del escenario de simulación en OPNET.
- Funcionamiento general: Se realiza una validación del funcionamiento de protocolo VST-TDMA 2.0.
- Auto-sostenibilidad de la energía: Esta sección tiene como objetivo ilustrar el comportamiento que tiene el protocolo VST-TDMA 2.0 con la implementación del modo de ahorro de energía. Se contempla también la escalabilidad que tiene el protocolo, la recuperación, ocupación del canal, tiempo de reposo y *throughput* en distintos escenarios.

### 4.2. Caso de estudio y configuración principal

El escenario utilizado para la simulación corresponde a una subred de oficina de dimensiones 10 x 20 m. En la Figura 4.1 es posible ver la subred de oficina está conformada por 3 nodos fijos y una estación base. En general, estas redes utilizan nodos fijos debido a que para alcanzar un grado de movilidad no es una tarea sencilla en el dominio de las ondas milimétricas. También se debe tener en consideración de que no constituye una restricción permanente y podría ser abordada en futuros diseños [26]. El número de nodos en el escenario es fácilmente escalable. El elemento adicional visible, *config*, corresponde a un nodo propio de OPNET para facilitar la configuración del escenario.

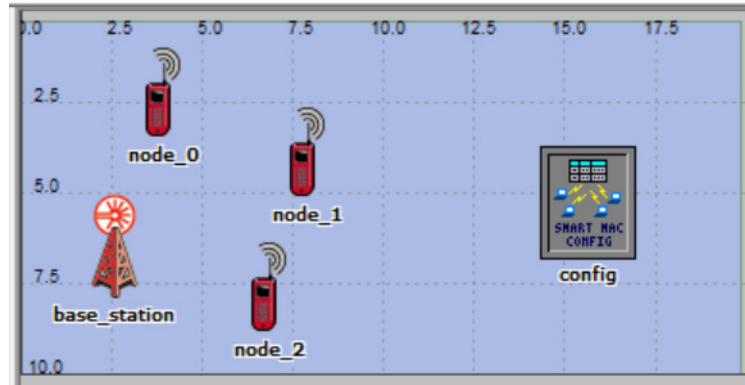


Figura 4.1: Escenario a simular

Tabla 4.1: Atributos de configuración

Atributo configuración	Valor
<i>throughput</i>	1 Gbps
<i>buffer time</i>	$1 \cdot 10^{-9}$ s
<i>travel time</i>	$1 \cdot 10^{-7}$ s
<i>listen buffer time</i>	$1 \cdot 10^{-6}$ s
<i>max battery charge</i>	3000 mAh

Hay que considerar que en primera instancia todos los nodos tendrán un nivel de batería correspondiente a *max battery charge* y estas serán variadas de acuerdo a los requerimientos del escenario. Existen variables relativas al consumo del nodo que serán mencionadas más adelante en la Tabla 4.3 y la Tabla 4.2.

### 4.3. Funcionamiento general

Para las pruebas del funcionamiento general se considerará una red conformada por 3 nodos y una BS, y el escenario donde la red opera con todos los nodos en un perfil de consumo de energía más agresivo sin entrar al modo de ahorro de energía, el cual luego se mostrará en este capítulo. Cabe mencionar que en estas pruebas donde los nodos no entran a un modo de ahorro energético, el principal puntero utilizado es *global\_ptr*. En pruebas posteriores se mostrara el funcionamiento en conjunto de el puntero *global\_ptr* y el par  $p_{in} - p_{out}$  dentro de la función *Smart Schedule Time Function*.

#### 4.3.1. Ingreso del primer nodo a la red

La Figura 4.2 muestra el ingreso del primer nodo a la red y la interacciones que se producen entre la BS, y el nodo entrante.

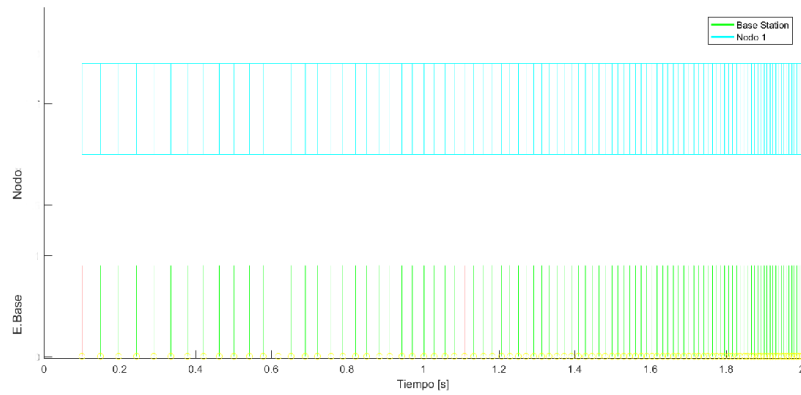


Figura 4.2: Ingreso del primer nodo a la red

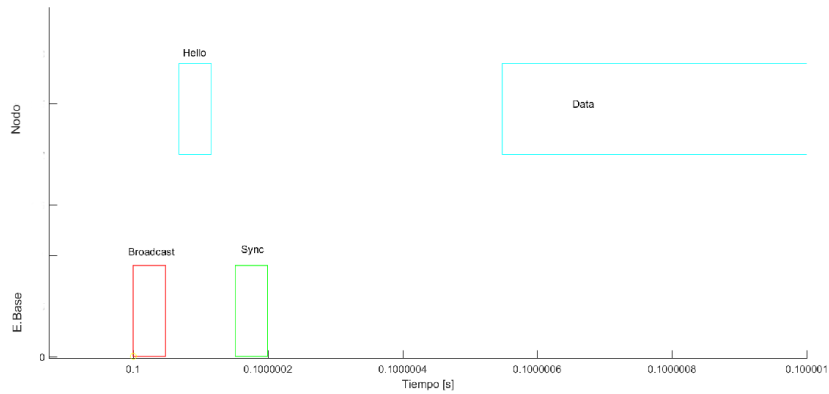


Figura 4.3: Detalle del paquete *hello* al ingreso del primer nodo a la red

Siguiendo el funcionamiento del protocolo VST-TDMA, la Figura 4.3 muestra como la BS envía la señal de *Broadcast* a la espera de encontrar un nodo que corresponda el *Broadcast* con la finalidad de transmitir información. Si es este el caso, el nodo responde con un paquete *Hello*, el cual es seguido de un paquete *Sync* por parte de la BS para iniciar la transmisión.

### 4.3.2. Ingreso del segundo nodo

Tal como indica la Figura 4.4 a los 2.1 s aproximados, el nodo 2 realiza su ingreso a la red. Tal como se realizó para el ingreso del primero nodo, el ingreso es indicado por el paquete *Hello* enviado desde la BS el cual es respondido por el nodo. Además, otro detalle interesante que se puede apreciar es la variación del tamaño de los paquetes enviados en los instantes anteriores al ingreso del nodo 2 y la recurrencia de los paquetes *Sync* enviados por la BS durante este mismo intervalo de tiempo.

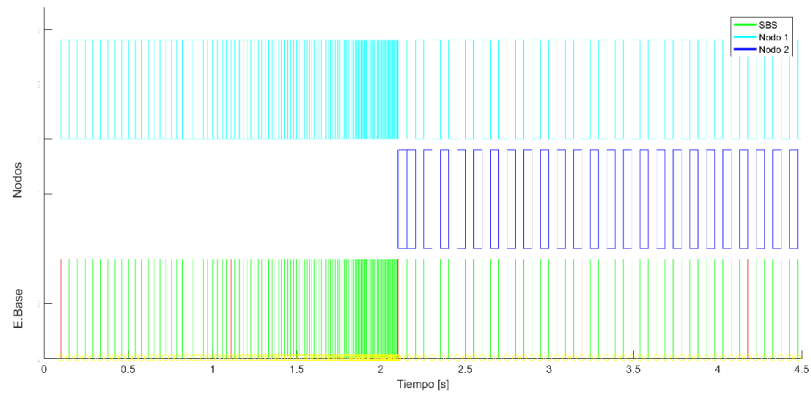


Figura 4.4: Ingreso del segundo nodo a la red

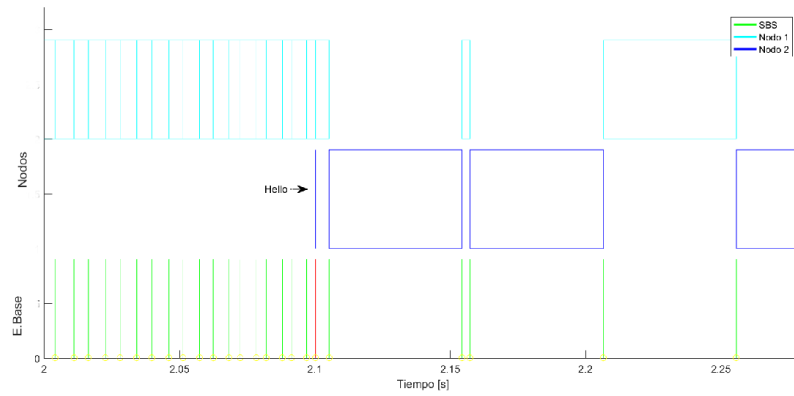


Figura 4.5: Detalle del ingreso al segundo nodo a la red

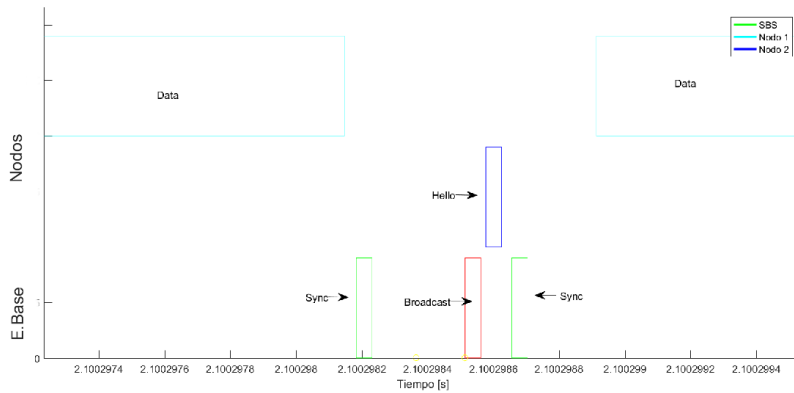


Figura 4.6: Detalle de los paquetes *broadcast-hello* al ingreso del segundo nodo a la red

### 4.3.3. Ingreso del tercer nodo

El ingreso del tercer nodo a la red se realiza de la misma manera que los nodos anteriores. El ingreso del nodo se realiza a los 5.16 s de iniciada la simulación y el envío de paquetes por parte del nodo 3 es programado después del envío de paquetes por parte del nodo 1.

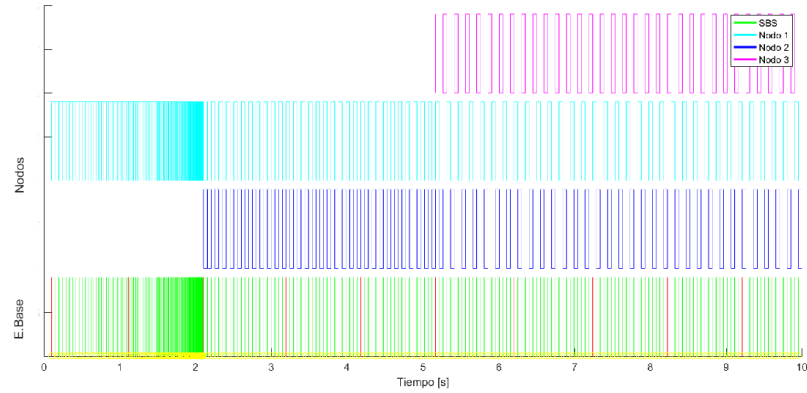


Figura 4.7: Ingreso del tercer nodo a la red

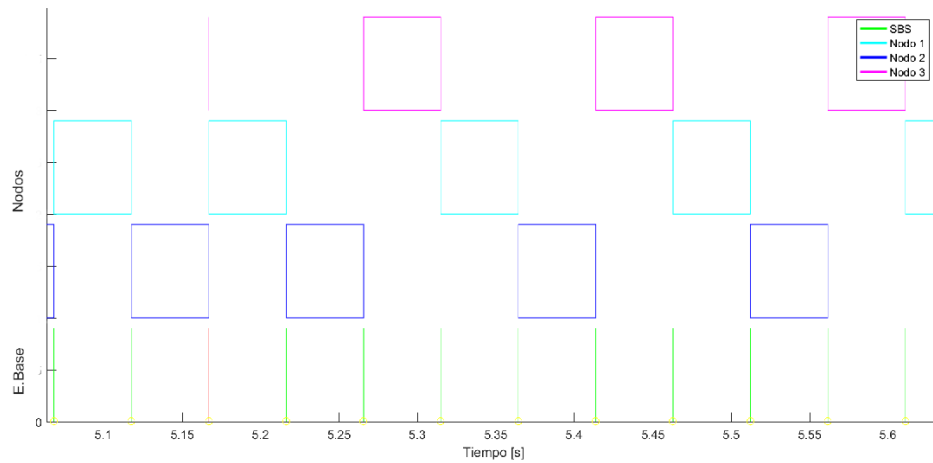


Figura 4.8: Ingreso del tercer nodo a la red

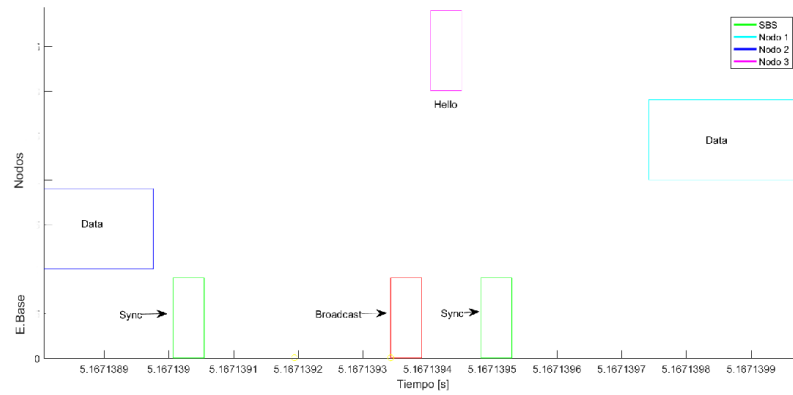


Figura 4.9: Detalle de ingreso del tercer nodo a la red

Tanto en la Figura 4.8 como en la Figura 4.9 se puede apreciar la entrada del nodo 3 a la red y como éste se posiciona entre el nodo 1 y nodo 2.

#### 4.4. Auto-sostenibilidad de la energía

En esta sección se tiene como objetivo ilustrar el comportamiento del envío de paquetes en el caso de que los nodos entren al modo de ahorro energético y alcancen la auto-sostenibilidad energética. Las pruebas tienen en consideración escenarios con múltiples nodos en la red con niveles de batería diferentes. Las variables del sistema y los consumos energéticos del nodo para sus distintos modos de operación se presentan en la Tabla 4.2 y la Tabla 4.3, respectivamente [27].

Tabla 4.2: Variables del sistema

Variable	Valor
Tensión del sistema	3 V
<i>Energy Harvesting Rate</i>	100-3000 $\mu\text{J/s}$
Capacidad de batería	3000 mAh

Tabla 4.3: Consumo de energía de nodo

Modo de operación	Corriente	Potencia
<i>Transmission</i>	3.3 mA	9.9 mW
<i>Reception</i>	3.1 mA	9.3 mW
<i>Listen</i>	1 mA	3 mW
<i>Sleep</i>	0.02 mA	0.03 mW

Primero se realiza una estimación de los tiempos de descanso para un nodo, Ecuación 2.5, con la variación de las potencias obtenidas mediante el EHD.



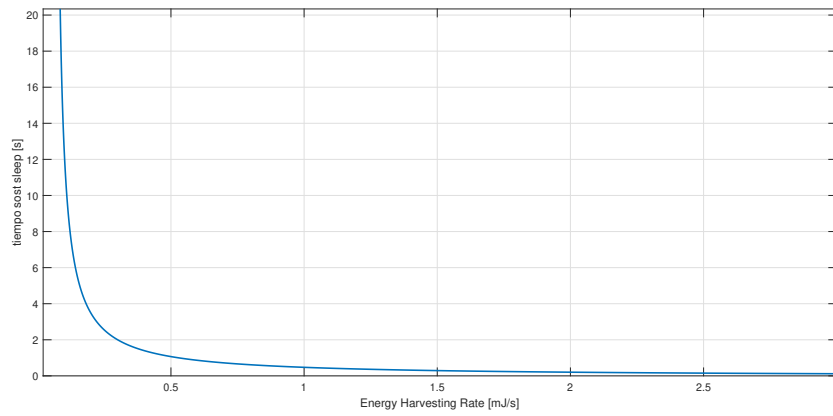


Figura 4.10: Tiempos de reposo necesarios para la auto-sostenibilidad para distintos valores de Energy Harvesting Rate

De la Figura 4.10 se desprende que a medida que la capacidad de recolección de energía por parte del EHD es mayor, se reducen los tiempos de reposos para lograr la condición de auto-sostenibilidad. En este caso para lograr un tiempo de reposo, inferior a 1 s, que cumpla con la condición de auto-sostenibilidad se requiere que el EHD suministre una potencia sobre los 0.528 mJ/s.

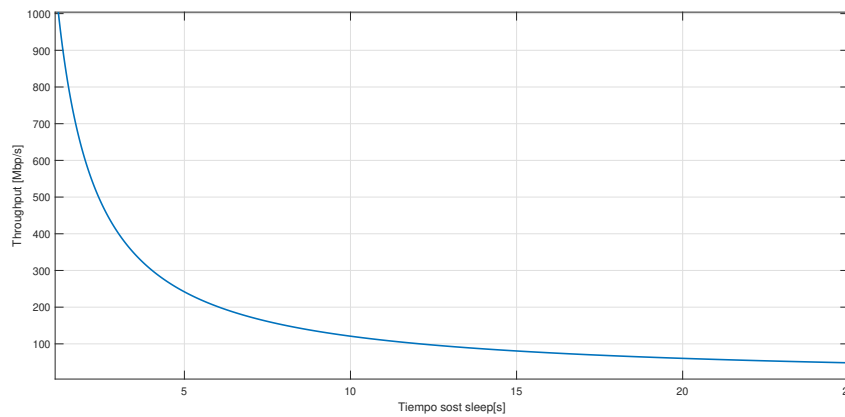


Figura 4.11: *Throughput* de acuerdo a tiempos de reposo con *Energy Harvesting Rate* de 0.1 mJ/s

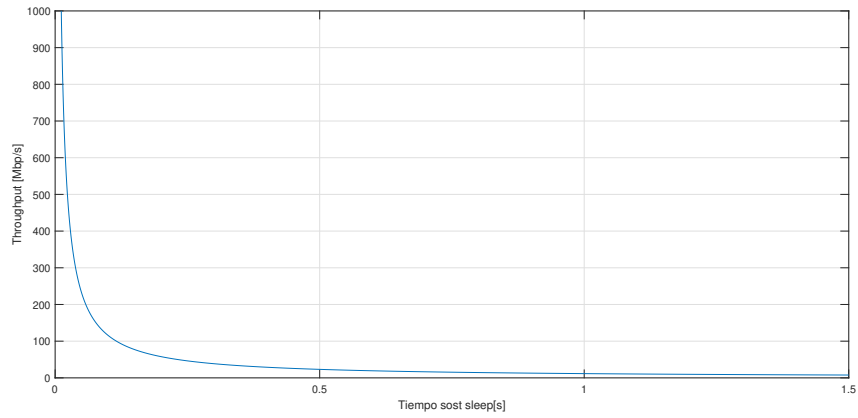


Figura 4.12: *Throughput* de acuerdo a tiempos de reposo con *Energy Harvesting Rate* de 3 mJ/s

#### 4.4.1. Funcionamiento modo ahorro de energía

Con el propósito de simular los procesos de descarga y carga de la batería y así ver de mejor forma la administración de la energía que tiene el protocolo, se ha incorporado un multiplicador de corriente en los módulos de los nodos. Durante esta sección y pruebas posteriores se utilizara el valor de *Energy Harvesting Rate* correspondiente a 0.1 mJ/s de manera predeterminada, a menos que se indique lo contrario.

En la Figura 4.13 se presenta un escenario con 3 nodos en la red que ingresan a la red con una nivel de carga de batería de 3000 mAh y están programados para entrar a modo ahorro energético cuando alcanzan un estado de carga asociado al 40 % de la *max battery charge*, valor que es aproximadamente 1200 mAh.

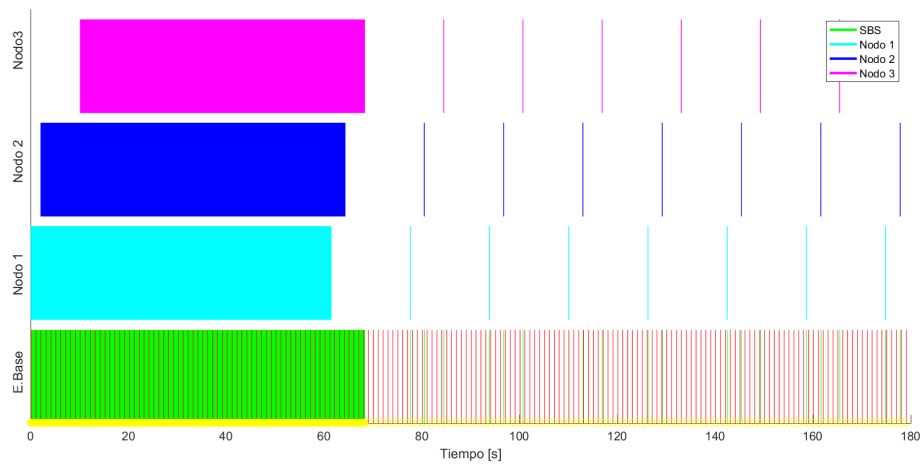


Figura 4.13: Escenario de 3 nodos conectados a la red con carga de batería *max battery charge*

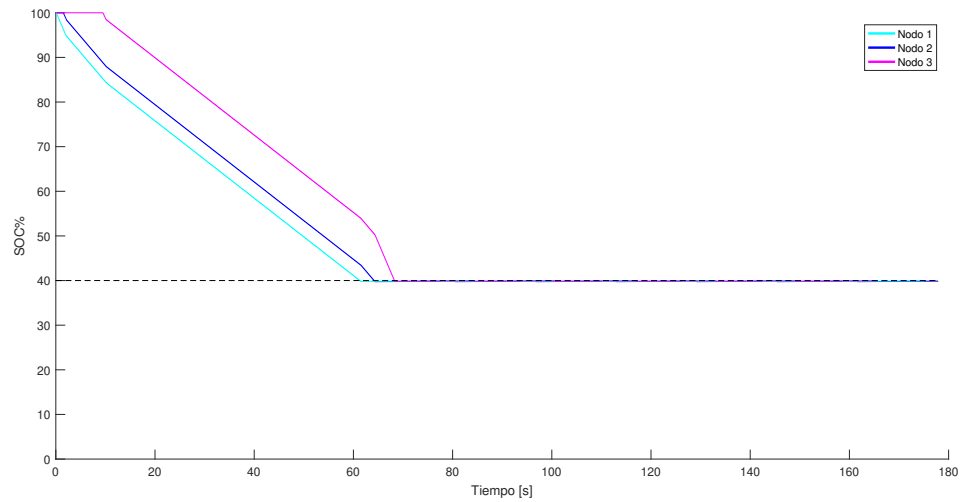


Figura 4.14: Indicadores de SOC de batería en escenario *max battery charge* con 3 nodos conectados a al red

Las Figuras 4.14 y 4.15 muestran los niveles indicadores de SOC para el escenario de 3 nodos con SOC inicial de 3000 mAh, correspondiente a la *max battery charge*. Alcanzados los 65 s, los nodos alcanzan el umbral designado,  $SOC_{min}$ .

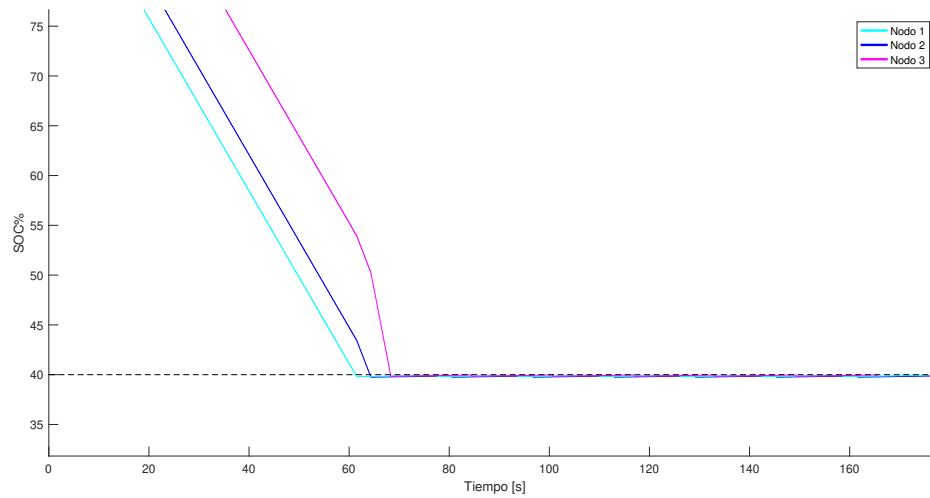


Figura 4.15: Detalle de Indicadores SOC de batería en escenario *max battery charge* con 3 nodos conectados a al red

#### 4.4.2. Escalabilidad

Si bien protocolo VST-TDMA 2.0 está diseñado para operar en redes de onda milimétrica donde es probable que no existan numerosos nodos en la red, se realizó una prueba de escalabilidad de la red para ver el comportamiento de estos y validar la función *Smart Schedule Time Function*, su capacidad de agendar nodos sin colisiones y la eficiencia del uso del canal en los 2 escenarios propuestos.

Una de las simulaciones realizadas para este escenario se puede apreciar en la Figura 4.16 donde se extiende a 10 el número de nodos en la red con distintos tiempos de ingreso. En particular en este escenario se considera que los nodos en la red empiezan sus operaciones con un nivel de batería de 3000 mAh, o bien, un SOC del 100 %.

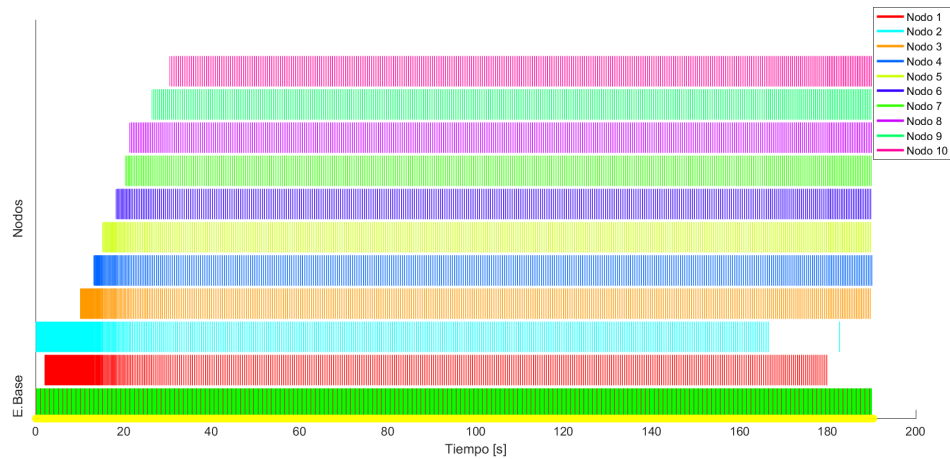


Figura 4.16: Escenario de 10 nodos conectados a la red con *max battery charge*

Uno de los atributos que la función *Smart Schedule Time Function* al protocolo VST-TDMA 2.0 es la capacidad de disponer del tiempo de manera óptima, como queda evidenciado en la Figura 4.17, donde se puede apreciar que los paquetes enviados por los nodos rompen continuidad al orden original de ingreso. Si se toma el ejemplo del nodo 2 que es el primero en iniciar transmisiones en la red, su próxima transmisión no es programada al término de las transmisiones de paquetes del nodo 10, sino que es programada para transmitir entre paquetes.

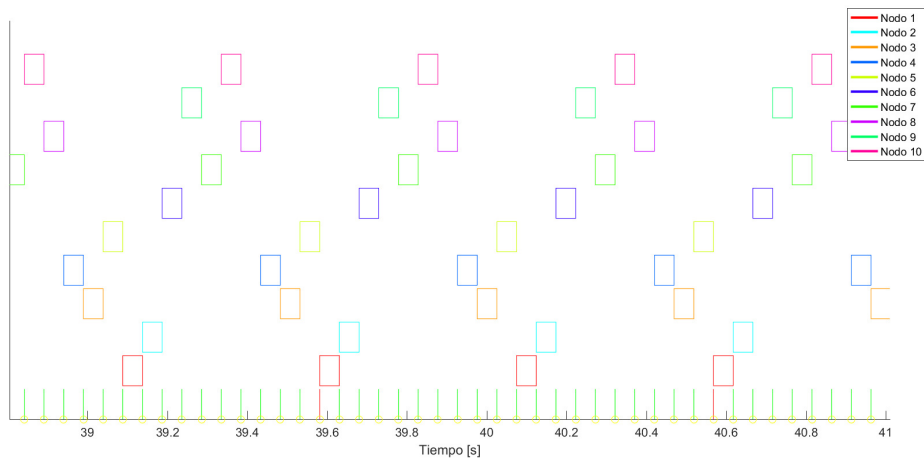


Figura 4.17: Escenario de 10 nodos conectados a la red con *max battery charge*

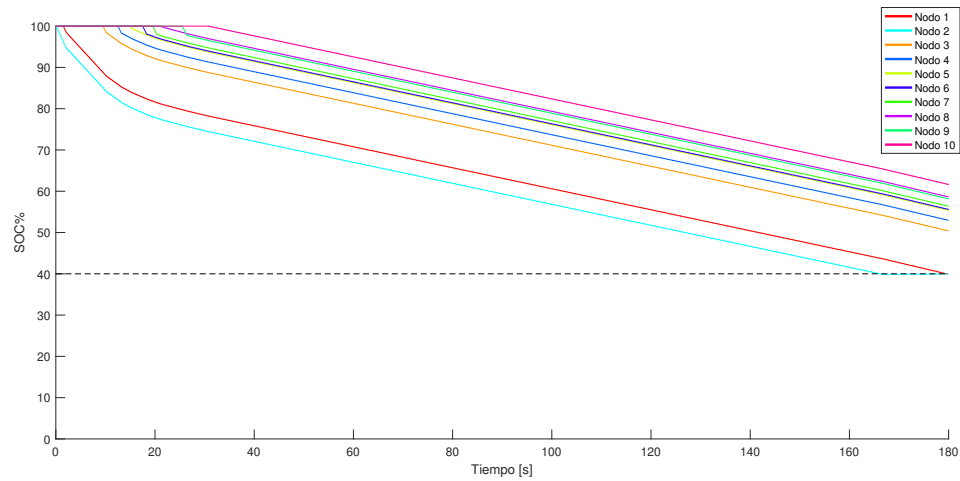


Figura 4.18: Indicadores de SOC batería de 10 nodos conectados a la red con *max battery charge*

Los indicadores de carga de la Figura 4.18 no difieren en demasía en el escenario visto anteriormente para 3 nodos. Alcanzado el 40 % de la *max battery charge*, estos entran en el modo de ahorro de energía donde su consumo de energía toma un perfil más conservador. Si, eventualmente, un nodo sobrepasa este umbral del 40 % el perfil de gasto energético se vuelve más agresivo.

Para la Figura 4.19 es considerado un escenario de 10 nodos con la diferencia que 2 de estos nodos, empiezan su funcionamiento con niveles de batería aproximados a los 2500 mAh y, adicionalmente, un nodo ingresa a la red con un nivel de batería de 1500 mAh. Un nivel de batería inicial diferente al máximo no incide directamente en el funcionamiento del protocolo VST-TDMA 2.0.

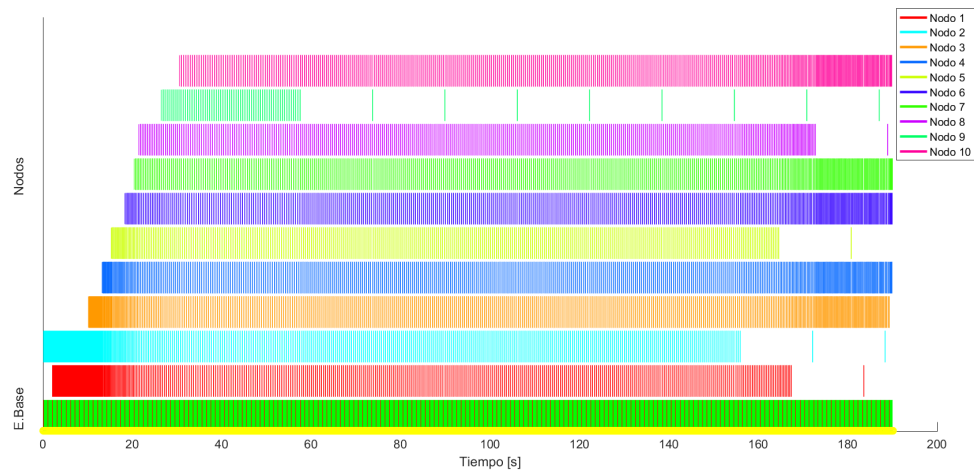


Figura 4.19: Funcionamiento de VST-TDMA 2.0 con 10 nodos en la red en modo de ahorro energético-3 nodos con SOC iniciales distintos

La Figura 4.20 se puede apreciar con mayor detalle de cuando el nodo 1, nodo 2, nodo 5, nodo 8 y nodo 9 ingresan al modo de ahorro energético y como se distribuyen los otros nodos

pertenecientes a la red.

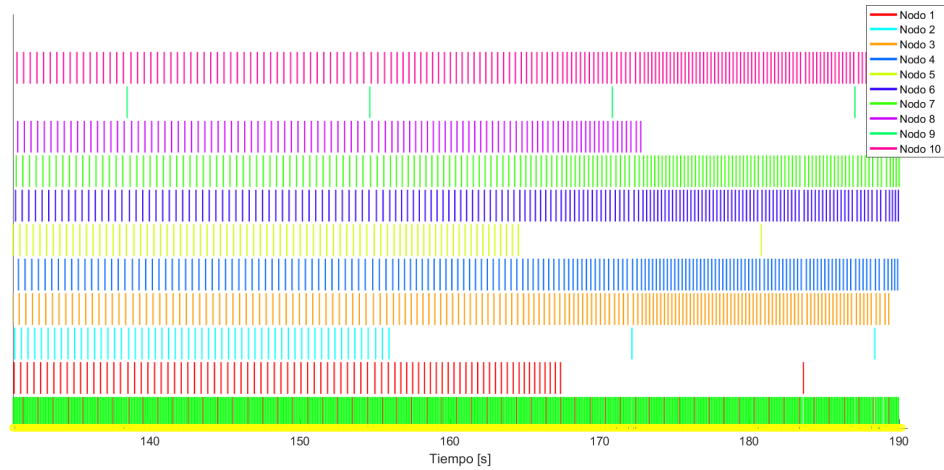


Figura 4.20: Detalle de funcionamiento de VST-TDMA 2.0 con 10 nodos en la red en modo de ahorro energético-3 nodos con SOC iniciales distintos

El ingreso al modo energético por parte del nodo 9 no condiciona a los demás nodos a hacer lo mismo. En la Figura 4.21 se puede apreciar el detalle del ingreso del nodo 9 al modo de ahorro energético. Aproximadamente a los 58 s, el nodo realiza su ultimo envío de paquetes en un perfil de gasto más agresivo. Los paquetes del nodo 6, nodo 7, nodo 10 son los paquetes que interaccionan de manera cercana al nodo 9. En particular, el paquete perteneciente al nodo 6 es agendado más cercano al paquete del nodo 7 ante la ausencia del nodo 9 en este ciclo de envíos.

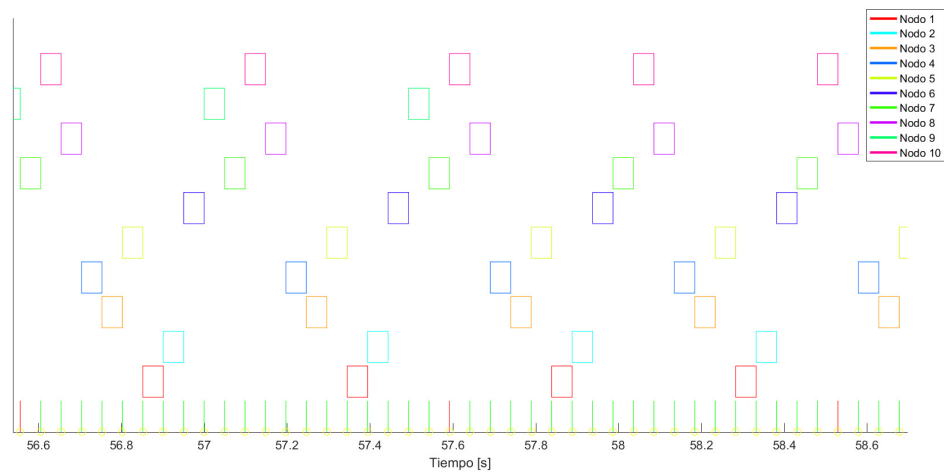


Figura 4.21: Detalle de funcionamiento de VST-TDMA 2.0 con 10 nodos en la red en modo de ahorro energético-3 nodos con SOC iniciales distintos

Los indicadores de SOC de la batería correspondientes a los 10 nodos conectados a la red, señalados en la Figura 4.22, muestra como los nodos alcanzan el criterio de auto-sostenibilidad.

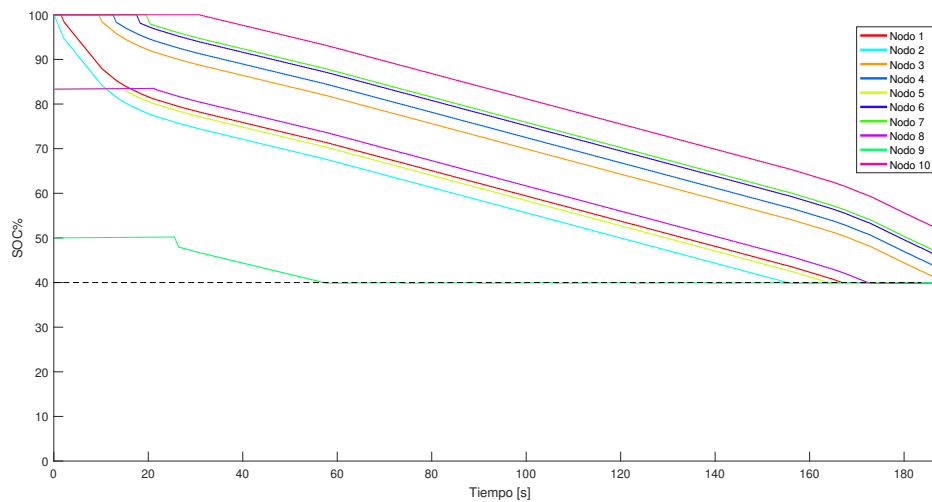


Figura 4.22: Indicadores de SOC batería de 10 nodos conectados a la red-3 nodos con SOC iniciales distintos

La Figura 4.23 muestra el detalle del nodo 2, nodo 5, nodo 1 y nodo 8 entrando al modo de auto-sostenibilidad.

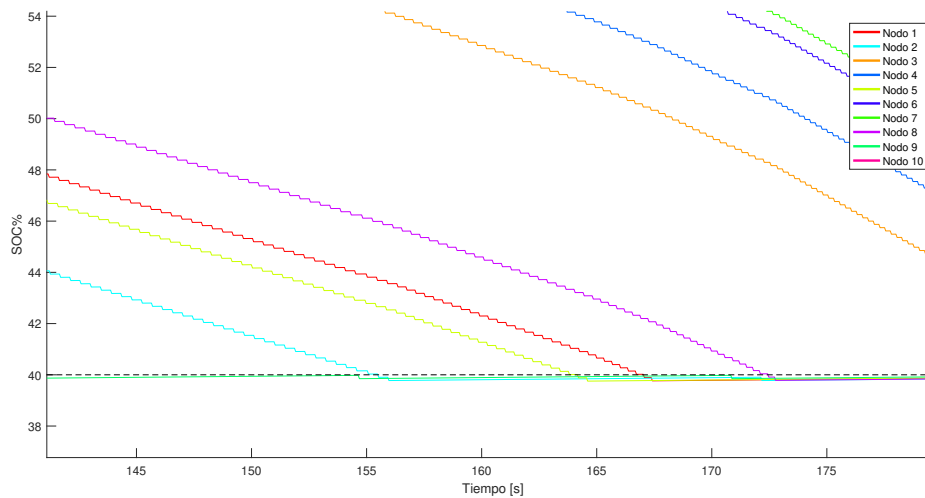


Figura 4.23: Detalle de indicadores de SOC batería de 10 nodos conectados a la red-3 nodos con SOC iniciales distintos

#### 4.4.2.1. Uso del canal

La Tabla 4.4, presentada a continuación, muestra los resultados obtenidos para los dos escenarios revisados con anterioridad. En ambos caso se obtiene un uso del canal por sobre el 99 % dando cuenta de la capacidad de VST-TDMA 2.0 de disponer del tiempo de manera óptima. Los escenarios considerados fueron llevados a cabo con simulaciones de 190 s, principalmente por el gasto computacional que implica un escenario con un gran número de nodos.

Tabla 4.4: Eficiencia del uso del canal para ambos escenarios de 10 nodos

Escenario	Tiempo ocupado [s]	Eficiencia uso del canal [%]
max battery charge	189.881851	99.9904
3 nodos con SOC iniciales distintos	189.635131	99.8605

### 4.4.3. Recuperación en un escenario más extenso

Para este escenario se han seleccionado 2 nodos para inicializar una configuración más pequeña de la red. En este escenario se inicializan los nodos 1 y 2 con niveles de batería de 3000 mAh y 1199 mAh, respectivamente. El *Energy Harvesting Rate* utilizado corresponde a 0.1 mJ/s. La Figura 4.24 muestra el comportamiento que tiene la batería en un escenario de simulación más extenso, en el que se puede apreciar que el nodo 2 logra una recuperación. Como referencia se tiene una línea punteada cercana al SOC de 38 %, adicional al umbral de auto-sostenibilidad. Cabe mencionar que este es un caso extremo en que uno de los nodos tiene un nivel de batería menor a lo establecido normalmente y no debiese ser la regla general. También se evidencia de que los niveles de  $SOC_{min}$  establecidos en la Figura 3.22 no son restrictivos y pueden alcanzar niveles bajo lo establecido.

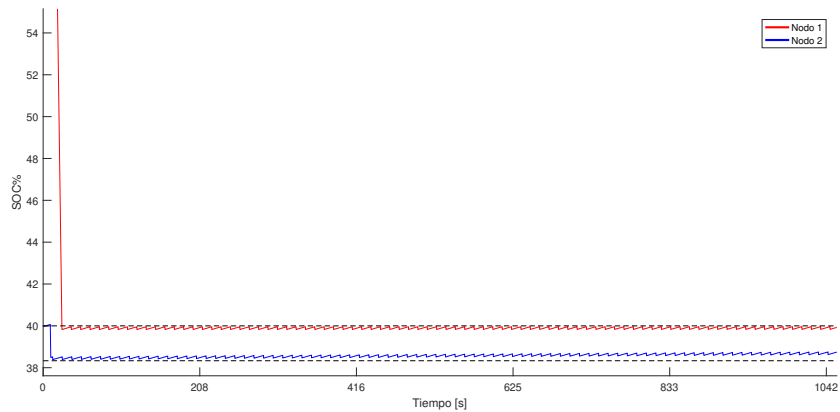


Figura 4.24: Detalle de SOC de batería mAh para escenario de 2 nodos en red en modo de ahorro energético-1 nodo con niveles cercanos a umbral

### 4.4.4. Ocupación del canal, tiempo de reposo y *throughput*.

Dentro de los parámetros para medir el desempeño de las mejoras al protocolo se puede considerar la ocupación del canal por parte de los nodos y el *throughput* en un intervalo de interés, la integración de los demás nodos en modo de ahorro energético y su interacción con la red. Además se puede considerar el *Energy Harvesting Rate* y su incidencia en el tiempo de reposo de los nodos, *time\_sleep*.

Específicamente para el área de interés, se pueden considerar dos escenarios:

1. Desde que un nodo ingresa a modo de ahorro energético y que finaliza cuando el otro nodo hace ingreso al modo de ahorro energético.
2. Desde el inicio hasta el fin de las transmisiones.



Por la naturaleza del protocolo VST-TDMA, que obliga los nodos que no requieren estar en modo de ahorro energético a que lo estén, no es posible determinar este intervalo de interés con claridad. Por tanto se realizaron las evaluaciones para el protocolo VST-TDMA 2.0 en el escenario en solitario y posteriormente, se evaluarán ambos protocolos en escenario de simulación más extenso. Las evaluaciones de protocolo VST-TDMA 2.0 estarán enfocadas en la utilización del canal de manera óptima con el propósito de validar la función *Smart Schedule Time Function* implementada. Para la evaluación del uso del canal se proponen simulaciones de 250 s que contemplan los casos en que existen 2 nodos en la red, o bien, 3 nodos.

A continuación se abordará el escenario donde el área de interés es el intervalo entre las entradas a modo de ahorro energético de los nodos.

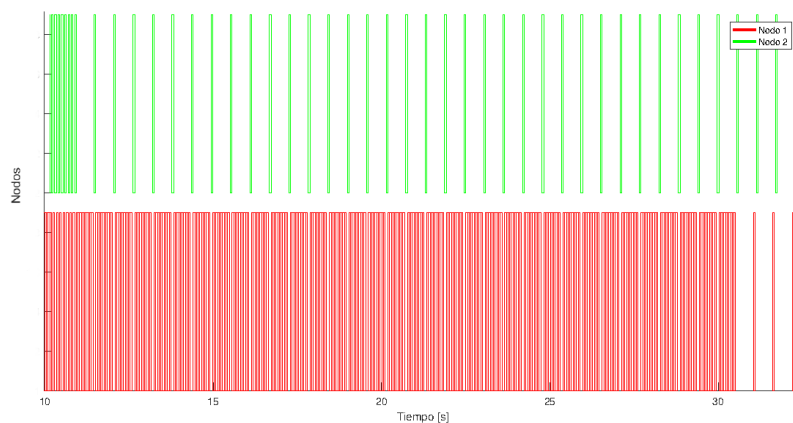


Figura 4.25: Área de interés-VST-TDMA 2.0 con Energy Harvesting Rate de 1 mJ/s

En la Figura 4.25 se presenta el detalle de la simulación del protocolo VST-TDMA 2.0 correspondiente al caso de 2 nodos, donde el nodo 1 hace su entrada a la red con un nivel de carga de 3000 mAh, y el nodo 2 que ingresa a la red con un nivel de carga de 1200 mAh. A los 10.15 s se produce la entrada del nodo 2 y a los 10.95 s aproximadamente, este ingresa al modo de ahorro de energía. A partir de ese punto, se considera el área de interés a evaluar hasta que el nodo 1 ingrese al modo de ahorro energético. Se puede apreciar se programa transmisiones del nodo 1 en los tiempos de reposo del nodo 2 y como logra compactar más paquetes por unidad de tiempo.

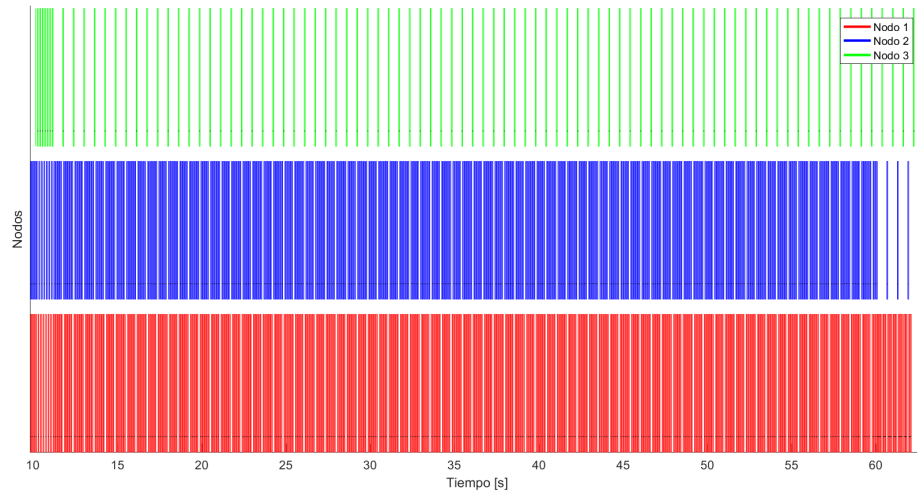


Figura 4.26: VST-TDMA 2.0 con Energy Harvesting Rate de 1 mJ/s

La Figura 4.26 aborda el escenario de 3 nodos conectados a la red; por un lado los nodos 1 y 2 hacen ingreso a la red con un nivel de carga de 3000 mAh y el nodo 3 ingresa con un nivel de carga de 1200 mAh. Al igual que el caso de la Figura 4.26, el nodo 3 hace su ingreso a los, aproximadamente, 10.15 s y su ingreso al modo de ahorro energía se produce a los 10.54 s. En la Figura 4.27 se puede apreciar de mejor manera como el protocolo VST-TDMA 2.0 compacta la programación de paquetes del nodo 1, una vez que el nodo 2 inicia el modo de ahorro energético a los 60.1 s, para hacer un buen uso del canal en los *slots* libres.

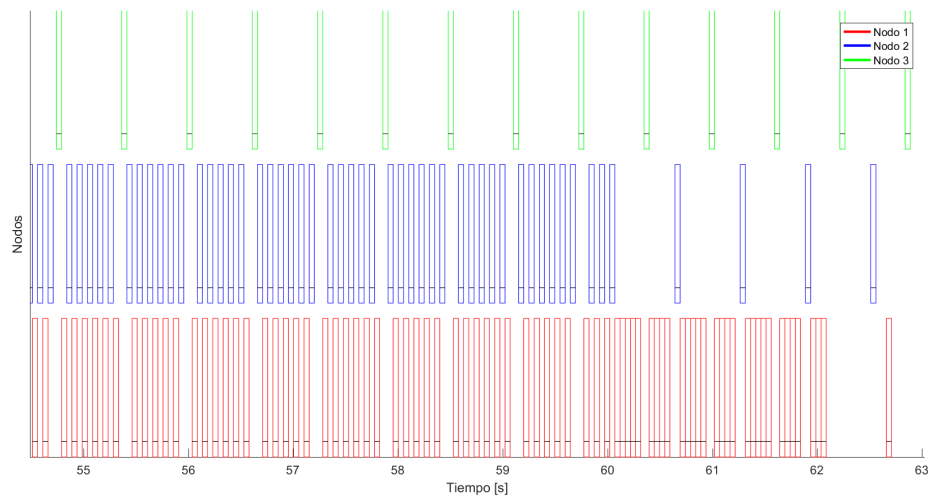


Figura 4.27: Detalle de la zona de interés-VST-TDMA 2.0 con Energy Harvesting Rate de 1 mJ/s

Tabla 4.5: Tabla de resultados de área de interés de 2 nodos con VST-TDMA 2.0

Opt. 2 nodos		N.1- 3000mAh		N.2 -1200 mAh	
EHR	Canal	$\overline{T.rep}$	$\overline{Thr}$	$\overline{T.rep}$	$\overline{Thr}$
[mJ/s]	[%]	[s]	[Mbit/s]	[s]	[Mbit/s]
3	99.1091	0.034	49.276	0.0962	49.227
2.5	98.8796	0.1002	49.254	0.1229	49.121
2	85.0165	0.1576	49.222	0.2255	48.863
1.5	88.8169	0.2288	49.209	0.4377	48.165
1	93.9635	0.2734	49.194	0.6988	47.19
0.1	99.5587	0.4415	49.17	11.4286	24.56

Tabla 4.6: Tabla de resultados de área de interés de 3 nodos con VST-TDMA 2.0

Opt. 3 nodos		N.1- 3000 mAh		N.2 -3000 mAh		N.3-1200 mAh	
EHR	Canal	$\overline{T.rep}$	$\overline{Thr}$	$\overline{T.rep}$	$\overline{Thr}$	$\overline{T.rep}$	$\overline{Thr}$
[mJ/s]	[%]	[s]	[Mbit/s]	[s]	[Mbit/s]	[s]	[Mbit/s]
3	91.1245	0.1071	49.311	0.0999	46.87	0.1103	49.311
2.5	98.7238	0.1008	49.312	0.0961	46.94	0.1516	49.303
2	92.3222	0.1644	49.261	0.1537	42.813	0.2736	49.116
1.5	87.1161	0.2312	49.241	0.2117	41.195	0.4912	48.885
1	93.5869	0.2765	49.231	0.2495	40.325	0.7385	48.518
0.1	99.5949	0.4592	49.212	0.3883	38.604	13.1262	32.832

Las Tabla 4.5 y la Tabla 4.6 contienen los resultados obtenidos para el área de interés del protocolo VST-TDMA 2.0 para 2 nodos y 3 nodos, respectivamente. En ambos escenarios, la eficiencia del uso del canal se encuentra en un rango de 85.0165 % – 99.5587%. Exceptuando los tiempos de reposo y *throughput* de los casos cuando el Energy Harvesting Rate es de 0.1 mJ/s para los nodos con batería inicial de 1200 mAh, estos se mantienen dentro de un cierto rango.

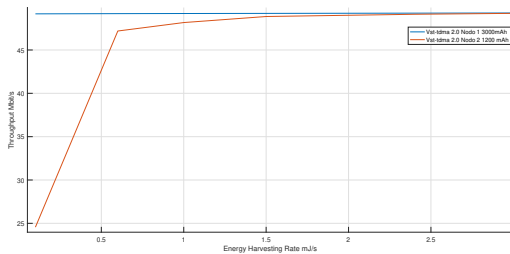


Figura 4.28: *Throughput* respecto a Energy Harvesting Rate para 2 nodos usando VST-TDMA 2.0

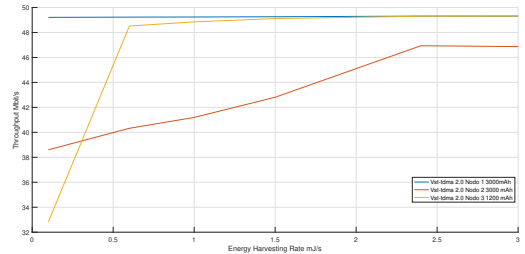


Figura 4.29: *Throughput* respecto a Energy Harvesting Rate para 3 nodos usando VST-TDMA 2.0

La Figura 4.28 muestra como para el caso 2 nodos en el área de interés, el nodo 1 mantiene un *throughput* relativamente constante para distintos valores de Energy Harvesting Rate. Para la Figura 4.29 donde se evalúa el escenario con 3 nodos. El nodo 1, al igual que el escenario de 2 nodos, mantiene un *throughput* constante, el nodo 3 tiene un comportamiento similar a su contraparte del escenario anterior, alcanzando valores similares al nodo 1 desde los 1.5 mJ/s en adelante. El nodo 2, que cuenta con la misma energía inicial del nodo 1, tiene un *throughput* que alcanza los 46.94 Mbit/s como valor máximo.

A continuación se comparara el desempeño del protocolo VST-TDMA 2.0 con el protocolo VST-TDMA tradicional. Como se menciono anteriormente, las pruebas a realizar serán considerando una área de interés que abarca desde el inicio de las transmisiones de la red hasta el fin de la simulación. Al igual que en los casos anteriores, existen los escenarios de 2 y 3 nodos con distintas niveles de batería inicial. Primero se revisará el escenario para 2 nodos y luego el de 3 nodos, tanto para el protocolo VST-TDMA 2.0 y VST-TDMA tradicional.

En la Figura 4.30, los nodos 1 y 2, cuentan con un nivel de batería inicial de 3000 mAh y 1200 mAh, respectivamente.

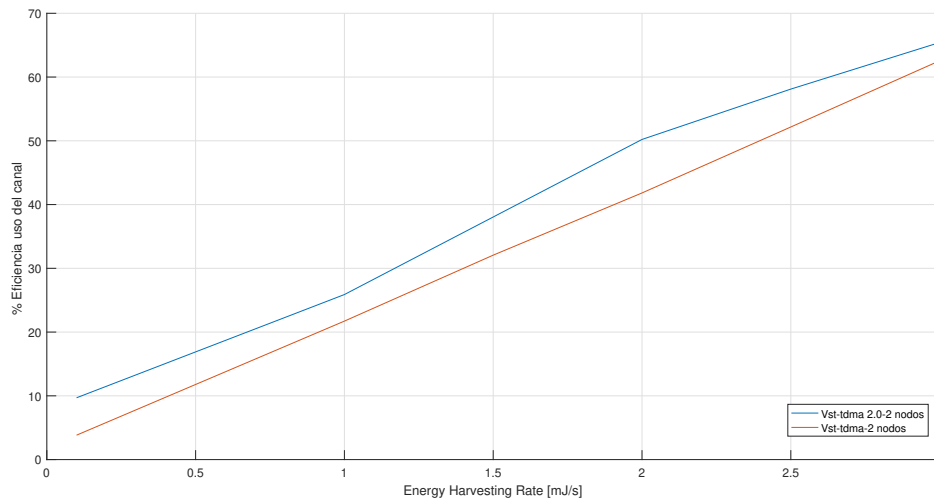


Figura 4.30: Uso del canal para escenario de 2 nodos

Como es posible apreciar en la Figura 4.30, el protocolo VST-TDMA 2.0 tiene una diferencia del uso del canal por sobre el protocolo VST-TDMA tradicional para distintos *Energy Harvesting Rate*. Ambos protocolos tienen comportamientos similares en cuanto a la variación del Energy Harvesting Rate teniendo variaciones en el rango de, aproximadamente, 3-8%, de acuerdo a los resultados obtenidos en las Tablas, Tabla 4.7 y Tabla 4.8.

Esta diferencia se produce debido a que el protocolo VST-TDMA tradicional, como se ve en la Figura 4.32, al momento de que el nodo 2 ingresa a modo de ahorro energético obliga al nodo 1 a seguir el mismo comportamiento, a diferencia de lo que se ve en la Figura 4.31 donde el nodo 1 se adapta a la entrada a modo de ahorro energético del nodo 2; logrando utilizar tiempo adicional del canal.

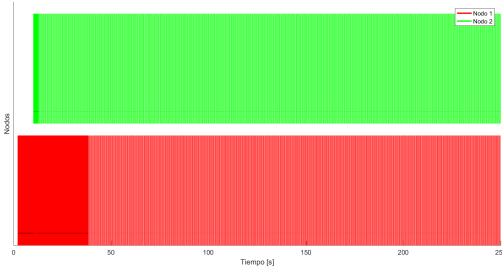


Figura 4.31: VST-TDMA 2.0 con *Energy Harvesting Rate* de 1.5 mJ/s

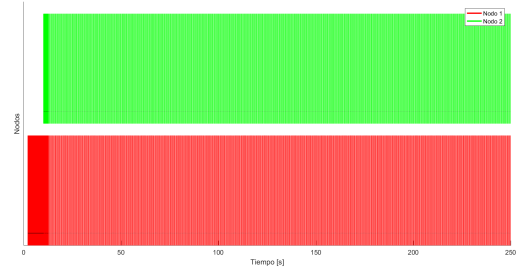


Figura 4.32: VST-TDMA tradicional con *Energy Harvesting Rate* de 1.5 mJ/s

Tabla 4.7: Tabla de simulación de 2 nodos con VST-TDMA tradicional

Trad. 2 nodos		N.1- 3000 mAh		N.2 -1200 mAh	
EHR	<i>Canal</i>	$\overline{T.rep}$	$\overline{Thr}$	$\overline{T.rep}$	$\overline{Thr}$
[mJ/s]	[%]	[s]	[Mbit/s]	[s]	[Mbit/s]
3	62.5536	0.0994	49.3143	0.1103	49.31108
2.5	52.1675	0.1273	49.3087	0.1441	49.3041
2	41.8209	0.1678	49.3006	0.196	49.2934
1.5	32.0664	0.2278	49.2887	0.2793	49.2763
1	21.7199	0.3427	49.2657	0.4628	49.2384
0.1	3.8305	1.2951	49.0688	15.4551	46.2484

Tabla 4.8: Tabla de simulación de 2 nodos con VST-TDMA optimizado

Opt. 2 nodos		N.1- 3000mAh		N.2 -1200 mAh	
EHR	<i>Canal</i>	$\overline{T.rep}$	$\overline{Thr}$	$\overline{T.rep}$	$\overline{Thr}$
[mJ/s]	[%]	[s]	[Mbit/s]	[s]	[Mbit/s]
3	65.4167	0.0813	49.3178	0.119	49.3093
2.5	58.1109	0.0961	49.3149	0.1441	49.3041
2	50.2127	0.1154	49.3111	0.1815	49.2964
1.5	38.0495	0.1576	49.3026	0.2791	49.2762
1	25.8862	0.2288	49.2884	0.5199	49.2266
0.1	9.6949	0.4415	49.2401	15.8407	46.248

De manera más detallada, los resultados del escenario de simulación de 2 nodos usando VST-TDMA 2.0 presentado en la Tabla 4.8 contrastando con los resultados obtenidos en el escenario de VST-TDMA tradicional, presentados en la Tabla 4.7 dan cuenta de la reducción del tiempo de reposo de los nodos. Respecto a los nodos 1 en ambos casos, para una *Energy Harvesting Rate* de 0.1 mJ/s donde el tiempo de reposo se supone mayor, en el caso de VST-TDMA 2.0 es de 0.4415 s, en el caso de VST-TDMA tradicional este valor es el triple del tiempo de reposo del protocolo optimizado.

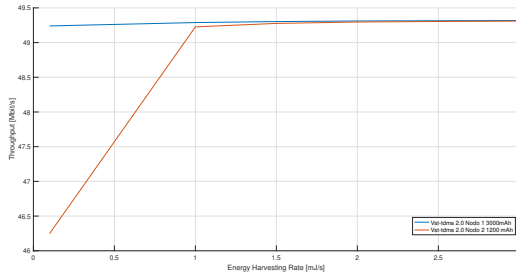


Figura 4.33: *Throughput* respecto a *Energy Harvesting Rate* para 2 nodos usando VST-TDMA 2.0

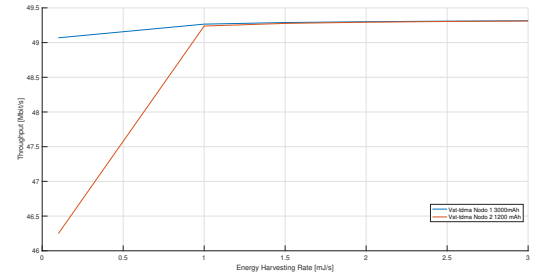


Figura 4.34: *Throughput* respecto a *Energy Harvesting Rate* para 2 nodos usando VST-TDMA tradicional

Respecto al *throughput*, en la Figura 4.33 se puede apreciar que para el nodo 1 el *throughput* se mantiene relativamente constante para todos los escenarios de *Energy Harvesting Rate* variable. En cambio el nodo 2, al estar en modo de ahorro energético, si bien presenta un *throughput* inferior para *Energy Harvesting Rate* de 0.1 mJ/s, luego para otros valores de *Energy Harvesting Rate* tiene un *throughput* similar al nodo 1. Si se analiza el otro caso donde se evalúa el desempeño de VST-TDMA tradicional presentado en la Figura 4.34, se puede apreciar que las 2 curvas correspondientes al *throughput* respecto a un *Energy Harvesting Rate* variable tienen un comportamiento similar a las de la Figura 4.33.

De manera análoga se realizó la evaluación del uso del canal para el caso de 3 nodos, presentado en la Figura 4.35. En esta ocasión se utilizaron 3 nodos con 3000 mAh, 3000 mAh, 1200 mAh. La diferencia del uso del canal de VST-TDMA 2.0 por sobre VST-TDMA se incrementa respecto a la Figura 4.30. De acuerdo a la Tabla 4.9 y la Tabla 4.10, para *Energy Harvesting Rate* de 2 mJ/s existe una diferencia porcentual de 21.4969 % y el promedio esta en torno al 15.9483 %. Por otro lado VST-TDMA tradicional alcanza niveles más cercanos al del protocolo optimizado cuando la *Energy Harvesting Rate* es cercano a 3 mJ/s, con una diferencia porcentual del 4.8317 %.

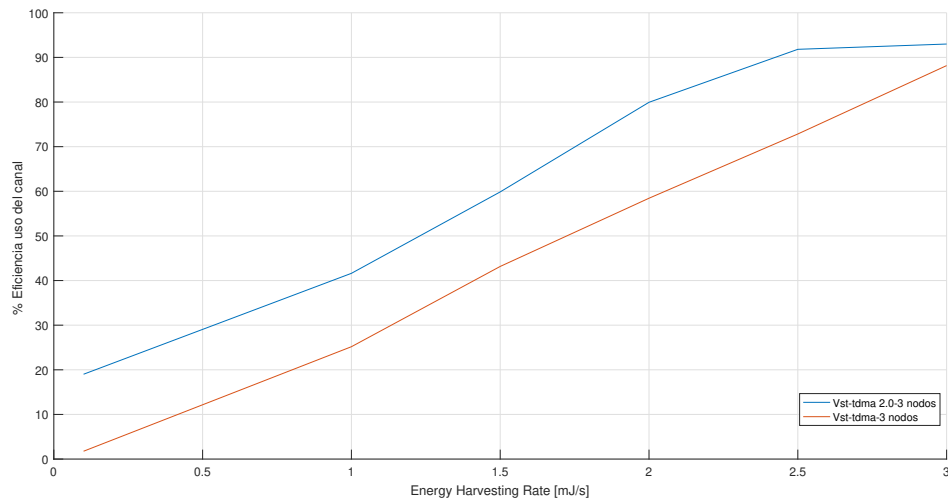


Figura 4.35: Eficiencia del uso del canal para escenario de 3 nodos

La Figura 4.37 y la Figura 4.36 muestran el escenario de 3 nodos con un Energy Harvesting Rate de 1.5 mJ/s para VST-TDMA 2.0 y VST-TDMA tradicional, respectivamente.

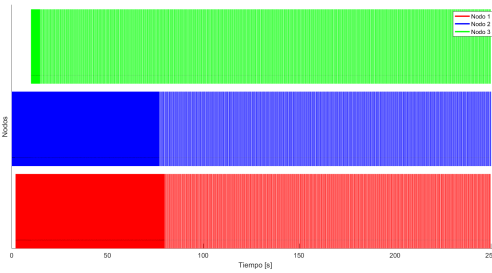


Figura 4.36: VST-TDMA 2.0 con Energy Harvesting Rate de 1.5 mJ/s

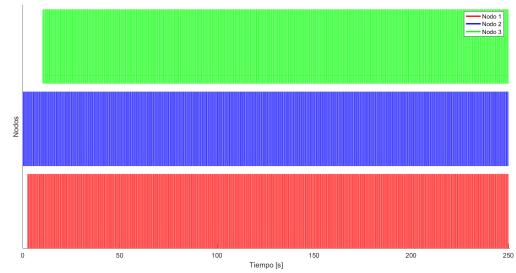


Figura 4.37: VST-TDMA tradicional con Energy Harvesting Rate de 1.5 mJ/s

Tabla 4.9: Tabla de simulación de 3 nodos con VST-TDMA tradicional

Trad. 3 nodos		N.1- 3000 mAh		N.2 -3000 mAh		N.3-1200 mAh	
EHR	Canal	$\bar{T}.rep$	$\bar{Thr}$	$\bar{T}.rep$	$\bar{Thr}$	$\bar{T}.rep$	$\bar{Thr}$
[mJ/s]	[ %]	[s]	[Mbit/s]	[s]	[Mbit/s]	[s]	[Mbit/s]
3	88.1635	0.1158	49.311	0.1157	49.3113	0.1158	49.31
2.5	72.841	0.1505	49.304	0.1503	49.3044	0.1505	49.3027
2	58.4465	0.1997	49.2942	0.1994	49.2947	0.1997	49.2936
1.5	43.1635	0.2789	49.2766	0.2873	49.2773	0.2879	49.2743
1	25.1753	0.5288	49.2285	0.5272	49.23	0.5288	49.2246
0.1	1.7571	7.7766	47.7461	7.7794	47.796	8.0448	47.6359

Tabla 4.10: Tabla de simulación de 3 nodos con VST-TDMA 2.0

Opti. 3 nodos		N.1- 3000 mAh		N.2 -3000 mAh		N.3-1200 mAh	
EHR	Canal	$\overline{T.rep}$	$\overline{Thr}$	$\overline{T.rep}$	$\overline{Thr}$	$\overline{T.rep}$	$\overline{Thr}$
[mJ/s]	[%]	[s]	[Mbit/s]	[s]	[Mbit/s]	[s]	[Mbit/s]
3	92.9952	0.1071	49.3127	0.0999	47.1568	0.1103	49.311
2.5	91.8104	0.0968	49.3148	0.0924	47.2681	0.1442	49.303
2	79.9434	0.1162	49.3109	0.1103	47.0054	0.1815	49.2963
1.5	59.8622	0.1644	49.3013	0.1537	46.3688	0.2936	49.2732
1	41.6173	0.2412	49.2859	0.2203	45.3951	0.5649	49.2117
0.1	19.0087	0.4592	49.2384	0.3883	42.648	15.8418	46.2482

En la Figura 4.38, correspondiente al *throughput* respecto al Energy Harvesting Rate del protocolo VST-TDMA, el nodo 1 y nodo 3 tienen un comportamiento similar al escenario presentado en la Figura 4.33. La entrada del nodo 2 a la red con un nivel de batería de 3000 mAh sugiere un cierto *trade-off* entre el *throughput* y el número de nodos en la red.

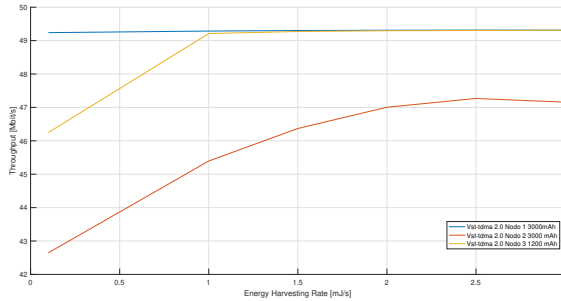


Figura 4.38: *Throughput* respecto a EHR para 3 nodos usando VST-TDMA 2.0

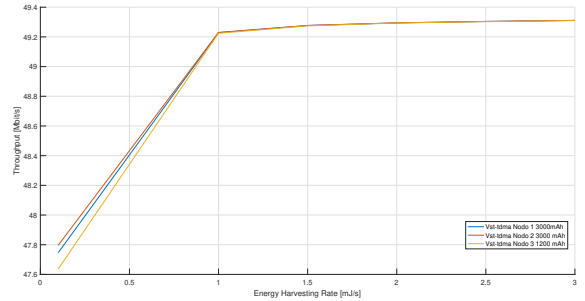


Figura 4.39: *Throughput* respecto a EHR para 3 nodos usando VST-TDMA tradicional

Por otro lado, el escenario correspondiente al protocolo VST-TDMA tradicional mostrado en la Figura 4.39 da cuenta de un comportamiento similar de los nodos 1 y 3 en cuanto a los niveles alcanzados de *throughput* para los mismos valores de Energy Harvesting Rate. En contraste a la Figura 4.38, el nodo 2 con un nivel de batería de 3000 mAh cuenta con un desempeño similar en cuanto a *throughput* en comparación a los nodos 1 y 3.

## 4.5. Discusión de resultados

En la sección 4.2, *Caso de estudio y configuración principal*, se presentan los valores propuestos de las configuraciones que se utilizan durante las simulaciones.

La sección *Funcionamiento general* 4.3 consta de tres subsecciones: *Ingreso primer nodo* 4.3.1, *Ingreso segundo nodo* 4.3.2 y *Ingreso tercer nodo* 4.3.3. En las subsecciones se muestra el funcionamiento general del protocolo, enfocado en la interacción de los nodos y la estación



base por medio de los paquetes *broadcast*, *hello* y *sync*.

La sección 4.4, *Auto-sostenibilidad de la energía*, se divide en cuatro subsecciones y se definen las variables relativas al sistema y el consumo de energía de cada nodo. Luego se realiza una estimación de los tiempos de reposo necesarios para alcanzar la auto-sostenibilidad; específicamente para valores de reposo inferiores a 1 s, se debe cumplir que el EHD entregue una potencia por sobre los 0.528 mJ/s. También se realiza una estimación de los *throughput* con tiempos de reposo variable para los valor mínimo y máximo de *Energy Harvesting Rate*.

Para la subsección 4.4.1, *Funcionamiento modo ahorro de energía*, se simulan los proceso de carga y descarga en un escenario conformado por 3 nodos fijos, los cuales empiezan la simulación con niveles de batería correspondientes a los máximos. Los indicadores de *SOC*, presentados en las Figura 4.14 y la Figura 4.15, dan cuenta de proceso de descarga de la batería y como, al llegar al umbral  $SOC_{min}$  establecido alcanza la condición de auto-sostenibilidad.

La subsección 4.4.2, Escalabilidad, se enfoca principalmente en validar el protocolo VST-TDMA 2.0 en escenarios de 10 nodos fijos. Se concentra en la capacidad del protocolo a adaptarse a un gran numero de nodos fijos y la eficiencia del uso del canal para 2 escenario: SOC iniciales correspondiente a *max battery charge* y otro escenario donde 3 nodos cuentan con SOC iniciales distintos. Los resultados obtenidos para la eficiencia del uso del canal superan el 99 %.

La subsección 4.4.3 aborda principalmente el escenario de recuperación y de convergencia de un nodo hacia la auto-sostenibilidad. En un escenario de 2 nodos que cuentan con niveles de energía en 2 extremos opuestos; que por un lado se tiene un valor inferior al umbral definido y otro nodo cuenta con la energía máxima de la batería. El nodo 2 alcanza valores cercanos al 38 % de *SOC* y, posteriormente, comienza su recuperación hacia el nivel  $SOC_{min}$ .

Finalmente, la subsección 4.4.4 aborda múltiples escenarios de 3 nodos fijos con valores de *Energy Harvesting Rate* variables. Se realizan pruebas para evaluar la eficiencia de uso del canal, *throughput* y tiempo de reposo promedio entre VST-TDMA tradicional y VST-TDMA 2.0. Se dividen las pruebas en 2 partes, siendo una enfocada en un intervalo de interés, iniciada por la entrada a modo de ahorro energético de un nodo y finalizada por la entrada al modo de ahorro energético del o los nodos restante. Debido a que no se logró establecer con claridad este intervalo de interés en las pruebas de protocolo VST-TDMA tradicional, se realizo exclusivamente para el protocolo VST-TDMA 2.0; con el propósito de ilustrar como se adapta el nodo a la entrada al modo energético de otro nodo sin sacrificar su rendimiento. Obteniéndose valores sobre el 87.1161 % de eficiencia de uso del canal para VST-TDMA 2.0 en para el escenario de 3 nodos, y valores de eficiencia de uso de canal sobre el 85.0165 % para un escenario de 2 nodos. El área de interés elegida entre la entrada de los nodos al modo de ahorro energético representa los intervalos en los que se desea optimizar el uso del canal mediante la función *Smart Schedule Time Function*. La eficiencia del uso del canal varia en un rango de 85 – 99.1091 %.

# Capítulo 5

## Conclusiones y trabajo futuro

### 5.1. Conclusiones

El trabajo realizado en la presente memoria da como resultado una propuesta para optimizar el tiempo del uso del canal en redes de ondas milimétricas. Aprovechando la configuración de la red, basada en nodos y una estación central, fue posible configurar un *set* de reglas que mejora la interacción de los múltiples nodos que pueden entrar a la red.

A través de la función propuesta, *Smart Schedule Time Function*, se logra implementar mejoras al protocolo VST-TDMA manteniendo la evitación de las colisiones y pérdidas de paquetes mediante un sistema de programación que utiliza distintos punteros *global\_ptr* o el par  $p_{in} - p_{out}$ .

El uso de estos punteros, dependiendo de los modos de operación, le confiere flexibilidad a la hora de programar los nodos y se antepone a los posibles casos de colisión, evaluados por funciones implementadas, tanto para los paquetes de información como para los *Broadcast*. Asimismo, se incluye un modo de ahorro de energía, determinado por un umbral correspondiente al 40 % del SOC que realiza el ajuste de tiempo de descanso, *time sleep*, que luego es incluido en el agendamiento de los nodos mediante la función *Smart Schedule Time Function*. Este tiempo de reposo se deriva a partir de las corrientes utilizadas por el sistema y el estado de carga de la batería, SOC.

A partir de las pruebas realizadas en OPNET fue posible validar el desempeño de las mejoras propuestas en distintos escenarios de prueba, donde se mostró la capacidad por parte de los nodos de alcanzar la auto-sostenibilidad de acuerdo a un umbral variable, la recuperación de batería por parte de los nodos y la escalabilidad del número de nodos presentes en la red.

Además se comprueba la capacidad que tiene la optimización al protocolo VST-TDMA 2.0 en cuanto a la ocupación del canal cuando uno de los nodos ha alcanzado el modo de ahorro energético, alcanzando valores sobre los 85.0165 % para el escenario de 2 nodos y sobre el 87.1161 % para el escenario de 3 nodos en un intervalo de interés y demostrando la gran adaptabilidad que tiene para agendar entre nodos.

## 5.2. Trabajo Futuro

Se propone como trabajo futuro, la realización de un perfil de descarga que se ajuste más a valores de la realidad y el trabajo con baterías reales, ya que este trabajo se enfocó principalmente en el funcionamiento y resulta interesante conocer el desempeño del protocolo en la realidad. Dentro de un nuevo perfil de descarga, se considera explorar un nuevo umbral,  $SOC_{min}$ .

Otra de las propuestas es cuantificar el gasto computacional dentro del protocolo, ya que existe un *trade-off* entre el tiempo de simulación con el número de nodos presentes en la red. Además, se propone revisar la influencia del número de nodos existentes en la red sobre la eficiencia del uso del canal.

# Bibliografía

- [1] V. Cedeño, “Design of a medium-access-control protocol for wireless sensor networks considering the battery state of charge and state of health,” Master’s thesis, Universidad de Chile, Nov. 2019.
- [2] ITU, “5g - fifth generation of mobile technologies,” Dec 2019.
- [3] W. Stutzman and G. Thiele, *Antenna Theory and Design, 3rd Edition*. Antenna Theory and Design, Wiley, 2012.
- [4] T. A. Khan, A. Alkhateeb, and R. W. Heath, “Millimeter wave energy harvesting,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 15, no. 9, pp. 6048–6062, 2016.
- [5] J. G. Proakis and M. Salehi, *Communication Systems Engineering*. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice-Hall, Inc., 1994.
- [6] B. Jacard, *Apuntes de Propagación y Calculo de Radioenlaces*. Apuntes EL6029-1 Propagación y Comunicaciones Inalámbricas, , 2019.
- [7] H. Chien, Y. Hsueh, A. Chowdhury, J. Yu, and G. Chang, “Optical millimeter-wave generation and transmission without carrier suppression for single- and multi-band wireless over fiber applications,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 28, pp. 2230–2237, Aug 2010.
- [8] IEEE, “Ieee standard definitions of terms for antennas,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 17, pp. 262–269, May 1969.
- [9] O. O. E. FEDERAL COMMUNICATIONS COMMISSION and TECHNOLOGY, *Millimeter Wave Propagation: Spectrum Management Implications*. FEDERAL COMMUNICATIONS COMMISSION, OFFICE OF ENGINEERING AND TECHNOLOGY, 1997.
- [10] P. Nenzi, F. Tripaldi, F. S. Marzano, F. Palma, and M. Balucani, “60 ghz tapered-helix antenna for wpan applications,” in *2012 IEEE 62nd Electronic Components and Technology Conference*, pp. 2042–2047, 2012.
- [11] K. S. Adu-Manu, N. Adam, C. Tapparello, H. Ayatollahi, and W. Heinzelman, “Energy-harvesting wireless sensor networks (eh-wsns): A review,” *ACM Trans. Sen. Netw.*, vol. 14, Apr. 2018.
- [12] D. Fuentealba Landeros, “Diseño de un protocolo mac para proveer acceso decamétrico inalámbrico usando ondas milimétricas,” *repositorio Uchile*, 2012.
- [13] C. Estevez and A. Kailas, “Energy-efficient process-stacking multiplexing access for 60-ghz mm-wave wireless personal area networks,” in *2012 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, pp. 2084–2087, Aug 2012.

- [14] B. T. Norambuena, “Diseño de un protocolo mac con un multiplexion temporal eficiente para redes inalámbricas locales energicamente autosustentables equipados con dispositivos captadores de energia,” Master’s thesis, Universidad de Chile, Nov. 2016.
- [15] C. Estevez and C. Azurdia, “60 ghz millimeter-wave bottom-layer solutions: Multiplexing access, energy awareness, and peak-to-average-power ratio,” *IEEE Latin America Transactions*, vol. 13, pp. 3524–3530, Nov 2015.
- [16] W.-Y. Chang, “The State of Charge Estimating Methods for Battery: A Review,” *ISRN Applied Mathematics*, vol. 2013, pp. 1–7, 2013.
- [17] K. Thoubboron, “Depth of discharge (dod): What does it mean for your battery, and why is it important?,” *EnergySage*, 2017.
- [18] T. Guena and P. Leblanc, “How depth of discharge affects the cycle life of lithium-metal-polymer batteries,” in *INTELEC 06 - Twenty-Eighth International Telecommunications Energy Conference*, pp. 1–8, 2006.
- [19] I. C. Society, *IEEE Std 802.15.3: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for High Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs)*, 2003.
- [20] I. C. Society, *IEEE Std 802.15.3c-2009: IEEE Standard for Information technology—Local and metropolitan area networks— Specific requirements— Part 15.3: 70 Amendment 2: Millimeter-wave-based Alternative Physical Layer Extension.* , 2009.
- [21] E. International, *Standard ECMA-387:High rate 60 Ghz PHY, MAC and HDMI PALs*. Status:Standard, 2010.
- [22] M. Shaik, A. Kabanni, and N. Nazeema, “Millimeter wave propagation measurments in forest for 5g wireless sensor communications,” in *2016 16th Mediterranean Microwave Symposium (MMS)*, pp. 1–4, Nov 2016.
- [23] EDN, “The 5 best 5g use cases,” *EDN*, 2017.
- [24] S. R. Jino Ramson and D. J. Moni, “Applications of wireless sensor networks — a survey,” in *2017 International Conference on Innovations in Electrical, Electronics, Instrumentation and Media Technology (ICEEIMT)*, pp. 325–329, 2017.
- [25] B. Torres, V. Quintero, C. Estevez, M. Orchard, and C. Azurdia, “Soc control for improved battery life and throughput performance under vst-tdma,” *Electronics Letters*, vol. 53, no. 3, pp. 183–185, 2017.
- [26] V. Quintero and C. Estevez, “Frame retransmission using a modified vst-tdma access protocol in picocell/wpan,” in *2017 IEEE 9th Latin-American Conference on Communications (LATINCOM)*, pp. 1–6, 2017.
- [27] C. Estevez, M. Orchard, and A. Kailas, “Improving throughput performance under an energy efficient multiplexing access scheme using time-of-failure prognosis,” in *Proceedings of the 8th International Conference on Body Area Networks*, pp. 390–393, ICST (Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and . . . , 2013.

# Capítulo 6

## Anexos

Código 6.1: Smart schedule time function

```
1 static void smart_schedule_time_function_v3 (void)
2 {
3     int x;
4     double sync_time = 6.4e-8;
5     double temp_global_ptr;
6     double wait_time;
7     FIN (smart_schedule_time_function_v3 ());
8     wait_time=buffer_time+travel_time;
9
10    if (not_all_out_of_harvesting_mode == 0){
11        p_in[index] = global_ptr;
12        p_out[index] = p_in[index] + t_reserve;
13        schedule_time = p_in[index];
14        global_ptr = p_out[index] + (2*wait_time) + sync_time;
15    } else {
16        if (harvesting_mode[index] == 0){
17            p_in[index] = global_ptr;
18            collision();
19            p_out[index] = p_in[index] + t_reserve;
20            schedule_time = p_in[index];
21            global_ptr = p_out[index] + (2*wait_time) + sync_time;
22        } else {
23            p_in[index] = p_out[index] + sleep_time[index] + wait_time;
24            collision();
25            p_out[index] = p_in[index] + t_reserve;
26            schedule_time = p_in[index];
27            p_out[index] = p_in[index] + t_reserve;
28        }
29    }
30    if (all_in_harvesting_mode){
31        temp_global_ptr = broadcast_time;
32        for(x=0; x<active_nodes; x++){
33            if (p_out[x] < temp_global_ptr){
34                temp_global_ptr = p_out[x];
35            }
36        }
37        global_ptr=temp_global_ptr;
38    }
39    FOUT;
40 }
```

## Código 6.2: Collision

```
1 static void collision(void)
2 {
3     int    x = 0;
4     int    c_index_ = -1;
5     double wait_time;
6     double sync_time = 6.4e-8;
7
8     FIN (collision ());
9     wait_time = buffer_time+travel_time;
10    for (x = 0; x < active_nodes; x++){
11        if (index != x){
12            if((p_in[index] > (p_in[x]-(t_reserve+wait_time)))&&(p_in[index]<(p_out[x]+wait_time))){
13                c_index_ = x;
14                break;
15            }
16        }
17    }
18    if (c_index_ != -1){
19        p_in[index] = p_out[c_index_] + 2*wait_time + sync_time;
20        collision();
21    }
22    FOUT;
23 }
```

## Código 6.3: Broadcast collision

```
1 static void broadcast_collision(void)
2 {
3     int    x = 0;
4     int    c_index_ = -1;
5     double wait_time;
6     double sync_time = 6.4e-8;
7
8     FIN (collision ());
9     wait_time = buffer_time+travel_time;
10    for (x = 0; x < active_nodes; x++){
11        if (index != x){
12            if((broadcast_time > (p_in[x]-(sync_time+wait_time)))&&(broadcast_time<(p_out[x]+wait_time))){
13                c_index_ = x;
14                break;
15            }
16        }
17    }
18    if (c_index_ != -1){
19        broadcast_time = p_out[c_index_] + 2*wait_time + sync_time;
20        collision();
21    }
22    FOUT;
```

## 6.1. Caso 2 nodos VST-TDMA 2.0

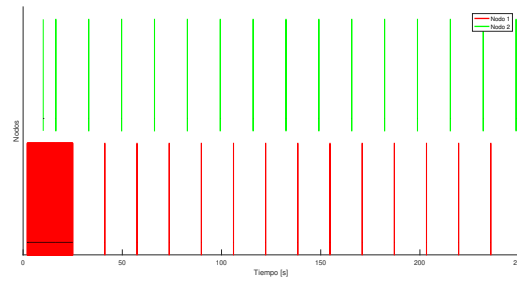


Figura 6.1: Simulación VST-TDMA 2.0 de 2 nodos con Energy Harvesting Rate de 0.1 mJ/s

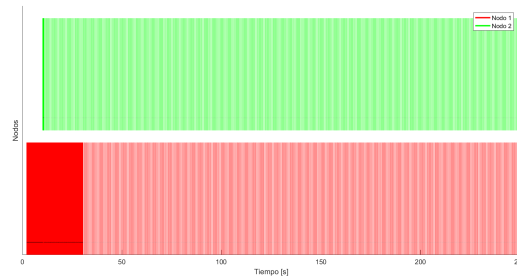


Figura 6.2: Simulación VST-TDMA 2.0 de 2 nodos con Energy Harvesting Rate de 1 mJ/s

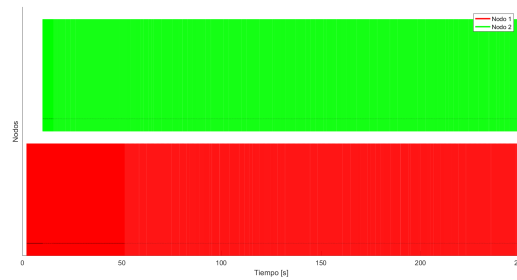


Figura 6.3: Simulación VST-TDMA 2.0 de 2 nodos con Energy Harvesting Rate de 2 mJ/s



## 6.2. Caso 2 nodos VST-TDMA 2.0 (Zona de interés)

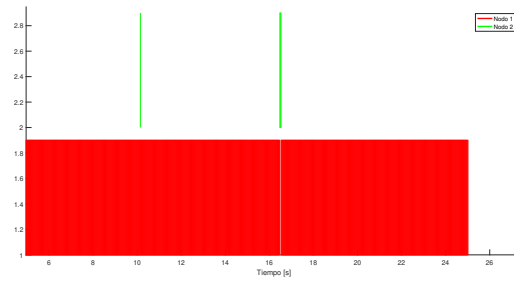


Figura 6.4: Simulación VST-TDMA 2.0 de 2 nodos con Energy Harvesting Rate de 0.1 mJ/s

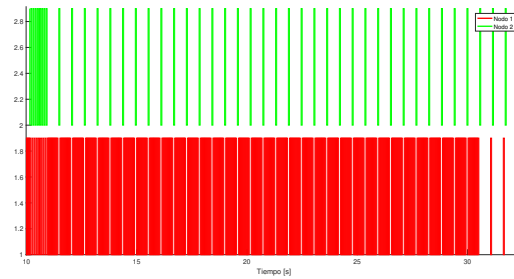


Figura 6.5: Simulación VST-TDMA 2.0 de 2 nodos con Energy Harvesting Rate de 1 mJ/s

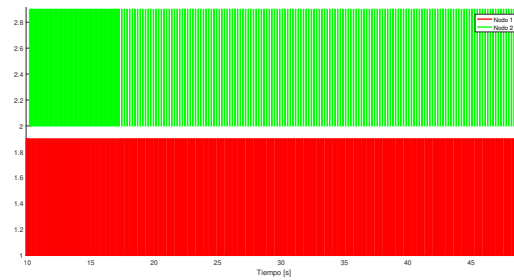


Figura 6.6: Simulación VST-TDMA 2.0 de 2 nodos con Energy Harvesting Rate de 2.5 mJ/s

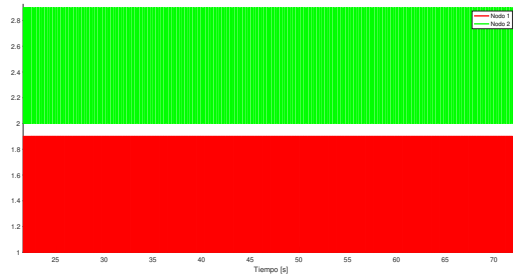


Figura 6.7: Simulación VST-TDMA 2.0 de 2 nodos con Energy Harvesting Rate de 3 mJ/s

### 6.3. Caso 3 nodos VST-TDMA 2.0

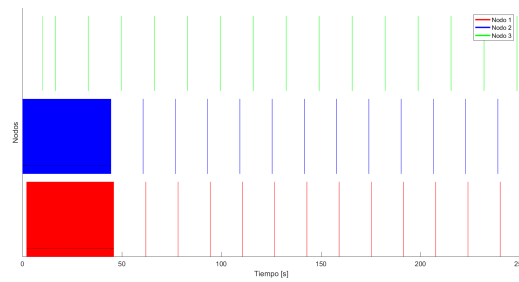


Figura 6.8: Simulación VST-TDMA 2.0 de 3 nodos con Energy Harvesting Rate de 0.1 mJ/s

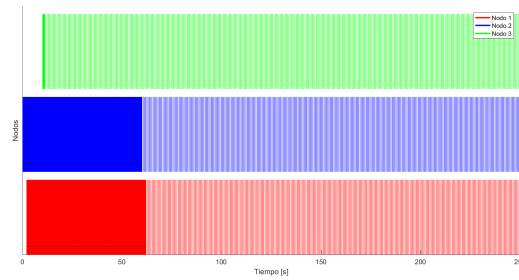


Figura 6.9: Simulación VST-TDMA 2.0 de 3 nodos con Energy Harvesting Rate de 1 mJ/s

## 6.4. Caso 3 nodos VST-TDMA 2.0 (Zona de interés)

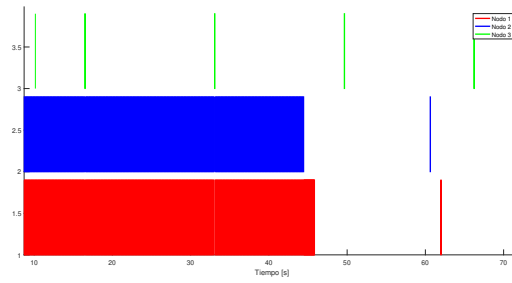


Figura 6.10: Simulación VST-TDMA 2.0 de 3 nodos con Energy Harvesting Rate de 0.1 mJ/s

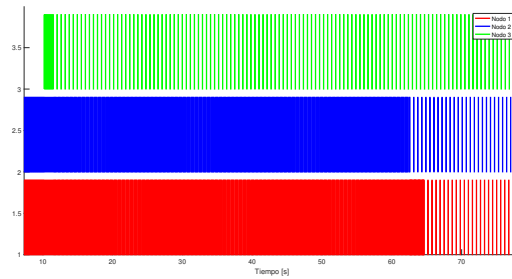


Figura 6.11: Simulación VST-TDMA2.0 de 3 nodos con Energy Harvesting Rate de 1 mJ/s

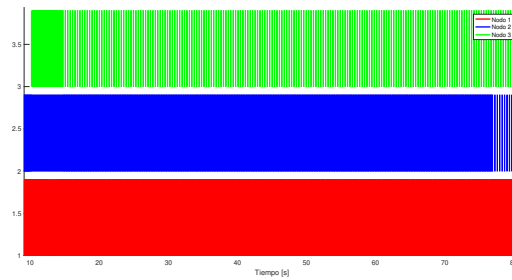


Figura 6.12: Simulación VST-TDMA 2.0 de 3 nodos con Energy Harvesting Rate de 1.5 mJ/s

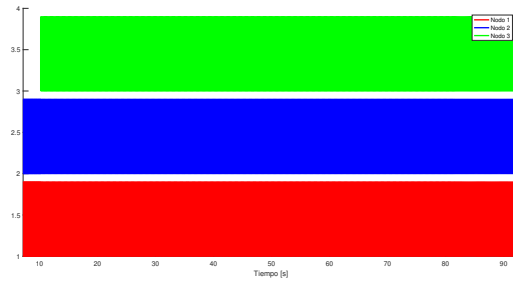


Figura 6.13: Simulación VST-TDMA 2.0 de 3 nodos con Energy Harvesting Rate de 3 mJ/s

## 6.5. Caso 2 nodos VST-TDMA tradicional

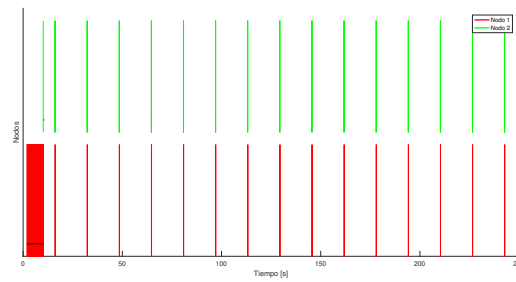


Figura 6.14: Simulación VST-TDMA tradicional de 2 nodos con Energy Harvesting Rate de 0.1 mJ/s

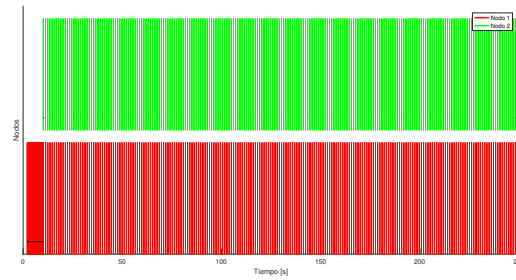


Figura 6.15: Simulación VST-TDMA tradicional de 2 nodos con Energy Harvesting Rate de 0.5 mJ/s

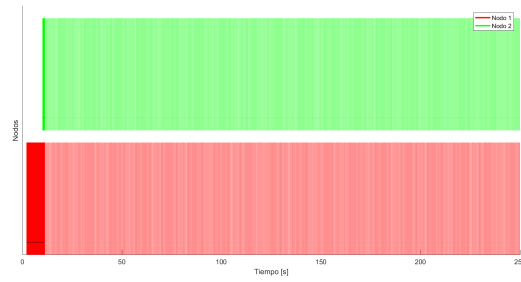


Figura 6.16: Simulación VST-TDMA tradicional de 2 nodos con Energy Harvesting Rate de 1 mJ/s

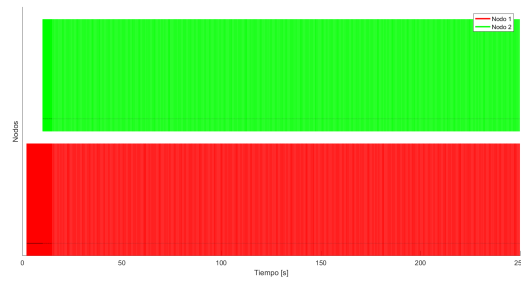


Figura 6.17: Simulación VST-TDMA tradicional de 2 nodos con Energy Harvesting Rate de 2 mJ/s

## 6.6. Caso 3 nodos VST-TDMA tradicional

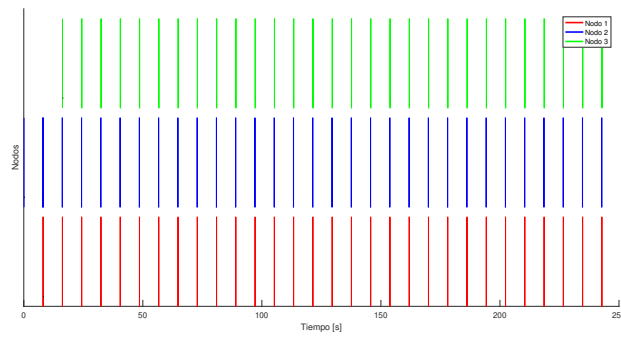


Figura 6.18: Simulación VST-TDMA tradicional de 3 nodos con Energy Harvesting Rate de 0.1 mJ/s

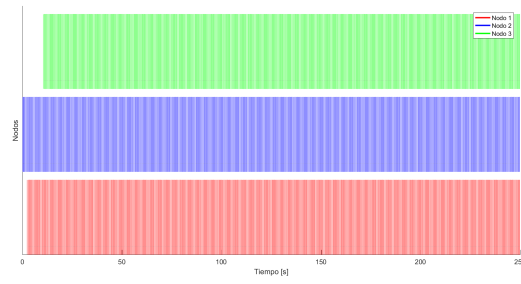


Figura 6.19: Simulación VST-TDMA tradicional de 3 nodos con Energy Harvesting Rate de 1 mJ/s

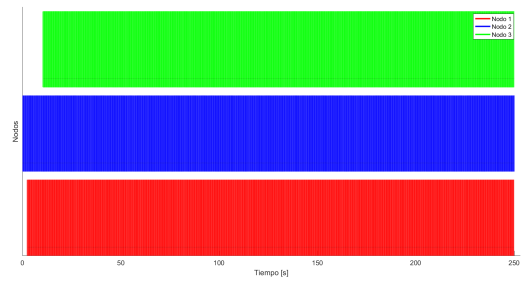


Figura 6.20: Simulación VST-TDMA tradicional de 3 nodos con Energy Harvesting Rate de 2 mJ/s