



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE ELÉCTRONICA Y TELECOMUNICACIONES**

**ANÁLISIS DE PARÁMETROS DE TRANSMISIÓN EN
SISTEMAS DE COMUNICACIONES MOLECULARES
MEDIANTE DIFERENTES CONDICIONES
COMUNICACIONALES EN LA TRANSMISIÓN Y
RECEPCIÓN**

**Trabajo de Titulación para optar al título de:
Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones**

**Autor:
Armas Benavides, Santiago David**

**Tutor:
Mgs. Deysi Vilma Inca Balseca**

Riobamba, Ecuador. 2023

DERECHOS DE AUTORÍA

Yo, **Santiago David Armas Benavides**, con cédula de ciudadanía **0604064733**, autor del trabajo de investigación titulado: **“ANÁLISIS DE PARÁMETROS DE TRANSMISIÓN EN SISTEMAS DE COMUNICACIONES MOLECULARES MEDIANTE DIFERENTES CONDICIONES COMUNICACIONALES EN LA TRANSMISIÓN Y RECEPCIÓN”**, certifico que la producción, ideas, opiniones, criterios, contenidos y conclusiones expuestas son de mí exclusiva responsabilidad.

Asimismo, cedo a la Universidad Nacional de Chimborazo, en forma no exclusiva, los derechos para su uso, comunicación pública, distribución, divulgación y/o reproducción total o parcial, por medio físico o digital; en esta cesión se entiende que el cesionario no podrá obtener beneficios económicos. La posible reclamación de terceros respecto de los derechos de autor (a) de la obra referida, será de mi entera responsabilidad; librando a la Universidad Nacional de Chimborazo de posibles obligaciones.

En Riobamba, 04 de agosto del 2023.



Santiago David Armas Benavides

C.I: 0604064733

DICTAMEN FAVORABLE DEL TUTOR Y MIEMBROS DE TRIBUNAL;

Quienes suscribimos, catedráticos designados Tutor y Miembros del Tribunal de Grado para la evaluación del trabajo de investigación "ANÁLISIS DE PARÁMETROS DE TRANSMISIÓN EN SISTEMAS DE COMUNICACIONES MOLECULARES MEDIANTE DIFERENTES CONDICIONES COMUNICACIONALES EN LA TRANSMISIÓN Y RECEPCIÓN" por Santiago David Armas Benavides, con cédula de identidad número 0604064733, certificamos que recomendamos la APROBACIÓN de este con fines de titulación. Previamente se ha asesorado durante el desarrollo, revisado y evaluado el trabajo de investigación escrito y escuchada la sustentación por parte de su autor; no teniendo más nada que observar.

De conformidad a la normativa aplicable firmamos, en Riobamba 04 de agosto del 2023.

**Carlos Ramiro Peñafiel Ojeda, PhD.
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL DE GRADO**




Firma

**Edgar Giovanny Cuzco Silva, Mgs.
MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO**



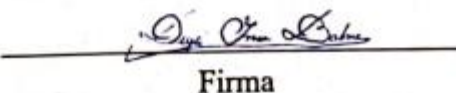
Firma

**Manuel Antonio Meneses Freire, PhD.
MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO**



Firma

**Deysi Vilma Inca Balseca, Mgs.
TUTOR**



Firma

CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL

Quienes suscribimos, catedráticos designados Miembros del Tribunal de Grado para la evaluación del trabajo de investigación “ANÁLISIS DE PARÁMETROS DE TRANSMISIÓN EN SISTEMAS DE COMUNICACIONES MOLECULARES MEDIANTE DIFERENTES CONDICIONES COMUNICACIONALES EN LA TRANSMISIÓN Y RECEPCIÓN”, presentado por Santiago David Armas Benavides, con cédula de identidad número 0604064733, bajo la tutoría de Mg. Deysi Vilma Inca Balseca; certificamos que recomendamos la APROBACIÓN de este con fines de titulación. Previamente se ha evaluado el trabajo de investigación y escuchada la sustentación por parte de su autor; no teniendo más nada que observar.

De conformidad a la normativa aplicable firmamos, en Riobamba 04 de agosto del 2023.

Presidente del Tribunal de Grado
PhD. Carlos Ramiro Peñafiel Ojeda



Firma

Miembro del Tribunal de Grado
Mgs. Edgar Giovanni Cuzco Silva



Firma

Miembro del Tribunal de Grado
PhD. Manuel Antonio Meneses Freire



Firma



Dirección
Académica
VICERRECTORADO ACADÉMICO



UNACH-RGF-01-04-02.20
VERSIÓN 02: 06-09-2021

CERTIFICACIÓN

Que, **ARMAS BENAVIDES SANTIAGO DAVID** con CC: **0604064733**, estudiante de la Carrera **ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES, NO VIGENTE**, Facultad de **INGENIERÍA**; ha trabajado bajo mi tutoría el trabajo de investigación titulado "**Análisis de parámetros de transmisión en sistemas de comunicaciones moleculares mediante diferentes condiciones comunicacionales en la transmisión y recepción**", cumple con el 9 %, de acuerdo al reporte del sistema Anti plagio **URKUND**, porcentaje aceptado de acuerdo a la reglamentación institucional, por consiguiente autorizo continuar con el proceso.

Riobamba, 28 de julio de 2023



Firmado electrónicamente por:
DEYSI VILMA INCA
BALSECA

Mgs. Deysi Inca
TUTORA TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

DEDICATORIA

Dedico esta tesis a mi familia, por su apoyo constante y paciencia durante todo este proceso. Sus palabras de aliento y confianza me han dado la fuerza necesaria para enfrentar los desafíos y alcanzar este logro.

A todos aquellos que me han acompañado en este proceso, aunque no puedan ser mencionados individualmente, les agradezco de corazón. Sus ánimos, consejos han sido de gran valor.

Santiago David Armas Benavides

AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi profundo agradecimiento a todas las personas que contribuyeron de manera significativa a la realización de este trabajo. Su apoyo y orientación fueron fundamentales para llevar a cabo esta tesis.

Agradezco especialmente a las docentes Yesenia Cevallos PhD. por su valiosa contribución inicial, sus conocimientos, guía y un interés genuino para mi crecimiento académico. A Mgs. Deysi Inca, quien asumió el rol de tutora con una generosidad y compromiso ejemplar. Les agradezco de todo corazón, su disposición para ayudarme fue fundamental para el avance y finalización exitosa de mi tesis.

También quiero agradecer a cada uno de los docentes, cuyas enseñanzas sentaron las bases para mi desarrollo académico.

A mis padres, hermanos y demás familiares, les agradezco por su apoyo incondicional y por ser fuente de motivación constante.

A Jacqueline, agradezco su amor, paciencia y aliento incondicional. Su apoyo me ha dado la fuerza y confianza necesaria para superar los desafíos. Gracias por creer en mí y por estar a mi lado en cada paso del camino.

Finalmente, a mis amigos y amigas por su compañía, comprensión y por ser un gran soporte en este camino académico.

Santiago David Armas Benavides

ÍNDICE GENERAL

DERECHOS DE AUTORÍA

DICTAMEN FAVORABLE DEL TUTOR Y MIEMBROS DE TRIBUNAL;

CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL

CERTIFICADO ANTIPLAGIO

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTO

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE TABLAS

ÍNDICE DE FIGURAS

RESUMEN

ABSTRACT

CAPÍTULO I. INTRODUCCION.....	18
1.1 Planteamiento del Problema.....	20
1.2 Objetivos	21
1.2.1 General	21
1.2.2 Específicos	21
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO.....	22
2.1 Estado del Arte	22
2.2 Fundamentos de nanocomunicaciones	23
2.2.1 Nanomáquinas y nanoredes.....	23
2.2.2 Sistema de comunicaciones a nanoescala	24
2.3 Comunicaciones Moleculares	24
2.3.1 Comunicación molecular vía difusión.....	26
2.3.2 Movimiento Browniano	27
2.3.2.1 Proceso de Wiener	28

2.3.3	Leyes de Fick	29
2.3.4	Propagación randómica	31
2.3.5	Propagación randómica con arrastre	32
2.4	Procesamiento de la información molecular	32
2.4.1	Transmisión de moléculas	32
2.4.1.1	Codificación	33
2.4.1.2	Modulación	33
2.4.1.2.1	On Off Keying OOK	33
2.4.1.2.2	Concentration Shift Keying CSK	34
2.4.1.2.3	Molecule Shift Keying MoSK	34
2.4.2	Recepción de moléculas	35
2.4.2.1	Capacidad del canal	35
2.4.2.2	Receptores moleculares	36
2.4.2.3	Decodificación	37
2.5	Network Simulator 3	38
2.6	Estándares de nanocomunicaciones IEEE 1906.1 y 1906.1.1	38
CAPÍTULO III. METODOLOGIA		43
3.1	Tipo de Investigación	43
3.2	Diseño de Investigación	43
3.3	Técnica de recolección de Datos	44
3.3.1	La observación	44
3.3.2	Instrumentos de la investigación	44
3.4	Población y Muestra	44
3.4.1	Población	44
3.4.2	Muestra	44
3.5	Operacionalización de las variables	44
3.6	Procesamiento y Análisis	45

3.7	Escenarios de estudio	46
3.8	Modelo matemático del sistema	46
3.8.1	Modelos del proceso de propagación	46
3.8.2	Modelos del proceso de modulación	48
3.8.3	Modelos del proceso de recepción	49
3.9	Modelo de Funcionamiento.....	53
3.9.1	Conexión de nodos y dispositivos.....	56
3.9.2	Clase portadora del mensaje (Message Carrier).....	56
3.9.3	Clase perturbación (Perturbation)	57
3.9.4	Clase movimiento (Motion)	57
3.9.5	Clase campo (Field)	58
3.9.6	Clase especificidad (Specificity).....	58
3.10	Implementación del estándar protocolario P1906.1.1 en NS-3.....	59
3.11	Métricas de comunicación.....	59
3.11.1	Pulso de retardo	59
3.11.2	Amplitud máxima de pulso	60
3.11.3	Ancho de pulso molecular	60
3.12	Parámetros de simulación del estándar protocolario IEEE 1906.1.1	61
3.12.1	Distancia de transmisión.....	61
3.12.2	Número de moléculas liberadas.....	62
3.12.3	Intervalo de pulso	63
3.13	Adquisición de resultados	64
CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN		66
4.1	Resultados Escenario 1.....	66
4.1.1	Concentración Molecular	66
4.1.2	Pulso de retardo.....	70
4.1.3	Amplitud máxima de pulso	71

4.1.4	Ancho de pulso.....	72
4.1.5	Capacidad del canal.....	74
4.2	Resultados Escenario 2.....	75
4.2.1	Concentración Molecular	75
4.2.2	Pulso de retardo.....	78
4.2.3	Amplitud máxima de pulso	79
4.2.4	Ancho de pulso.....	81
4.2.5	Capacidad del canal.....	82
4.3	Resultados Escenario 3.....	83
4.3.1	Concentración Molecular	83
4.3.2	Pulso de retardo.....	86
4.3.3	Amplitud máxima de pulso	88
4.3.4	Ancho de pulso.....	89
4.3.5	Capacidad del canal.....	90
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		92
5.1	Conclusiones	92
5.2	Recomendaciones.....	93
BIBLIOGRAFÍA		94
ANEXOS.....		98

ÍNDICE DE TABLAS.

Tabla 1. Operacionalización de variables	45
Tabla 2. Parámetros de simulación para la identificación de la distancia de transmisión..	62
Tabla 3. Parámetros de simulación para la identificación del número de moléculas.	63
Tabla 4. Parámetros de simulación para la identificación del intervalo de pulso.....	64
Tabla 5. Parámetros generales de simulación.....	66
Tabla 6. Valores de concentración molecular obtenidos del escenario 1 a diferentes distancias.	69
Tabla 7. Valores de pulso de retardo obtenidos del escenario 1 a distancias diferentes y a dos coeficientes de difusión.....	70
Tabla 8. Valores de amplitud máxima de pulso obtenidos del escenario 1 a diferentes distancias contrastados con los resultados de la expresión analítica.	72
Tabla 9. Valores de ancho de pulso obtenidos del escenario 1 a diferentes distancias contrastados con los resultados de la expresión analítica.....	73
Tabla 10. Valores de concentración molecular obtenidos del escenario 2 a diferentes distancias.	77
Tabla 11. Valores de pulso de retardo obtenidos del escenario 2 a distancias diferentes y a dos coeficientes de difusión.....	78
Tabla 12. Valores de amplitud máxima de pulso obtenidos del escenario 2 a diferentes distancias contrastados con los resultados de la expresión analítica.	80
Tabla 13. Valores de ancho de pulso obtenidos del escenario 2 a diferentes distancias contrastados con los resultados de la expresión analítica.....	81
Tabla 14. Valores de concentración molecular obtenidos del escenario 3 a diferentes distancias.	85
Tabla 15. Valores de pulso de retardo obtenidos del escenario 3 a distancias diferentes y a dos coeficientes de difusión.....	87
Tabla 16. Valores de amplitud máxima de pulso obtenidos del escenario 3 a diferentes distancias contrastados con los resultados de la expresión analítica.	89
Tabla 17. Valores de ancho de pulso obtenidos del escenario 3 a diferentes distancias contrastados con los resultados de la expresión analítica.....	90

ÍNDICE DE FIGURAS.

Figura 1. Aplicación médica continua intracorporal de IoBNT (Internet of Bio NanoThings) mediante nanoredes de CM.	25
Figura 2. Modelo de una CM.	26
Figura 3. Comunicación molecular basada en difusión.....	27
Figura 4. Abstracción básica de un sistema CM basado en desplazamiento aleatorio.....	31
Figura 5. Abstracción básica de un sistema de CM basado en el desplazamiento aleatorio con deriva.	32
Figura 6. Modulación On-Off Keying de la señal molecular.	33
Figura 7. Comparación entre las técnicas de modulación entre la radiocomunicación tradicional ASK y la comunicación molecular CSK.	34
Figura 8. Comparación entre las técnicas de modulación entre la radiocomunicación tradicional FSK y la comunicación molecular MoSK.....	35
Figura 9. Modelos de receptores moleculares para el desarrollo de métodos de detección de moléculas.	37
Figura 10. Modelo de referencia del estándar de nanocomunicaciones de IEEE 1906: Un nodo se compone de un emisor y un receptor. La Perturbación representa un Mensaje, el Movimiento transmite el mensaje, el Campo orienta físicamente los y la especificidad regula la recepción del mensaje.	39
Figura 11. Procesamiento y análisis de la investigación	45
Figura 12. Esquema de los principales archivos necesarios para la configuración del estándar protocolario P1906 destinado a las CM.	54
Figura 13. Diagrama UML del marco de comunicación implementado.	55
Figura 14. Distancia de transmisión vs BER.....	62
Figura 15. Relación del número de moléculas y el BER.....	63
Figura 16. Intervalo de pulso vs BER.	64
Figura 17. Concentración molecular en función a la distancia y el tiempo obtenido de la simulación del escenario 1.....	67
Figura 18. Resultado obtenido del escenario 1 por consola de la recepción del mensaje a distancias diferentes: (a) 2.1 μ m y (b) 2.2 μ m.....	68
Figura 19. Pulso de retardo en función de la distancia obtenido de la simulación del escenario 1.....	70

Figura 20. Amplitud máxima de pulso en función de la distancia obtenido de la simulación del escenario 1.	71
Figura 21. Ancho de pulso mínimo en función de la distancia obtenido de la simulación del escenario 1.	73
Figura 22. Capacidad de canal obtenida de la simulación del escenario 1.	74
Figura 23. Concentración molecular en función a la distancia y el tiempo obtenido de la simulación del escenario 2.	75
Figura 24. Resultado obtenido del escenario 2 por consola de la recepción del mensaje a distancias diferentes: (a) 2.1μm y (b) 2.2μm.	76
Figura 25. Pulso de retardo en función de la distancia obtenido de la simulación del escenario 2.	78
Figura 26. Amplitud máxima de pulso en función de la distancia obtenido de la simulación del escenario 2.	79
Figura 27. Ancho de pulso mínimo en función de la distancia obtenido de la simulación del escenario 2.	81
Figura 28. Capacidad de canal obtenida de la simulación del escenario 2.	82
Figura 29. Concentración molecular en función a la distancia y el tiempo obtenido de la simulación del escenario 3.	84
Figura 30. Resultado obtenido del escenario 3 por consola de la recepción del mensaje a distancias diferentes: (a) 2.1μm y (b) 2.2μm.	85
Figura 31. Pulso de retardo en función de la distancia obtenido de la simulación del escenario 3.	86
Figura 32. Amplitud máxima de pulso en función de la distancia obtenido de la simulación del escenario 3.	88
Figura 33. Ancho de pulso mínimo en función de la distancia obtenido de la simulación del escenario 3.	89
Figura 34. Capacidad de canal obtenida de la simulación del escenario 3.	91
Figura 35. Archivo .tar.bz2 del Network Simulator 3.	99
Figura 36. Vista de los archivos descomprimidos.	100
Figura 37. Construcción del módulo p1906 en el software NS-3.	101
Figura 38. Vista por consola de la ejecución del estándar IEEE1906.1 mediante el archivo mol-example.cc, representando la creación de la componenete Movimiento y del primer dispositivo de Red.	108

Figura 39. Vista por consola de la ejecución del estándar IEEE1906.1 mediante el archivo mol-example.cc, representando la creación de la componente Especificidad, Campo y Perturbación.....	108
Figura 39. Vista por consola de la ejecución del estándar IEEE1906.1 mediante el archivo mol-example.cc, representando la creación del segundo dispositivo de Red, creación de la componente Especificidad, Campo y Perturbación.....	109
Figura 41. Vista por consola de la ejecución del estándar IEEE1906.1 mediante el archivo mol-example.cc, representando la configuración y conexión de componentes e interfaces.	109
Figura 42. Vista por consola de la ejecución del estándar IEEE1906.1 mediante el archivo mol-example.cc, representando la transmisión del paquete, transmisión en la interfaz de comunicación, establecimiento del mensaje en la portadora, generación y configuración de la técnica de modulación describiendo la lógica del programa.	109
Figura 43. Vista por consola de la ejecución del estándar IEEE1906.1 mediante el archivo mol-example.cc, representando el cálculo del retardo de pulso, cálculos con el mensaje recibido en el nodo asociado, análisis del cálculo relacionado con la interferencia entre símbolos.....	110
Figura 44. Vista por consola de la ejecución del estándar IEEE1906.1 mediante el archivo mol-example.cc, representando la recepción y procesamiento de la compatibilidad en el receptor, obtiene la modulación asociada a la portadora y comienza el proceso de demodulación y el manejo de la información.....	110
Figura 45. Vista del fragmento de código del archivo _RUN_MOL_Pulso_Retardo.sh para la obtención de resultado.	111
Figura 46. Vista del fragmento de código del archivo _RUN_MOL_Pulso_Retardo.sh para la obtención de resultado.	111
Figura 47. Vista del código de MatLab para la obtención de las gráficas del pulso de retardo.	112
Figura 48. Vista del ECM para la evaluación del sistema con la ayuda del software SPSS Statistics.....	113

RESUMEN

Las Comunicaciones Moleculares CM son uno de los campos más importantes de la ciencia debido principalmente a las aplicaciones en el área médica para mejorar la salud del paciente, a través de tratamientos menos invasivos. Las CM son tan importantes que IEEE (Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos) ha definido dos estándares, que son 1906.1 y 1906.1.1, que soportan NS3 (Network Simulator-3) como el software para implementar escenarios de comunicaciones moleculares. Así, en este trabajo se desarrollan tres casos de transmisión/recepción molecular en los que se utilizan modulaciones OOK (On-Off Keying), MoSK (Molecular Shift Keying) y CSK (Concentration Shift Keying), con receptores de tipo absorbentes, ligandos y de concentración en el extremo de recepción, se contrasta la simulación con las ecuaciones teóricas para confirmar los resultados.

Palabras claves: Nanocomunicaciones, comunicaciones moleculares, NS-3, estándares de nanocomunicaciones, propagación, modulación, recepción moleculares.

ABSTRACT

Molecular Communication MCs is one of the most important fields in science due mainly the current applications in the medical field to enhance the patient's health with less invasive treatments. MCs are so important that IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineers) has defined two standards, they are 1906.1 and 1906.1.1, they support to NS-3 (Network Simulator-3) as the software to implement molecular communicational sceneries. Thus, in this work is developed three transmission/reception cases in which are used OOK (On-Off Keying), MoSK (Molecular Shift Keying) and CSK (Concentration Shift Keying) modulations, with receptors of type absorbers, ligands and those defined by concentrations at receiverend, the simulation is contrasted with theoretical equations to confirm results.

Keywords: Nano-communications, molecular communications, NS-3, nano-communication standards, molecular propagation, modulation, reception.



Reviewed by:
Msc. Jhon Inca Guerrero.
ENGLISH PROFESSOR
C.C. 0604136572

CAPÍTULO I. INTRODUCCION.

El estudio de los sistemas de nanocomunicación o sistemas de Comunicaciones Moleculares CM presentes en los sistemas biológicos constituyen una parte prometedora de la ciencia que puede ser vista como una solución frente a importantes limitaciones [1]. En este contexto han surgido las nanomáquinas, las cuales cuentan con componentes funcionales a escala nano y cuya definición incluye a las células. Los materiales con los cuales se construyen pueden ser orgánicos y no orgánicos, y se considera que el material, el dispositivo y su función son prácticamente inseparables [2]. Las nanomáquinas podrían recolectar e intercambiar información utilizando los mismos métodos empleados por el cuerpo a nivel microscópico, como difusión (a través de moléculas), proteínas motoras (a través de vesículas) o movilidad bacteriana (a través de bacterias) [3].

La interconexión resultante de una serie de nanomáquinas se denomina nanored, y la colaboración y coordinación entre nanomáquinas necesariamente requiere que una nanomáquina se comunique con otra, por lo que la coordinación de las nanomáquinas a través del paradigma de comunicación a nanoescala mejora la confiabilidad y la capacidad de control. Y lo más importante aún, la nanored de nanomáquinas puede coordinar tareas entre grupos de diferentes nanomáquinas para lograr comportamientos altamente complejos y aumentar el número de posibilidades de diseño [4].

Las CM se definen por la transmisión (Tx) y recepción (Rx) de información codificada en moléculas orgánicas en un medio de propagación entre ellas también conocido como canal, los procesos de comunicación abarcan la codificación de información en una molécula, envío de la molécula de información por la nanomáquina emisora y la propagación de la molécula de información [5]. Por otro lado, el Rx reconoce la llegada de moléculas destino a su proximidad y detecta información codificada en las propiedades físicas de estas moléculas, como la concentración, el tipo o el tiempo de liberación [6].

Dado que las CM poseen características diferentes en relación con los sistemas de comunicación tradicionales los cuales incorporan datos en señales electromagnéticas (EM), no obstante, las CM puede utilizarse en áreas donde la comunicación tradicional falla, por esta razón una de las ventajas de las CM en comparación con la señalización EM es la eficiencia energética. En concreto las CM no pueden alcanzar las tasas de transmisión de

información que obtienen los sistemas basados en EM, por lo que tienen un gasto de energía mucho menor por bit de información transmitida, lo cual las hace adecuadas para aplicaciones de muy bajo consumo que no requieren altas tasas de información [7].

De este modo, surge un nuevo paradigma: las comunicaciones a nanoescala entre nanomáquinas, y entre nanomáquinas y dispositivos convencionales en la red. Estos nanodispositivos se han convertido en un tema de creciente interés para la comunidad científica, ya que podrían reunir parámetros físicos a nanoescala con una elevada precisión [5]. Esta capacidad permitiría una gran cantidad de aplicaciones que no se limita sólo a la medicina [8], sino abarca otros campos como: el industrial, ingeniería biológica, el medio ambiente, entre otros. Este tipo de comunicaciones serán claves en un futuro cercano para la medicina personalizada [3]. De esta forma se podrán producir soluciones óptimas para el tratamiento de enfermedades, la cual a su vez generaría una mejor calidad de vida en los pacientes y facilitaría mecanismos de monitoreo y control preventivo de enfermedades [1].

Los estándares IEEE 1906.1-2015 e IEEE 1906.1.1-2020 aportan el proceso específico de proporcionar un modelo conceptual común, un marco práctico y métricas similares que permiten a la industria y a la investigación hablar un lenguaje unificado y desarrollar simulaciones y componentes de hardware compatibles sin limitar la innovación o la creatividad [9]. Los desarrolladores del estándar reconocen que esta tecnología está en constante evolución y que aún hay nuevas ideas e invenciones por explorar que aprovechen el cambio en la escala de longitud para la comunicación.

El modelo estándar se ha implementado en forma de código utilizando el Network Simulator-3 NS-3 y se basa en el estándar IEEE 1906.1-2015. Además, también se cuenta con soporte para el estándar IEEE 1906.1.1-2020. Este código permite simular tanto la comunicación molecular a nanoescala como la comunicación electromagnética EM a nanoescala. Para simular la comunicación molecular a nanoescala, se asume que las moléculas se desplazan en el medio siguiendo la ley de Fick. Conociendo el número de moléculas liberadas en cada pulso y el coeficiente de difusión, el modelo calcula la concentración molecular en función de la distancia y el tiempo, estima el retardo de propagación y evalúa la capacidad máxima del canal cuando se utiliza un receptor basado en la concentración [10].

Concretamente, el aporte de esta investigación consiste en caracterizar sistemas de CM, desde el paradigma comunicacional de Shannon, esto es, desde la perspectiva de los componentes básicos de un sistema de comunicación, en la transmisión, propagación de la señal y procesamiento de la información, usando NS-3.

1.1 Planteamiento del Problema

A pesar de los recientes avances en el área, la construcción de una configuración experimental de la comunicación molecular sigue siendo un gran desafío; en consecuencia, la simulación parece actualmente la opción más factible. Un simulador permitiría recrear un entorno de comunicaciones moleculares y medir las métricas pertinentes para evaluar su rendimiento [11].

Por lo antes expuesto en este trabajo se pretende simular y analizar a través de escenarios de propagación en el software NS-3, (el cual es un simulador de redes de eventos discretos [12]), las condiciones presentes en la implementación de funcionalidades específicas que intervienen en las CM en cuanto a la transmisión, propagación de la señal en el transmisor y procesamiento de la información en el transmisor y receptor moleculares. Integrando los procesos de las CM que incluyen modulación (On-Off Keying OOK, Concentration Shift Keying CSK, Molecular Shift Keying MoSK), propagación en el canal de transmisión mediante propagación randómica y randómica con arrastre, interferencia entre símbolos, demodulación y procesamiento de información molecular mediante receptores biológicos activos y pasivos. Esto permitiría comprender la influencia de las componentes comunicacionales y sus variaciones en los escenarios de comunicación en la forma en que se transmite la información molecular; contribuir a una comprensión adecuada del funcionamiento de las CM y los parámetros que intervienen en este tipo de transmisiones.

1.2 Objetivos

1.2.1 General

- Analizar los resultados obtenidos en simulaciones en NS-3 mediante diferentes condiciones de transmisión, propagación de la señal en el transmisor y procesamiento de la información en el transmisor y receptor moleculares.

1.2.2 Específicos

- Simular y analizar sistemas de comunicación molecular mediante modulación OOK (On-Off Keying), CSK (Concentration Shift Keying) y MoSK (Molecular Shift Keying).
- Simular y analizar las condiciones de propagación en el canal de transmisión mediante propagación randómica y randómica con arrastre.
- Simular y analizar la recepción de información molecular mediante receptores biológicos activos y pasivos.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO.

2.1 Estado del Arte

En este apartado se detallan las investigaciones previas en cuanto a los trabajos relacionados con el presente proyecto de tesis:

En el caso del proyecto [3], realizaron un análisis e implementación de un modelo de propagación difusivo para CM, el trabajo parte de la recomendación dada en el estándar IEEE 1906.1-2015 que busca abordar cuatro aspectos: modulación, movimiento de las moléculas, interferencia entre símbolos y demodulación. Todo el proceso considera un Movimiento Browniano MB libre, un MB con deriva, un MB libre delimitado por el medio y un MB con deriva delimitado por el medio, obteniendo como resultado un tren de pulsos de la concentración de moléculas en función de tiempo en el receptor y validar que la implementación cumple con el modelo matemático establecido por la segunda Ley de Fick.

Del trabajo propuesto en [13], el objetivo fue evaluar una simulación de transmisión molecular incluyendo la absorción, buscando desarrollar un método de detección para un canal acumulativo dado que el receptor no absorbe todas las moléculas enviadas y que permanecen en el canal influyendo en una futura transmisión, mediante el mapeo de las señales recibidas, obteniendo como resultado los cambios de la señal recibida y la creación del diagrama de enrejado basado en demostrar que los cambios de “0” a “1” o de “1” a “0” son más significativos que los cambios en los que la nueva secuencia mantiene el mismo estado de la secuencia anterior.

En el estudio propuesto [5], se realizó un análisis basado en el escenario de comunicación molecular propuesto por el estándar IEEE 1906.1, en función de los parámetros de configuración tales como la distancia entre nodos, intervalo de pulso, coeficiente de difusión y número de moléculas enviadas. Para comprender las estructuras jerárquicas y los modelos centrales que intervienen en el marco de las comunicaciones moleculares apoyándose con la interacción de componentes y entidades durante el intercambio de información.

En la siguiente sección se presentan conceptos que serán necesarios para comprender este trabajo de investigación.

2.2 Fundamentos de nanocomunicaciones

Los avances en la tecnología facilitan la solución de varios problemas y han dado lugar a nuevos desarrollos para hacer frente a otros problemas para los que no existían solución. Estos avances incluyen la miniaturización a nanoescala de dispositivos. La rama de estudio se llama “nanotecnología” que se encarga de la manipulación de la materia a escala atómica y molecular [14], que va de 1 a 100 nanómetros [15]. Por consiguiente, definir conceptos como las nanomáquinas, nanoredes y la comunicación a nanoescala se vuelven una parte fundamental de la investigación.

2.2.1 Nanomáquinas y nanoredes

El elemento más básico y funcional en la escala nanométrica es una nanomáquina, que se describe como un mecanismo artificial o biológico compuesto por partes con dimensiones en el nivel nano [1]. Se define una nanomáquina basada en tres criterios: material, tamaño y funcionalidad [16], [17]. En primer lugar, una nanomáquina está compuesta por materiales biológicos (por ejemplo, proteínas, ácidos nucleicos, lípidos, células biológicas) con o sin materiales no biológicos (por ejemplo, partículas magnéticas). En segundo lugar, el tamaño de una nanomáquina va desde el tamaño de una macromolécula hasta el de una célula biológica. En tercer lugar, una nanomáquina implementa un conjunto de funcionalidades simples, (por ejemplo, adquirir, usar energía, moverse a lo largo de un filamento de proteínas, capturar/almacenar/liberar moléculas, detectar moléculas y modificar moléculas) [18].

Las nanoredes representan un enfoque innovador de comunicación que abarca varios métodos de transmisión de información entre dispositivos a escala micro o nanométrica [19]. En el campo de las nanoredes, existen dos enfoques principales: comunicaciones moleculares y electromagnéticas. Las nanoredes moleculares (enfoque principal de esta investigación) se basan en mecanismos biológicos/moleculares para transmitir información, mientras que en las nanoredes electromagnéticas, las nanomáquinas artificiales utilizan radiación electromagnética generada por nanotubos para comunicarse (antenas de comunicación inalámbrica en GHz y THz).

Las nanomáquinas individuales tienen una capacidad limitada para realizar tareas complejas debido al tamaño y las limitaciones físicas. Sin embargo, al conectarse en una red y formar

nanoredes, las nanomáquinas podrían trabajar cooperativamente para realizar tareas más complejas, mejorando su funcionalidad y capacidad de cumplir con comportamientos controlados.

2.2.2 Sistema de comunicaciones a nanoescala

La comunicación a nanoescala es el proceso de transmitir información desde uno o varios transmisores hacia uno o varios receptores, a través de un medio [3]. Su capa física se describe mediante: transmisor, receptor, mensaje, portador del mensaje y medio. La comunicación entre los componentes tiene distancias en el orden de nanómetros (nm) [10]. La comunicación debe aprovechar el entorno natural con la menor perturbación posible.

2.3 Comunicaciones Moleculares

Las comunicaciones moleculares son un paradigma del campo de la comunicación a nanoescala, en esta las nanomáquinas biológicas se comunican a través de moléculas que son liberadas en un medio por una entidad y recibidas por otra [5].

Un requisito inicial en la investigación de las comunicaciones moleculares es generalizar los procesos de comunicación y desarrollar un modelo básico de comunicación molecular. En los sistemas biológicos aparecen diversos diseños y mecanismos de comunicación molecular (por ejemplo, las células biológicas naturales se comunican mediante la transmisión de moléculas difusoras, las proteínas nanomáquinas transportan materiales propagándose por filamentos de proteínas) [17], por lo tanto, se debe abordar la determinación de algunas de sus reglas. Basándose en la distancia de comunicación, en [20] se añade el alcance en el medio de transmisión y los canales de CM se clasifican en tres tipos: corto alcance ($nm - \mu m$), medio alcance ($\mu m - mm$) y largo alcance ($mm - m$). Este trabajo de tesis se desarrolla en el corto alcance ($nm - \mu m$) debido a la dificultad de clasificación con precisión el alcance en el medio de transmisión. En términos esenciales, las comunicaciones moleculares estudian la transmisión de información biológica, donde las células actúan como “dispositivos inteligentes”, componen el cuerpo y se comunican principalmente a través de enlaces moleculares y del transporte Browniano [21].

En este sentido, las CM tiene un gran potencial en términos de aplicaciones, especialmente en el ámbito de las tecnologías de la información y la comunicación TIC. Entre las aplicaciones prometedoras se encuentran la monitorización continua de parámetros de salud,

la administración inteligente de fármacos y el desarrollo de órganos artificiales [6] (Figura 1).

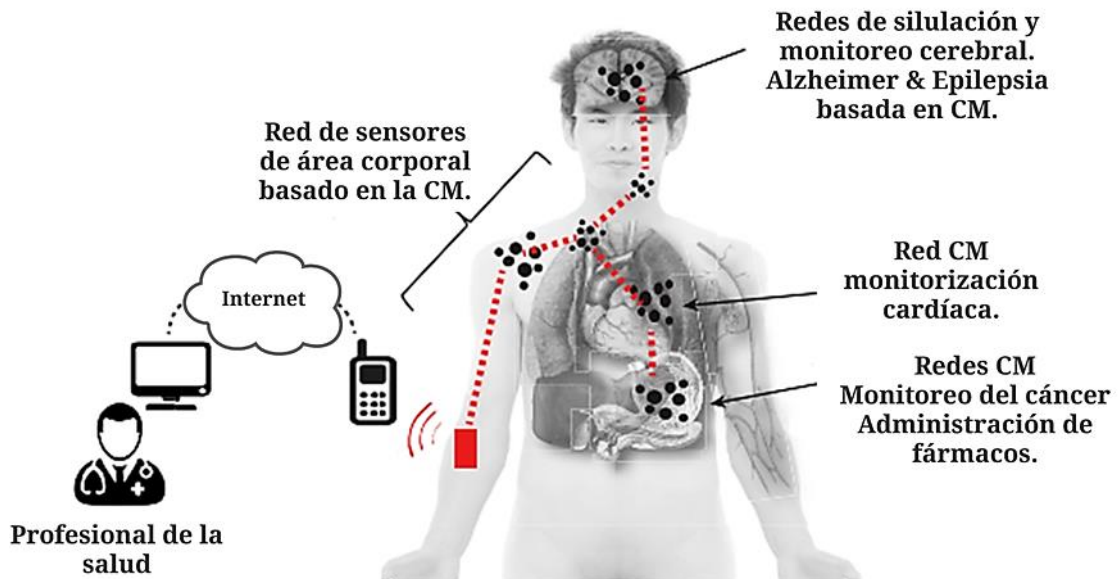


Figura 1. Aplicación médica continua intracorporal de IoBNT (Internet of Bio NanoThings) mediante nanoredes de CM.

Fuente: [6]

La importancia de la comunicación entre entidades biológicas en la propagación de información conlleva a que la investigación molecular se base en las teorías matemáticas y comportamentales de los sistemas de comunicación convencionales. En el diseño, análisis, simulación y experimentación de sistemas de comunicaciones moleculares se han utilizado modelos de interconexión de redes de computadoras ISO/OSI (Organización Internacional de Normalización/Interconexión de Sistemas Abiertos) y TCP/IP (Protocolo de control de transmisión/Protocolo de Internet), en este sentido, la ciencia considera a las CM actualmente como un nuevo paradigma comunicacional de *networking*. A pesar de la utilización de conceptos de sistemas de comunicación tradicionales y de *networking* en las comunicaciones moleculares, esto no significa que un modelo o arquitectura de capas estratificadas de red tenga las mismas características detalladas presentes en la transmisión de información en seres vivos. La razón de esta diferencia se debe a la interconexión que existe entre los dispositivos electrónicos en sistemas de telecomunicaciones y la interconexión de entidades biológicas [21].

El modelo básico de comunicación molecular puede describirse a partir del modelo de comunicación de Shannon (Figura 2), parte de la lógica del modelo de Shannon es que la

comunicación fiable es generalmente posible a tasas de información superiores a cero, y la tasa máxima de información puede enviarse a través de un medio ruidoso mientras se garantiza una comunicación fiable.

Los procesos generales de comunicación incluyen (1) la codificación de la información en moléculas de información por parte de la bio-nanomáquina emisora, (2) el envío de moléculas de información al entorno, (3) la propagación de moléculas de información a través del entorno, (4) la recepción de moléculas de información por parte de la bio-nanomáquina receptora, y (5) la decodificación de moléculas de información en una reacción química en la bio-nanomáquina receptora [17].

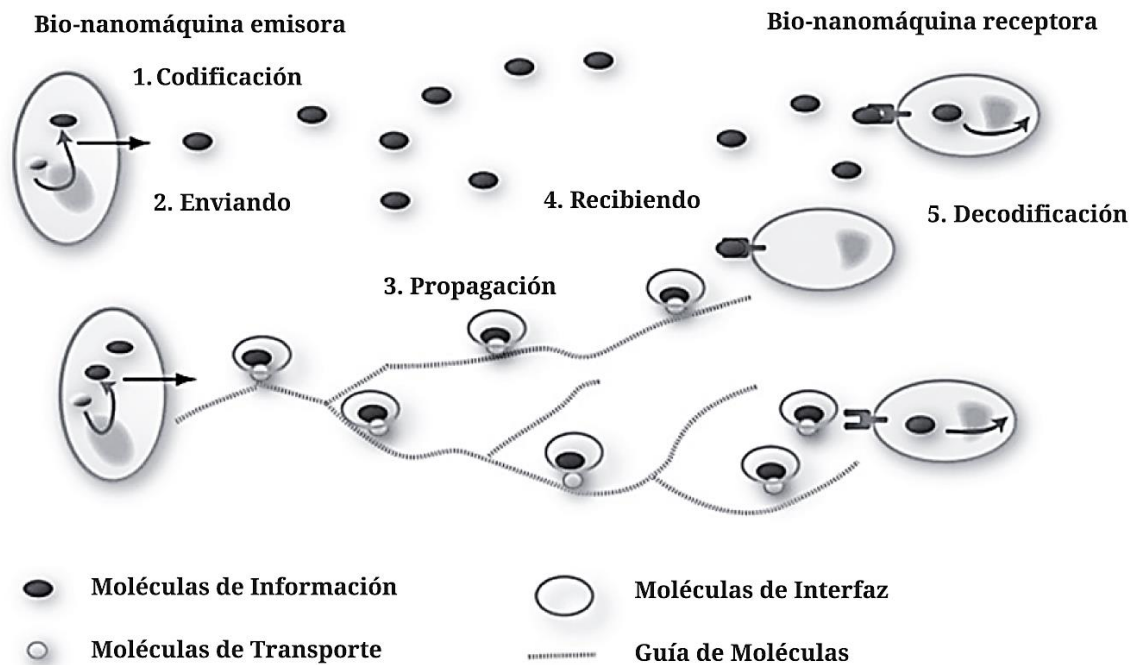


Figura 2. Modelo de una CM.

Fuente: [17]

2.3.1 Comunicación molecular vía difusión

La comunicación molecular basada en la difusión CMvD se considera el medio más práctico para realizar comunicaciones inalámbricas entre nanomáquinas. Al igual que cualquier otro sistema de comunicación, los componentes clave del intercambio molecular basado en la difusión son un transmisor, un sistema de propagación y un receptor, como se observa en la Figura 3 [22].

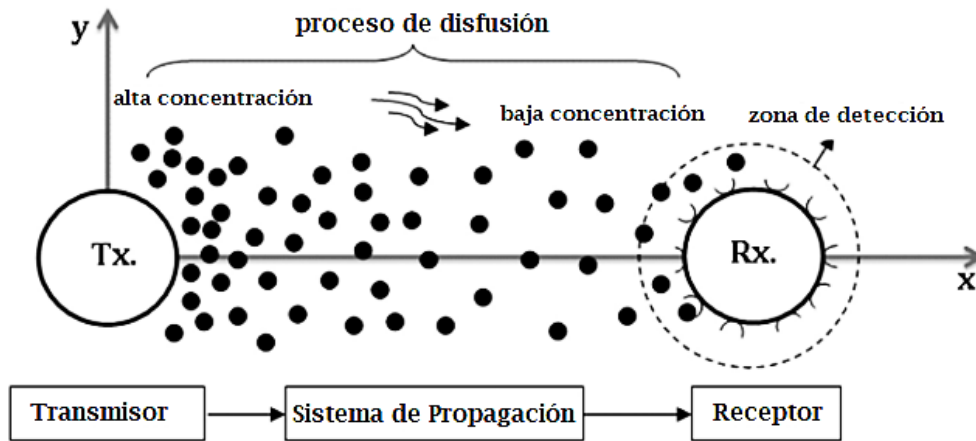


Figura 3. Comunicación molecular basada en difusión.

Fuente: [22]

El proceso de propagación de moléculas por difusión se basa en fenómenos completamente diferentes a la propagación de ondas electromagnéticas en los sistemas de comunicación clásicos. Mientras que las ondas electromagnéticas ejecutan la propagación de energía a la velocidad de la luz, el proceso de difusión de moléculas es provocado por la propagación aleatoria del movimiento browniano, las moléculas se propagan con una dirección aleatoria y también con un retardo elevado para la mayoría de los rangos de transmisión [23]. Lo que hace que su comportamiento sea impredecible y muy dinámico. La transmisión no es adecuada para entornos abarrotados y CM de largo alcance porque se requiere de un gran número de moléculas de información para viajar a un lugar distante mediante dicho movimiento [24].

2.3.2 Movimiento Browniano

El movimiento browniano de moléculas libres en un medio fluido es el resultado del movimiento aleatorio provocado por las colisiones con las moléculas del fluido. Sin embargo, este tipo de movimiento se considera pasivo, lo que significa que no requiere energía adicional para producir su propagación [21]. Robert Brown, botánico inglés, observó por primera vez el movimiento browniano de las partículas en 1827, pero no fue hasta que Albert Einstein lo explicó en 1905 que se debía a un número extremadamente elevado de colisiones entre partículas [25].

El movimiento browniano o proceso de difusión sigue diferentes modelos matemáticos; el enfoque macroscópico con la ley de Fick que describe cómo se mueven las moléculas en función de la concentración molecular, y el enfoque microscópico con la ecuación de la

propagación aleatoria de Einstein-Smoluchowski y la ecuación de Langevin que describen la propagación de una única señal molecular entre el transmisor y receptor [24].

2.3.2.1 Proceso de Wiener

El proceso de Wiener es un modelo natural del movimiento browniano, sin duda uno de los procesos estocásticos más importantes. Describe un movimiento aleatorio y continuo de una partícula bajo la influencia de un gran número de colisiones entre moléculas desplazándose en un fluido [26].

Dicho proceso se define en términos de la distribución gaussiana [17], La notación $x \sim N(m, \sigma^2)$ significa que posee una distribución gaussiana con media m y varianza σ^2 ; es decir, x tiene una función de densidad de probabilidad dada por la ecuación 1.

$$f_x(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1)$$

Por intermedio de la ecuación 1, dejando que $B(t)$ represente la posición de un MB, donde $B(0)$ es la posición inicial para un $t \geq 0$. $B(t)$ es un proceso de Wiener en una dimensión, si se cumple las siguientes condiciones:

1. Para cualquier tiempo t_1 y t_2 (dónde $t_2 > t_1 \geq 0$), y alguna constante σ^2

$$B(t_2) - B(t_1) \sim N(0, \sigma^2(t_2 - t_1)) \quad (2)$$

2. Para dos intervalos $[t_1, t_2]$ y $[t_3, t_4]$, los incrementos $B(t_4) - B(t_3)$ y $B(t_2) - B(t_1)$ son estadísticamente independientes si los intervalos no se solapan.

Suponiendo que el proceso comienza en $B(0) = 0$ y se verifica el proceso una vez por segundo, es decir: $B(1), B(2), B(3)$, etc. En ese caso, $B(k)$, la posición en el tiempo k , es una variable aleatoria Gaussiana con una distribución normal representada por la ecuación 3.

$$B(k) \sim N(0, k\sigma^2), \quad (3)$$

Donde cada incremento es $B(k) - B(k-1)$ y tienen una distribución normal dada por la ecuación 4.

$$B(k) - B(k-1) \sim N(0, \sigma^2), \quad (4)$$

Los incrementos son independientes para cada valor de k . Así se tiene un proceso cuya varianza aumenta con el tiempo, pero los incrementos son independientes e idénticamente distribuidos. Ocurre lo mismo si se realizan muestreos a intervalos de tiempo $\Delta t < 1$. En este caso, la distribución se expresa mediante la ecuación 5 y los incrementos están dados como $B(k\Delta t) - B((k-1)\Delta t) \sim N(0, \Delta t \sigma^2)$.

$$B(k\Delta t) \sim N(0, k\Delta t \sigma^2), \quad (5)$$

No obstante, en el MB el parámetro de varianza σ^2 está dada por $\sigma^2 = \alpha D$. Donde D es el coeficiente de libre difusión de las moléculas que se propagan en el medio, además, α varía entre $\alpha = 2, 4, 6$, dependiendo si el sistema está en 1, 2 o 3 dimensiones, respectivamente. El valor del coeficiente de difusión está establecido por la ecuación 6.

$$D = \frac{k_B T}{6\pi\eta R_H}, \quad (6)$$

Donde $k_B = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ es la constante de Boltzmann, T es la temperatura en $[K]$, η es la viscosidad dinámica del fluido, y R_H es el radio hidráulico de la molécula.

2.3.3 Leyes de Fick

La difusión de moléculas en un fluido puede explicarse por la primera y segunda ley de difusión de Fick. Estas leyes son ecuaciones diferenciales que describen la distribución no uniforme de moléculas en un medio fluido, en el dominio del espacio y el tiempo. Las leyes de difusión de Fick explican cómo la propagación de moléculas de información a través de un medio influye en la concentración media de moléculas disponibles en el receptor [25].

La primera ley de Fick establece que el flujo neto de moléculas en x es proporcional a la pendiente de la función de concentración en x , siendo la constante de proporcionalidad igual a $-D$. Por lo tanto, la primera ley de Fick puede expresarse mediante la ecuación 7, lo que significa que no habrá flujo de partículas si las moléculas se distribuyen uniformemente en el espacio, por consiguiente, la distribución de moléculas no cambia con el tiempo si $J_x = 0$.

$$J_x = -D \frac{\partial U}{\partial x}. \quad (7)$$

Las moléculas de información se propagan de forma independiente en tres dimensiones, de modo que las ecuaciones de difusión también se pueden expresar en tres dimensiones.

Generalmente, si se consideran las constantes de difusión independientes en cada dimensión, se puede escribir las ecuaciones para el flujo molecular neto y las concentraciones como:

$$J_x = -D_x \frac{\partial U}{\partial x}, \quad J_y = -D_y \frac{\partial U}{\partial y}, \quad J_z = -D_z \frac{\partial U}{\partial z}. \quad (8)$$

Ahora bien, en un medio homogéneo es usual suponer que las constantes de difusión en cada dimensión son iguales ($D_x = D_y = D_z = D$).

La segunda ley de Fick se deriva de la primera ley y describe la velocidad de cambio de la concentración de moléculas de información en un lugar, siempre y cuando se conserve el número total de moléculas de información. La segunda ley es descrita por la ecuación 9.

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \frac{\partial J_x}{\partial x}, \quad (9)$$

reemplazando (7) en (9) se obtiene:

$$\frac{\partial U}{\partial t} = D \frac{\partial^2 U}{\partial x^2}. \quad (10)$$

Si la pendiente de concentración $\frac{\partial U}{\partial t}$ es constante $\left(\left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} \right) = 0 \right)$. Entonces la concentración es estacionaria $\frac{\partial U}{\partial t} = 0$, lo que implica que el número de moléculas de información que se difunden hacia dentro será igual al que difunden hacia afuera. Cuando el transmisor libera moléculas en un espacio tridimensional, la solución a la ecuación de difusión de la segunda ley se puede encontrar como la ecuación 11:

$$U(r, t) = \frac{Q_0}{(4\pi Dt)^{\frac{3}{2}}} \exp\left(-\frac{r^2}{4Dt}\right), \quad (11)$$

donde:

- Q_0 Corresponde al número de moléculas liberadas por el transmisor
- D Es el coeficiente de difusión
- t Representa el tiempo transcurrido desde la emisión de moléculas
- r Representa la distancia entre el transmisor y el receptor

De esta manera se puede predecir que $U(r,t)$ indica las moléculas de información disponibles en la distancia r y tiempo t .

2.3.4 Propagación randómica

El desplazamiento aleatorio es el mecanismo esencial en el que se basa la comunicación molecular para llevar a cabo la transmisión de moléculas [16]. Como se muestra en la Figura 4, donde se describen los bloques funcionales, no es necesario utilizar ningún método adicional para transmitir una molécula.

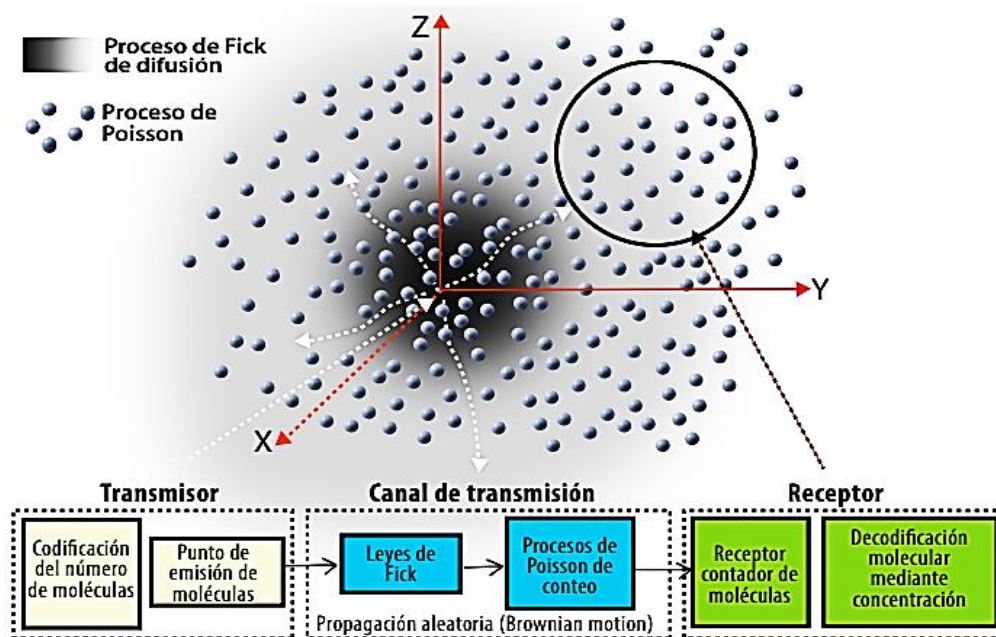


Figura 4. Abstracción básica de un sistema CM basado en desplazamiento aleatorio.

Fuente: [21]

Se supone una comunicación molecular unidireccional que comienza en un tiempo $t = 0$ en la posición $x = 0$ [4]. La nanomáquina emisora codifica la información en una molécula y la libera en $t = 0$; a continuación, la molécula se desplaza aleatoriamente a través del entorno y, cuando llega a su destino, la nanomáquina receptora decodifica la información de la molécula [16]. El desplazamiento aleatorio se rige por las siguientes reglas:

1. Cada molécula da un paso a la derecha o a la izquierda una vez cada τ segundos con velocidad y longitud de paso.
2. Las probabilidades de ir a la derecha o izquierda en cada paso son iguales entre sí y en $1/2$.

- Cada molécula se mueve independientemente de las demás. Las moléculas no interactúan entre sí.

2.3.5 Propagación randómica con arrastre

En los sistemas de CM basados en el desplazamiento aleatorio con arrastre, las moléculas emitidas por el emisor no solo se propagan a través de MB [27], sino que también cambian de posición a una velocidad que no está relacionada con el MB o la viscosidad del fluido.

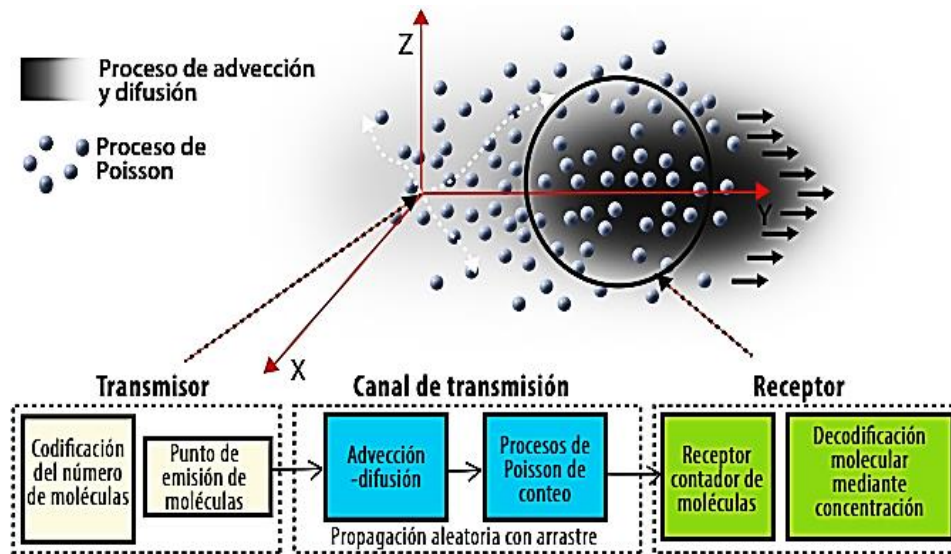


Figura 5. Abstracción básica de un sistema de CM basado en el desplazamiento aleatorio con deriva.

Fuente: [21]

Además de sufrir un arrastre direccional que propaga continuamente moléculas en dicha dirección, las moléculas pueden experimentar cambios en su movimiento mencionados anteriormente. Este fenómeno de arrastre es relevante en los sistemas biológicos, donde las moléculas pueden ser transportadas a través de fluidos para alcanzar células objetivo en diferentes partes del cuerpo. Por ejemplo, las células que secretan sustancias hormonales que circulan por el flujo sanguíneo [16]. Así, el desplazamiento aleatorio con deriva es un mecanismo fundamental para la propagación de señales en los sistemas biológicos y tiene una amplia variedad de aplicaciones en la investigación médica y biotecnológica.

2.4 Procesamiento de la información molecular

2.4.1 Transmisión de moléculas

La forma en que se transmite la información es mediante la liberación de moléculas portadoras en el medio. En un sistema molecular, este proceso se relaciona con el

movimiento de las moléculas, que a su vez está definido por ciertas propiedades que caracterizan los tipos de transporte, y cada una de estas características establece la forma en que la señal se codifica [21].

2.4.1.1 Codificación

En la comunicación molecular, la información se codifica en moléculas en lugar de ondas electromagnéticas o acústicas. Para la codificación se utilizan propiedades de moléculas individuales o de conjuntos de moléculas de forma que sea posible que el receptor las detecte, la información puede codificarse basándose en la estructura tridimensional de la molécula de información, la composición específica de las moléculas de información o en la concentración de moléculas de información [28].

2.4.1.2 Modulación

2.4.1.2.1 On Off Keying OOK

On-Off Keying es el método básico de modulación digital utilizado en las comunicaciones moleculares basadas en la difusión. Se divide el tiempo en intervalos para transmitir información, similar a la comunicación electromagnética tradicional. Para representar un bit-1, una cantidad específica de moléculas se libera al medio de comunicación desde el transmisor al inicio o durante todo el intervalo de tiempo, mientras que la ausencia de liberación de moléculas representa un bit-0 [25]. El receptor detecta el número de moléculas en sus proximidades y decide si se ha transmitido un 0 o un 1 en función de un umbral de concentración.

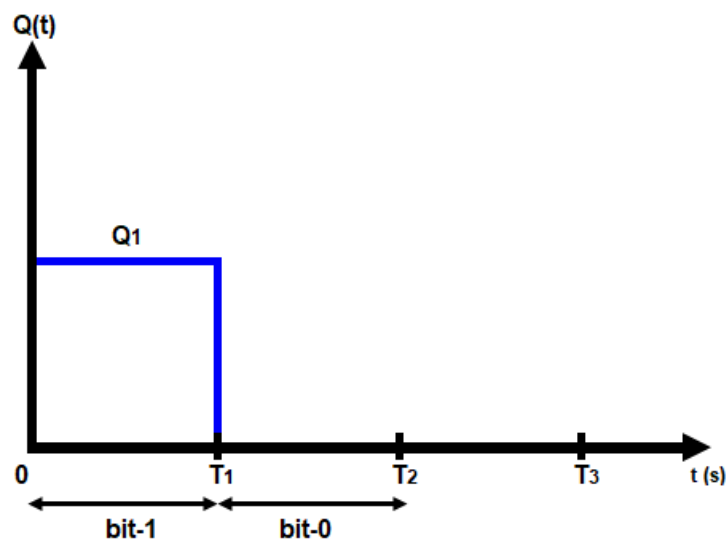


Figura 6. Modulación On-Off Keying de la señal molecular.

Fuente: Autor

On-off Keying se emplea primordialmente para caracterizar el canal de comunicación molecular basado en la difusión y para determinar su capacidad.

2.4.1.2.2 Concentration Shift Keying CSK

La modulación por Desplazamiento de Concentración CSK es un esquema de modulación análoga a la modulación por Desplazamiento de Amplitud ASK en comunicaciones electromagnéticas convencionales (Figura 7). La concentración de las moléculas representa las amplitudes de las señales en la comunicación molecular de corta y media distancia. Propuesta en [29], la información se divide en intervalos de tiempo y se asigna un símbolo a cada intervalo. No obstante, existen más de dos símbolos binarios y un símbolo puede representar más de un bit. La concentración del impulso transmitido varía según los grupos secuenciales de bits.

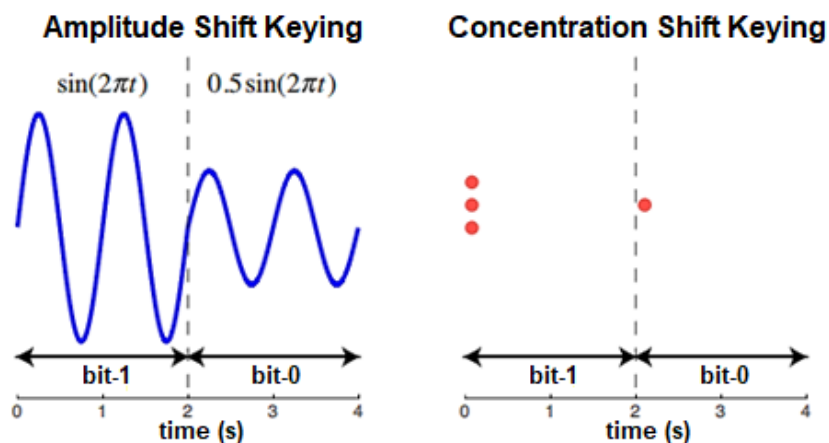


Figura 7. Comparación entre las técnicas de modulación entre la radiocomunicación tradicional ASK y la comunicación molecular CSK.

Fuente: [30]

Para codificar n bits, deben generarse 2^n niveles de concentración molecular distintos en el transmisor y considerarse $2^n - 1$ niveles de umbral en el receptor. Si las moléculas pueden no llegar al receptor en el momento en que se liberan, causan una decodificación incorrecta del símbolo actual. Si llegan en momentos posteriores, causan interferencia entre símbolos para los símbolos siguientes [25].

2.4.1.2.3 Molecule Shift Keying MoSK

Para transferir n bits de información, MoSK utiliza 2^n tipos diferentes de moléculas para representar cada combinación de 2^n secuencias diferentes de n bits [3]. La modulación se enfoca en el uso de diversos tipos de Mensajeros Moleculares MM en el sistema de

comunicación, como se indica en la Figura 8. Así, el transmisor libera una de estas moléculas en función del símbolo deseado. El tiempo se divide en intervalos del mismo tamaño y al comienzo de cada uno, se libera una gran cantidad de un tipo de estas 2^n moléculas diferentes. El receptor decodifica el símbolo en función del tipo y la concentración de la molécula recibida durante un periodo de tiempo específico, si la concentración de un tipo de molécula supera el umbral en el receptor, el símbolo se decodifica utilizando la secuencia de bits asociada con este tipo de molécula [25].

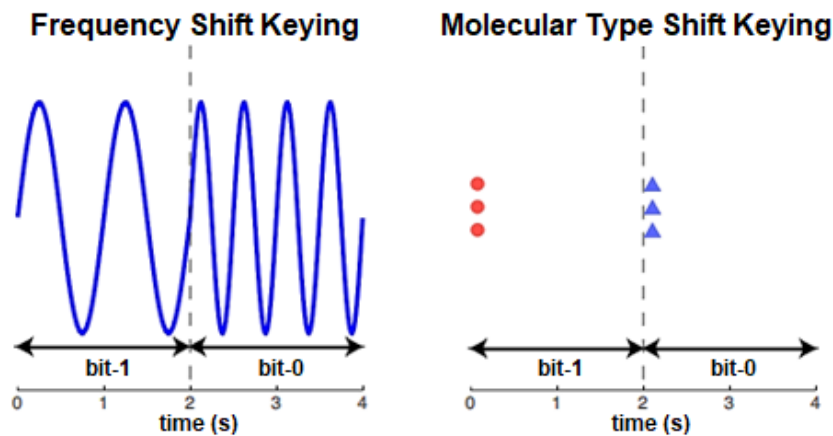


Figura 8. Comparación entre las técnicas de modulación entre la radiocomunicación tradicional FSK y la comunicación molecular MoSK.

Fuente: [30]

2.4.2 Recepción de moléculas

La información es recibida a través de la detección de las moléculas que llegan al receptor. Generalmente, esta recepción se produce mediante reacciones químicas entre las moléculas portadoras de información y las que se encuentran presentes en el propio receptor [21].

2.4.2.1 Capacidad del canal

La capacidad del canal de comunicación de la CM es determinada por la estructura de su capa física. La teoría de información se utiliza para predecir el impacto de la interferencia en la forma de la propagación aleatoria de moléculas [17]. La capacidad del canal se define como la velocidad máxima a la que se puede transmitir información desde la fuente hasta el destino, con respecto a todas las señales posibles emitidas por el transmisor [31]. Se expresa mediante el teorema de Shannon para determinar la velocidad de transferencia máxima de información [5], la capacidad del canal se expresa como:

$$C = \max\{I(X; Y)\}, \quad (12)$$

donde $I(X;Y)$ es la entropía de información mutua entre x e y . También puede estar expresada como:

$$\begin{aligned} I(X;Y) &= H(Y) - H(Y|X) \\ I(X;Y) &= H(X) - H(X|Y) \\ I(X;Y) &= H(X) - H(Y, X). \end{aligned} \tag{13}$$

donde $H(X)$ es la entropía por segundo de la señal transmitida X , $H(X|Y)$ es la entropía por segundo de la señal transmitida X dada la señal recibida Y , $H(Y|X)$ es la entropía por segundo de la señal recibida Y dada la señal transmitida X , y $H(X, Y)$ es la entropía conjunta por segundo de la señal transmitida X y la señal recibida Y .

2.4.2.2 Receptores moleculares

Las nanomáquinas receptoras detectan y reaccionan bioquímicamente con las moléculas entrantes para descodificar la información. Para su detección, se utilizan receptores diseñados para unirse a un tipo específico de moléculas de información [25]. El receptor es capaz de reconocer la llegada de moléculas objetivo en su entorno y detectar la información almacenada en una característica física de dichas moléculas, tales como la concentración, tipología o el tiempo de liberación [6].

En la mayoría de los estudios previos sobre el rendimiento de CM no tienen en cuenta la estructura física del receptor y suponen que pueden efectuar una contabilidad precisa de las moléculas que; a) penetran en una región de recepción con fronteras transparentes; b) impactan en una esfera tridimensional que es capaz de absorber moléculas; o c) se unen a receptores en su superficie [30]. Por tanto, es esencial modelar teóricamente estos procesos. Los enfoques disponibles del proceso de recepción se pueden dividir en tres categorías y se pueden visualizar en la Figura 9:

1. Recepción pasiva. En la que el receptor no obstaculiza la movilidad de las moléculas señalizadoras, lo que implica que los receptores pasivos no producen ningún impacto en la propagación de las moléculas en el canal de transmisión. Estos receptores se consideran como supuestos y se describen como entidades esféricas cuya membrana es transparente para todo tipo de moléculas [21].

2. Recepción absorbente. En la que el receptor puede de absorber y degradar cada molécula que impacta su superficie, que suele ser de forma esférica. Se asume que existen altas concentraciones de receptores moleculares y tasas de absorción que permiten que cada molécula que colisiona con la superficie del receptor sea enlazada y consumida de forma instantánea dando a lugar una “perfecta” absorción [6].
3. Recepción activa. En la que el receptor puede influir en la movilidad de las moléculas señalizadoras al reaccionar químicamente con ellas a través de receptores integrados en la superficie del receptor. Las moléculas accesibles interactúan con los receptores ubicados en su superficie, las moléculas pueden o no unirse a los receptores. La unión de las moléculas de información con los receptores es conocida como unión ligando-receptor [32].

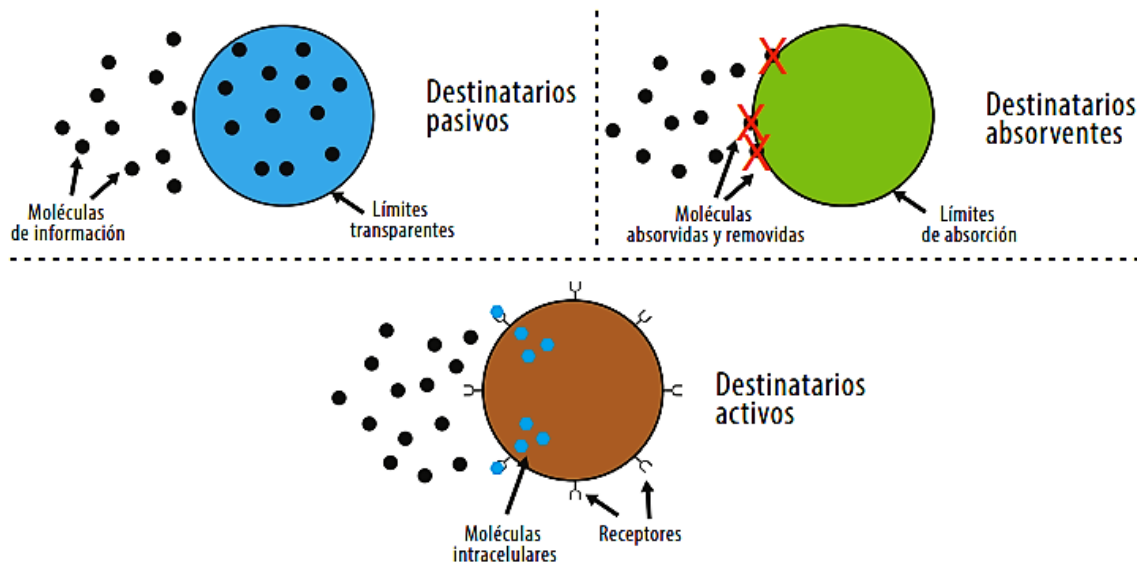


Figura 9. Modelos de receptores moleculares para el desarrollo de métodos de detección de moléculas.

Fuente: [21]

2.4.2.3 Decodificación

La decodificación de la información es un proceso similar al de la demodulación utilizado en los sistemas de comunicación convencionales. Su objetivo es recuperar la información transmitida desde el extremo de transmisión, la cual puede verse afectada por diferentes factores, como el ruido, los errores en la señal recibida o los errores provocados por las colisiones entre moléculas [21].

2.5 Network Simulator 3

Network Simulator 3 (NS-3), el cual es un simulador de redes de eventos discretos, desarrollado para proporcionar una plataforma de simulación de red abierta y extensible, diseñado como un conjunto de bibliotecas que se pueden combinar entre sí. Distribuida en módulos, los cuales hacen uso de numerosas clases para implementar los diferentes modelos que incluye el simulador [12].

El núcleo de la simulación y los modelos de NS-3 están implementados en C++ [33]. Su estructura está compuesta por varias capas, cada una construida como una biblioteca de software autónoma y afectada solo por los módulos subyacentes.

2.6 Estándares de nanocomunicaciones IEEE 1906.1 y 1906.1.1

Para el avance de esta tecnología es necesario un marco conceptual que ofrezca definiciones claras para guiar la investigación hacia sistemas prácticos. Bajo esta premisa, surgieron los estándares IEEE 1906.1 (1906.1-2015 y 1906.1.1-2020) que definen el concepto de una red de comunicación a nanoescala para lograr proponer un marco conceptual para el desarrollo de las CM. Además, de permitir una estructura de datos autodescriptiva para la gestión y control de sistemas de comunicación a nanoescala [10]. Los estándares IEEE de nanocomunicaciones es descrito como un marco de referencia en lugar de un protocolo específico [21], y debe ser lo suficientemente amplio para cubrir las posibles situaciones generales de los diferentes tipos de transmisión de mensajes moleculares. El marco IEEE 1906.1 está compuesto por los siguientes elementos [10]:

a) Componente 0: Portadora de mensajes

El mensaje puede ser transportado tanto por partículas como ondas, en este caso moléculas. Al igual que en la mecánica cuántica, también puede ser una combinación de ambos. La información puede ser codificada en la estructura molecular de la portadora del mensaje que viaja desde un transmisor a un receptor.

b) Componente 1: Movimiento

La portadora de mensajes es desplazada en cualquier dirección por el Componente de Movimiento, que proporciona el servicio de movimiento causado por una fuerza o empuje aplicado. La capacidad de desplazarse proporciona la posibilidad de transportar información a través de un canal de comunicación.

c) Componente 2: Campo

El componente de campo es responsable de proveer movimiento organizado para la portadora de mensajes. Se puede ver como una guía en las comunicaciones y puede ser implementada tanto interna como externamente en relación con el medio.

d) Componente 3: Perturbación

El componente de perturbación es fundamental en el proceso de comunicación, ya que varían las portadoras de mensajes para que puedan representar la señal que se desea transmitir. Esta variación es análoga a los procesos de modulación en las señales tradicionales de telecomunicaciones, y se vuelve un proceso crucial en el que se imprime la señal en las portadoras.

e) Componente 4: Especificidad

El componente de especificidad brinda el servicio de identificar o recibir un mensaje (dirigido por parte del componente de perturbación) cuando ha llegado al objetivo. Esto se puede comparar con la dirección en los sistemas de comunicación tradicionales, se utiliza la detección por amplitud o por energía.

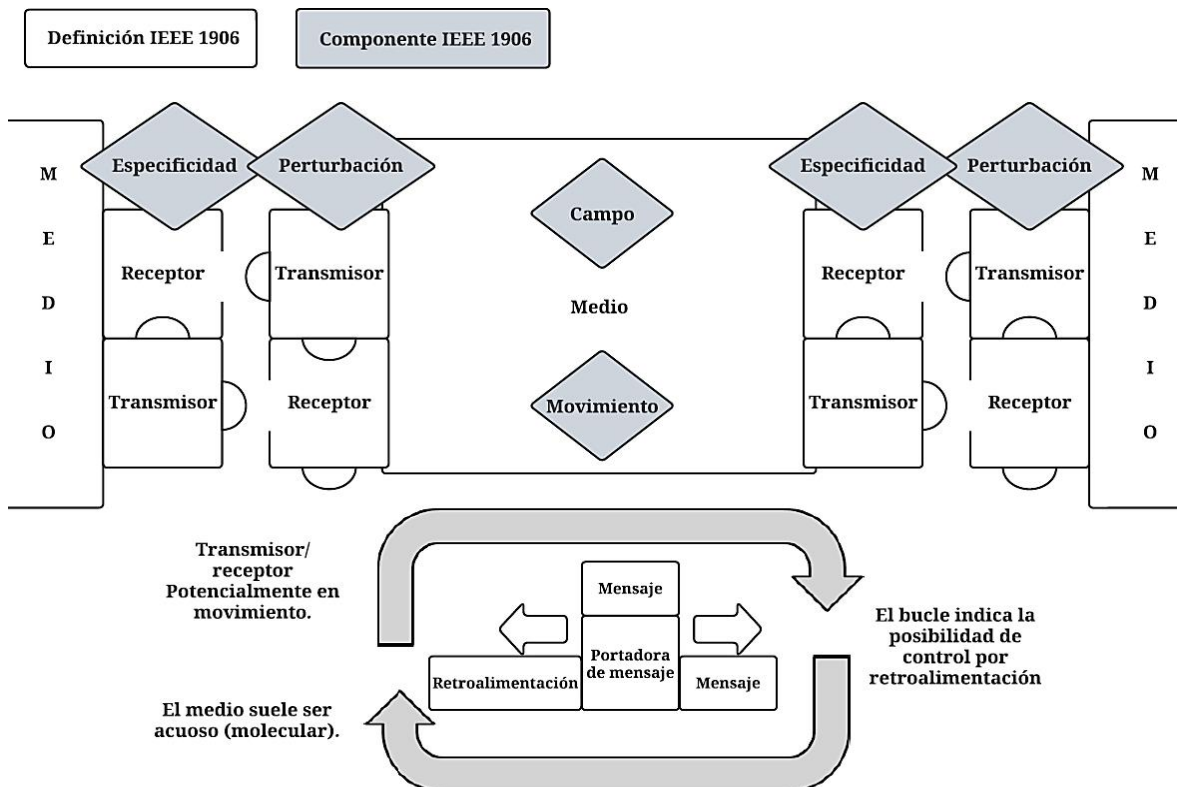


Figura 10. Modelo de referencia del estándar de nanocomunicaciones de IEEE 1906: Un nodo se compone de un emisor y un receptor. La Perturbación representa un Mensaje, el Movimiento transmite el mensaje, el Campo orienta físicamente los y la especificidad regula la recepción del mensaje.

Fuente: [10]

A pesar de que existen algunas plataformas avanzadas, existe una brecha debida a la incompatibilidad entre la gran mayoría de las herramientas de simulación y ninguna cuenta con todas las características de comunicación definidas por el marco de referencia IEEE. Para cerrar la brecha, IEEE utiliza la capacidad y accesibilidad de la plataforma de simulación NS-3 [21]. El núcleo del simulador representa los componentes definidos en el marco de referencia IEEE 1906.1 y proporciona parámetros básicos y funcionalidad común para todos los esquemas de comunicación a nivel nano. Esto permite la interacción de los componentes durante el intercambio de mensajes.

A finales del 2020, se dio la aprobación de una nueva versión del estándar de comunicaciones nano por el IEEE, lo que llevo a la creación de la versión 1906.1.1. Dicha versión introdujo un modelo de información YANG (Yet Another Next Generation) [21]. El modelo proporciona la posibilidad de incorporar detalles específicos de la física de los sistemas de comunicación a nanoescala a los componentes centrales del estándar de comunicaciones nano de IEEE 1906.1-2015, siempre y cuando se respete la estructura general previamente establecida [3].

En cuanto a la ejecución de proceso nano en forma remota, YANG ofrece formatos de configuración y administración, así como una estructura de información que permite una interpretación común a través de una amplia variedad de medios de comunicación y tecnologías asociadas, mediante [21]:

- a) Se garantiza los requerimientos que con el estándar IEEE 1906.1.
- b) Descripción de sistemas a nanoescala.
- c) Representación de la física fundamental que afecta a la IEEE 1906.1.
- d) Se emplea una estructura de datos que se describe a sí misma para llevar a cabo la gestión y control de sistemas de comunicación a nanoescala.

En los párrafos siguientes se analizan los parámetros informativos especificados en las secciones del estándar IEEE 1906.1.1 que sirven de base para un amplio análisis de un sistema de comunicación a nanoescala [21], [34]:

1. Al transferir información de un sistema CM, deben tenerse en cuenta las siguientes especificaciones:

- a) En las comunicaciones nano, se asume que las moléculas se mueven según las leyes de Fick durante la transmisión, es decir, que se propagan por movimiento omnidireccional.
 - b) Se requiere un conocimiento explícito del número de moléculas que se transmiten durante cada pulso de una comunicación.
 - c) Es necesario evaluar el retardo de propagación de un enlace molecular.
 - d) Hay que estimar la capacidad máxima del canal de transmisión.
2. Al transferir información de un sistema CM, deben tenerse en cuenta las siguientes especificaciones [21], [34]:
- a) Una red molecular es un sistema creado por el ser humano para la comunicación a nanoescala, utilizando conceptos de la física cuántica adaptados a los sistemas a nanoescala.
 - b) El acto de transmitir un mensaje de una entidad emisora a una entidad receptora que es la destinataria de esa comunicación, se conoce propiamente como comunicación.
 - c) Un sistema conocido como red activa es aquella en el que los paquetes se transfieren a través de una red de comunicaciones, lo que cambia el funcionamiento del sistema de forma dinámica.
 - d) El termino mensaje se refiere a la información que se transmitirá entre los dos extremos de la comunicación y que es conocida por el emisor, pero desconocida por el receptor.
 - e) Una entidad física conocida como portadora de mensajes transporta físicamente un mensaje a través de un medio de comunicación.
 - f) Un trasmisor, también conocido como emisor o fuente, es un dispositivo (nodo) utilizado para transmitir un mensaje a un receptor.
 - g) El Receptor es un componente que recibe diversas señales.
 - h) El entorno molecular del tipo gas, gel o líquido que permite la conexión entre los extremos de la comunicación se denomina medio de transmisión.
 - i) Especificidad es la proporción de eventos que se producen en las señales portadoras que llegan a un destino sin estar explícitamente dirigidos a él y no son procesados por ello.

- j) La sensibilidad evaluar la proporción de los sucesos que transportan mensajes y llegan a un destino explícitamente dirigidos y, en consecuencia, procesará la información que transportan.
 - k) La señalización molecular y los receptores de superficie funcionan, respectivamente, como mensaje y procesadores de la información.
3. Los componentes introducidos al principio de esta Sección 2.6 deben tenerse en cuenta cuando se envía información de un sistema de comunicación molecular.
 4. Los componentes del marco de referencia tienen una interfaz genérica claramente definida para prestar un servicio [21], [34]. Estas interfaces incluyen:
 - a) Mensaje-a-portadora de mensajes (codificación de la información).
 - b) Portadora de mensajes-a-movimiento (rango de movimiento).
 - c) Movimiento-a-campo (movimiento controlado-guiado).
 - d) Campo-a-perturbación (rápido control de campo).
 - e) Perturbación-a-especificidad (modifica dinámicamente la especificidad para codificar el mensaje).
 - f) Especificidad-a-portadora de mensajes (portadora de mensajes con capacidad de crear enlaces moleculares).
 - g) Portadora de mensajes-a-receptor en el destino (decodificación de la información).
 5. Las métricas utilizadas en las redes de comunicación a nanoescala que se encuentran en [34] se utilizan para presentar información sobre la interoperabilidad entre los componentes de un sistema y para comparar el rendimiento de otros sistemas de comunicación a nanoescala [21]. (Sección 6.2.3 de la documentación del estándar 1906.1.1).

CAPÍTULO III. METODOLOGIA.

3.1 Tipo de Investigación

La investigación se desarrolló en base a la recopilación de información para la comprensión del problema de investigación y las variables que son importantes para el análisis, de acuerdo a estos parámetros se ha definido como una investigación exploratoria. Se abordó información sobre el sistema de comunicaciones de las CM, concretamente en el intercambio de información a través del canal mediante un transmisor y receptor para así comprender la influencia de los componentes comunicacionales y sus modificaciones en los escenarios de propagación propuestos en el software NS-3.

De esta manera, dichas variables pueden ser sometidas a medición, por lo tanto, mediante una investigación cuantitativa se pretende verificar que los resultados en el intercambio de información y con las modificaciones de los escenarios respectivamente mejoren la comprensión del comportamiento de la propagación de la información molecular y el adecuado funcionamiento de las CM.

3.2 Diseño de Investigación

Para el presente estudio se ha tomado el método experimental como primer enfoque, de modo que, para la obtención de resultados que permitan evaluar el desempeño de la comunicación molecular se realizan simulaciones de escenarios de propagación, implicando la observación previa a la manipulación de variables que afectan los parámetros de una comunicación (modulación OOK-CSK-MoSK), propagación en el canal de transmisión, recepción y demodulación de información molecular.

Para el análisis del comportamiento de la comunicación, se implementó un método descriptivo y, con base a los resultados obtenidos se evalúan las variables que fueron afectadas para poder interpretar la propagación de la información molecular. Para la revisión ordenada de los resultados obtenidos para la evaluación se usó un método enfocado en el proceso analítico, a partir de los elementos del objeto de estudio para interpretar las modificaciones de las características presentes en el sistema de comunicación y evaluar el rendimiento del mismo.

3.3 Técnica de recolección de Datos

3.3.1 La observación

La observación es una técnica basada en un conjunto de reglas diseñadas para evaluar un fenómeno específico, permitiendo un análisis sistemático y preciso de los objetivos planteadas en la investigación, por lo tanto, permitirá un estudio más preciso de los parámetros que serán evaluados. Estos parámetros para considerar son las cantidades de moléculas que llegan al receptor para obtener graficas resultantes y realizar los análisis correspondientes.

3.3.2 Instrumentos de la investigación

- Módulo P1906.1 de NS-3 para CM.
- Módulo P1906.1-2015 de NS-3 para CM.
- Artículos científicos relacionados con la base teórica de las comunicaciones moleculares.
- Para implementar el modelo de gráficas resultantes se utiliza el software de MatLab.

3.4 Población y Muestra

3.4.1 Población

La población se define por los datos obtenidos del funcionamiento de los tres escenarios de acuerdo con la caracterización de los parámetros de simulación del estándar protocolario, como son; distancia de transmisión, número de moléculas liberadas, intervalo de pulso.

3.4.2 Muestra

La muestra la determinará un subconjunto representativo de la población, que según las modificaciones se analizan métricas de comunicación utilizando todos los datos recopilados que serán válidos para el proyecto.

3.5 Operacionalización de las variables

Variable Dependiente: Parámetros de transmisión

Variable Independiente: Condiciones comunicacionales

Tabla 1. Operacionalización de variables

VARIABLE		CONCEPTO	INDICADORES	INSTRUMENTOS
DEPENDIENTE	Parámetros de transmisión	Establecido por los componentes configurables en la simulación, distancia entre el nodo Tx y Rx, número de moléculas, intervalo de pulso, coeficiente de difusión.	<ul style="list-style-type: none"> • Distancia entre Tx y Rx • Número de moléculas • Intervalo de pulso • Coeficiente de difusión 	<ul style="list-style-type: none"> • Fundamentos conceptuales • Observación directa a través del modelo de simulación molecular en el software NS-3 • Modelo de gráficos en el software de MatLab
INDEPENDIENTE	Condiciones comunicacionales	Está definida por parámetros ideales para la simulación de la CM, estos son: modulación (OOK, CSK, MoSK), propagación en el canal de transmisión mediante propagación aleatoria y aleatoria con arrastre, recepción y demodulación de información molecular mediante receptores biológicos activos.	<ul style="list-style-type: none"> • Modulación • Propagación en el canal • Demodulación • Recepción 	

Fuente: Autor

3.6 Procesamiento y Análisis

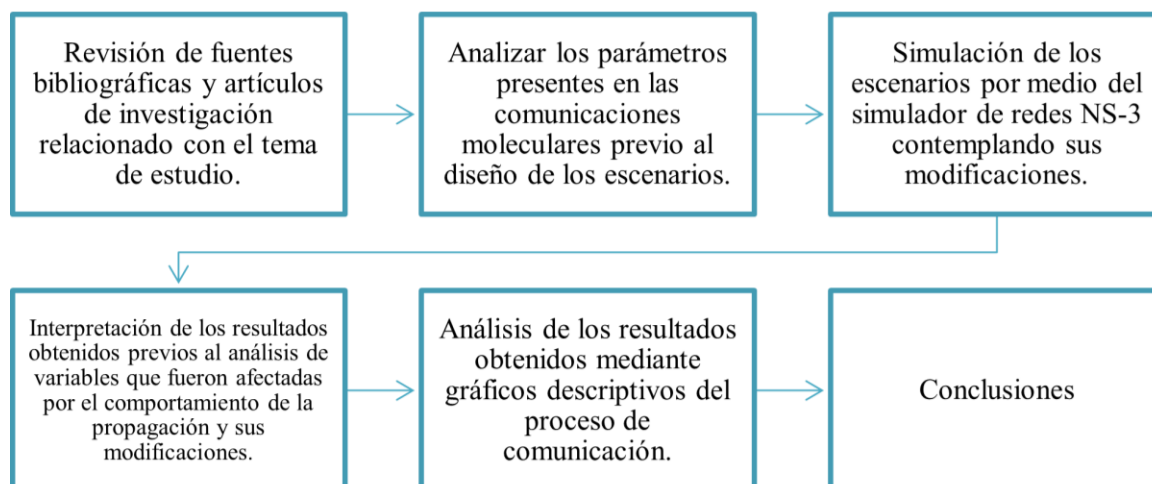


Figura 11. Procesamiento y análisis de la investigación

Fuente: Autor

3.7 Escenarios de estudio

A partir de la descripción de los componentes del módulo P1906 y de NS-3 se definieron tres escenarios de simulación que permitan realizar un análisis de la comunicación molecular implementada. Cada escenario plantea un esquema específico que consta de elementos interconectados que comprenden una nanomáquina transmisora puntual con ubicación fija, una nanomáquina receptora y un medio de propagación de moléculas:

- **Escenario 1:** Sistema de CM con modulación OOK con propagación randómica y receptor con técnica de detección de concentración molecular.
- **Escenario 2:** Sistema de CM mediante modulación BCSK con propagación randómica y receptor absorbente.
- **Escenario 3:** Sistema de CM con modulación BMoSK con propagación randómica con arrastre y receptor unión ligando-receptor.

3.8 Modelo matemático del sistema

En esta sección, se establecen las ecuaciones fundamentales que gobiernan la propagación molecular, las técnicas de modulación/demodulación y el modelo de recepción. Específicamente, se realizó una modelización matemática del efecto de difusión y la reacción en la distribución espacio-temporal de las moléculas con el fin de implementarlas en el simulador. Esta modelización es crucial para el desarrollo de los escenarios propuestos.

Cada molécula liberada por un transmisor en estos escenarios se mueve según el movimiento browniano. Se centra en la comunicación basada en la difusión, cuyo canal físico se rige por las leyes de difusión de Fick y establecido un coeficiente de difusión homogéneo tanto en el espacio como en el tiempo. La concentración de moléculas liberadas en estas condiciones previstas es significativamente inferior a la concentración de moléculas en el fluido. En estas circunstancias, se supone que pueda despreciarse la interacción entre las moléculas liberadas (por ejemplo, colisiones y fuerzas estocásticas).

3.8.1 Modelos del proceso de propagación

El concepto de difusión molecular se utiliza en esta investigación para describir como se propagan las moléculas, y la primera función *BMLibre* designa una propagación randómica, en la que la propagación de las moléculas de información se caracteriza por un movimiento libre en el espacio no afectado por factores externos. Este movimiento browniano ideal se

representa mediante el proceso de Wiener, que sigue una distribución gaussiana mediante la notación $x \sim \mathcal{N}(\mu, \sigma^2)$. Para simular él *BMLibre* se describe mediante el proceso de Wiener W_t [14], que se caracteriza por cuatro hechos:

- $W_0 = 0$,
- W_t es seguramente continua,
- W_t tiene incrementos independientes,
- $W_t - W_s \sim \mathcal{N}(0, t - s)$ para $0 \leq s \leq t$.

Donde $\mathcal{N}(\mu, \sigma^2)$ denota la distribución Gaussiana con media μ y varianza σ^2 . Para el movimiento browniano en un espacio n-dimensional, el tiempo se divide en pequeños intervalos de tiempo, y en cada intervalo consecutivo se aplica un movimiento aleatorio a cada dimensión como sigue:

$$\vec{r}_{t+\Delta t} = \vec{r}_t + \Delta\vec{r}. \quad (14)$$

El desplazamiento total de una molécula, $\Delta\vec{r}$ en un intervalo de tiempo, Δt , se puede encontrar como:

$$\Delta\vec{r} = (\Delta x_1, \dots, \Delta x_n) \quad (15)$$

donde Δx_i es un desplazamiento molecular en la dimensión i-ésima. El desplazamiento en cada dimensión a lo largo del tiempo se modela de forma independiente y sigue una distribución gaussiana:

$$\Delta x_i \sim \mathcal{N}(0, 2D\Delta t) \quad (16)$$

donde Δt es el periodo temporal. Según esta dinámica, las moléculas se propagan por el entorno [14], [35]. El modelo ignora las colisiones entre moléculas mensajeras por simplicidad, como se hace en la literatura.

La segunda función es *BMDeriva*, que implica una propagación randómica con arrastre relacionada con el proceso de Wiener con deriva. En este proceso se tiene en cuenta la dirección del fluido en el que se propagan las moléculas [3]. En un proceso de Wiener con deriva, la distribución de incrementos para cualquier tiempo t_1 y t_2 (donde $t_2 > t_1 \geq 0$), y

cualquier constante σ^2 se especifican como $B(t_2) - B(t_1) \sim \mathcal{N}(0, \sigma^2(t_2 - t_1))$ y se sustituyen por la ecuación 17, donde v es la velocidad de deriva constante igual a $v = 5 \times 10^{-4} m/s$ en el entorno [36]. El análisis se simplifica al tener en cuenta la velocidad de deriva constante a lo largo del tiempo.

$$B(t_2) - B(t_1) \sim \mathcal{N}(v(t_2 - t_1), \sigma^2(t_2 - t_1)), \quad (17)$$

3.8.2 Modelos del proceso de modulación

Para la simulación del *Escenario 1* se cuenta con un esquema de modulación OOK basado en pulsos, donde el transmisor Tx emite un pulso de moléculas para representar el bit correspondiente ($S[(t)]$) con el valor de *bit-1* y el transmisor no libera moléculas para representar el *bit-0*. En el receptor Rx , se cuenta el número de moléculas de información recibidas en cada intervalo de tiempo ($N^{Rx}[k]$), y se utiliza un umbral para decodificar el valor del *bit* transmitido en un intervalo de tiempo dado ($\hat{S}[k]$). Se decodifica como valor de bit-1 si $N^{Rx}[k] \geq \lambda$; de lo contrario, se descodifica como *bit-0*, donde λ es el umbral para la detección de señales [7], [21]. Este esquema de modulación OOK se describe de la siguiente manera:

$$f(t) = \begin{cases} Q_1 \Pi(t), & \text{bit 1} \\ 0, & \text{bit 0} \end{cases} \quad (18)$$

Donde Q_1 representa la concentración molecular y $\Pi(t)$ describe un pulso rectangular con amplitud unitaria.

Para la simulación del *Escenario 2* se emplea una modulación CSK, en la cual cada símbolo se representa por m -bits de información. En esta implementación se utilizó la técnica de modulación CSK binaria (BCSK), de modo que para el k -ésimo símbolo, el transmisor libera dos valores de símbolo con una cantidad de moléculas de información que depende del valor actual del símbolo expresado como [7]:

$$N^{Tx}[k] = n_{S[k]}, S[k] \in \{sym_0, sym_1\} \quad (19)$$

Donde $n_{S[k]}$ establece la cantidad de moléculas a ser liberadas para representar el símbolo $S[k]$, el cual puede tomar uno de los 2^m valores de símbolo, en este caso sym_0 y sym_1 . Para demodular $\hat{S}[k]$ de la señal recibida se utiliza dos umbrales λ_0, λ_1 como:

$$\hat{S}[k] = \begin{cases} sym_0, & \lambda_0 \leq N^{Rx}[x] < \lambda_1 \\ sym_1, & \lambda_1 \leq N^{Rx}[K] \end{cases} \quad (20)$$

Donde $N^{Rx}[k]$ representa el número de moléculas recibidas durante el tiempo de símbolo [7].

En la simulación del *Escenario 3* se utiliza la modulación MoSK que se enfoca en el uso de múltiples tipos de moléculas de información. El transmisor libera diferentes tipos de moléculas similares en composición, pero solo pueden ser recibidos por una clase particular de receptores. Se empleó la técnica MoSK binaria (BMoSK), en la que, para cada intervalo de símbolo, el receptor cuenta el número de moléculas de información que llegan y se demodula mediante $\hat{S}[k]$, empleando un umbral establecido como [7], [29]:

$$\hat{S}[k] = \begin{cases} sym_0, & N_{mmB}^{Rx}[k] \geq \lambda \wedge N_{mmA}^{Rx}[k] < \lambda \\ sym_1, & N_{mmA}^{Rx}[k] \geq \lambda \wedge N_{mmB}^{Rx}[k] < \lambda \\ e, & \text{cualquier otro caso} \end{cases} \quad (21)$$

Donde a y b representan los tipos de moléculas de información que se usan en el proceso de modulación, $MM_1 \in (mm_A, mm_B)$ y $N_{mm_{type}}^{Rx}[k]$ representa el número de moléculas de información definidos por mm_{type} captados por el receptor durante el intervalo de tiempo k -ésimo [7], [29].

3.8.3 Modelos del proceso de recepción

Para la simulación del *Escenario 1* la nanomáquina transmisora libera instantáneamente un pulso de moléculas. Esto crea un pico en la concentración molecular en la ubicación del transmisor, que se propaga a través del espacio y el tiempo. La propagación de este impulso puede modelarse analíticamente resolviendo las leyes de difusión de Fick [5]. Si el transmisor libera Q moléculas en el instante $t = 0$, la concentración molecular en cualquier punto viene dada por:

$$c(r, t) = \frac{Q}{(4\pi Dt)^{3/2}} e^{-r^2/4Dt} \quad (22)$$

Donde D es el coeficiente de difusión del medio, t es el tiempo y r es la distancia desde la ubicación del transmisor.

El modelo de receptor absorbente se utiliza para la simulación del *Escenario 2*; cada vez que una molécula mensajera entra en el cuerpo del receptor, es recibida y eliminada del entorno. Si los receptores no eliminan moléculas de su entorno, disponen de otros mecanismos para asegurarse de que cada molécula solo contribuye a la señal una vez, por lo tanto, después de ese punto, la molécula que golpea no puede moverse más y constituye la señal sólo una vez [14]. Este proceso se denomina primer paso o procedimiento de golpeo. Lo que interesa es la probabilidad de que las partículas difusoras alcancen por primera vez un lugar determinado en un momento determinado.

En un entorno 1-D, se tiene una solución de forma cerrada para la función de probabilidad de primer impacto. La probabilidad de que las partículas difusoras alcancen al receptor durante un largo periodo es de uno (proceso recurrente) en entornos 1-D y 2-D. El autor [14] tiene en cuenta un entorno tridimensional en el que existe una probabilidad positiva de que una partícula difusora no alcance el receptor para llegar a una solución. La probabilidad del primer impacto para una fuente puntual en un entorno tridimensional es la siguiente:

$$f_h(d, t) = \left(\frac{r_{RN}}{r_{RN} + d} \right) \frac{d}{\sqrt{4\pi Dt^3}} e^{-d^2/4Dt} \quad (23)$$

donde d es la distancia entre el transmisor y el receptor absorbente y r_{RN} es el radio del nodo receptor.

Se basó la simulación del *Escenario 3* en el modelo de receptor activo, en las que las moléculas pueden unirse o no unirse al receptor, también conocido como modelo de unión ligando-receptor. El estado del receptor es binario [17]: unido (B) o no unido (U). El estado actual del receptor es un proceso aleatorio, que depende del estado anterior del receptor y de la concentración en la entrada del receptor.

El sistema se representa en tiempo discreto, con estados $y_i \in \{B, U\}$ para cada $i \in \{1, 2, \dots, \ell\}$ (donde ℓ es el número de intervalos en la sesión de comunicación). Además, la concentración en el momento i , escrita como x_i , es binaria: alta (H), o baja (L). Evidentemente, el estado y_i del receptor solo depende del estado y_{i-1} más reciente, así como de la concentración actual en la entrada x_i del receptor [17].

Si $y_i = U$, la probabilidad de pasar al estado B en el siguiente instante de tiempo depende de la concentración: α_H y α_L para las concentraciones de entrada H y L, respectivamente. Si $y_i = B$, entonces la probabilidad de pasar al estado U en el instante de tiempo posterior es β , independientemente de la concentración.

Sea \mathbf{y} un vector de estados y sea \mathbf{x} un vector de concentraciones [17]. Dada la descripción anterior, se puede escribir la probabilidad de \mathbf{y} dada \mathbf{x} de la siguiente manera:

$$p_{\mathbf{Y}|\mathbf{X}}(\mathbf{y} | \mathbf{x}) = p(y_1|x_1) \prod_{i=1}^{\ell} p(y_i|y_{i-1}, x_i). \quad (24)$$

Por tanto, dado \mathbf{x} , este sistema es una cadena de Markov variable en el tiempo, con una probabilidad instantánea de transición de Markov $p_{Y_i|Y_{i-1}, X_i}(y_i|y_{i-1}, x_i)$ dependiente de la concentración de entrada x_i . Para expresar esta probabilidad de transición se puede utilizar una de las dos matrices de probabilidad de transición de estados.

Si $x_i = L$, se tiene:

$$\mathbf{P}_{Y|X=L} = \begin{bmatrix} 1 - \alpha_L & \alpha_L \\ \beta & 1 - \beta \end{bmatrix}, \quad (25)$$

y si $x_i = H$, se tiene:

$$\mathbf{P}_{Y|X=H} = \begin{bmatrix} 1 - \alpha_H & \alpha_H \\ \beta & 1 - \beta \end{bmatrix}. \quad (26)$$

U y B se sitúan en la primera y segunda columnas y filas de las matrices, respectivamente [17].

Dado \mathbf{x} , la secuencia de enlace \mathbf{y} puede simularse como una cadena de Markov dependiente del tiempo: para cada tiempo i , se elige el estado de enlace y_i , dado el estado previo y_{i-1} y la concentración actual x_i , según la distribución $p_{Y_i|Y_{i-1}, X_i}(y_i|y_{i-1}, x_i)$, que viene dada por las matrices de probabilidad de transición de estado (25)-(26).

Es necesario reproducirse la concentración del punto de entrada \mathbf{x} para simular el sistema por completo. Esta secuencia puede modelarse como una cadena de Markov de primer orden utilizando la matriz de probabilidad de transición [17]:

$$\mathbf{P}_X = \begin{bmatrix} 1-r & r \\ s & 1-s \end{bmatrix}, \quad (27)$$

Que contiene elementos que representan a L en la fila y columna superiores y elementos que representan a H en la fila y columna inferiores. En estas circunstancias, (\mathbf{x}, \mathbf{y}) juntos forman una cadena de Markov con los estados {UL, UH, BL, BH}, y con la matriz de probabilidad de transición [17], se tiene:

$$\mathbf{P}_{Y,X} = \begin{bmatrix} (1-\alpha_L)(1-r) & (1-\alpha_H)r & \alpha_L(1-r) & \alpha_Hr \\ (1-\alpha_L)s & (1-\alpha_H)(1-s) & \alpha_Ls & \alpha_H(1-s) \\ \beta(1-r) & \beta r & (1-\beta)(1-r) & (1-\beta)s \\ \beta s & \beta(1-s) & (1-\beta)s & (1-\beta)(1-s) \end{bmatrix}. \quad (28)$$

Utilizando esta matriz de probabilidad de transición, \mathbf{x} e \mathbf{y} pueden simularse conjuntamente seleccionando el estado futuro (y_i, x_i) dado el estado actual (y_{i-1}, x_{i-1}) , según la probabilidad $p_{Y_i, X_i | Y_{i-1}, X_{i-1}}(y_i, x_i | y_{i-1}, x_{i-1})$.

Después del proceso de la propagación randómica con arrastre, el transmisor libera moléculas al canal que tiene como respuesta de impulso $h(t)$ [36], la respuesta al impulso se obtiene como:

$$h(t) = \frac{1}{\sqrt{4\pi Dt^3}} e^{(d(t)-vt)^2/4Dt}, \quad (29)$$

donde D es el coeficiente de difusión, $d(t)$ es la distancia entre el transmisor-receptor que viene dado por $d(t) = \sqrt{[x(t) - x_t]^2 + [y(t) - y_t]^2 + [z(t) - z_t]^2}$ y v es la velocidad de deriva. La concentración total detectada por el receptor viene dada por:

$$y(t) = s(t) * h(t) = \sum_{n=1}^{\infty} a_n C(t - (n-1)T), \quad (30)$$

donde $*$ denota el operador de convolución, $C(t)$ es una función que representa la concentración detectada por el receptor en el tiempo t , $h(t)$ (que viene dada en 29) es la respuesta al impulso, y se expresa mediante (ecuación 31), donde M es el número de moléculas liberadas en el canal [36]:

$$C(t) = Mh(t) = \frac{M}{\sqrt{4\pi Dt^3}} e^{-(d(t)-vt)^2/4Dt}. \quad (31)$$

3.9 Modelo de Funcionamiento

Los archivos .cc y .h proporcionan la base del módulo IEEE P1906. A diferencia de los archivos .h, que contienen declaraciones de clases, estructuras, variables y funciones que se utilizan en el código fuente y sirven para garantizar la comunicación de los componentes, los archivos .cc contienen la implementación del código fuente estándar en C++, definiendo las funciones y métodos de cada componente. El módulo se presenta por una estructura de directorios mostrado en la Figura 12, es importante destacar que se construyen como una biblioteca, la cual esta se utiliza de forma dinámica por el archivo principal *mol-example.cc*, este archivo se encarga de ejecutar la simulación en NS-3 y define la topología y configuración de los distintos escenarios, además, dentro de este archivo se realizan las modificaciones basadas en los parámetros fundamentales (distancia entre nodos, número de moléculas, intervalo de pulso, etc.) y las funcionalidades comunes requeridas en todos los esquemas de comunicación (creación del helper, nodos, medio, movimiento, conexión de componentes, creación del paquete, etc.).

El proceso UML (Lenguaje Unificado de Modelado) de la comunicación molecular se representa en la Figura 13, definido por los siguientes pasos generales que se muestran a continuación y serán extendidos a partir de la Sección 3.9.1 de acuerdo al requerimiento de la investigación:

1. El elemento de red emisor-fuente (*NetDevice*) recibe un mensaje desde las capas superiores, el cual es transferido a la interfaz de comunicación.
2. El componente Perturbación (*Perturbation*) se usa para crear el portador del mensaje (*Message Carrier*).
3. La interfaz de comunicación del transmisor activa la propagación en el medio pasando por los componentes pertinentes a la portadora de mensajes, perturbación y campo (*Field*).
4. El componente Movimiento (*Motion*) modifica las propiedades de la portadora de mensajes, por ejemplo, la pérdida de propagación y el retardo.
5. La portadora se entrega al receptor y el componente Especificidad (*Specificity*) verifica la compatibilidad.
6. Cuando la compatibilidad ocurre, el mensaje se entrega a las capas superiores.
7. El mensaje es recibido por las capas superiores [10].

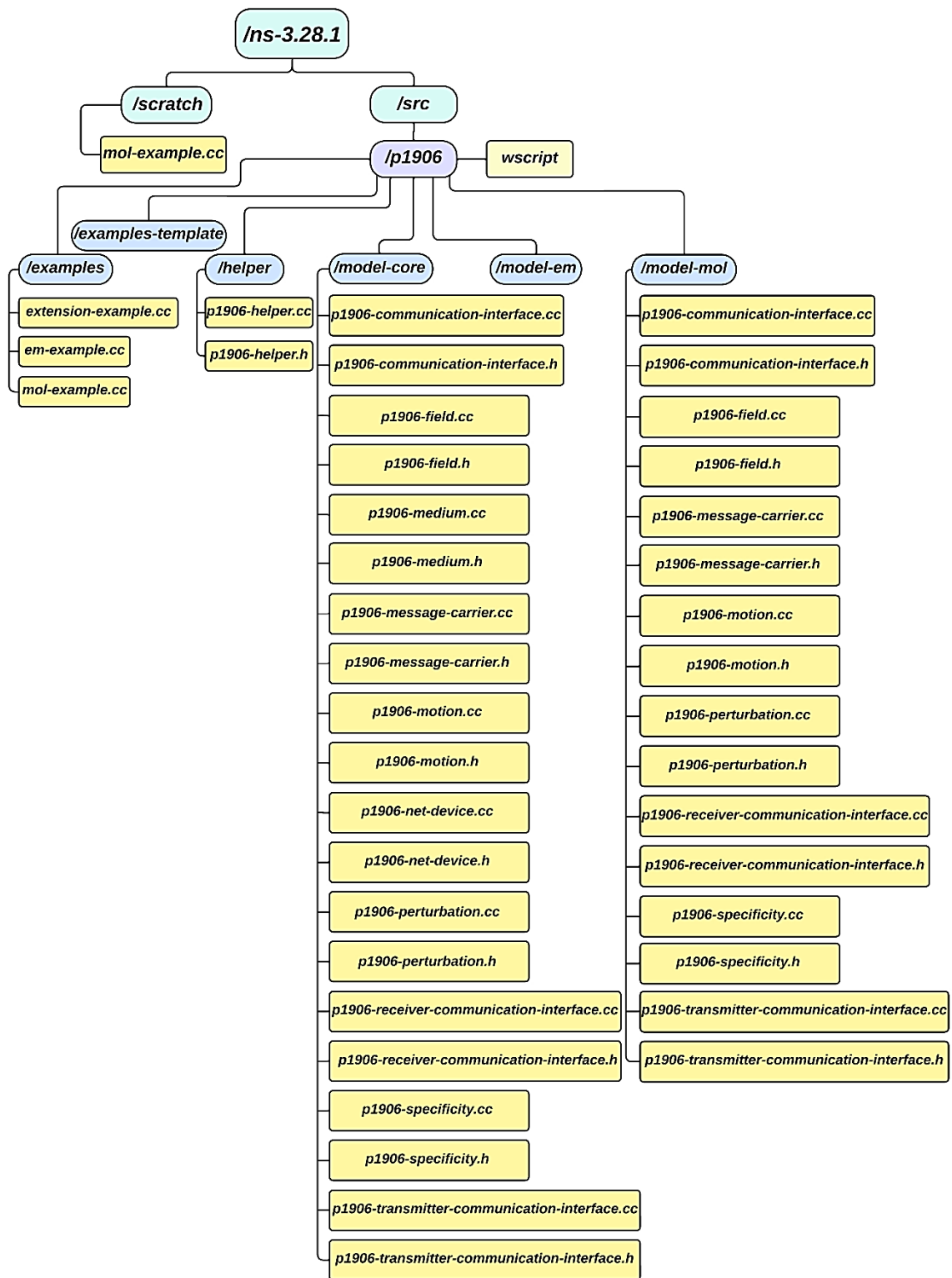


Figura 12. Esquema de los principales archivos necesarios para la configuración del estándar protocolario P1906 destinado a las CM.

Fuente: Autor

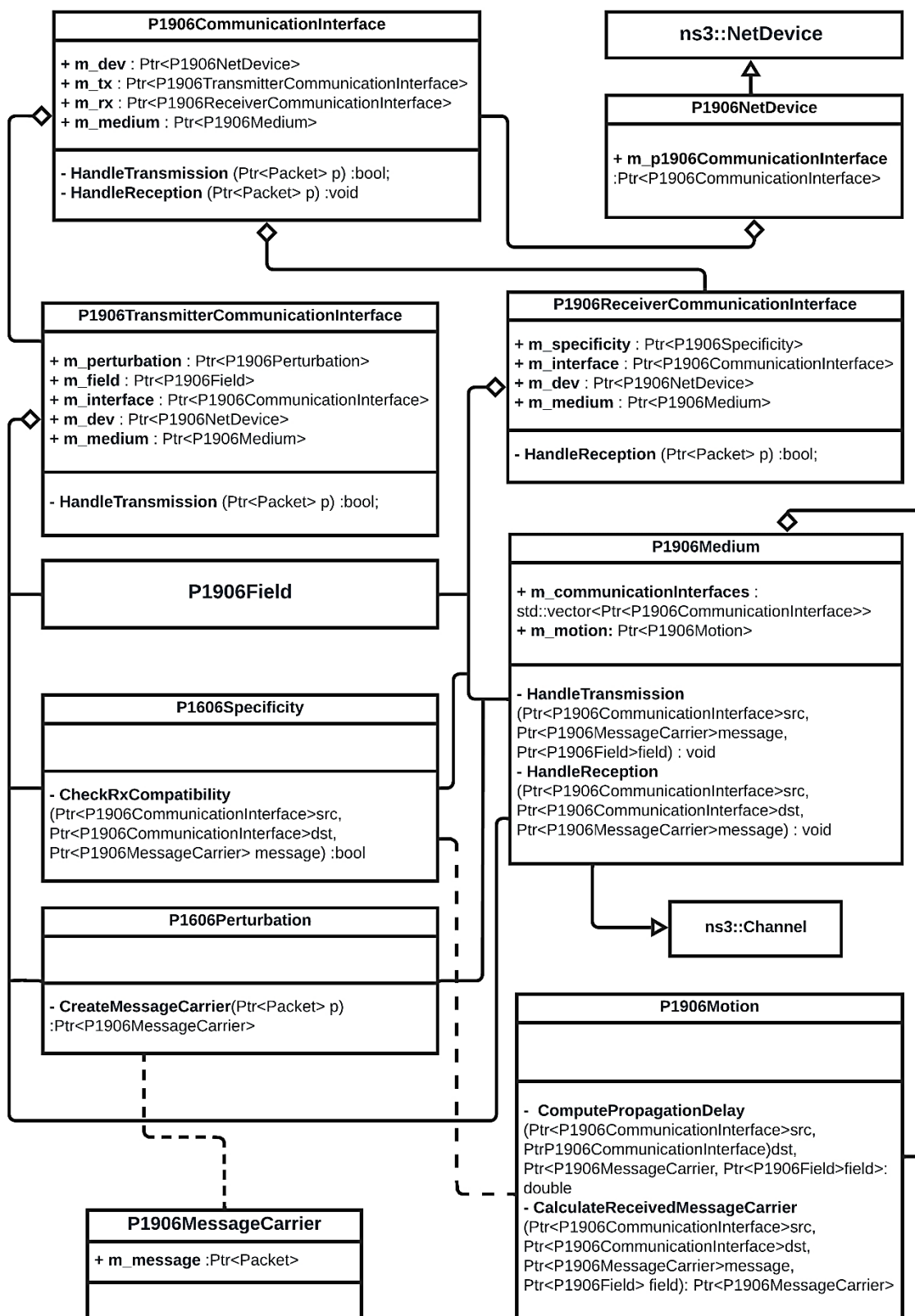


Figura 13. Diagrama UML del marco de comunicación implementado.

Fuente: Autor

3.9.1 Conexión de nodos y dispositivos

La clase *helper* proporciona los métodos suficientes para establecer parámetros específicos del módulo, así como funciones para crear instancias y conectar todo el sistema. Esta clase permite simplificar el proceso de configuración de nodos, dispositivos, canales de comunicación y otros componentes dentro de su estructura.

Para la creación de nodos en NS-3, se utiliza la clase *nodeContainer*, y mediante el uso de *Ptr < Node >*, se puede acceder a los métodos y atributos del objeto *Node*, lo que permite la interacción y configuración de propiedades como posición, distancia y el modelo de movilidad. El puntero *Ptr < Node >* proporciona una manera práctica de manipular nodos individuales dentro de la simulación, lo que facilita la personalización y configuración de cada nodo según los requisitos específicos del escenario de simulación.

La clase *P1906NetDevice* se concibe como un contenedor que modela un dispositivo de red presente en el proceso de comunicación. El propósito principal diseñado como contenedor es abarcar los protocolos y la interfaz física asociada. Uno de los componentes esenciales dentro de esta clase es *m_interface*, el cual representa la interfaz física del dispositivo y es modelado por la clase *P1906CommunicationInterface* y que administra tanto la transmisión como la recepción. Este contiene un puntero a las clases *P1906TransmitterCommunicationInterface*, encargada del procedimiento de transmisión y *P1906ReceiverCommunicationInterface*, que gestiona el procedimiento de recepción [5], [10].

3.9.2 Clase portadora del mensaje (Message Carrier)

La clase *P1906MessageCarrier* es responsable de implementar el portador del mensaje que se puede generar e intercambiar entre dispositivos. De manera predeterminada, este componente cuenta con un puntero que apunta al objeto *ns3::Packet* que representa la cadena de bits almacenada en el mensaje implementada por medio de la clase *Packet* [10]. La clase extendida del núcleo del código NS-3 es la componente *ns3::P1906MOLMessagecarrier*, en donde se incluyen los parámetros de la portadora tales como el número de moléculas por cada intervalo, el tiempo de transmisión y un segmento que simboliza la modulación.

La clase *P1906MOLMessageCarrier*, que se define como una subclase de *P1906MessageCarrier* en la cual se proporcionan funciones para obtener el identificador de tipo (*TypeID*) para la clase. Además, se encarga de la inicialización y destrucción de los objetos de la clase, estableciendo el mensaje a 0 en ambos casos. En el archivo se establecen las funciones que permiten obtener las variables del mensaje como miembros de datos.

3.9.3 Clase perturbación (Perturbation)

Corresponde a la componente *ns3::P1906MOLPerturbation*, responsable de la modulación del paquete (*Ptr < Packet > p*) [10]. Su función es similar a la de la modulación de señales, donde se produce la variación en la concentración o el movimiento de la señal de información. A través de este componente es posible almacenar información como el número de moléculas que se transmiten por cada pulso y el intervalo de tiempo entre dos pulsos sucesivos. Utiliza el método *CreateMessageCarrier* la cual es utilizada para codificar la información que se transmitirá y asociarla con la portadora correspondiente. Aquí se realizó la creación del objeto de mensaje portadora *P1906MOLMessageCarrier* a partir del objeto de paquete *Packet*, el método comienza creando la función y asignando a una variable *carrier* de tipo *Ptr < P1906MOLMessageCarrier >* usado para almacenar y transportar la información relacionada con la modulación, iterando sobre el tamaño del paquete realizando la operación de verificación de bit y agregando la cadena correspondiente. Finalmente, se configura las propiedades del objeto de mensaje de portadora utilizando los valores calculados y se devuelve el objeto para su posterior uso en la simulación.

Se configura la técnica de modulación OOK en el escenario 1, donde se envía un número de moléculas para representar el bit 1, mientras que no se envía ninguna en el caso del bit 0. En la simulación del escenario 2, se implementa la técnica de modulación BSCK, en la que se transmite un número total de moléculas para representar el bit 1 y se envía la mitad de ese número para representar el bit 0. Y para el escenario 3, se utiliza la técnica de modulación BMoSK, que implica la activación de un determinado tipo de molécula durante un periodo de símbolo para transferir múltiples bits. Estas técnicas se describen en la sección 3.8.2.

3.9.4 Clase movimiento (Motion)

Esta clase implementa el componente de movimiento del módulo P1906 denominado *ns3::P1906MOLMotion*, el cual incluye las funciones encargadas con el movimiento de

las moléculas, lo que contribuye a generar el potencial necesario para propagar la información a través del canal de comunicación [5], [10]. El proceso de comunicación inicia cuando el transmisor necesita enviar información y para ello emite un pulso de moléculas mediante el movimiento browniano *MB Libre* y movimiento browniano con deriva *MB Deriva* de forma independiente establecido por los escenarios (Sección 3.8.1), lo que genera un aumento en la concentración molecular en la ubicación del transmisor y permite transmitir la información por todo el espacio.

La función *ComputePropagationDelay()* se implementa con la finalidad de calcular el retardo de propagación molecular basado en la distancia entre las dos interfaces tomando los argumentos del transmisor y receptor, el mensaje transportado y el campo asociado. Además, en esta clase se declara la función *CalculateReceivedMessageCarrier()*, que se utiliza para calcular el tiempo de duración de cada símbolo para obtener la ISI promedio mediante el tamaño de vector de tiempos en el sistema de registro.

3.9.5 Clase campo (Field)

La función de la componente *ns3::P1906MOLField* es actuar como una guía de onda que proporciona la capacidad de direccionar un portador de mensaje (message carrier) a su destino [10]. Este componente puede implementarse interna o externamente en relación con el medio, para esta investigación se utiliza una implementación externa, debido a que se encarga de enviar los parámetros al Medio, para luego ser el encargado de enviar estos parámetros al componente movimiento y usarlo con la función *BM Deriva*.

3.9.6 Clase especificidad (Specificity)

Durante el proceso de recepción, la clase *ns3::MOLReceiverCommunicationInterface* activa el procedimiento a través de la función *HandleReception* para comenzar el proceso comprobando que la interfaz pueda recibir e interpretar correctamente el mensaje transmitido [10]. Para este motivo, llama al método *CheckRxCompatibility* de la función *P1906Specificity* para determinar si se recibirá o no mensaje. Se implementa la componente *ns3::MOLSpecificity* para la detección o recepción de un portador de mensaje, comprueba si la capacidad de canal es mayor que la tasa de transmisión. En caso de que la capacidad del canal sea mayor, se procede con la recepción y demodulación. De lo contrario, no se lleva a cabo la recepción y por tanto la demodulación.

El modelo molecular utilizado en los estándares IEEE proporciona un valor booleano verdadero que indica si se cumple el límite de Fick, por otro lado, si la capacidad molecular es menor y no se respeta el límite de Fick, se produce un valor booleano correspondiente a falso, lo que resulta en un fallo en la conexión.

3.10 Implementación del estándar protocolario P1906.1.1 en NS-3

NS-3 se divide en varios módulos siguiendo una estructura de biblioteca que son usados para realizar simulaciones de acuerdo a las necesidades. El módulo IEEE 1906 no se contempla en la actualización del software NS3 usado en esta investigación, así que se lo agrega por medio del archivo de configuración *wscript* que es leído por la herramienta *waf* que compila el código y ejecuta las funciones de la aplicación *mol-example.cc*. En *wscript* están definidas las dependencias del módulo, así como la declaración de la aplicación. En el Anexo II se describe el proceso para la correcta integración del módulo P1906.

3.11 Métricas de comunicación

Una forma de examinar las características del canal molecular es a través del análisis directo de la segunda Ley de Fick. Para este propósito, se consideran varias métricas que serán validadas mediante simulación y que permitirán evaluar el rendimiento de la comunicación en los escenarios propuestos. La investigación se enfoca en tres de ellas: pulso de retardo, amplitud del pulso y el ancho de pulso.

3.11.1 Pulso de retardo

Para hallar el pulso de retardo, que representa el instante de tiempo en el receptor desde la llegada de la primera molécula hasta donde la ecuación del pulso alcanza su máximo. Se procede a calcular la posición de este máximo tomando la derivada temporal de la función y encontrando el instante de tiempo en el que es igual a cero [37], obteniendo la ecuación 32:

$$\frac{dc(r, t)}{dt} = \frac{d}{dt} \frac{Qe^{-r^2/4Dt}}{(4\pi Dt)^{3/2}} = 0 \quad (32)$$

Aislando la variable t se puede obtener el tiempo en el que el pulso tiene su máximo t_d . Así, este tiempo se interpreta como el retardo de pulso en el canal [37]:

$$t_d = \frac{r^2}{6D} \quad (33)$$

Es importante destacar que el retardo obtenido de la ecuación 33 está relacionado con la distancia entre transmisor y receptor elevado al cuadrado, y es inversamente proporcional al coeficiente de difusión D . De este modo, a un mayor coeficiente de difusión permitirá una propagación más rápida de los pulsos moleculares.

3.11.2 Amplitud máxima de pulso

Para determinar esta amplitud máxima, se procede a evaluar la ecuación de pulso que se ha encontrado previamente (ver ecuación 33) en el instante de tiempo en el que el pulso alcanza su valor máximo, reemplazando en la ecuación 32, dando lugar a la ecuación 34 [37]:

$$C_{max} = \left(\frac{3}{2\pi e} \right)^{3/2} \frac{Q}{r^3} \quad (34)$$

Se observa que la amplitud del pulso no depende del coeficiente de difusión, lo que indica que dicha atenuación del pulso molecular no está determinada por el coeficiente de difusión del medio. Sino que dicha concentración máxima decrecerá dependiendo del factor distancia.

3.11.3 Ancho de pulso molecular

Se determina el ancho de pulso considerando valores de concentración mayores al 50% del valor máximo, es decir, el intervalo de tiempo en el que el pulso tiene una amplitud superior a la mitad de su valor máximo (ver ecuación 35) [37].

$$c(r, t) = \frac{Q}{(4\pi Dt)^{3/2}} e^{-r^2/4Dt} = \frac{C_{max}}{2} = \frac{1}{2} \left(\frac{3}{2\pi e} \right)^{3/2} \frac{Q}{r^3} \quad (35)$$

Se obtiene la siguiente expresión aislando la variable tiempo (ver ecuación 36):

$$t = - \frac{r^2}{6DW \left(-\frac{1}{2^{2/3}e} \right)} \quad (36)$$

Donde W es la función W de Lambert. Esta ecuación posee dos soluciones, que representa los dos instantes de tiempo en los que la amplitud del pulso es igual a la mitad de su valor máximo [37]. Estos instantes vienen dados por la ecuación 37:

$$t_1 = \frac{0.0728}{D} r^2 \quad t_2 = \frac{0.5229}{D} r^2 \quad (37)$$

Finalmente, se obtiene la expresión de ancho de pulso con la diferencia entre los dos instantes dando lugar a la ecuación 38 [37]:

$$t_w = t_2 - t_1 = \frac{0.4501}{D} r^2 \quad (38)$$

Se observa que al igual que ocurría con el retardo del pulso, el ancho del pulso es inversamente proporcional al coeficiente de difusión y directamente proporcional al cuadrado de la distancia. En consecuencia, a medida que la distancia entre el transmisor y receptor aumenta, el pulso de la señal se ensancha.

3.12 Parámetros de simulación del estándar protocolario IEEE 1906.1.1

Previo al análisis de resultados de los escenarios propuestos con las métricas de comunicación se debe caracterizar los parámetros presentes en el estándar IEEE. Este proceso de identificación es útil para hallar los parámetros ideales que aseguran la comunicación del sistema. Se realizan varias simulaciones variando los parámetros a identificar, se promedian los resultados y se grafican en función del *Bit Error Rate* (BER) siguiendo la recomendación del autor [3], que mide la probabilidad de error en la recepción de los bits transmitidos en la comunicación, en relación con la difusión molecular, un valor bajo en el BER es indicativo de una alta calidad de la transmisión. De esta manera, se simula modificando diversas variables, tales como el número de moléculas transmitidas (*nbOfMolecules*), la distancia entre transmisor y receptor (*nodeDistance*), el coeficiente de difusión (*diffusionCoefficient*), la frecuencia del pulso molecular (*pulseInterval*). Todo el proceso se realiza dentro del archivo “mol-example.cc” del estándar protocolario IEEE 1906.

3.12.1 Distancia de transmisión

La simulación se realiza considerando el proceso dentro del estándar protocolario, con la identificación de la distancia de transmisión se necesita encontrar la distancia máxima entre el transmisor y receptor, en la cual no se obtienen pérdidas en la propia transmisión. Se considera valores desde $1.5 \mu\text{m}$ hasta $2.5 \mu\text{m}$ configurados en la variable *nodeDistance* del protocolo. Estos parámetros se muestran en la Tabla 2 y en la Figura 14 se ilustra la curva resultante de la concentración presentes en el escenario.

Tabla 2. Parámetros de simulación para la identificación de la distancia de transmisión.

Nombre	Variable	Valores	Unidad
Distancia de transmisión	<i>nodeDistance</i>	1.5 – 2.5	μm
Número de moléculas	<i>nbOfMoleculas</i>	10000	<i>mol</i>
Intervalo de pulso	<i>pulseInterval</i>	1000	<i>ms</i>
Coefficiente de difusión	<i>diffusionCoefficient</i>	1	$\frac{nm^2}{ns}$

Fuente: Autor

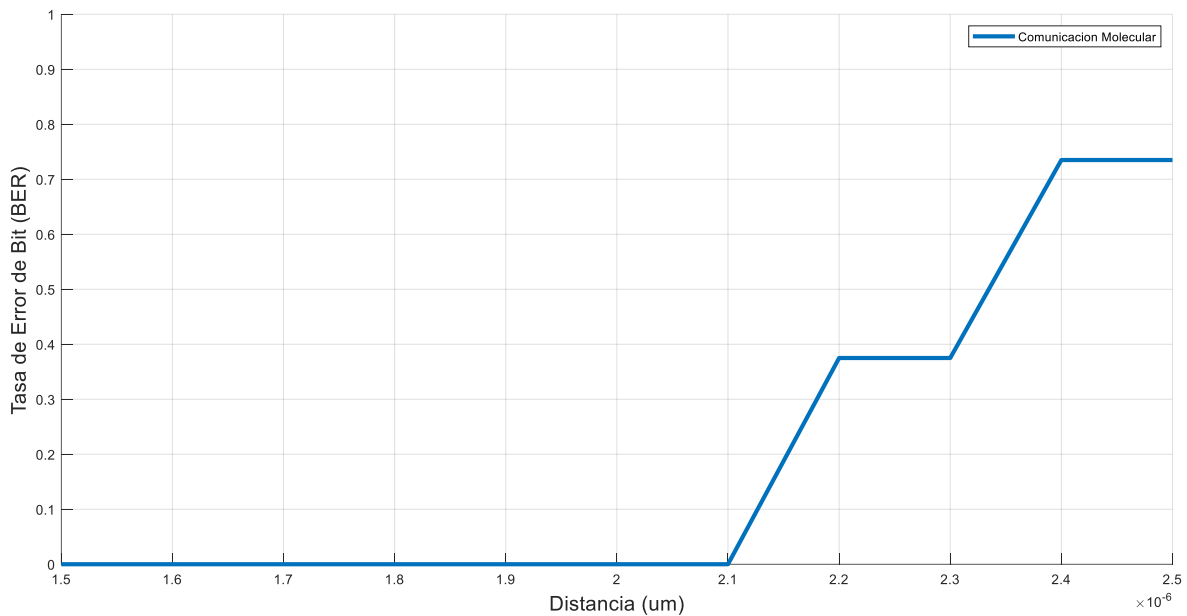


Figura 14. Distancia de transmisión vs BER.

Fuente: Autor

Los resultados indican que el BER aumenta a partir de $2.1\mu m$ en función a la distancia, y que para valores menores no hay errores en la transmisión. Se puede deducir que a medida que se incrementa la distancia entre el transmisor y el receptor, aumenta la probabilidad de errores en la simulación.

3.12.2 Número de moléculas liberadas

Encontrar la cantidad adecuada de moléculas ayuda a modular el mensaje y de evita que se suelten moléculas en gran cantidad en el medio y que lleguen a causar interferencia. Se utiliza el valor hallado en la identificación de la distancia de transmisión. Para la identificación del número de moléculas liberadas se considera valores desde $1000\ mol$ hasta

20000 *mol*, configuradas en la variable *nbOfMoleculas*. Los parámetros utilizados se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Parámetros de simulación para la identificación del número de moléculas.

Nombre	Variable	Valores	Unidad
Distancia de transmisión	<i>nodeDistance</i>	2.1	μm
Número de moléculas	<i>nbOfMoleculas</i>	1000 – 20000	<i>mol</i>
Intervalo de pulso	<i>pulseInterval</i>	1000	<i>ms</i>
Coefficiente de difusión	<i>diffusionCoefficient</i>	1	$\frac{nm^2}{ns}$

Fuente: Autor

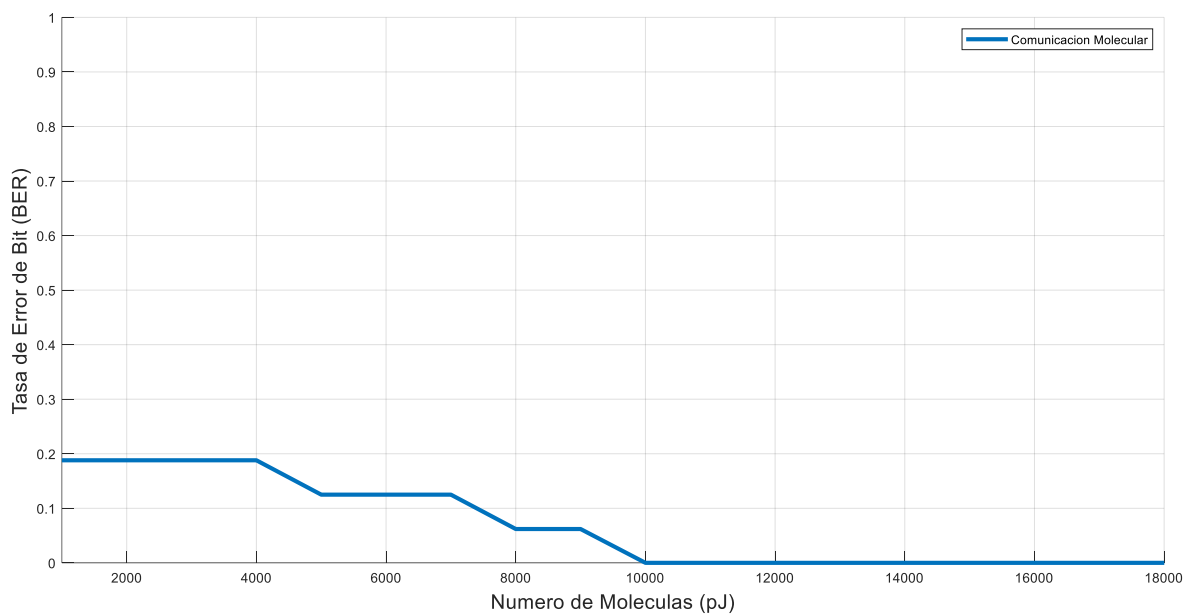


Figura 15. Relación del número de moléculas y el BER.

Fuente: Autor

La Figura 15 muestra cómo el aumento en la cantidad de moléculas liberadas permite reducir el BER a través de modulaciones que varían por encima de las 10000 *mol*. Los errores en la recepción se deben a las moléculas que se encuentran sueltas en el medio y que no son fácilmente guiadas por el MB libre del escenario.

3.12.3 Intervalo de pulso

La variable *pulseInterval* considera variables desde 100 *ms* hasta 5000 *ms* para poder encontrar el valor de intervalo de pulso adecuado, y lograr que el número de moléculas lleguen al receptor y de esta manera decodificar el mensaje. Se utiliza el valor encontrado

en la identificación de la distancia de transmisión y el valor del número de moléculas liberadas. Los parámetros utilizados se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Parámetros de simulación para la identificación del intervalo de pulso.

Nombre	Variable	Valores	Unidad
Distancia de transmisión	<i>nodeDistance</i>	1	μm
Número de moléculas	<i>nbOfMoleculas</i>	10000	<i>mol</i>
Intervalo de pulso	<i>pulseInterval</i>	100 – 5000	<i>ms</i>
Coefficiente de difusión	<i>diffusionCoefficient</i>	1	$\frac{nm^2}{ns}$

Fuente: Autor

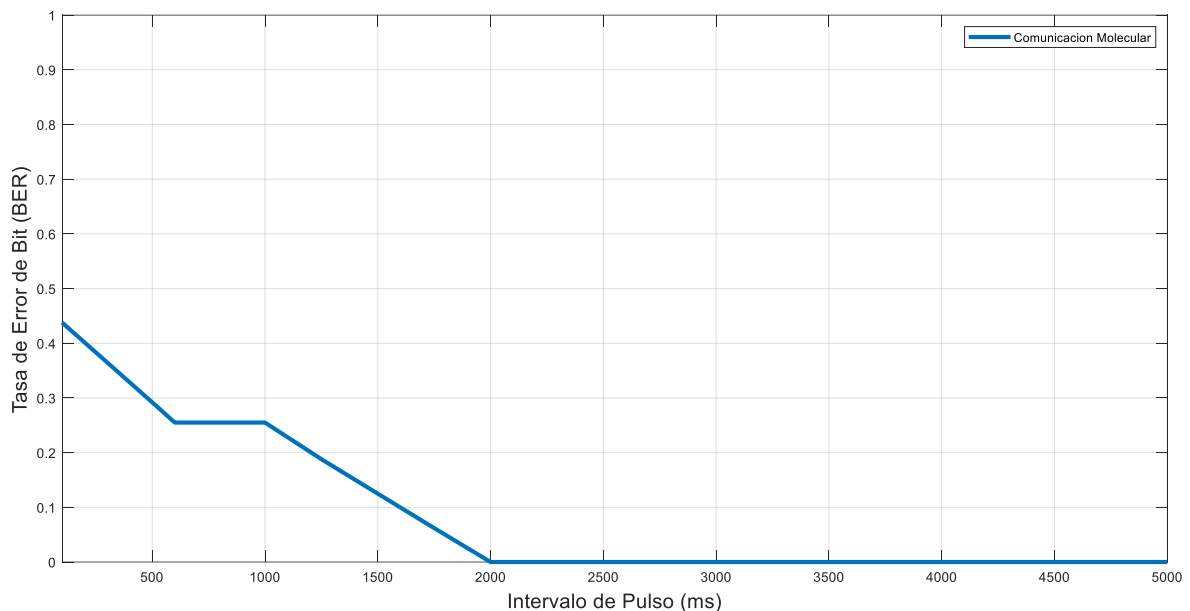


Figura 16. Intervalo de pulso vs BER.

Fuente: Autor

La Figura 16 muestra los resultados obtenidos en relación del intervalo de pulso y el BER, los resultados representan que a medida que aumenta el intervalo de pulso, se produce una disminución en el BER. Esta caracterización establece valores ideales que permitan la calidad de la transmisión, para un valor mayor a 2000 ms.

3.13 Adquisición de resultados

En el simulador se implementaron archivos .sh en cada escenario, los cuales realizan un ciclo repetitivo de evaluación por medio de la configuración de variables en la simulación y, como

resultado, estos archivos contienen el registro de información (archivos .csv) de cada escenario de forma independiente para su correspondiente análisis de manera estructurada.

Para la obtención y representación de resultados se usa el software MatLab, en el cual se analizan los datos mediante la importación de archivos .csv extraídos del simulador NS-3.

En el presente proyecto de tesis, se utilizó la técnica del error cuadrático medio ECM para evaluar la precisión de la simulación (archivos .csv) en comparación con los resultados del modelo matemático, específicamente con las métricas de comunicación. El ECM es una medida de dispersión que permite determinar qué tan cerca se encuentran los valores estimados de los valores del modelo, lo que a su vez brinda información sobre la calidad de la simulación [38], [39]. El cálculo del ECM se realizó utilizando la siguiente formula:

$$ECM = \frac{\sum(y_i - \hat{y}_i)^2}{n} \quad (39)$$

Donde:

- Σ la notación de suma
- y_i es el valor observado (simulación)
- \hat{y}_i es el valor predicho correspondiente (analítico)
- n el número de datos

CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Luego de la identificación de los parámetros adecuados, se procede a realizar las simulaciones de los tres escenarios establecidos y posteriormente, el análisis de resultados. Estos parámetros se muestran en la Tabla 5.

Con el fin de validar los resultados de las simulaciones de los escenarios derivados de este trabajo, se emplearon las características del canal molecular basándose en métricas de comunicación para el análisis de resultados como el pulso de retardo en el medio, amplitud máxima de pulso, ancho de pulso mínimo, y la capacidad del canal molecular.

Tabla 5. Parámetros generales de simulación.

Nombre	Abreviación	Distancia de transmisión	Número de moléculas	Intervalo de pulso	Coefficiente de difusión	Tipo de movimiento
On-Off Keying	OOK	2.1 μm	10000 mol	2000 ms	1 nm^2/ns	BM Libre
Concentration Shift Keying	CSK	2.1 μm	10000 mol	2000 ms	1 nm^2/ns	BM Libre
Molecular Shift Keying	MoSK	2.1 μm	10000 mol	2000 ms	1 nm^2/ns	BM Deriva

Fuente: Autor

4.1 Resultados Escenario 1

El esquema de simulación de una CM con modulación On-Off Keying, emplea una conexión punto a punto para conectar los nanodispositivos sin obstáculos ni interferencias externas que afecten la comunicación y en el cual se realiza un movimiento omnidireccional de las señales moleculares según la componente de campo. De acuerdo con el escenario establecido por los parámetros generales de simulación presentes en la Tabla 5. A continuación se muestran los resultados obtenidos a partir del estándar IEEE 1906.1.

4.1.1 Concentración Molecular

El resultado principal obtenido a través del estándar protocolario junto con NS-3 es la concentración molecular en función del tiempo medida por el receptor. La nanomáquina transmisora está establecida por una ubicación fija, donde el transmisor libera las moléculas en el medio luego de su codificación y estas son gobernadas por el movimiento browniano, por último, se modela el receptor como una nanomáquina que puede contar el número de

moléculas en un volumen cercano, lo que permite estimar la concentración. Las leyes de Fick establecen valores máximos de distancia entre un nodo transmisor y receptor para prevenir errores en la detección de señales moleculares. La calidad de comunicación entre los nodos depende de la concentración molecular, y si la distancia entre ellos es excesivamente grande, la concentración no alcanzará el umbral necesario para una detección adecuada, lo que ocasionará la pérdida del mensaje que se está transmitiendo.

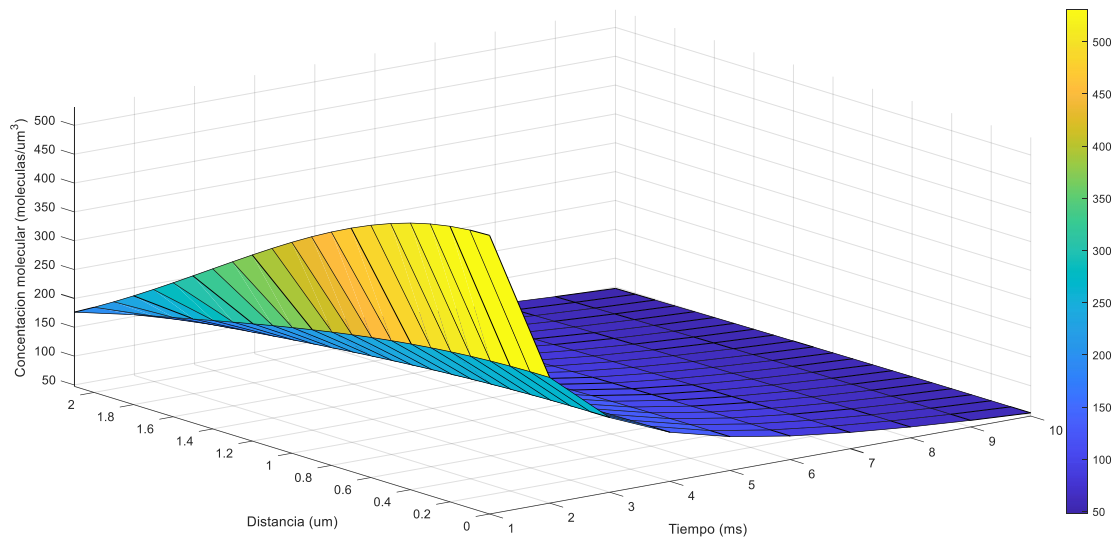


Figura 17. Concentración molecular en función a la distancia y el tiempo obtenido de la simulación del escenario 1.

Fuente: Autor

En la Figura 17 se muestra el resultado de la concentración molecular. Se puede apreciar que la concentración medida por el receptor alcanza su valor máximo en el primer instante de tiempo cuando la distancia aumenta a más de $0 \mu\text{m}$, este instante de tiempo en el que se registra el pico de concentración se considera como el de pulso de retardo. Tras alcanzar su valor máximo, la concentración disminuye gradualmente debido al efecto de la difusión.

Además, es importante destacar que el retardo no solo indica el momento de mayor concentración, sino que también proporciona información sobre la velocidad de propagación de la señal molecular. Cuanto mayor sea el pulso de retardo, más lenta será la difusión de las moléculas en el medio. Por otro lado, un pulso de retardo más corto indica una difusión más rápida y una propagación más eficiente de la señal, este aspecto es ampliado en la Sección 4.1.2 en el análisis de resultados.

```

P1906Medium:HandleTransmission("===Se ha configurado el componente de Movimiento/Motion===")
P1906Medium:HandleReception(0x55ec8d9803f0)
P1906CommunicationInterface:GetP1906ReceiverCommunicationInterface(0x55ec8d983140)
P1906MOLReceiverCommunicationInterface:HandleReception(0x55ec8d983300, "===Sección-Proceso de Recepción===")
P1906ReceiverCommunicationInterface:GetP1906Specificity(0x55ec8d983300)
P1906MOLSpecificity:CheckRxCompatibility(0x55ec8d982a70)
P1906MOLMessageCarrier:GetPulseInterval(0x55ec8d9839f0)
P1906CommunicationInterface:GetP1906NetDevice(0x55ec8d97fdf0)
P1906NetDevice:GetNode(0x55ec8d9a3da0)
P1906CommunicationInterface:GetP1906NetDevice(0x55ec8d983140)
P1906NetDevice:GetNode(0x55ec8d982a30)
P1906MOLSpecificity:CheckRxCompatibility(0x55ec8d982a70, "[distancia,txRate]", 2.1e-06, 0.5)
P1906MOLSpecificity:GetDiffusionCoefficient(0x55ec8d982a70)
P1906MOLSpecificity:CheckRxCompatibility(0x55ec8d982a70, "testCapacidad: [distancia, txRate, Capacidadcana
l, AnchoPulsoMin]", 2.1e-06, 0.5, 0.503793, 1.98494)
P1906MOLMessageCarrier:GetMolecules(0x55ec8d9839f0)
P1906MOLSpecificity:CheckRxCompatibility(0x55ec8d982a70, "Límite de Fick respetado")
P1906MOLReceiverCommunicationInterface:HandleReception(0x55ec8d983300, "Mensaje recibido correctamente")
P1906MessageCarrier:GetMessage(0x55ec8d9839f0)
P1906MOLReceiverCommunicationInterface:HandleReception(0x55ec8d983300, "Recibiendo el paquete [id,size]",
0, 1)
P1906MOLMessageCarrier:GetModulation(0x55ec8d9839f0)
P1906MOLReceiverCommunicationInterface:HandleReception("[Concentración Máxima por Bit:]", 0)
P1906MOLReceiverCommunicationInterface:HandleReception("[Concentración Máxima por Bit:]", 0)
P1906MOLReceiverCommunicationInterface:HandleReception("[Concentración Máxima por Bit:]", 0)
P1906MOLReceiverCommunicationInterface:HandleReception("[Concentración Máxima por Bit:]", 0)
P1906MOLReceiverCommunicationInterface:HandleReception("[Concentración Máxima por Bit:]", 0)
P1906MOLReceiverCommunicationInterface:HandleReception("[Concentración Máxima por Bit:]", 0)
P1906MOLReceiverCommunicationInterface:HandleReception("[Concentración Máxima por Bit:]", 0)
P1906MOLReceiverCommunicationInterface:HandleReception("[Concentración Máxima por Bit:]", 10000)
P1906MOLReceiverCommunicationInterface:HandleReception("[Secuencia Recibida:]", "00000001")

```

(a)

```

P1906Medium:HandleTransmission("===Se ha configurado el componente de Movimiento/Motion===")
P1906Medium:HandleReception(0x560635f0b3f0)
P1906CommunicationInterface:GetP1906ReceiverCommunicationInterface(0x560635f0e140)
P1906MOLReceiverCommunicationInterface:HandleReception(0x560635f0e300, "===Sección-Proceso de Recepción===")
P1906ReceiverCommunicationInterface:GetP1906Specificity(0x560635f0e300)
P1906MOLSpecificity:CheckRxCompatibility(0x560635f0da70)
P1906MOLMessageCarrier:GetPulseInterval(0x560635f0e9f0)
P1906CommunicationInterface:GetP1906NetDevice(0x560635f0adf0)
P1906NetDevice:GetNode(0x560635f2eda0)
P1906CommunicationInterface:GetP1906NetDevice(0x560635f0e140)
P1906NetDevice:GetNode(0x560635f0da30)
P1906MOLSpecificity:CheckRxCompatibility(0x560635f0da70, "[distancia,txRate]", 2.2e-06, 0.5)
P1906MOLSpecificity:GetDiffusionCoefficient(0x560635f0da70)
P1906MOLSpecificity:CheckRxCompatibility(0x560635f0da70, "testCapacidad: [distancia, txRate, Capacidadcana
l, AnchoPulsoMin]", 2.2e-06, 0.5, 0.459035, 2.17848)
P1906MOLMessageCarrier:GetMolecules(0x560635f0e9f0)
P1906MOLSpecificity:CheckRxCompatibility(0x560635f0da70, "Límite de Fick NO respetado --> transmision fall
ida")
P1906MOLReceiverCommunicationInterface:HandleReception(0x560635f0e300, "Mensaje NO recibido correctamente")
P1906MOLMessageCarrier::~P1906MOLMessageCarrier(0x560635f0e9f0)
P1906MessageCarrier:SetMessage(0x560635f0e9f0)
P1906MessageCarrier::~P1906MessageCarrier(0x560635f0e9f0)
P1906NetDevice:DoDispose(0x560635f2eda0)
P1906NetDevice:DoDispose(0x560635f0da30)
P1906Medium:DoDispose(0x560635f0b3f0)
P1906MOLMotion::~P1906MOLMotion(0x560635f0b100)
P1906Motion::~P1906Motion(0x560635f0b100)

```

(b)

Figura 18. Resultado obtenido del escenario 1 por consola de la recepción del mensaje a distancias diferentes: (a) $2.1\mu\text{m}$ y (b) $2.2\mu\text{m}$.

Fuente: Autor

De la Figura 18 (a) se observa que la respuesta del simulador por consola muestra un mensaje de confirmación de la recepción de la información, esto ocurre debido a que la señal portadora encapsulada por la componente de perturbación es demodulada correctamente en función del umbral, además, y la comunicación se considera satisfactoria ya que se cumplen los límites de Fick establecido por la componente de especificidad. Por otro lado, en la Figura 18 (b) donde el simulador muestra “mensaje NO recibido correctamente” se debe a que la cantidad de moléculas que captura el receptor no es suficiente para cumplir con el umbral, lo que indica que la transmisión fallo y la información no logro ser recibida.

Tabla 6. Valores de concentración molecular obtenidos del escenario 1 a diferentes distancias.

Distancia entre nodos (μm)	Coefficiente de difusión (nm^2/ns)	Concentración Molecular ($\text{mol}/\mu\text{m}^3$)
0.2	1	525.238
0.4	1	509.713
0.6	1	484.856
0.8	1	452.076
1	1	413.167
1.2	1	370.129
1.4	1	325.008
1.6	1	279.737
1.8	1	236.005
2	1	195.166
2.1	1	176.153

Fuente: Autor

La Tabla 6 representa valores de concentración molecular a medida que aumenta la distancia considerando un coeficiente de difusión igual a $1 \frac{\text{nm}^2}{\text{ns}}$ de acuerdo a los parámetros generales de simulación. Como se observa, existe una disminución en la concentración molecular a medida que la distancia aumenta y llegaría a repercutir en el alcance de la comunicación. Sin embargo, la distancia máxima de $2.1 \mu\text{m}$ establecida en la caracterización de los parámetros de simulación conocida como radio de comunicación, permite que las moléculas puedan recorrer dicha distancia antes de volverse ineficaces.

4.1.2 Pulso de retardo

El pulso de retardo presente entre transmisor y receptor se mide en cada distancia donde se coloca el receptor, de tal manera que los resultados obtenidos en cada una de las distancias proporcionan información sobre cómo la comunicación se ve afectada por el retardo. Se procede a realizar varias simulaciones variando la distancia entre el transmisor y el receptor para un rango entre $0.1 \mu m$ a $2.1 \mu m$, con un paso de $0.1 \mu m$.

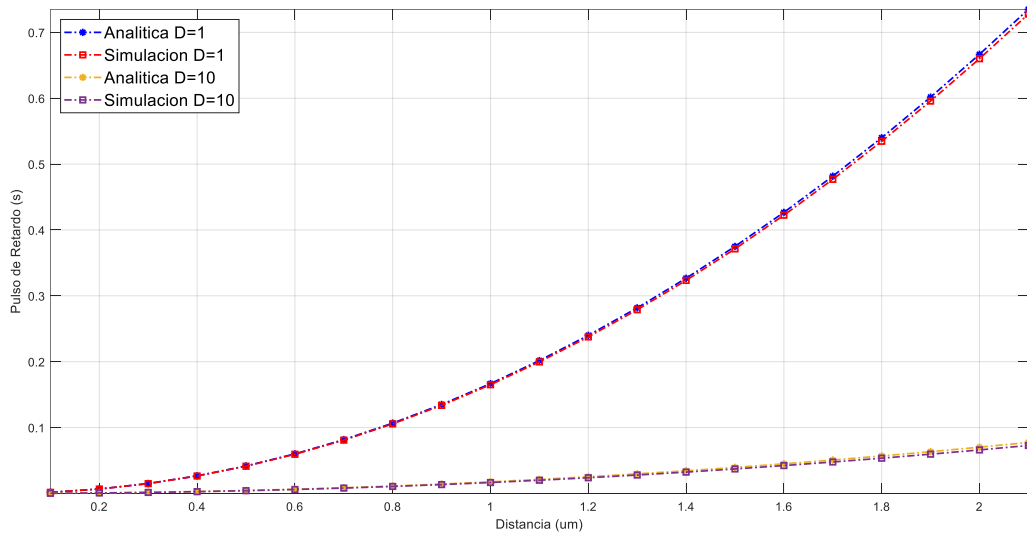


Figura 19. Pulso de retardo en función de la distancia obtenido de la simulación del escenario 1.

Fuente: Autor

La Figura 19 refleja el resultado del pulso de retardo a partir de la simulación con los parámetros establecidos donde se transmiten un pulso de 10000 mol con un coeficiente de difusión D de $1 \frac{\text{nm}^2}{\text{ns}}$ y $10 \frac{\text{nm}^2}{\text{ns}}$, y con un rango de comunicación entre $0.1 \mu m$ a $2.1 \mu m$. Las curvas con valor de $D = 1$, muestran como el pulso de retardo aumenta a medida que la distancia incrementa, por tanto, más tiempo le toma al pulso molecular propagarse en el medio. Sin embargo, para las curvas con valor de $D = 10$ se nota que el pulso de retardo es más pequeño de modo que el pulso molecular se difunde por el medio con una mayor rapidez.

Tabla 7. Valores de pulso de retardo obtenidos del escenario 1 a distancias diferentes y a dos coeficientes de difusión.

Distancia entre nodos (μm)	Coefficiente de Difusión (nm^2/ns)	Pulso de retardo (s)
0.4	1	0.02640
0.8	1	0.10561
1.2	1	0.23762

1.6	1	0.42244
2.1	1	0.72772
0.4	10	0.00264
0.8	10	0.01056
1.2	10	0.02376
1.6	10	0.04224
2.1	10	0.07277

Fuente: Autor

La Tabla 7 representa algunos resultados del pulso de retardo, en los cuales se modifica tanto la distancia y el coeficiente de difusión en la simulación. Como se sabe que este retraso es inversamente proporcional al coeficiente de difusión, se puede lograr una transmisión más rápida del pulso molecular simplemente ajustando el valor de dicho coeficiente, y en consecuencia permite una detección precisa de la información sin que se vea afectada. Estos resultados son contrastados con la expresión analítica de la ecuación 33, las curvas son consistentes con el modelo matemático obteniendo una media del error cuadrático medio de 0,0000108 en ambos casos.

4.1.3 Amplitud máxima de pulso

Para evaluar el desempeño de la comunicación, una métrica importante es la amplitud máxima del pulso o concentración máxima con la que llega la señal al receptor. Para su análisis se hace uso de la ecuación 34.

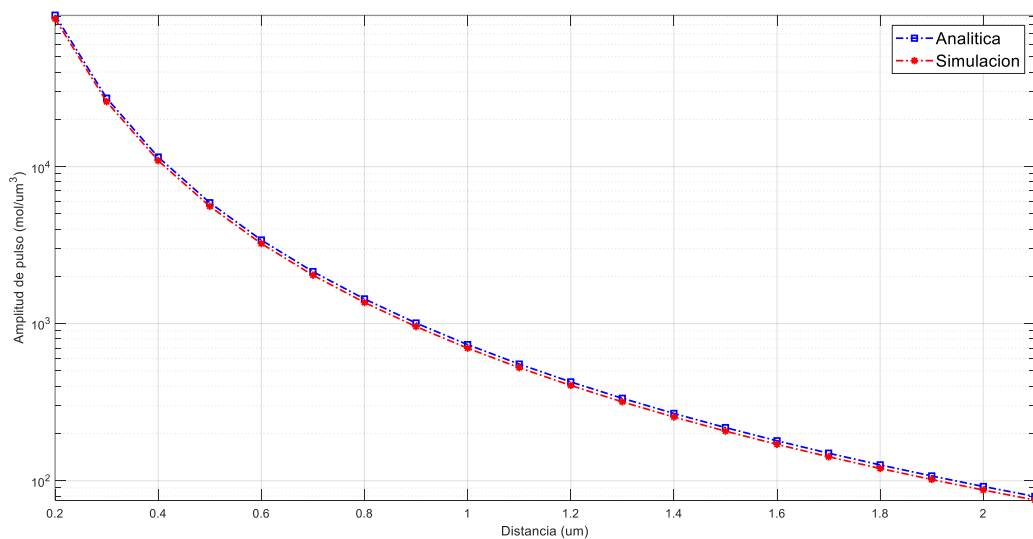


Figura 20. Amplitud máxima de pulso en función de la distancia obtenido de la simulación del escenario 1.

Fuente: Autor

En la Figura 20 se presentan los resultados de la amplitud máxima de pulso en función de la distancia entre transmisor y receptor. Se observa que la amplitud disminuye a medida que la distancia aumenta, lo cual indica que el canal empieza a experimentar atenuación. Para la distancia de $0.2\mu m$, la amplitud es de 9127 moléculas, para la distancia más lejana de $2.1\mu m$ es de 75 moléculas. Es notable que la amplitud del pulso no depende del coeficiente de difusión, en consecuencia, no tendrá ningún efecto sobre la atenuación de los pulsos moleculares a través del medio. Este resultado es consistente con la ecuación 34, como se muestra en la Tabla 8. Se obtiene una media del error cuadrático medio igual a 1274,316 referente a la magnitud significativa de los datos, el error se considera aceptable.

Tabla 8. Valores de amplitud máxima de pulso obtenidos del escenario 1 a diferentes distancias contrastados con los resultados de la expresión analítica.

Distancia entre nodos (μm)	Coefficiente de difusión (nm^2/ns)	Amplitud máxima de pulso (Simulación)	Amplitud máxima de pulso (Analítica)
0.2	1	9127.50	9201.72
0.4	1	7412.84	7502.34
0.6	1	3397.32	3408.13
0.8	1	1425.10	1437.80
1	1	728.221	736.156
1.2	1	422.164	426.016
1.4	1	259.567	268.278
1.6	1	173.887	179.725
1.8	1	122.129	126.227
2	1	89.0304	92.0196
2.1	1	75.9179	79.4900

Fuente: Autor

4.1.4 Ancho de pulso

Otra métrica importante es el ancho de pulso mínimo, ya que proporciona la velocidad de transmisión alcanzable en la comunicación. La velocidad está relacionada con la duración de los símbolos transmitidos, es decir, la cantidad de tiempo necesaria para transmitir cada símbolo. Asimismo, el ancho del pulso permite evaluar la capacidad del canal molecular presentado en el componente de especificidad.

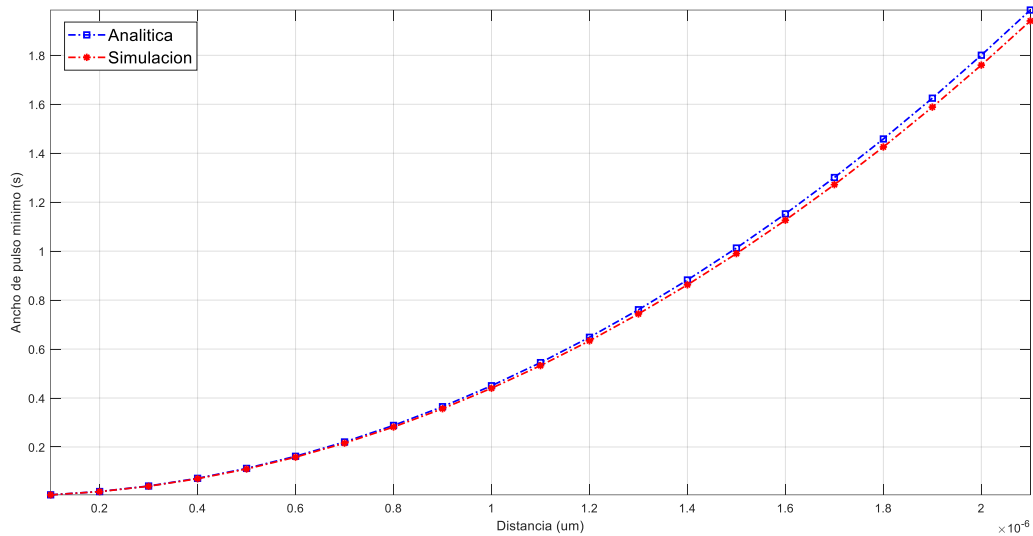


Figura 21. Ancho de pulso mínimo en función de la distancia obtenido de la simulación del escenario 1.

Fuente: Autor

De la Figura 21 se observa como el ancho de pulso mínimo varía en función de la distancia. Para el valor de $0.2 \mu\text{m}$, el ancho de pulso es 17.68 ms , y para la distancia de $2.1 \mu\text{m}$ el ancho de pulso es de 1941.07 ms , como se muestra en la Tabla 9. Se puede notar que a medida que la distancia aumenta, el ancho de pulso también lo hace, es decir, el pulso de la señal se ensancha a medida que aumenta la distancia entre el transmisor y el receptor. La Figura 21 muestra que los resultados de la simulación tienen una curva consistente con los valores de la expresión analítica (ver ecuación 38), con una media del error cuadrático medio de 0,0004.

Tabla 9. Valores de ancho de pulso obtenidos del escenario 1 a diferentes distancias contrastados con los resultados de la expresión analítica.

Distancia entre nodos (μm)	Coefficiente de difusión (nm^2/ns)	Ancho de pulso (Simulación)	Ancho De pulso (Analítica)
0.2	1	0.01768	0.01800
0.4	1	0.07042	0.07201
0.6	1	0.15842	0.16203
0.8	1	0.28160	0.28806
1	1	0.44700	0.45010
1.2	1	0.63360	0.64814
1.4	1	0.86242	0.88219

1.6	1	1.12642	1.15225
1.8	1	1.42568	1.45832
2	1	1.76000	1.80040
2.1	1	1.94107	1.98494

Fuente: Autor

4.1.5 Capacidad del canal

A continuación, se procede a realizar la gráfica de la capacidad del canal una vez analizadas las métricas anteriores.

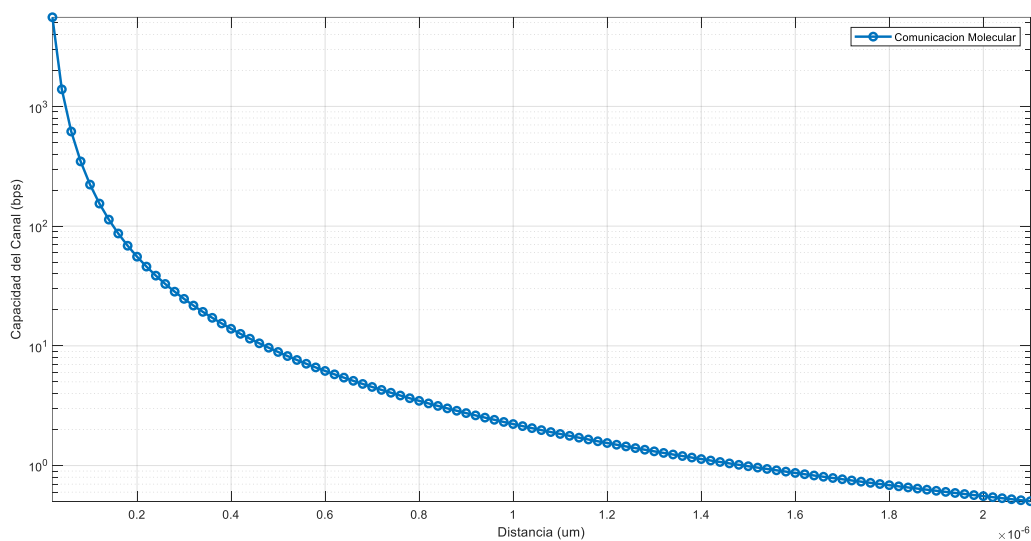


Figura 22. Capacidad de canal obtenida de la simulación del escenario 1.

Fuente: Autor

En la Figura 22 se puede notar una disminución en la capacidad del canal a medida que aumenta la distancia entre el transmisor y receptor. Se entiende que, a mayor rango de comunicación, el canal no es adecuado para una comunicación fiable. Esto se debe a que, a mayores distancias, es necesario un mayor ancho de pulso para que las moléculas lleguen al receptor. No obstante, se estableció una distancia máxima de 2.1 μm durante la caracterización de los parámetros, se ha observado en la Sección 4.1.1 que la comunicación no experimenta fallos y el mensaje es recibido correctamente, incluso cuando la concentración de las moléculas es menor. Esto demuestra la eficiencia y robustez del sistema de comunicación molecular en la simulación, permitiendo una transmisión confiable de información a distancias considerables.

4.2 Resultados Escenario 2

El esquema de simulación del escenario emplea una modulación BCSK (CSK Binario), en este caso, el transmisor envía un número diferente de moléculas para cada valor que el símbolo puede representar la señal: para el bit 1 se liberan $n_1 = 10000$ moléculas, mientras que para representar el bit 0 se emite el 50% del pulso del bit 1. Considerando un MB libre y la configuración de que la nanomáquina receptora es un absorbente con un radio de recepción de $1.6 \mu m$. Se presentan a continuación los resultados obtenidos utilizando los parámetros generales de simulación presentes en la Tabla 5 y se procede a realizar un análisis de las métricas de comunicación de la misma manera que en la Sección 4.1.

4.2.1 Concentración Molecular

Los valores mínimos a partir de los cuales se pueden separar los nodos se conocen según las leyes de Fick. En consecuencia, el nodo receptor dispone de un esquema de detección de concentración molecular que, en función de los parámetros predeterminados, puede resultar satisfactorio. En este caso, se utiliza la modulación BCSK para enviar información mediante cambios de concentración de estas moléculas a lo largo del tiempo. Una vez que las moléculas son liberadas por la nanomáquina transmisora establecida por una ubicación fija, se dispersan en el medio de acuerdo con las configuraciones introducidas en la Sección 3.9.

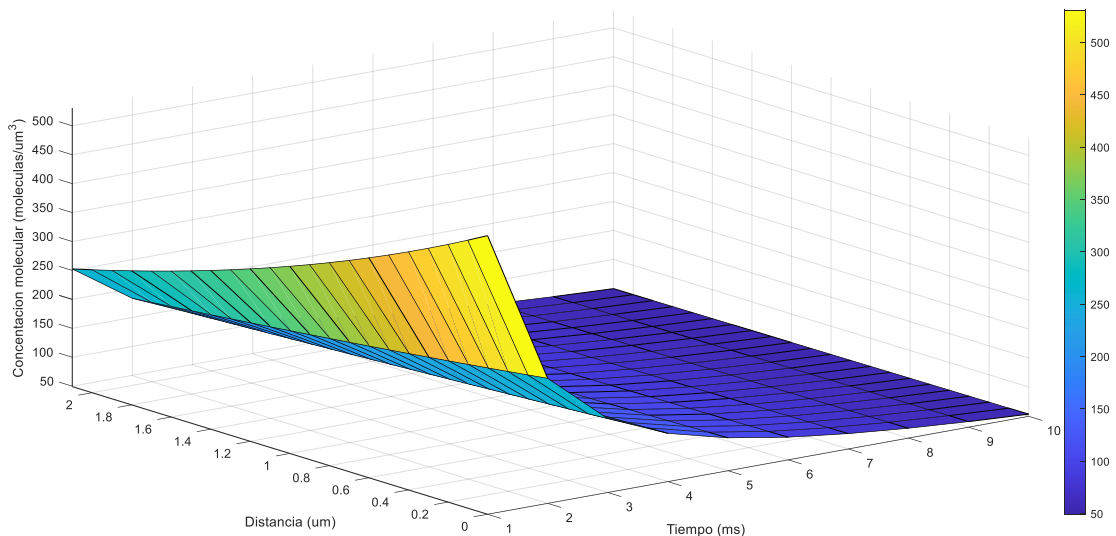


Figura 23. Concentración molecular en función a la distancia y el tiempo obtenido de la simulación del escenario 2.

Fuente: Autor

En la Figura 23, puede observarse que el receptor detecta la mayor concentración durante el primer instante de tiempo en que la distancia supera los $0 \mu m$. Una vez que alcanza este pico, la concentración disminuye periódicamente como consecuencia de la acción de la difusión,

al igual que en el ejemplo anterior (Sección 4.1.1). Es importante señalar que, el receptor absorbente es capaz de recibir directamente las moléculas mensajeras que entran en contacto con él, considerando la distribución no uniforme de la distribución del pulso molecular.

```
P1906CommunicationInterface:GetP1906ReceiverCommunicationInterface(0x55ea991b6140)
P1906MOLReceiverCommunicationInterface:HandleReception(0x55ea991b6300, "===Sección-Proceso de Recepción===")
P1906ReceiverCommunicationInterface:GetP1906Specificity(0x55ea991b6300)
P1906MOLSpecificity:CheckRxCompatibility(0x55ea991b5a70)
P1906MOLMessageCarrier:GetPulseInterval(0x55ea991b69f0)
P1906CommunicationInterface:GetP1906NetDevice(0x55ea991b2df0)
P1906NetDevice:GetNode(0x55ea991d6da0)
P1906CommunicationInterface:GetP1906NetDevice(0x55ea991b6140)
P1906NetDevice:GetNode(0x55ea991b5a30)
P1906MOLSpecificity:CheckRxCompatibility(0x55ad5e2afa70, "[distancia,txRate]", 2.1e-06, 0.5)
P1906MOLSpecificity:GetDiffusionCoefficient(0x55ad5e2afa70)
P1906MOLSpecificity:CheckRxCompatibility(0x55ad5e2afa70, "testCapacidad: [distancia, txRate, Capacidadcana
l, AnchoPulsoMin]", 2.1e-06, 0.5, 0.528983, 1.89042)
P1906MOLMessageCarrier:GetMolecules(0x55ad5e2b09f0)
P1906MOLSpecificity:CheckRxCompatibility(0x55ad5e2afa70, "Limite de Fick respetado")
P1906MOLReceiverCommunicationInterface:HandleReception(0x55ad5e2b0300, "Mensaje recibido correctamente")
P1906MessageCarrier:GetMessage(0x55ad5e2b09f0)
P1906MOLReceiverCommunicationInterface:HandleReception(0x55ad5e2b0300, "Recibiendo el paquete [id,size]",
0, 1)
P1906MOLMessageCarrier:GetModulation(0x55ad5e2b09f0)
P1906MOLReceiverCommunicationInterface:HandleReception("[Concentración Máxima por bit:]", 5000)
P1906MOLReceiverCommunicationInterface:HandleReception("[Concentración Máxima por bit:]", 5000)
P1906MOLReceiverCommunicationInterface:HandleReception("[Concentración Máxima por bit:]", 5000)
P1906MOLReceiverCommunicationInterface:HandleReception("[Concentración Máxima por bit:]", 5000)
P1906MOLReceiverCommunicationInterface:HandleReception("[Concentración Máxima por bit:]", 10000)
P1906MOLReceiverCommunicationInterface:HandleReception("[Concentración Máxima por bit:]", 10000)
P1906MOLReceiverCommunicationInterface:HandleReception("[Concentración Máxima por bit:]", 10000)
P1906MOLReceiverCommunicationInterface:HandleReception("[Concentración Máxima por bit:]", 10000)
P1906MOLReceiverCommunicationInterface:HandleReception("[Secuencia Recibida:]", "00001111")
```

(a)

```
P1906CommunicationInterface:GetP1906ReceiverCommunicationInterface(0x559b6fc66140)
P1906MOLReceiverCommunicationInterface:HandleReception(0x559b6fc66300, "===Sección-Proceso de Recepción===")
P1906ReceiverCommunicationInterface:GetP1906Specificity(0x559b6fc66300)
P1906MOLSpecificity:CheckRxCompatibility(0x559b6fc65a70)
P1906MOLMessageCarrier:GetPulseInterval(0x559b6fc669f0)
P1906CommunicationInterface:GetP1906NetDevice(0x559b6fc62df0)
P1906NetDevice:GetNode(0x559b6fc86da0)
P1906CommunicationInterface:GetP1906NetDevice(0x559b6fc66140)
P1906NetDevice:GetNode(0x559b6fc65a30)
P1906MOLSpecificity:CheckRxCompatibility(0x559b6fc65a70, "[distancia,txRate]", 2.2e-06, 0.5)
P1906MOLSpecificity:GetDiffusionCoefficient(0x559b6fc65a70)
P1906MOLSpecificity:CheckRxCompatibility(0x559b6fc65a70, "testCapacidad: [distancia, txRate, Capacidadcana
l, AnchoPulsoMin]", 2.2e-06, 0.5, 0.459035, 2.17848)
P1906MOLMessageCarrier:GetMolecules(0x559b6fc669f0)
P1906MOLSpecificity:CheckRxCompatibility(0x559b6fc65a70, "Limite de Fick NO respetado --> transmision fall
ida")
P1906MOLReceiverCommunicationInterface:HandleReception(0x559b6fc66300, "Mensaje NO recibido correctamente")
P1906MOLMessageCarrier::~P1906MOLMessageCarrier(0x559b6fc669f0)
P1906MessageCarrier:SetMessage(0x559b6fc669f0)
P1906MessageCarrier::~P1906MessageCarrier(0x559b6fc669f0)
P1906NetDevice:DoDispose(0x559b6fc86da0)
P1906NetDevice:DoDispose(0x559b6fc65a30)
P1906Medium:DoDispose(0x559b6fc633f0)
P1906MOLMotion::~P1906MOLMotion(0x559b6fc63100)
P1906Motion::~P1906Motion(0x559b6fc63100)
```

(b)

Figura 24. Resultado obtenido del escenario 2 por consola de la recepción del mensaje a distancias diferentes: (a) $2.1\mu\text{m}$ y (b) $2.2\mu\text{m}$.

Fuente: Autor

La salida de la simulación se muestra en la Figura 24 (a), donde se aprecia la respuesta de la interfaz de recepción que indica “mensaje recibido correctamente”, esto es debido al proceso de demodulación de la señal portadora, que se encuentra encapsulada por la componente de perturbación del estándar. El éxito de la comunicación se basa en el cumplimiento de los límites de Fick establecidos por el componente de especificidad, donde asegura que la propagación de las moléculas evite dispersiones en la difusión por el medio. En contraste, en la Figura 24 (b), el simulador muestra “mensaje NO recibido correctamente”. Esta situación se debe a que la concentración molecular a esa distancia no es capaz de llegar a la superficie del receptor absorbente lo que conlleva a un fallo en la transmisión.

Tabla 10. Valores de concentración molecular obtenidos del escenario 2 a diferentes distancias.

Distancia entre nodos (μm)	Coefficiente de difusión (nm^2/ns)	Concentración Molecular ($mol/\mu m^3$)
0.2	1	512.337
0.4	1	460.814
0.6	1	429.355
0.8	1	400.044
1	1	372.733
1.2	1	347.287
1.4	1	323.287
1.6	1	301.488
1.8	1	280.906
2	1	261.729
2.1	1	252.637

Fuente: Autor

La Tabla 10 muestra los valores de concentración molecular en base a la modificación de parámetros como la distancia (*nodeDistance*) obtenidas de la configuración del escenario 2 y permite obtener la concentración medida por el receptor absorbente situado a las diferentes distancias en función del tiempo. Dado que el canal molecular es lineal e invariante en el tiempo, estas medidas se interpretan como la respuesta del canal al impulso de moléculas, es decir la respuesta al impulso del canal.

4.2.2 Pulso de retardo

El pulso de retardo se calcula en el instante de tiempo necesario para que la ecuación del pulso alcance su valor global máximo. Para ver cómo este retardo varía en función a las distintas distancias (*nodeDistance*) entre el transmisor y receptor, en la Figura 25 se procede a realizar la gráfica procedente de varias simulaciones configurando la distancia entre el transmisor y el receptor para un rango entre $0.1 \mu\text{m}$ a $2.1 \mu\text{m}$ con un paso de $0.1 \mu\text{m}$.

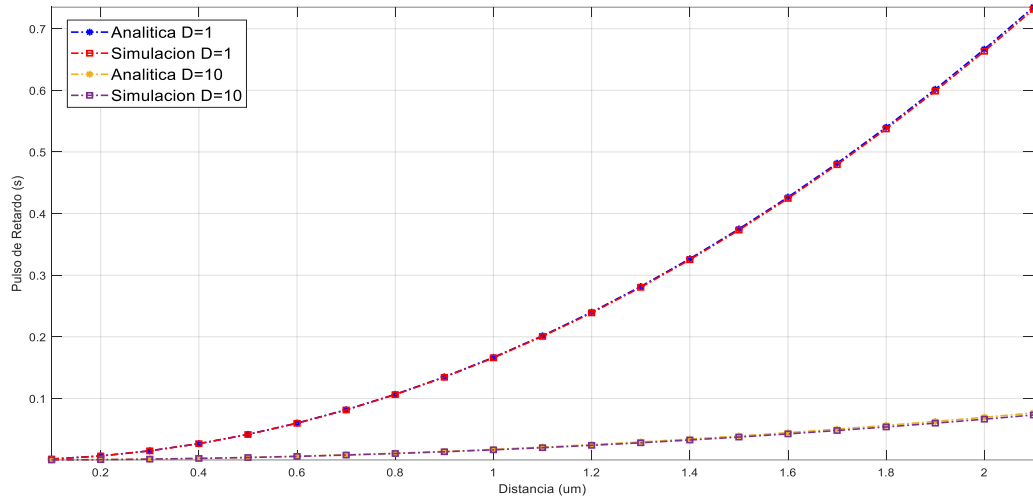


Figura 25. Pulso de retardo en función de la distancia obtenido de la simulación del escenario 2.

Fuente: Autor

En la Figura 25 se observa el resultado del pulso de retardo a medida que aumenta la variable *nodeDistance*, las curvas de $D = 1$ ilustran como aumenta el retardo a medida que la distancia incrementa. Esto muestra que la variación en la cantidad de tiempo de retardo necesario para emitir un determinado número de moléculas aumenta a medida que la variable lo hace. Sin embargo, las curvas de $D = 10$ revelan que, para valores mayores de coeficiente de difusión el pulso de retardo es menor, lo que sugiere una mayor rapidez de difusión del pulso molecular por el medio.

Tabla 11. Valores de pulso de retardo obtenidos del escenario 2 a distancias diferentes y a dos coeficientes de difusión.

Distancia entre nodos (μm)	Coefficiente de Difusión (nm^2/ns)	Pulso de retardo (s)
0.4	1	0.02653
0.8	1	0.10613
1.2	1	0.23880
1.6	1	0.42454
2.1	1	0.73134

0.4	10	0.00265
0.8	10	0.01061
1.2	10	0.02388
1.6	10	0.04245
2.1	10	0.07313

Fuente: Autor

Los resultados del pulso de retardo, que se obtienen de acuerdo a las modificaciones de las variables *nodeDistance* y *diffusionCoefficient* del escenario 2, se muestran en la Tabla 11. Para la distancia establecida de $2.1 \mu\text{m}$ y con un coeficiente de difusión igual a 1, el tiempo medido del retardo es de 0.73134 s , mientras que para el caso de $2.1 \mu\text{m}$ con un coeficiente de difusión igual a 10 es de 0.07313 s . Por tanto, el tiempo de retardo medido en el receptor en la concentración máxima del pulso y dado que este retardo es inversamente proporcional al coeficiente de difusión, es posible conseguir una transmisión más rápida del pulso molecular ajustando el valor de este coeficiente sin afectar la información transmitida. Los resultados obtenidos son comparados con la expresión analítica de la ecuación 33, las curvas son coherentes con el modelo matemático en ambos casos, teniendo una media del error cuadrático de $0,000002739$.

4.2.3 Amplitud máxima de pulso

Se realizan varias simulaciones variando la distancia (*nodeDistance*) entre el transmisor y el receptor de $0.1 \mu\text{m}$ a $2.1 \mu\text{m}$, con un paso de $0.1 \mu\text{m}$. La curva resultante se muestra a continuación.

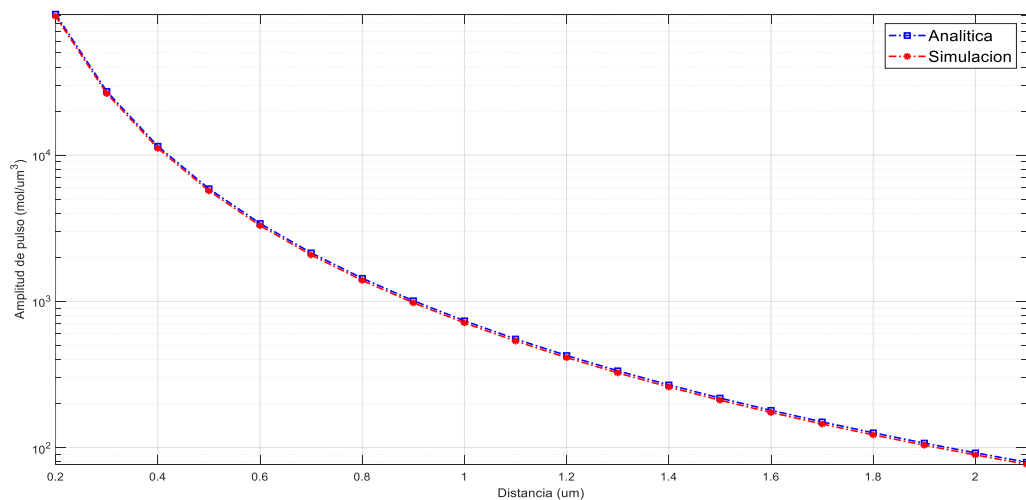


Figura 26. Amplitud máxima de pulso en función de la distancia obtenido de la simulación del escenario 2.

Fuente: Autor

En la Figura 26 se puede apreciar la amplitud del pulso que llega al receptor. Se destaca que a diferencia del pulso de retardo no depende del coeficiente de difusión. Por lo tanto, el coeficiente de difusión presente en el medio no afecta la atenuación de los pulsos moleculares en el espacio. Para la distancia de $0.2 \mu\text{m}$, la amplitud es de 9189 moléculas, para la distancia más lejana de $2.1 \mu\text{m}$ es de 75 moléculas. Esta tasa de absorción de moléculas en el receptor representa el promedio de moléculas que puede absorber por unidad de tiempo en función de la distancia entre los nodos. Estos resultados logran tener una mayor consistencia con la ecuación 34 (ver Tabla 12). El análisis revela una media del error cuadrático medio igual a 175,312 el cual se considera aceptable, estos resultados se obtienen debido al principio de la técnica de modulación BCSK permitiendo la concentración de moléculas en el pulso variando la presencia de información a transmitir. Esto aprovecha la capacidad de difusión en el medio de transmisión para propagar la información de manera efectiva.

Tabla 12. Valores de amplitud máxima de pulso obtenidos del escenario 2 a diferentes distancias contrastados con los resultados de la expresión analítica.

Distancia entre nodos (μm)	Coefficiente de difusión (nm^2/ns)	Amplitud máxima de pulso (Simulación)	Amplitud máxima de pulso (Analítica)
0.2	1	9189.74	9201.72
0.4	1	7491.76	7502.34
0.6	1	3384.83	3408.13
0.8	1	1464.69	1437.80
1	1	728.723	736.156
1.2	1	424.354	426.016
1.4	1	254.637	268.278
1.6	1	170.587	179.725
1.8	1	119.809	126.227
2	1	87.3414	92.0196
2.1	1	75.4479	79.4900

Fuente: Autor

4.2.4 Ancho de pulso

Para llevar a cabo el análisis, se realizaron múltiples simulaciones en las que se varió la distancia entre el transmisor y el receptor en un rango de $0.1 \mu\text{m}$ a $2.1 \mu\text{m}$ con incrementos de $0.1 \mu\text{m}$. Los resultados obtenidos se evaluaron con la ecuación 38.

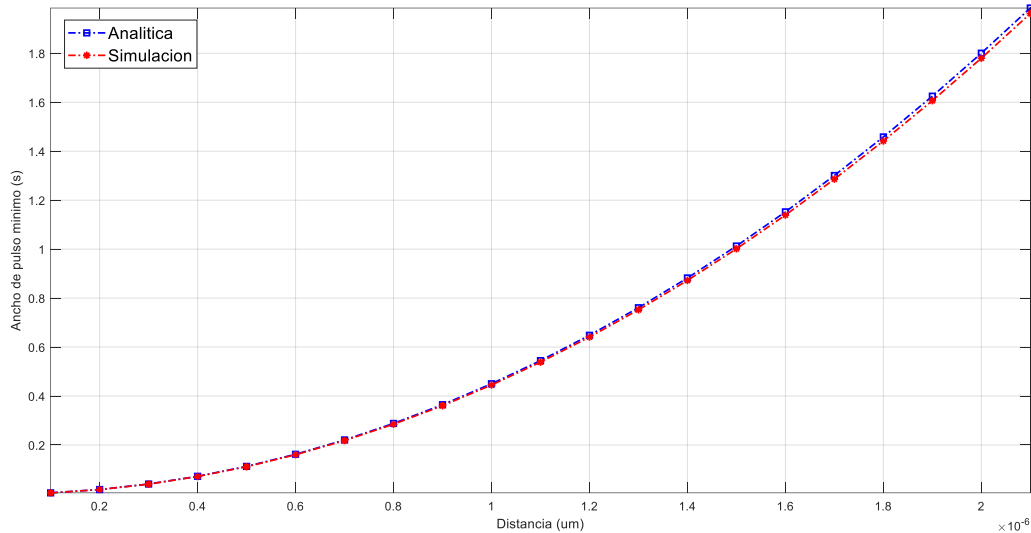


Figura 27. Ancho de pulso mínimo en función de la distancia obtenido de la simulación del escenario 2.

Fuente: Autor

La Figura 27 muestra claramente que el ancho de pulso aumenta significativamente con la distancia entre el transmisor y el receptor. Dado que el coeficiente de difusión no varía, el ancho de pulso depende principalmente de la distancia. El ancho de pulso para $0.2 \mu\text{m}$ es de 17.80 ms , mientras que para la distancia de $2.1 \mu\text{m}$ es de 1962.45 ms , como se muestra en la Tabla 13. La Figura 27 muestra que los resultados de la simulación tienen una curva coherente con los valores derivados de la expresión analítica (ver ecuación 38), obteniendo una media del error cuadrático medio de $0,000103593$.

Tabla 13. Valores de ancho de pulso obtenidos del escenario 2 a diferentes distancias contrastados con los resultados de la expresión analítica.

Distancia entre nodos (μm)	Coefficiente de difusión (nm^2/ns)	Ancho de pulso (Simulación)	Ancho De pulso (Analítica)
0.2	1	0.01780	0.01800
0.4	1	0.07120	0.07201
0.6	1	0.16020	0.16203
0.8	1	0.28480	0.28806

1	1	0.44500	0.45010
1.2	1	0.64080	0.64814
1.4	1	0.87220	0.88219
1.6	1	1.13920	1.15225
1.8	1	1.44180	1.45832
2	1	1.78000	1.80040
2.1	1	1.96245	1.98494

Fuente: Autor

4.2.5 Capacidad del canal

A continuación, se procede a realizar la gráfica de la capacidad del canal una vez analizadas las métricas anteriores.

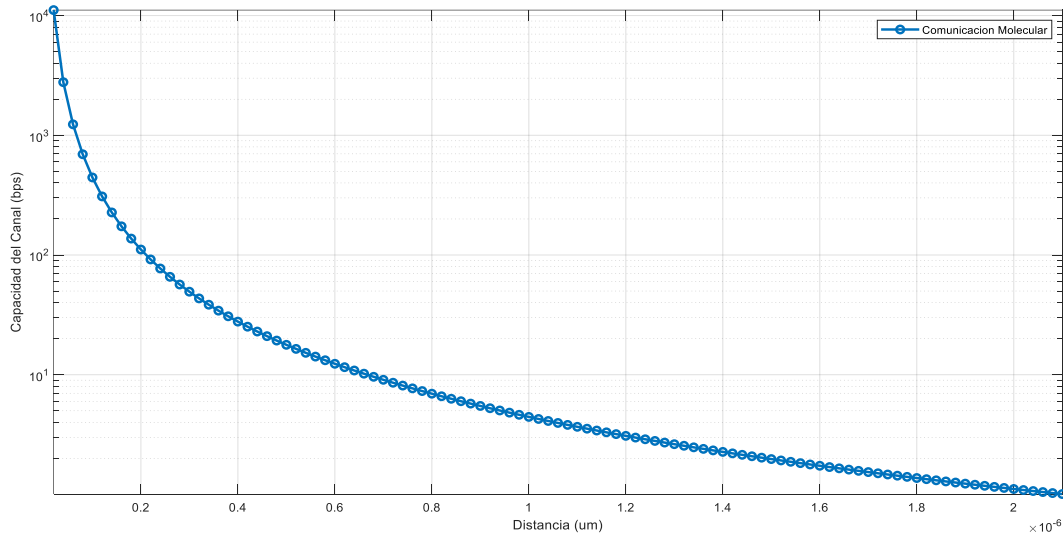


Figura 28. Capacidad de canal obtenida de la simulación del escenario 2.

Fuente: Autor

La técnica de modulación alcanza su límite teórico de capacidad del canal cuando la distancia entre el transmisor y el receptor es corta, como se muestra en la Figura 28. Este nivel de capacidad es la cantidad de información que un canal de comunicación molecular puede transportar de manera efectiva. Se observa una disminución en la capacidad como resultado del aumento de la distancia, lo que espera que tenga un impacto negativo en la calidad de la comunicación. La sensibilidad del receptor, que permite la captación de señales debilitadas a pesar de la atenuación experimentada durante la transmisión del mensaje, explica por qué la comunicación mantiene un nivel de confiabilidad a pesar del aumento de la distancia.

4.3 Resultados Escenario 3

El esquema de simulación del escenario 3 emplea una modulación BMoSK (MoSK Binario), donde se utilizan dos tipos diferentes de moléculas mensajeras para representar diferentes símbolos. El transmisor libera un número constante de moléculas de tipo A o tipo B para los valores de símbolo actuales de bit 1 y bit 0 respectivamente, se considera que son dos tipos de moléculas dado a que poseen dos tamaños diferentes y que experimentarán, coeficientes de difusión distintos, el número de umbral de moléculas recibidas es diferente para los distintos tipos de moléculas, cómo se indica en la Sección 3.8.2. Se considera un MB con arrastre y la configuración de que la nanomáquina receptora es mediante la unión ligando-receptor.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos utilizando los parámetros generales de simulación indicados en la Tabla 5, y se procede a realizar el análisis de las métricas de comunicación.

4.3.1 Concentración Molecular

Cada molécula se desplaza por el medio según el modelo de propagación randómica con arrastre bajo la función MB deriva. Si la molécula colisiona con el receptor, se establece que “La molécula golpeo al receptor”, y la molécula es eliminada del sistema debido a que la unión ligando receptor forma un enlace químico con la molécula mensajera y la molécula es absorbida por el receptor.

La simulación denota que en cuanto las moléculas del Tipo A son liberadas por el transmisor y entran en contacto el receptor, estas son absorbidas por el receptor a través de la unión una vez que golpean la superficie del receptor, lo que da lugar a la expresión analítica de la ecuación 31 de la Sección 3.8.3 para el número de moléculas en función de la distancia y el tiempo.

Dando como resultado la gráfica de la concentración molecular en el receptor que se presenta a continuación.

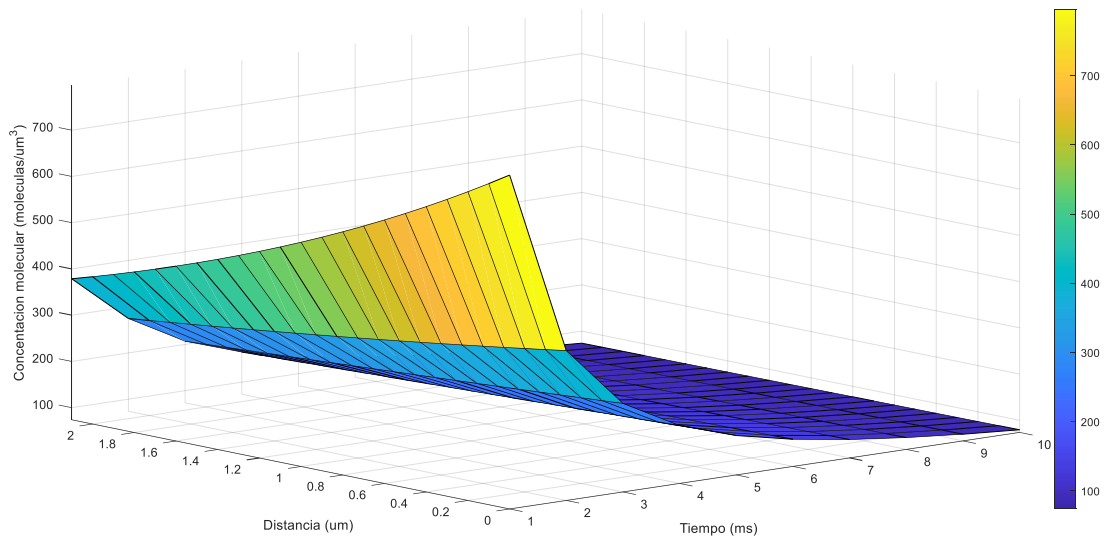


Figura 29. Concentración molecular en función a la distancia y el tiempo obtenido de la simulación del escenario 3.

Fuente: Autor

En la Figura 29, se observa la concentración molecular resultante para diferentes valores de tiempo y distancia, ajustando la distancia del receptor en valores configurados en la variable *nodeDistance* del archivo mol-example.cc entre 0.1 μm a 2.1 μm . El pico de concentración disminuye a medida que aumenta el rango de transmisión. Esto se debe a que durante el primer instante de tiempo donde la distancia es corta, las moléculas tienen poco espacio para moverse y la mayoría de ellas unen al receptor, mientras que a medida que la distancia aumenta, el alcance de transmisión se convierte en el principal factor que afecta al nivel de concentración molecular medida en el receptor.

```
P1906ReceiverCommunicationInterface:GetP1906Specificity(0x55b5ce303300)
P1906MOLSpecificity:CheckRxCompatibility(0x55b5ce302a70)
P1906MOLMessageCarrier:GetPulseInterval(0x55b5ce3039f0)
P1906CommunicationInterface:GetP1906NetDevice(0x55b5ce2ffdf0)
P1906NetDevice:GetNode(0x55b5ce323da0)
P1906CommunicationInterface:GetP1906NetDevice(0x55b5ce303140)
P1906NetDevice:GetNode(0x55b5ce302a30)
P1906MOLSpecificity:CheckRxCompatibility(0x55b5ce302a70, "[distancia,txRate]", 2.1e-06, 0.5)
P1906MOLSpecificity:GetDiffusionCoefficient(0x55b5ce302a70)
P1906MOLSpecificity:CheckRxCompatibility(0x55b5ce302a70, "testCapacidad: [distancia, txRate, Capacidadcana
l, AnchoPulsoMin]", 2.1e-06, 0.5, 0.549135, 1.82105)
P1906MOLMessageCarrier:GetMolecules(0x55b5ce3039f0)
P1906MOLSpecificity:CheckRxCompatibility(0x55b5ce302a70, "Límite de Fick respetado")
P1906MOLReceiverCommunicationInterface:HandleReception(0x55b5ce303300, "Mensaje recibido correctamente")
P1906MessageCarrier:GetMessage(0x55b5ce3039f0)
P1906MOLReceiverCommunicationInterface:HandleReception(0x55b5ce303300, "Recibiendo el paquete [id,size]",
0, 1)
P1906MOLMessageCarrier:GetModulation(0x55b5ce3039f0)
P1906MOLReceiverCommunicationInterface:HandleReception("[Concentración Máxima por bit:]", 5000, "[Tiempo:]
", 0.5)
P1906MOLReceiverCommunicationInterface:HandleReception("[Concentración Máxima por bit:]", 10000, "[Tiempo:
]", 1)
P1906MOLReceiverCommunicationInterface:HandleReception("[Concentración Máxima por bit:]", 5000, "[Tiempo:]
", 0.5)
P1906MOLReceiverCommunicationInterface:HandleReception("[Concentración Máxima por bit:]", 10000, "[Tiempo:
]", 1)
P1906MOLReceiverCommunicationInterface:HandleReception("[Concentración Máxima por bit:]", 5000, "[Tiempo:]
```

(a)

```

P1906MOLReceiverCommunicationInterface:HandleReception(0x55be7a23c300, "===Sección-Proceso de Recepción===")
P1906ReceiverCommunicationInterface:GetP1906Specificity(0x55be7a23c300)
P1906MOLSpecificity:CheckRxCompatibility(0x55be7a23ba70)
P1906MOLMessageCarrier:GetPulseInterval(0x55be7a23c9f0)
P1906CommunicationInterface:GetP1906NetDevice(0x55be7a238df0)
P1906NetDevice:GetNode(0x55be7a25cda0)
P1906CommunicationInterface:GetP1906NetDevice(0x560304fe5140)
P1906NetDevice:GetNode(0x560304fe4a30)
P1906MOLSpecificity:CheckRxCompatibility(0x560304fe4a70, "[distancia,txRate]", 2.2e-06, 0.5)
P1906MOLSpecificity:GetDiffusionCoefficient(0x560304fe4a70)
P1906MOLSpecificity:CheckRxCompatibility(0x560304fe4a70, "testCapacidad: [distancia, txRate, Capacidadcana
l, AnchoPulsoMin]", 2.2e-06, 0.5, 0.413131, 2.42054)
P1906MOLMessageCarrier:GetMolecules(0x560304fe59f0)
P1906MOLSpecificity:CheckRxCompatibility(0x560304fe4a70, "Limite de Fick NO respetado --> transmision fall
ida")
P1906MOLReceiverCommunicationInterface:HandleReception(0x560304fe5300, "mensaje NO recibido correctamente")
P1906MOLMessageCarrier::~P1906MOLMessageCarrier(0x560304fe59f0)
P1906MessageCarrier:SetMessage(0x560304fe59f0)
P1906MessageCarrier::~P1906MessageCarrier(0x560304fe59f0)
P1906NetDevice:DoDispose(0x560305005da0)
P1906NetDevice:DoDispose(0x560304fe4a30)

```

(b)

Figura 30. Resultado obtenido del escenario 3 por consola de la recepción del mensaje a distancias diferentes: (a) 2.1 μm y (b) 2.2 μm .

Fuente: Autor

La Figura 30 (a), muestra el resultado de la salida por consola de la simulación del escenario, exhibiendo la respuesta del proceso de recepción en la distancia más lejana que concibe los parámetros generales para recuperar la información original mediante un mensaje de éxito que indica “mensaje recibido correctamente”. Este mensaje de éxito se basa en el cumplimiento de los límites de Fick establecidos por el componente de especificidad, garantizando que las moléculas se propaguen durante la difusión en el medio y lleguen al receptor, formando el complejo ligando-receptor. Por el contrario, en la Figura 30 (b), el simulador indica “mensaje NO recibido correctamente”, cuando la distancia supera el valor fijado de 2.1 μm a 2.2 μm y la concentración molecular no forma el proceso de unión, la probabilidad de impacto disminuye y el componente de especificidad es incapaz de enviar la información a las capas superiores para proceder con la demodulación de la portadora.

Tabla 14. Valores de concentración molecular obtenidos del escenario 3 a diferentes distancias.

Distancia entre nodos (μm)	Coefficiente de difusión (nm^2/ns)	Concentración Molecular ($\text{mol}/\mu\text{m}^3$)
0.2	1	741.448
0.4	1	690.831
0.6	1	643.669
0.8	1	599.726

1	1	558.726
1.2	1	520.636
1.4	1	485.093
1.6	1	451.977
1.8	1	421.121
2	1	392.372
2.1	1	378.742

Fuente: Autor

Los valores de concentración molecular obtenidos modificando el parámetro de distancia se muestran en la Tabla 14. Como se conoce, el rendimiento del sistema puede verse afectado al aumentar la distancia; sin embargo, el canal BMoSK no se ve afectado porque utiliza una molécula diferente para cada valor de bit, y estos valores son superiores a los obtenidos con el MB libre. Esto se debe al efecto del flujo que dirige las moléculas hacia el receptor, lo que hace que la concentración obtenga estos valores.

4.3.2 Pulso de retardo

Se realizan simulaciones utilizando diferentes distancias (*nodeDistance*) entre el transmisor y el receptor, que van de $0.1 \mu\text{m}$ a $2.1 \mu\text{m}$, en incrementos de $0.1 \mu\text{m}$ y se fija el valor de velocidad de deriva en $5 \times 10^{-4} \text{m/s}$. Las curvas que representan los resultados se muestran a continuación.

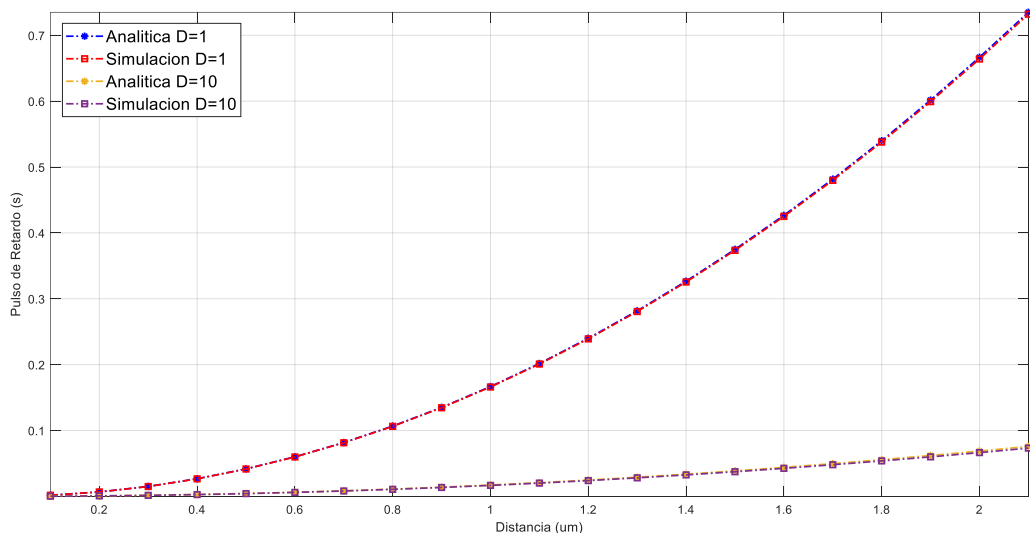


Figura 31. Pulso de retardo en función de la distancia obtenido de la simulación del escenario 3.

Fuente: Autor

En la Figura 31 se traza las curvas de resultados del pulso de retardo en función de la distancia, para dos conjuntos diferentes de coeficientes de difusión, $D = 1$, para el escenario de baja de difusión, y $D = 10$ para el escenario de alta difusión. En las curvas de $D = 1$ y velocidad de deriva igual a $5 \times 10^{-4} m/s$, el retardo aumenta a medida que la distancia incrementa, esta tendencia es la esperada en el sistema de CMvD debido al receptor y a la dinámica de difusión que es proporcional a la distancia al cuadrado. Por lo tanto, el parámetro *nodeDistance* influye en la eficacia de la comunicación. No obstante, las curvas de $D = 10$ y el mismo valor de velocidad de deriva muestran que, el tiempo necesario para el paso de las moléculas de información por el canal se acorta a medida que aumenta el coeficiente de difusión. Por consiguiente, en un intervalo de tiempo, aumentara el número de moléculas de información captadas por el receptor. Esto se debe a que la difusión en el medio ayuda a la propagación de la molécula desde el transmisor hacia el receptor provocando una disminución en el pulso de retardo.

Tabla 15. Valores de pulso de retardo obtenidos del escenario 3 a distancias diferentes y a dos coeficientes de difusión.

Distancia entre nodos (μm)	Coefficiente de Difusión (nm^2/ns)	Pulso de retardo (s)
0.4	1	0.02656
0.8	1	0.10624
1.2	1	0.23904
1.6	1	0.42496
2.1	1	0.73207
0.4	10	0.00265
0.8	10	0.01062
1.2	10	0.02390
1.6	10	0.04249
2.1	10	0.07320

Fuente: Autor

Los valores del pulso de retardo para los dos valores diferentes del coeficiente de difusión se muestran en la Tabla 15 con la misma velocidad de deriva. Cuando el coeficiente de difusión se fija en un valor de 1 y con la distancia más lejana de $2.1 \mu m$, el retardo previsto es de $0.73207 s$, pero es de $0.07320 s$ cuando el coeficiente de difusión se fija en un valor de 10 al mismo valor de distancia. Teniendo en cuenta los dos valores, se afirma que el

tiempo de retardo es significativamente menor cuando el coeficiente es mayor. En ambos casos, los resultados de la simulación validan la formulación analítica, con un error cuadrático medio de 0.000001756.

4.3.3 Amplitud máxima de pulso

Para obtener el resultado de la amplitud máxima de pulso se realizan varias simulaciones variando la distancia (*nodeDistance*) entre el transmisor y el receptor de $0.1 \mu\text{m}$ a $2.1 \mu\text{m}$, con un paso de $0.1 \mu\text{m}$. La curva resultante se muestra a continuación.

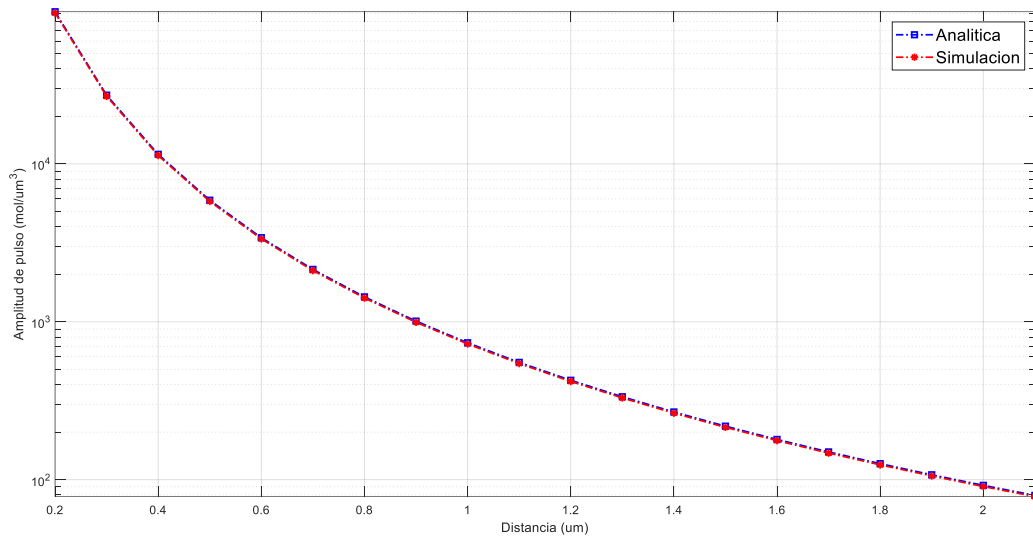


Figura 32. Amplitud máxima de pulso en función de la distancia obtenido de la simulación del escenario 3.

Fuente: Autor

El resultado de la amplitud máxima de pulso se muestra en la Figura 32 en función a diferentes distancias establecidas para el escenario. En la condición en que la distancia es corta $0.2 \mu\text{m}$, la amplitud alcanza su máximo pico en la curva resultante es de 9193 moléculas; a la distancia más lejana $2.1 \mu\text{m}$, el valor disminuye a 78 moléculas (ver Tabla 16). Así tenemos, que la amplitud disminuye a medida que aumenta la distancia de transmisión cuando todas las condiciones son iguales. Esto sugiere que la distancia entre el transmisor y el receptor no debería ser superior al valor del parámetro establecido de $2.1 \mu\text{m}$ para tener un buen rendimiento en la comunicación. El análisis en relación a la expresión analítica referente a la magnitud significativa de los datos tenemos una media aceptable del error cuadrático medio igual a 78,980.

Tabla 16. Valores de amplitud máxima de pulso obtenidos del escenario 3 a diferentes distancias contrastados con los resultados de la expresión analítica.

Distancia entre nodos (μm)	Coefficiente de difusión (nm^2/ns)	Amplitud máxima de pulso (Simulación)	Amplitud máxima de pulso (Analítica)
0.2	1	9193.58	9201.72
0.4	1	7501.23	7502.34
0.6	1	3389.34	3408.13
0.8	1	1423.92	1437.80
1	1	723.457	736.156
1.2	1	418.667	426.016
1.4	1	263.636	268.278
1.6	1	176.625	179.725
1.8	1	124.049	126.227
2	1	90.4321	92.0196
2.1	1	78.1186	79.4900

Fuente: Autor

4.3.4 Ancho de pulso

Para llevar a cabo el análisis, se realizan simulaciones en las que se modifica la distancia entre el transmisor y el receptor en un rango de $0.1 \mu\text{m}$ a $2.1 \mu\text{m}$ con incrementos de $0.1 \mu\text{m}$.

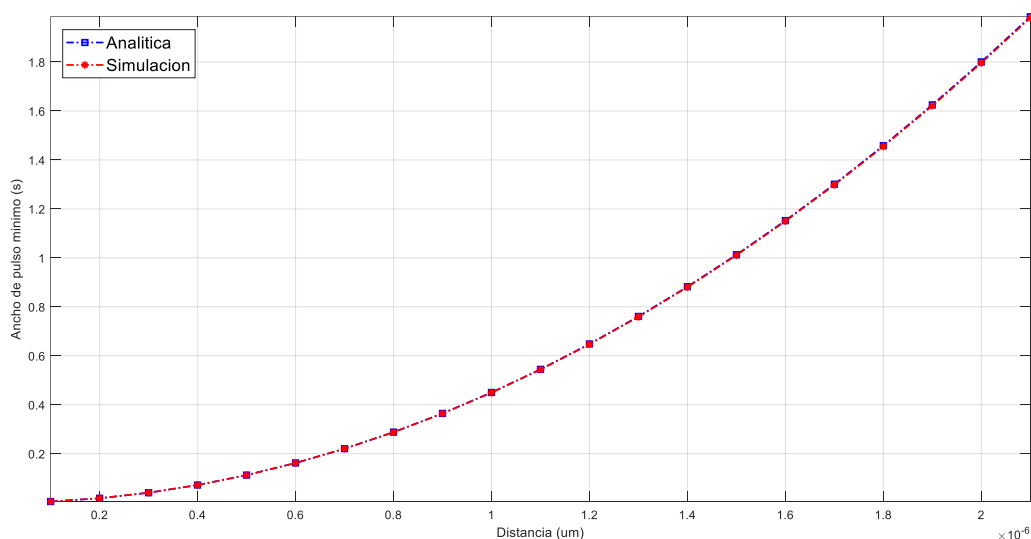


Figura 33. Ancho de pulso mínimo en función de la distancia obtenido de la simulación del escenario 3.

Fuente: Autor

La Figura 33 muestra que el ancho de pulso varía dependiendo de la distancia, debido a la duración del pulso de la señal de la molécula (o ligando) que se difunde en el medio regido por la función de MB deriva. El ancho de pulso para $0.2 \mu m$ es de $17.96 ms$, mientras que para la distancia de $2.1 \mu m$ es de $1980.10 ms$, como se muestra en la Tabla 17. La Figura 33 muestra que los resultados de la simulación tienen una curva consistente con los valores derivados de la expresión analítica, obteniendo una media del error cuadrático medio de $0,00000657$.

Tabla 17. Valores de ancho de pulso obtenidos del escenario 3 a diferentes distancias contrastados con los resultados de la expresión analítica.

Distancia entre nodos (μm)	Coefficiente de difusión (nm^2/ns)	Ancho de pulso (Simulación)	Ancho De pulso (Analítica)
0.2	1	0.01796	0.01800
0.4	1	0.07184	0.07201
0.6	1	0.16164	0.16203
0.8	1	0.28736	0.28806
1	1	0.44900	0.45010
1.2	1	0.64656	0.64814
1.4	1	0.88004	0.88219
1.6	1	1.14944	1.15225
1.8	1	1.45476	1.45832
2	1	1.79600	1.80040
2.1	1	1.98010	1.98494

Fuente: Autor

4.3.5 Capacidad del canal

Se realizaron múltiples simulaciones en las que la distancia entre el transmisor y el receptor se modificó en un rango de $0.1 \mu m$ a $2.1 \mu m$ en pasos de $0.1 \mu m$ para llevar a cabo el análisis. Tras examinar las métricas anteriores, se muestra el gráfico de la capacidad del canal.

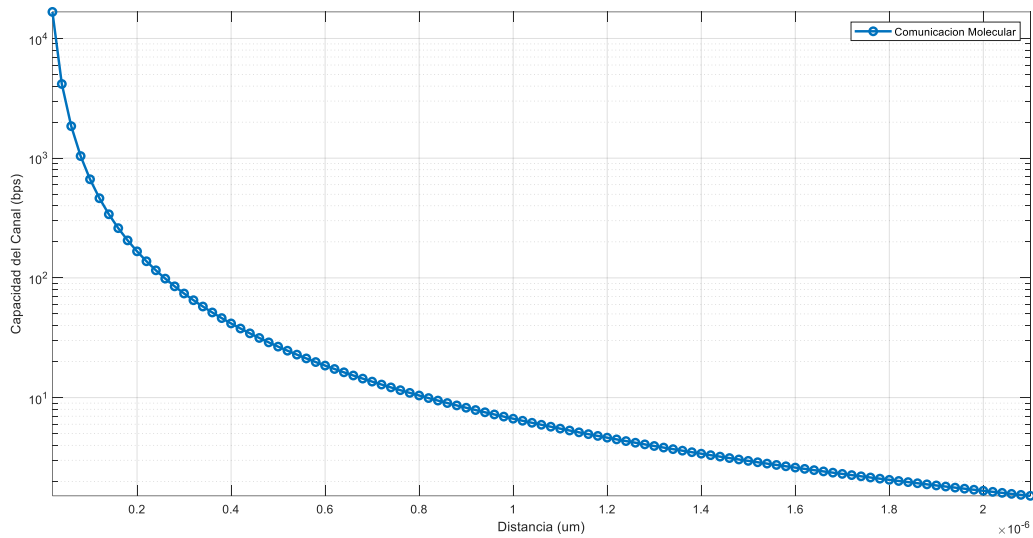


Figura 34. Capacidad de canal obtenida de la simulación del escenario 3.

Fuente: Autor

Tanto el coeficiente de difusión como el número de moléculas transmitidas son parámetros cruciales para la capacidad del canal. En la Figura 34 se muestra el resultado de la capacidad en función de la distancia *nodeDistance*. Como se observa, la capacidad del canal alcanza su máximo en las distancias iniciales, la razón es que, como la velocidad de deriva es rápida, las moléculas de información pueden llegar rápidamente al receptor. Se sabe que el aumento del número de moléculas que el receptor puede captar a lo largo del tiempo aumentará la capacidad del canal. En este caso, se requirió eliminar la interferencia de la velocidad de reacción y la velocidad de reacción de degradación, de modo que se considera que la reacción es unidireccional, y se asume que las moléculas mensajeras no se degradan durante la propagación. En estas circunstancias, las moléculas mensajeras reaccionan con el receptor una vez que alcanzan la superficie de este, y se obtiene el gráfico resultante.

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- La comprensión de los estándares de la familia protocolaria IEEE 1906 fueron fundamentales para el desarrollo de sistemas de comunicaciones moleculares, teniendo como base en la simulación a NS-3, con la finalidad de diseñar escenarios, componentes y entidades descritas dentro del marco de referencia que establecen los estándares, que proporcionan los parámetros básicos y funcionalidades comunes presentes en los tres escenarios de comunicaciones propuestos.
- Al caracterizar la transferencia de información en comunicaciones moleculares, se garantiza que las ecuaciones fundamentales que gobiernan la propagación biológica (randómica y randómica con arrastre), las técnicas de modulación (OOK, BCSK, BMoSK) y el modelo de recepción (activos y pasivos) sean implementadas en el núcleo del simulador mediante modificaciones de sus componentes (portadora de mensaje, perturbación, movimiento, campo y especificidad), por medio del lenguaje de programación C++ propio de estándar y que está orientado a eventos y orientado a objetos.
- Mediante el uso de la identificación de parámetros de simulación, se logró hallar los parámetros ideales para el rendimiento de una transmisión en comunicaciones moleculares vía difusión. El número de moléculas mensajeras, de acuerdo al tipo de modulación, se establece como una variable de proporciones relativamente grandes, lo cual es fundamental para el proceso de transmisión en función al medio de transmisión y al tipo de receptor de cada escenario.
- En este trabajo, se incluyó una forma de examinar las características del canal molecular a través del análisis directo de la segunda ley de Fick, con el propósito de validación de los escenarios propuestos mediante simulación y que permiten evaluar el rendimiento de la comunicación propiamente. Se ha determinado que los resultados del análisis estadístico son coherentes con el modelo de transmisión/recepción que se utilizó en cada escenario, en función a las métricas de evaluación del canal molecular denotados en los estándares de nanocomunicaciones.

5.2 Recomendaciones

- Para garantizar el correcto funcionamiento de NS3, es crucial asegurarse de tener instalada la versión apropiada y que sea compatible con el sistema operativo Ubuntu. Esto implica verificar los requisitos del sistema y seleccionar las versiones adecuadas de estas herramientas. Además, es importante tener en cuenta que estos programas requieren paquetes adicionales para su óptimo rendimiento. Por lo tanto, se recomienda seguir la documentación oficial, además de las instrucciones proporcionadas en este trabajo.
- Debido al tipo de implementación de cada escenario, se recomienda que los parámetros de simulación previamente definidos no excedan los rangos establecidos, para conseguir el rendimiento de comunicación deseado.
- Los trabajos futuros deberían centrarse en la implementación de un entorno multinodo con transmisiones simultáneas entre múltiples pares de transmisores y receptores. Esto implicaría explorar las últimas actualizaciones y revisiones de los estándares IEEE 1906.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Y. Cevallos, D. Inca, I. Santillán, C. Banchón, L. Tello-Oquendo, M. Guevara, N. Samaniego y H. Ruiz, *Modelamiento comunicacional de la expresión genética y el transporte de proteínas mediante un sistema de transmisión digital extremo a extremo*, 2022.
- [2] F. Allhoff, P. Lin y D. Moore, *"What Is Nanotechnology and Why Does It Matter?: From Science to Ethics"*, Wiley & Sons, Incorporated, John., 2011.
- [3] J. Calderón y E. Zúñiga, *"Análisis e implementación en NS3 de un modelo de propagación difusivo para comunicaciones moleculares"*, Cuenca: B.S. Thesis. [En línea]. Disponible: <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/36091>, 2021.
- [4] B. Atakan, "Molecular communications and nanonetworks", PSpringer-Verlag New York, vol. 1, pp. 1–103, 2014.
- [5] A. Rivera, *"Simulación de nano sistemas de comunicaciones en NS3 en función a los componentes comunicacionales establecidos por el estándar IEEE 1906.1"*, Riobamba: bachelorThesis, Universidad Nacional de Chimborazo, [En línea]. Disponible: <http://dspace.unach.edu.ec/handle/51000/7805> , 2021.
- [6] M. Kuscu, E. Dinc, B. A. Bilgin, H. Ramezani y O. B. Akan, *"Transmitter and receiver architectures for molecular communications: A survey on physical design with modulation, coding, and detection techniques"*, Proceedings of the IEEE, vol. 107, n.º 7, pp. 1302–1341, julio de 2019. Accedido el 12 de junio de 2022. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1109/jproc.2019.2916081> , 2019.
- [7] M. Ş. Kuran, H. B. Yilmaz, I. Demirkol, N. Farsad y A. Goldsmith, *"A survey on modulation techniques in molecular communication via diffusion"*, IEEE Communications Surveys & Tutorials, p.1., 2021.
- [8] I. F. Akyildiz, J. M. Jornet y M. Pierobon, *"Nanonetworks: A New Frontier in Communications"*, vol. 54, Association for Computing Machinery, vol. 54, n.º11, pp. 84-89, New York, NY, USA, 2011, pp. 84-89.
- [9] S. F. Bush, "Interoperable Nanoscale Communication", in IEEE Consumer Electronics Magazine, vol. 6, no. 2, pp. 39-47, doi: 10.1109/MCE.2016.2640600., 2017.

- [10] "Ieee recommended practice for nanoscale and molecular communication framework," IEEE Std 1906.1-2015, pp, 1-64, 2016.
- [11] I. Llatser, I. Pascual, N. Garralda, A. Cabellos-Aparicio, M. Pierobon, E. Alarcon y J. Sole-Pareta, "Exploring the physical channel of diffusion-based molecular communication by simulation", Houston, TX, USA, 5–9 de diciembre de 2011. IEEE: IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM 2011), [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1109/glocom.2011.6134028> , 2011.
- [12] T. Henderson, "NS3 Manual Release 3.26", [En línea]. Disponible: <https://www.nsnam.org/docs/release/3.26/manual/html/index.html>, 2016.
- [13] V. Honary y T. A. Wysocki, "Molecular communication system with non-absorbing receiver", Nano Communication Networks, vol. 28, p. 100335, 2021.
- [14] H. B. Yilmaz y C.-B. Chae, "Simulation study of molecular communication systems with an absorbing receiver: Modulation and ISI mitigation techniques", Simulation Modelling Practice and Theory, vol. 49, 136-150, 2014.
- [15] S. Zafar, M. Nazir y A. Sabah, "Molecular communication in Nano Networks", International Conference on Computational Methods, 7th ICCM2016, vol. 3, pp. 1397–1402, 2016.
- [16] T. Nakano, M. Moore, F. Wei, A. Vasilakos y J. Shuai, "Molecular Communication and Networking: Opportunities and Challenges", IEEE Transactions on NanoBioscience, vol. 11, no. 2, pp. 135-148, 2012.
- [17] T. Nakano, A. Eckford y T. Haraguchi, "Molecular Communication", Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [18] T. Nakano, T. Suda, Y. Okaie, M. Moore y A. Vasilakos, "Molecular Communication among Biological Nanomachines: A Layered Architecture and Research Issues", IEEE transactions on nanobioscience, 13(3), 169-197., 2014.
- [19] S. Abadal y I. F. Akyildiz, "Automata modeling of quorum sensing for nanocommunication networks", Nano Communication Networks, vol. 2, no 1, p. 74-83, 2011.
- [20] M. Gregori y I. F. Akyildiz, "A new nanonetwork architecture using flagellated bacteria and catalytic nanomotors", in IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 28, no. 4, pp. 612-619, doi: 10.1109/JSAC.2010.100510, 2010.

- [21] Y. Cevallos, D. Inca, I. Santillán, C. V. Gómez, T. Tene, A. Espinal, C. Téllez y N. Samaniego, "Comunicaciones Moleculares Un análisis desde el paradigma protocolario de IEEE", 2023.
- [22] H. ShahMohammadian, G. Messier y S. Magierowski, "*Optimum receiver for molecule shift keying modulation in diffusion-based molecular communication channels*", Nano Communication Networks. 3. 183–195. 10.1016/j.nancom.2012.09.006., 2012.
- [23] M. Pierobon y I. F. Akyildiz, "*Fundamentals of Diffusion-Based Molecular Communication in Nanonetworks*", now, 2014.
- [24] Y. Sun, "*Channel Modelling of Blood Capillary-based Molecular Communication*", PhD thesis, University of Essex, 2018.
- [25] J. Suzuki, T. Nakano y M. J. Moore, "*Modeling, Methodologies and Tools for Molecular and Nano-Scale Communications*", Springer International Publishing AG, 2017.
- [26] T. Szabados, "*An elementary introduction to the wiener process and stochastic integrals*", Studia Scientiarum Mathematicarum Hungarica, vol. 31, 2010.
- [27] I. F. Akyildiz, M. Pierobon y S. Balasubramaniam, "*An Information Theoretic Framework to Analyze Molecular Communication Systems Based on Statistical Mechanics*", in Proceedings of the IEEE, vol. 107, no. 7, pp. 1230-1255, July 2019.
- [28] A. W. Eckford, "*Achievable information rates for molecular communication with distinct molecules*", 2007 2nd Bio-Inspired Models of Network, Information and Computing Systems, Budapest, Hungary: pp. 313-315, 2007.
- [29] M. S. Kuran, H. B. Yilmaz, T. Tugcu y I. F. Akyildiz, "*Modulation Techniques for Communication via Diffusion in Nanonetworks*", Kyoto, Japan: 2011 IEEE International Conference on Communications (ICC), 2011.
- [30] N. Farsad, H. B. Yilmaz, A. Eckford, C.-B. Chae y W. Guo, "*A Comprehensive Survey of Recent Advancements in Molecular Communication*", in IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 18, no. 3, pp. 1887-1919, 2016.
- [31] C. E. Shannon, "*A mathematical theory of communication*", in The Bell System Technical Journal, vol. 27, no. 3, pp. 379-423, 1984.

- [32] V. Jamali, A. Ahmadzadeh, W. Wicke, A. Noel y R. Schober, "*Channel Modeling for Diffusive Molecular Communication—A Tutorial Review*", in Proceedings of the IEEE, vol. 107, no. 7, pp. 1256-1301, 2019.
- [33] L. Maygua, "*Simulación de un mecanismo de control de potencia en aodv en función del número de vecinos usando cross layering en una MANET*", Quito: Bachelor's thesis, 2017.
- [34] "*IEEE Standard Data Model for Nanoscale Communication Systems*", in IEEE Std 1906.1.1-2020 , vol., no., pp.1-142, doi: 10.1109/IEEESTD.2020.9285373., 2020.
- [35] M. J. Moore, T. Suda y K. Oiwa, "*Molecular Communication: Modeling Noise Effects on Information Rate*", in IEEE Transactions on NanoBioscience, vol. 8, no. 2, pp. 169-180, 2009.
- [36] X. Liao, Z. Jia, Z. Wu, B. Liu, X. Wang y X. Jiang, "*Modulation and Signal Detection for Diffusive-Drift Molecular Communication with a Mobile Receiver*", Mobile Information Systems, 1-17, 2021.
- [37] I. Llatser, E. Alarcón y M. Pierobony, "*Diffusion-based channel characterization in molecular nanonetworks*", Shanghai, China: IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHP), pp. 467-472, doi: 10.1109/INFCOMW.2011.5928858., 2011.
- [38] A. Gusi-Amigó, P. Ciosas y L. Vandendorpe, "*Mean square error performance of sample mean and sample median estimators*", Palma de Mallorca, Spain: IEEE Statistical Signal Processing Workshop (SSP), pp. 1-5, doi: 10.1109/SSP.2016.7551739., 2016.
- [39] A. M. Almohammed, A. Zerguine, M. Deriche y S. M. Sait, "*Artificial Bee Colony DLMS Beyond Mean Square Error Boundary in Ad-hoc WSN*", Al-Khobar, Saudi Arabia: 14th International Conference on Computational Intelligence and Communication Networks (CICN), pp. 572-576, doi: 10.1109/CICN56167.2022.10008253., 2022.

ANEXOS

Anexo I. Descarga de NS-3

Anexo II. Descarga e instalación del módulo P1906

Anexo III. Declaración de dependencias del módulo

Anexo IV. Ejecución del simulador

Anexo V. Obtención de resultados

ANEXO I

Descarga de NS-3

Se requiere la versión 3.28.1 de NS-3 y la versión de Ubuntu 20.04.6 (<https://releases.ubuntu.com/focal/>), sistema de código abierto el cual tiene compatibilidad con Linux para la gestión de herramientas de desarrollo para el funcionamiento de NS-3. El software NS-3 está disponible en la página oficial de nsnam.org, mediante el enlace (<https://www.nsnam.org/releases/ns-3-28/download/>).

La documentación inicial de NS-3 se la encuentra en la siguiente página (<https://www.nsnam.org/docs/release/3.28/tutorial/singlehtml/index.html>), donde se cubren aspectos como: plataformas soportadas, prerequisites, formas de obtener NS-3, formas de construir NS-3 y la ejecución.

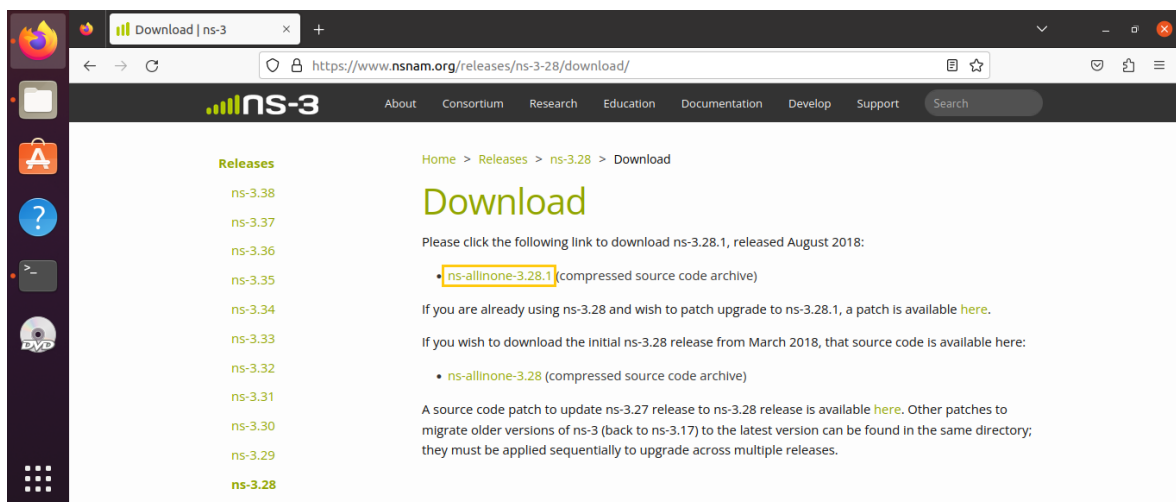


Figura 35. Archivo *.tar.bz2* del Network Simulator 3.

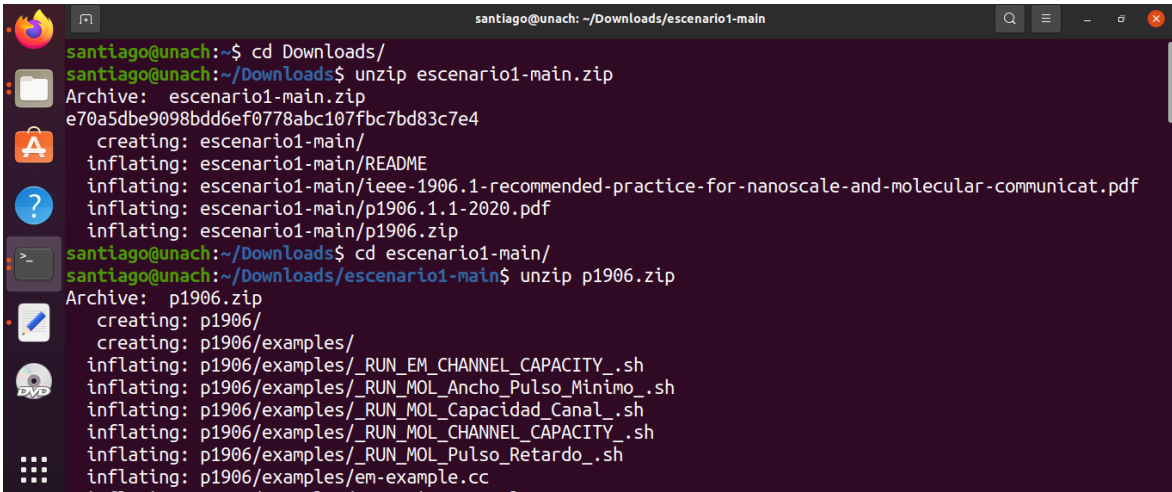
Fuente: Autor

ANEXO II

Descarga e instalación del módulo P1906

Del siguiente enlace <https://github.com/ArmasSantiago?tab=repositories>, se presentan 3 repositorios que determinan los 3 escenarios configurados individualmente. Cada repositorio se conforma por el archivo README el cual muestra brevemente la forma de ejecución del escenario en específico, el archivo p1906.zip contiene las 9 clases y 21 archivos configurados para la simulación en NS-3 y también se proporcionan documentos que representan las prácticas recomendadas del estándar.

Una vez descargados los archivos desde GitHub, donde los puede obtener en archivo escenario-main.zip de cada uno de los escenarios. Se procede a abrir una terminal, y nos dirigimos generalmente en la carpeta Descargas para luego descomprimir el archivo *escenario1-main.zip* y el archivo *p1906.zip*.



```
santiago@unach: ~/Downloads/escenario1-main
santiago@unach:~$ cd Downloads/
santiago@unach:~/Downloads$ unzip escenario1-main.zip
Archive:  escenario1-main.zip
e70a5dbe9098bdd6ef0778abc107fbc7bd83c7e4
  creating:  escenario1-main/
  inflating:  escenario1-main/README
  inflating:  escenario1-main/ieee-1906.1-recommended-practice-for-nanoscale-and-molecular-communicat.pdf
  inflating:  escenario1-main/p1906.1.1-2020.pdf
  inflating:  escenario1-main/p1906.zip
santiago@unach:~/Downloads$ cd escenario1-main/
santiago@unach:~/Downloads/escenario1-main$ unzip p1906.zip
Archive:  p1906.zip
  creating:  p1906/
  creating:  p1906/examples/
  inflating:  p1906/examples/_RUN_EM_CHANNEL_CAPACITY_.sh
  inflating:  p1906/examples/_RUN_MOL_Ancho_Pulso_Minimo_.sh
  inflating:  p1906/examples/_RUN_MOL_Capacidad_Canal_.sh
  inflating:  p1906/examples/_RUN_MOL_CHANNEL_CAPACITY_.sh
  inflating:  p1906/examples/_RUN_MOL_Pulso_Retardo_.sh
  inflating:  p1906/examples/em-example.cc
  inflating:  p1906/examples/extension-example.cc
```

Figura 36. Vista de los archivos descomprimidos.

Fuente: Autor

Se ingresa a la carpeta */escenario1-main* para poder copiar la carpeta */p1906* y dirigirla a la carpeta */src* de NS-3 mediante el siguiente comando:

```
santiago@unach:~/Downloads/escenario1-main$ cp -r p1906/ ~/Documents/proyinvestigacion/ns-allinone-3.28.1/ns-3.28.1/src/
```

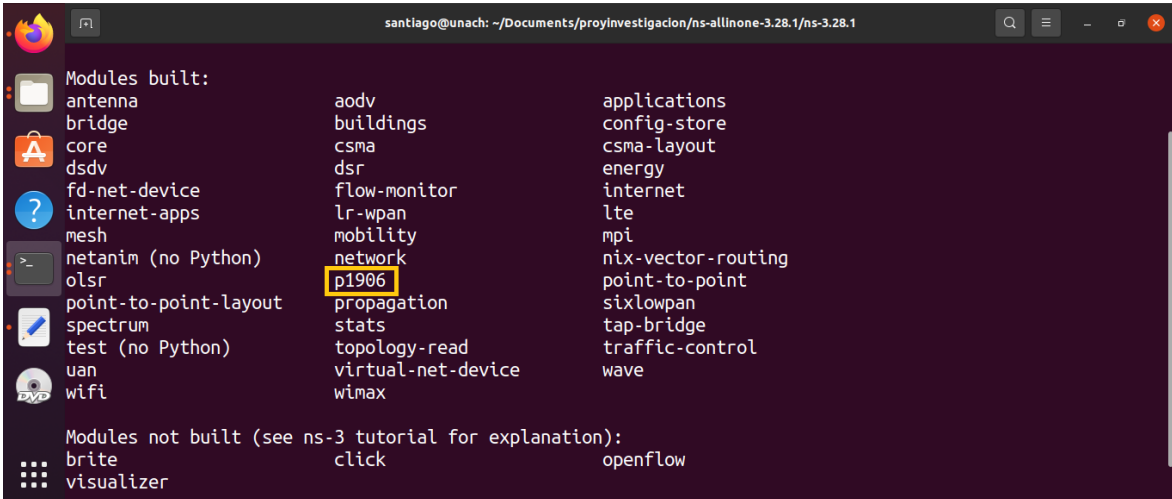
Se dirige a la carpeta que contiene el software, concretamente a */ns-3.28.1* para poder configurar el simulador mediante el siguiente comando:

```
santiago@unach:~/Documents/proyinvestigacion/ns-allinone-3.28.1/ns-3.28.1$ ./waf configure
```

Finalmente, para construir el proyecto, sin errores y listo para que se incluya en los módulos de NS-3 se aplica el siguiente el comando:

```
santiago@unach:~/Documents/proyinvestigacion/ns-allinone-3.28.1/ns-3.28.1$ ./waf
```

La forma de comprobar si este módulo es incluido y listo para ser utilizado, se realiza mediante la integración misma otorgada en la respuesta por consola de la siguiente manera:



```
santiago@unach: ~/Documents/proyinvestigacion/ns-allinone-3.28.1/ns-3.28.1
Modules built:
antenna          aodv             applications
bridge          buildings        config-store
core            csma             csma-layout
dsvd            dsr              energy
fd-net-device   flow-monitor     internet
internet-apps  lr-wpan          lte
mesh           mobility         mpi
netanim (no Python) network          nix-vector-routing
olsr           p1906           point-to-point
point-to-point-layout propagation       sixlowpan
spectrum       stats            tap-bridge
test (no Python) topology-read   traffic-control
uan            virtual-net-device wave
wifi          wimax

Modules not built (see ns-3 tutorial for explanation):
brite          click            openflow
visualizer
```

Figura 37. Construcción del módulo p1906 en el software NS-3.

Fuente: Autor

Luego de la construcción satisfactoria del módulo, se copia el programa mol-example.cc ubicando en la carpeta /examples del módulo y se dirige a la carpeta /scratch del simulador.

```
santiago@unach:~/Downloads/escenario1-main/p1906$ cp examples/mol-example.cc ~/Documents/proyinvestigacion/ns-allinone-3.28.1/ns-3.28.1/scratch/
```

Y mediante el siguiente comando se ejecuta el programa con sus parámetros por defecto, los cuales se detallan en el Anexo III y el resultado por consola se muestra en el Anexo IV.

```
santiago@unach:~/Documents/proyinvestigacion/ns-allinone-3.28.1/ns-3.28.1$ ./waf --run scratch/mol-example
```

ANEXO III

Declaración de dependencias del módulo

Archivo wscript

En este anexo se muestra la declaración del módulo con sus características, funciones y los archivos fuente del módulo p1906.

- Creación del módulo *p1906* dentro del entorno NS-3, incluyendo las características *'network'* y *'spectrum'*, con la ayuda de la función llamada *'build'* que toma un argumento llamado *'bld'* para la construcción.

```
• def build(bld):  
•     module = bld.create_ns3_module('p1906', ['network',  
•     'spectrum'])
```

- Asignación de archivos fuente a la propiedad *'source'* del objeto llamado *'module'* para la interacción con el módulo p1906 para ser compilados en el proyecto.

```
•     module.source = [  
•         'helper/p1906-helper.cc',  
•         'model-core/p1906-medium.cc',  
•         'model-core/p1906-net-device.cc',  
•         'model-core/p1906-message-carrier.cc',  
•         'model-core/p1906-field.cc',  
•         'model-core/p1906-motion.cc',  
•         'model-core/p1906-perturbation.cc',  
•         'model-core/p1906-specificity.cc',  
•         'model-core/p1906-communication-interface.cc',  
•         'model-core/p1906-transmitter-communication-interface.cc',  
•         'model-core/p1906-receiver-communication-interface.cc',  
•  
•         'model-em/p1906-em-field.cc',  
•         'model-em/p1906-em-motion.cc',  
•         'model-em/p1906-em-message-carrier.cc',  
•         'model-em/p1906-em-perturbation.cc',  
•         'model-em/p1906-em-specificity.cc',  
•         'model-em/p1906-em-communication-interface.cc',  
•         'model-em/p1906-em-transmitter-communication-  
interface.cc',  
•         'model-em/p1906-em-receiver-communication-interface.cc',  
•  
•         'model-mol/p1906-mol-field.cc',  
•         'model-mol/p1906-mol-motion.cc',  
•         'model-mol/p1906-mol-message-carrier.cc',  
•         'model-mol/p1906-mol-perturbation.cc',  
•         'model-mol/p1906-mol-specificity.cc',  
•         'model-mol/p1906-mol-communication-interface.cc',  
•         'model-mol/p1906-mol-transmitter-communication-  
interface.cc',  
•         'model-mol/p1906-mol-receiver-communication-interface.cc',  
•
```

- 'extension-template/extension-name-p1906-medium.cc',
- 'extension-template/extension-name-p1906-net-device.cc',
- 'extension-template/extension-name-p1906-message-carrier.cc',
- 'extension-template/extension-name-p1906-field.cc',
- 'extension-template/extension-name-p1906-motion.cc',
- 'extension-template/extension-name-p1906-perturbation.cc',
- 'extension-template/extension-name-p1906-specificity.cc',
- 'extension-template/extension-name-p1906-communication-interface.cc',
- 'extension-template/extension-name-p1906-transmitter-communication-interface.cc',
- 'extension-template/extension-name-p1906-receiver-communication-interface.cc'
-]
- Creación de la biblioteca de pruebas del entorno NS-3 para el módulo *p1906* usando la función `create_ns3_module_test_library()`, y creación del objeto `headers` para generar los archivos de encabezado propios del módulo p1906 para la compilación y uso del entorno.

```

• module_test = bld.create_ns3_module_test_library('p1906')
• module_test.source = [
• ]
• headers = bld(features='ns3header')
• headers.module = 'p1906'
• headers.source = [
• 'helper/p1906-helper.h',
• 'model-core/p1906-medium.h',
• 'model-core/p1906-net-device.h',
• 'model-core/p1906-communication-interface.h',
• 'model-core/p1906-transmitter-communication-interface.h',
• 'model-core/p1906-receiver-communication-interface.h',
• 'model-core/p1906-message-carrier.h',
• 'model-core/p1906-field.h',
• 'model-core/p1906-motion.h',
• 'model-core/p1906-perturbation.h',
• 'model-core/p1906-specificity.h',
•
• 'model-em/p1906-em-field.h',
• 'model-em/p1906-em-motion.h',
• 'model-em/p1906-em-message-carrier.h',
• 'model-em/p1906-em-perturbation.h',
• 'model-em/p1906-em-specificity.h',
• 'model-em/p1906-em-communication-interface.h',
• 'model-em/p1906-em-transmitter-communication-interface.h',
• 'model-em/p1906-em-receiver-communication-interface.h',
•
• 'model-mol/p1906-mol-field.h',
• 'model-mol/p1906-mol-motion.h',
• 'model-mol/p1906-mol-message-carrier.h',
• 'model-mol/p1906-mol-perturbation.h',

```

- `'model-mol/p1906-mol-specificity.h',`
- `'model-mol/p1906-mol-communication-interface.h',`
- `'model-mol/p1906-mol-transmitter-communication-`
`interface.h',`
- `'model-mol/p1906-mol-receiver-communication-interface.h',`
-
- `'extension-template/extension-name-p1906-medium.h',`
- `'extension-template/extension-name-p1906-net-device.h',`
- `'extension-template/extension-name-p1906-message-`
`carrier.h',`
- `'extension-template/extension-name-p1906-field.h',`
- `'extension-template/extension-name-p1906-motion.h',`
- `'extension-template/extension-name-p1906-perturbation.h',`
- `'extension-template/extension-name-p1906-specificity.h',`
- `'extension-template/extension-name-p1906-communication-`
`interface.h',`
- `'extension-template/extension-name-p1906-transmitter-`
`communication-interface.h',`
- `'extension-template/extension-name-p1906-receiver-`
`communication-interface.h'`
-
- `]`
- Verificación de la variable `'ENABLE_EXAMPLES'` en el entorno de construcción `'bld.env'`, que indica si contiene ejemplos relacionados con el módulo `'p1906'` y si están disponibles para compilación y ejecución. Si los ejemplos están habilitados, se invoca el comando `'resource()'` para procesar los ejemplos. Esto implica que se realizará una construcción recursiva en la carpeta `'examples'` donde está incorporado el archivo `'mol-example'` y finalmente, se invoca el comando `'ns3_python_bindings()'` proporcionado por el objeto `'bld'` para generar los enlaces (bindings) de Python para permitir la interacción con el módulo `'p1906'`.
 - `if (bld.env['ENABLE_EXAMPLES']):`
 - `bld.recurse('examples')`
 -
 - `bld.ns3_python_bindings()`

Archivo `mol-example.cc`

El siguiente anexo muestra el archivo de la aplicación `mol-example`, que contiene los componentes e interfaces de comunicación que conforman la arquitectura del simulador, así como los parámetros para la simulación.

- Inclusión de los archivos de encabezados (*headers*) de la biblioteca que son accesibles para el usuario, las mismas que proporcionan declaraciones de funciones y clases necesarias para la funcionalidad del módulo. Cada línea de inclusión

corresponde a un archivo de encabezado específico que son necesarios para el módulo *p1906* en el entorno de NS-3.

- `#include "ns3/core-module.h"`
- `#include "ns3/network-module.h"`
- `#include "ns3/mobility-module.h"`
- `#include "ns3/p1906-helper.h"`
- `#include "ns3/p1906-net-device.h"`
- `#include "ns3/p1906-mol-perturbation.h"`
- `#include "ns3/p1906-mol-field.h"`
- `#include "ns3/p1906-mol-motion.h"`
- `#include "ns3/p1906-mol-specificity.h"`
- `#include "ns3/p1906-medium.h"`
- `#include "ns3/p1906-mol-communication-interface.h"`
- `#include "ns3/p1906-mol-transmitter-communication-interface.h"`
- `#include "ns3/p1906-mol-receiver-communication-interface.h"`
- Punto de entrada principal del programa donde comienza la ejecución, inicialización y declaración de variables, creación del objeto *cmd* para analizar y procesar los argumentos de línea de comandos, operación de ajuste del valor *diffusionCoefficient* y establecimiento de la resolución de tiempo de la clase *Time*.

```

• int main (int argc, char *argv[])
• {
•
•     //set of parameters
•     double nodeDistance = 2.1 *pow(10,-6);
//     [m]
•     double nbOfMoleculas = 10000; //
// [pJ]
•     double pulseInterval = 2000; //
// [ms]
•     double diffusionCoefficient = 1; //
// [nm^2/ns]
•
•     CommandLine cmd;
•     cmd.AddValue("nodeDistance", "nodeDistance", nodeDistance);
•     cmd.AddValue("nbOfMoleculas", "nbOfMoleculas", nbOfMoleculas);
•     cmd.AddValue("diffusionCoefficient", "diffusionCoefficient",
diffusionCoefficient);
•     cmd.AddValue("pulseInterval", "pulseInterval", pulseInterval);
•     cmd.Parse(argc, argv);
•
•     diffusionCoefficient = diffusionCoefficient * 1e-12;
•
•     Time::SetResolution(Time::NS);

```

- Creación y configuración de componentes y objetos necesarios para la simulación del escenario de comunicaciones moleculares tales como; habilitación de registros de componentes del módulo *p1906*, creación de nodos, almacenamiento de dispositivos de red, creación del objeto *P1906Medium*, establecimiento del método

‘*motion*’ y la creación de objetos y designación de métodos que representan las características del primer y segundo dispositivo.

- `// Create P1906 Helper`
- `P1906Helper helper;`
- `helper.EnableLogComponents ();`
-
- `// Create nodes (typical operation of ns-3)`
- `NodeContainer n;`
- `NetDeviceContainer d;`
- `n.Create (2);`
-
- `// Create a medium and the Motion component`
- `Ptr<P1906Medium> medium = CreateObject<P1906Medium> ();`
- `Ptr<P1906MOLMotion> motion = CreateObject<P1906MOLMotion> ();`
- `motion->SetDiffusionCoefficient (diffusionCoefficient);`
- `medium->SetP1906Motion (motion);`
-
- `// Create Device 1 and related components/entities`
- `Ptr<P1906NetDevice> dev1 = CreateObject<P1906NetDevice> ();`
- `Ptr<P1906MOLCommunicationInterface> c1 =`
- `CreateObject<P1906MOLCommunicationInterface> ();`
- `Ptr<P1906MOLSpecificity> s1 = CreateObject<P1906MOLSpecificity>`
- `();`
- `Ptr<P1906MOLField> fi1 = CreateObject<P1906MOLField> ();`
- `Ptr<P1906MOLPerturbation> p1 =`
- `CreateObject<P1906MOLPerturbation> ();`
- `p1->SetPulseInterval (Milliseconds(pulseInterval));`
- `p1->SetMolecules (nbOfMoleculas);`
- `s1->SetDiffusionCoefficient (diffusionCoefficient);`
-
- `// Create Device 2 and related components/entities`
- `Ptr<P1906NetDevice> dev2 = CreateObject<P1906NetDevice> ();`
- `Ptr<P1906MOLCommunicationInterface> c2 =`
- `CreateObject<P1906MOLCommunicationInterface> ();`
- `Ptr<P1906MOLSpecificity> s2 = CreateObject<P1906MOLSpecificity>`
- `();`
- `Ptr<P1906MOLField> fi2 = CreateObject<P1906MOLField> ();`
- `Ptr<P1906MOLPerturbation> p2 =`
- `CreateObject<P1906MOLPerturbation> ();`
- `p2->SetPulseInterval (Milliseconds(pulseInterval));`
- `p2->SetMolecules (nbOfMoleculas);`
- `s2->SetDiffusionCoefficient (diffusionCoefficient);`
- Configuración de las posiciones de los dispositivos y establecimiento de las conexiones entre los nodos, dispositivos, medio y componentes relacionados con el módulo ‘*p1906*’, por ejemplo, se tiene el objeto ‘*positionAlloc*’ del tipo ‘*ListPositionAllocator*’ para la asignación de posiciones a los nodos en la simulación, se configura la movilidad como una posición constante de los nodos, se añade los dispositivos a sus contenedores y se establece la conexión utilizando el objeto

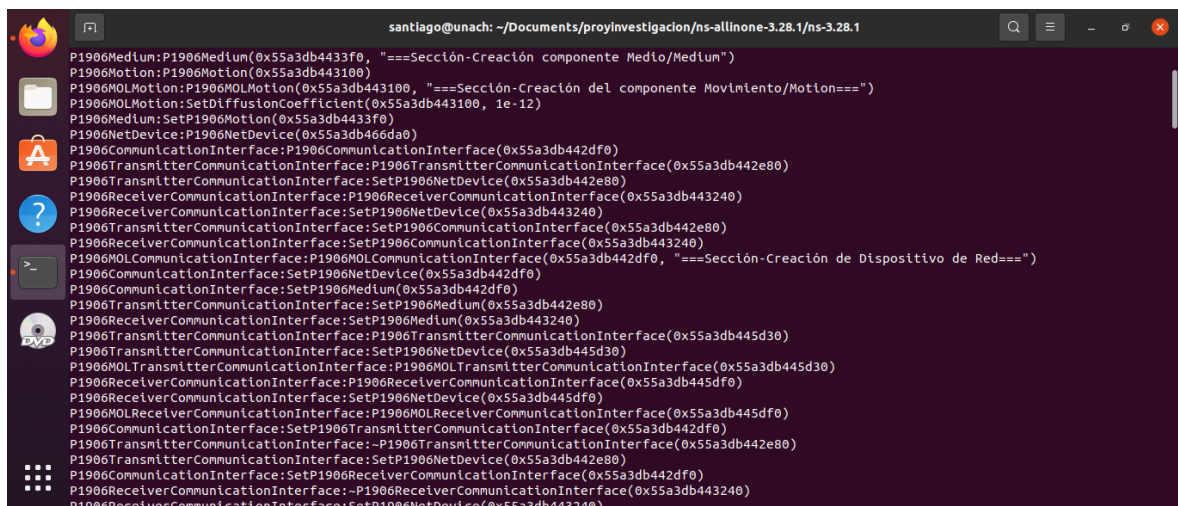
'helper' para conectar el primer y segundo nodo con sus dispositivos y sus respectivos componentes relacionados.

- `//set devices positions`
- `Ptr<ListPositionAllocator> positionAlloc =`
- `CreateObject<ListPositionAllocator> ();`
- `positionAlloc->Add (Vector(0, 0, 0));`
- `positionAlloc->Add (Vector(nodeDistance, 0, 0));`
- `MobilityHelper mobility;`
- `mobility.SetMobilityModel("ns3::ConstantPositionMobilityModel");`
- `mobility.SetPositionAllocator(positionAlloc);`
- `mobility.Install(n);`
-
-
- `// Connect devices, nodes, medium, components and entities`
- `d.Add (dev1);`
- `d.Add (dev2);`
- `helper.Connect(n.Get (0), dev1, medium, c1, fi1, p1, s1);`
- `helper.Connect(n.Get (1), dev2, medium, c2, fi2, p2, s2);`
- Creación del mensaje para ser enviado por la red estableciendo; su tamaño, el arreglo de bytes llamado 'buffer', se asigna el valor a cada byte del buffer en este caso el paquete es de 1 byte, se crea el objeto 'message' del tipo 'Packet', se llama al método 'HandleTransmission()' para manejar la transmisión del mensaje, en 'Simulator::Run()' se inicia la ejecución de la simulación, en 'Simulator::Destroy()' se finaliza y se limpian los recursos de simulación y finalmente en 'return 0' se retorna el valor 0 para indicar que el programa ha finalizado correctamente.
- `// Create a message to sent into the network`
- `size_t pktSize = 1; //bytes`
- `uint8_t *buffer = new uint8_t[pktSize];`
- `for (size_t i = 0; i < pktSize; i++)`
- `{`
- `buffer[i] = 0b00000001;`
- `}`
-
- `Ptr<Packet> message = Create<Packet>(buffer, pktSize);`
-
-
- `c1->HandleTransmission (message);`
-
-
- `Simulator::Run ();`
-
- `Simulator::Destroy ();`
- `return 0;`
- `}`

ANEXO IV

Ejecución del simulador

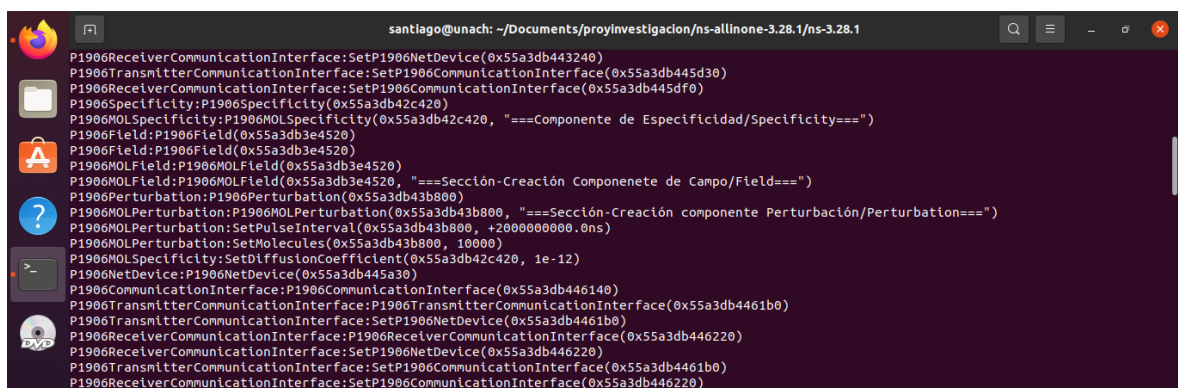
En este anexo se muestra el resultado por consola de la ejecución del simulador del Escenario 1. Se representa por secciones la creación de los componentes que integran los módulos configurados, la creación de objetos y la llamada a métodos en NS-3. Durante la ejecución del simulador las líneas muestran, por ejemplo; creación del objeto denominado 'P1906Medium' con una dirección de memoria '0x55a3db4433f0' y un mensaje de texto asociado. Estos objetos llaman a los métodos asociados a los componentes integrados para realizar las funciones del programa.



```
santiago@unach: ~/Documents/proyinvestigacion/ns-allinone-3.28.1/ns-3.28.1
P1906Medium:P1906Medium(0x55a3db4433f0, "===Sección-Creación componente Medio/Medium")
P1906Motion:P1906Motion(0x55a3db443100)
P1906MOLMotion:P1906MOLMotion(0x55a3db443100, "===Sección-Creación del componente Movimiento/Motion===")
P1906MOLMotion:SetDiffusionCoefficient(0x55a3db443100, 1e-12)
P1906Medium:SetP1906Motion(0x55a3db4433f0)
P1906NetDevice:P1906NetDevice(0x55a3db466da0)
P1906CommunicationInterface:P1906CommunicationInterface(0x55a3db442df0)
P1906TransmitterCommunicationInterface:P1906TransmitterCommunicationInterface(0x55a3db442e80)
P1906TransmitterCommunicationInterface:SetP1906NetDevice(0x55a3db442e80)
P1906ReceiverCommunicationInterface:P1906ReceiverCommunicationInterface(0x55a3db443240)
P1906ReceiverCommunicationInterface:SetP1906NetDevice(0x55a3db443240)
P1906TransmitterCommunicationInterface:SetP1906CommunicationInterface(0x55a3db442e80)
P1906ReceiverCommunicationInterface:SetP1906CommunicationInterface(0x55a3db443240)
P1906MOLCommunicationInterface:P1906MOLCommunicationInterface(0x55a3db442df0, "===Sección-Creación de Dispositivo de Red===")
P1906CommunicationInterface:SetP1906NetDevice(0x55a3db442df0)
P1906CommunicationInterface:SetP1906Medium(0x55a3db442df0)
P1906TransmitterCommunicationInterface:SetP1906Medium(0x55a3db442e80)
P1906ReceiverCommunicationInterface:SetP1906Medium(0x55a3db443240)
P1906TransmitterCommunicationInterface:P1906TransmitterCommunicationInterface(0x55a3db445d30)
P1906TransmitterCommunicationInterface:SetP1906NetDevice(0x55a3db445d30)
P1906MOLTransmitterCommunicationInterface:P1906MOLTransmitterCommunicationInterface(0x55a3db445d30)
P1906ReceiverCommunicationInterface:P1906ReceiverCommunicationInterface(0x55a3db445df0)
P1906ReceiverCommunicationInterface:SetP1906NetDevice(0x55a3db445df0)
P1906MOLReceiverCommunicationInterface:P1906MOLReceiverCommunicationInterface(0x55a3db445df0)
P1906CommunicationInterface:SetP1906TransmitterCommunicationInterface(0x55a3db442df0)
P1906TransmitterCommunicationInterface:-P1906TransmitterCommunicationInterface(0x55a3db442e80)
P1906TransmitterCommunicationInterface:SetP1906NetDevice(0x55a3db442e80)
P1906CommunicationInterface:SetP1906ReceiverCommunicationInterface(0x55a3db442df0)
P1906ReceiverCommunicationInterface:-P1906ReceiverCommunicationInterface(0x55a3db443240)
P1906ReceiverCommunicationInterface:SetP1906NetDevice(0x55a3db443240)
```

Figura 38. Vista por consola de la ejecución del estándar IEEE1906.1 mediante el archivo mol-example.cc, representando la creación de la componenete Movimiento y del primer dispositivo de Red.

Fuente: Autor



```
santiago@unach: ~/Documents/proyinvestigacion/ns-allinone-3.28.1/ns-3.28.1
P1906ReceiverCommunicationInterface:SetP1906NetDevice(0x55a3db443240)
P1906TransmitterCommunicationInterface:SetP1906CommunicationInterface(0x55a3db445d30)
P1906ReceiverCommunicationInterface:SetP1906CommunicationInterface(0x55a3db445df0)
P1906Specificity:P1906Specificity(0x55a3db42c420)
P1906MOLSpecificity:P1906MOLSpecificity(0x55a3db42c420, "===Componente de Especificidad/Specificity===")
P1906Field:P1906Field(0x55a3db3e4520)
P1906Field:P1906Field(0x55a3db3e4520)
P1906MOLField:P1906MOLField(0x55a3db3e4520)
P1906MOLField:P1906MOLField(0x55a3db3e4520, "===Sección-Creación Componente de Campo/Field===")
P1906Perturbation:P1906Perturbation(0x55a3db43b800)
P1906MOLPerturbation:P1906MOLPerturbation(0x55a3db43b800, "===Sección-Creación componente Perturbación/Perturbation===")
P1906MOLPerturbation:SetPulseInterval(0x55a3db43b800, +2000000000.0ns)
P1906MOLPerturbation:SetMolecules(0x55a3db43b800, 10000)
P1906MOLSpecificity:SetDiffusionCoefficient(0x55a3db42c420, 1e-12)
P1906NetDevice:P1906NetDevice(0x55a3db445a30)
P1906CommunicationInterface:P1906CommunicationInterface(0x55a3db446140)
P1906TransmitterCommunicationInterface:P1906TransmitterCommunicationInterface(0x55a3db4461b0)
P1906TransmitterCommunicationInterface:SetP1906NetDevice(0x55a3db4461b0)
P1906ReceiverCommunicationInterface:P1906ReceiverCommunicationInterface(0x55a3db446220)
P1906ReceiverCommunicationInterface:SetP1906NetDevice(0x55a3db446220)
P1906TransmitterCommunicationInterface:SetP1906CommunicationInterface(0x55a3db4461b0)
P1906ReceiverCommunicationInterface:SetP1906CommunicationInterface(0x55a3db446220)
```

Figura 39. Vista por consola de la ejecución del estándar IEEE1906.1 mediante el archivo mol-example.cc, representando la creación de la componente Especificidad, Campo y Perturbación.

Fuente: Autor

```

santiago@unach: ~/Documents/proyinvestigacion/ns-allinone-3.28.1/ns-3.28.1
P1906MOLTransmitterCommunicationInterface: P1906MOLTransmitterCommunicationInterface(0x55a3db446290)
P1906ReceiverCommunicationInterface: P1906ReceiverCommunicationInterface(0x55a3db446300)
P1906ReceiverCommunicationInterface: SetP1906NetDevice(0x55a3db446300)
P1906MOLReceiverCommunicationInterface: P1906MOLReceiverCommunicationInterface(0x55a3db446300)
P1906CommunicationInterface: SetP1906TransmitterCommunicationInterface(0x55a3db446140)
P1906TransmitterCommunicationInterface: ~P1906TransmitterCommunicationInterface(0x55a3db4461b0)
P1906TransmitterCommunicationInterface: SetP1906NetDevice(0x55a3db4461b0)
P1906ReceiverCommunicationInterface: SetP1906ReceiverCommunicationInterface(0x55a3db446140)
P1906ReceiverCommunicationInterface: ~P1906ReceiverCommunicationInterface(0x55a3db446220)
P1906ReceiverCommunicationInterface: SetP1906NetDevice(0x55a3db446220)
P1906TransmitterCommunicationInterface: SetP1906CommunicationInterface(0x55a3db446290)
P1906ReceiverCommunicationInterface: SetP1906CommunicationInterface(0x55a3db446300)
P1906Specificity: P1906Specificity(0x55a3db445a70)
P1906MOLSpecificity: P1906MOLSpecificity(0x55a3db445a70, "===Componente de Especificidad/Specificity===")
P1906Field: P1906Field(0x55a3db3e2850)
P1906Field: P1906Field(0x55a3db3e2850)
P1906MOLField: P1906MOLField(0x55a3db3e2850)
P1906MOLField: P1906MOLField(0x55a3db3e2850, "===Sección-Creación Componente de Campo/Field===")
P1906Perturbation: P1906Perturbation(0x55a3db48d590)
P1906MOLPerturbation: P1906MOLPerturbation(0x55a3db48d590, "===Sección-Creación componente Perturbación/Perturbation===")
P1906MOLPerturbation: SetPulseInterval(0x55a3db48d590, +2000000000.0ns)
P1906MOLPerturbation: SetMolecules(0x55a3db48d590, 10000)
P1906MOLSpecificity: SetDiffusionCoefficient(0x55a3db445a70, 1e-12)
P1906NetDevice: SetNode(0x55a3db490e70)
P1906NetDevice: SetNode(0x55a3db490e70)

```

Figura 40. Vista por consola de la ejecución del estándar IEEE1906.1 mediante el archivo mol-example.cc, representando la creación del segundo dispositivo de Red, creación de la componente Especificidad, Campo y Perturbación.

Fuente: Autor

```

santiago@unach: ~/Documents/proyinvestigacion/ns-allinone-3.28.1/ns-3.28.1
P1906TransmitterCommunicationInterface: SetP1906Medium(0x55a3db445d30)
P1906ReceiverCommunicationInterface: SetP1906Medium(0x55a3db445d30)
P1906CommunicationInterface: GetP1906TransmitterCommunicationInterface(0x55a3db442df0)
P1906TransmitterCommunicationInterface: SetP1906Perturbation(0x55a3db445d30)
P1906CommunicationInterface: GetP1906TransmitterCommunicationInterface(0x55a3db442df0)
P1906TransmitterCommunicationInterface: SetP1906Field(0x55a3db445d30)
P1906CommunicationInterface: GetP1906ReceiverCommunicationInterface(0x55a3db442df0)
P1906ReceiverCommunicationInterface: SetP1906Specificity(0x55a3db445d30)
P1906Specificity: SetP1906CommunicationInterface(0x55a3db442c40)
P1906Medium: AddP1906CommunicationInterface(0x55a3db4433f0)
P1906NetDevice: SetNode(0x55a3db4af680)
P1906NetDevice: SetNode(0x55a3db4af680)
P1906NetDevice: SetIfIndex(0)
P1906NetDevice: SetReceiveCallback(0x7fff1a8085a0)
P1906CommunicationInterface: SetP1906NetDevice(0x55a3db446140)
P1906CommunicationInterface: SetP1906Medium(0x55a3db446140)
P1906TransmitterCommunicationInterface: SetP1906Medium(0x55a3db446290)
P1906ReceiverCommunicationInterface: SetP1906Medium(0x55a3db446300)
P1906CommunicationInterface: GetP1906TransmitterCommunicationInterface(0x55a3db446140)
P1906TransmitterCommunicationInterface: SetP1906Perturbation(0x55a3db446290)
P1906CommunicationInterface: GetP1906TransmitterCommunicationInterface(0x55a3db446140)
P1906TransmitterCommunicationInterface: SetP1906Field(0x55a3db446290)
P1906CommunicationInterface: GetP1906ReceiverCommunicationInterface(0x55a3db446140)
P1906ReceiverCommunicationInterface: SetP1906Specificity(0x55a3db446300)

```

Figura 41. Vista por consola de la ejecución del estándar IEEE1906.1 mediante el archivo mol-example.cc, representando la configuración y conexión de componentes e interfaces.

Fuente: Autor

```

santiago@unach: ~/Documents/proyinvestigacion/ns-allinone-3.28.1/ns-3.28.1
P1906CommunicationInterface: HandleTransmission(0x55a3db442df0, "Transmisión del paquete [id,size]", 0, 1)
P1906TransmitterCommunicationInterface: HandleTransmission(0x55a3db445d30)
P1906MOLPerturbation: CreateMessageCarrier(0x55a3db43b800, "===Sección-Creación de la Portadora===")
P1906MessageCarrier: P1906MessageCarrier(0x55a3db4469f0)
P1906MOLMessageCarrier: SetMessage(0x55a3db4469f0)
P1906MOLPerturbation: CreateMessageCarrier(0x55a3db43b800, "[t, bits, pulsoIntervalo, duración]", 0, 8, +2000000000.0ns, 16)
P1906MOLPerturbation: CreateMessageCarrier("Bit a Transmirtir:", 0, "Concentración", 0)
P1906MOLPerturbation: CreateMessageCarrier("Bit a Transmirtir:", 0, "Concentración", 0)
P1906MOLPerturbation: CreateMessageCarrier("Bit a Transmirtir:", 0, "Concentración", 0)
P1906MOLPerturbation: CreateMessageCarrier("Bit a Transmirtir:", 0, "Concentración", 0)
P1906MOLPerturbation: CreateMessageCarrier("Bit a Transmirtir:", 0, "Concentración", 0)
P1906MOLPerturbation: CreateMessageCarrier("Bit a Transmirtir:", 0, "Concentración", 0)
P1906MOLPerturbation: CreateMessageCarrier("Bit a Transmirtir:", 0, "Concentración", 0)
P1906MOLPerturbation: CreateMessageCarrier("Bit a Transmirtir:", 0, "Concentración", 0)
P1906MOLPerturbation: CreateMessageCarrier("Bit a Transmirtir:", 0, "Concentración", 0)
P1906MOLPerturbation: CreateMessageCarrier("Bit a Transmirtir:", 0, "Concentración", 0)
P1906MOLPerturbation: CreateMessageCarrier("Bit a Transmirtir:", 0, "Concentración", 0)
P1906MOLPerturbation: CreateMessageCarrier("Bit a Transmirtir:", 0, "Concentración", 0)
P1906MOLPerturbation: CreateMessageCarrier("Paquete [1 Byte] en TX con id:", 0, "Secuencia:", "0000001")
P1906MOLMessageCarrier: SetPulseInterval(0x55a3db4469f0, +2000000000.0ns)
P1906MOLMessageCarrier: SetDuration(0x55a3db4469f0, +16000000000.0ns)
P1906MOLMessageCarrier: SetStartTime(0x55a3db4469f0, +0.0ns)
P1906MOLPerturbation: GetMolecules(0x55a3db43b800)

```

Figura 42. Vista por consola de la ejecución del estándar IEEE1906.1 mediante el archivo mol-example.cc, representando la transmisión del paquete, transmisión en la interfaz de comunicación, establecimiento del mensaje en la portadora, generación y configuración de la técnica de modulación describiendo la lógica del programa.

Fuente: Autor

```

santiago@unach: ~/Documents/proyinvestigacion/ns-allnone-3.28.1/ns-3.28.1
P1906NetDevice: GetNode(0x55a3db445a30)
P1906MOLMotion: GetDiffusionCoefficient(0x55a3db443100)
P1906MOLMotion: GetDiffusionCoefficient(0x55a3db443100)
P1906MOLMotion: ComputePropagationDelay(0x55a3db443100, "[distancia,difusion,retardo]", 2.1e-06, 1e-12, 0.735)
P1906MOLMotion: CalculateReceivedMessageCarrier(0x55a3db443100)
P1906CommunicationInterface: GetP1906NetDevice(0x55a3db442df0)
P1906NetDevice: GetNode(0x55a3db466da0)
P1906CommunicationInterface: GetP1906NetDevice(0x55a3db446140)
P1906NetDevice: GetNode(0x55a3db445a30)
P1906MOLMotion: GetDiffusionCoefficient(0x55a3db443100)
P1906MOLMotion: CalculateReceivedMessageCarrier("[Tiempos de inicio de cada bit:]", "0.000000||1.152738||2.305476||3.458213||4.610951||5.763689
||6.916427||8.069164||")
P1906MOLMotion: CalculateReceivedMessageCarrier("[Tiempos de finalización de cada bit:]", "1.152738||2.305476||3.458213||4.610951||5.763689||6.
916427||8.069164||9.221902||")
P1906MOLMotion: CalculateReceivedMessageCarrier("[Interferencia Inter-Símbolos:]", 0.133646)
P1906Medium: HandleTransmission("===Se ha configurado el componente de Movimiento/Motion===")
P1906Medium: HandleReception(0x55a3db4433f0)
P1906CommunicationInterface: GetP1906ReceiverCommunicationInterface(0x55a3db446140)
P1906MOLReceiverCommunicationInterface: HandleReception(0x55a3db446300, "===Sección-Proceso de Recepción===")
P1906MOLReceiverCommunicationInterface: GetP1906Specificity(0x55a3db446300)
P1906MOLSpecificity: CheckRxCompatibility(0x55a3db445a70)
P1906MOLMessageCarrier: GetPulseInterval(0x55a3db4469f0)
P1906CommunicationInterface: GetP1906NetDevice(0x55a3db442df0)
P1906NetDevice: GetNode(0x55a3db466da0)
P1906CommunicationInterface: GetP1906NetDevice(0x55a3db446140)
P1906NetDevice: GetNode(0x55a3db445a30)
P1906MOLSpecificity: CheckRxCompatibility(0x55a3db445a70, "[distancia,txRate]", 2.1e-06, 0.5)
P1906MOLSpecificity: GetDiffusionCoefficient(0x55a3db445a70)
P1906MOLSpecificity: CheckRxCompatibility(0x55a3db445a70, "testCapacidad: [distancia, txRate, Capacidadcanal, AnchoPulsoMin]", 2.1e-06, 0.5, 0.
503793, 1.98494)

```

Figura 43. Vista por consola de la ejecución del estándar IEEE1906.1 mediante el archivo mol-example.cc, representando el cálculo del retardo de pulso, cálculos con el mensaje recibido en el nodo asociado, análisis del cálculo relacionado con la interferencia entre símbolos.

Fuente: Autor

```

santiago@unach: ~/Documents/proyinvestigacion/ns-allnone-3.28.1/ns-3.28.1
P1906MOLSpecificity: CheckRxCompatibility(0x55a3db445a70, "testCapacidad: [distancia, txRate, Capacidadcanal, AnchoPulsoMin]", 2.1e-06, 0.5, 0.
503793, 1.98494)
P1906MOLMessageCarrier: GetMolecules(0x55a3db4469f0)
P1906MOLSpecificity: CheckRxCompatibility(0x55a3db445a70, "Limite de Fick respetado")
P1906MOLReceiverCommunicationInterface: HandleReception(0x55a3db446300, "Mensaje recibido correctamente")
P1906MessageCarrier: GetMessage(0x55a3db4469f0)
P1906MOLReceiverCommunicationInterface: HandleReception(0x55a3db446300, "Recibiendo el paquete [id,size]", 0, 1)
P1906MOLMessageCarrier: GetModulation(0x55a3db4469f0)
P1906MOLReceiverCommunicationInterface: HandleReception("[Concentración Máxima por Bit:]", 0)
P1906MOLReceiverCommunicationInterface: HandleReception("[Concentración Máxima por Bit:]", 0)
P1906MOLReceiverCommunicationInterface: HandleReception("[Concentración Máxima por Bit:]", 0)
P1906MOLReceiverCommunicationInterface: HandleReception("[Concentración Máxima por Bit:]", 0)
P1906MOLReceiverCommunicationInterface: HandleReception("[Concentración Máxima por Bit:]", 0)
P1906MOLReceiverCommunicationInterface: HandleReception("[Concentración Máxima por Bit:]", 0)
P1906MOLReceiverCommunicationInterface: HandleReception("[Concentración Máxima por Bit:]", 10000)
P1906MOLReceiverCommunicationInterface: HandleReception("[Secuencia Recibida:]", "00000001")
P1906MOLReceiverCommunicationInterface: HandleReception("[Número de Error Bits:]", 0)
P1906MOLReceiverCommunicationInterface: HandleReception("[Umbral en RX:]", 5000)
P1906MOLReceiverCommunicationInterface: HandleReception("[BIT_ERROR_RATE (BER):]", 0)
P1906MOLMessageCarrier: ~P1906MOLMessageCarrier(0x55a3db4469f0)
P1906MessageCarrier: SetMessage(0x55a3db4469f0)
P1906MessageCarrier: ~P1906MessageCarrier(0x55a3db4469f0)
P1906NetDevice: DoDispose(0x55a3db466da0)
P1906NetDevice: DoDispose(0x55a3db445a30)
P1906Medium: DoDispose(0x55a3db4433f0)
P1906MOLMotion: ~P1906MOLMotion(0x55a3db443100)
P1906Motion: ~P1906Motion(0x55a3db443100)
santiago@unach: ~/Documents/proyinvestigacion/ns-allnone-3.28.1/ns-3.28.1$

```

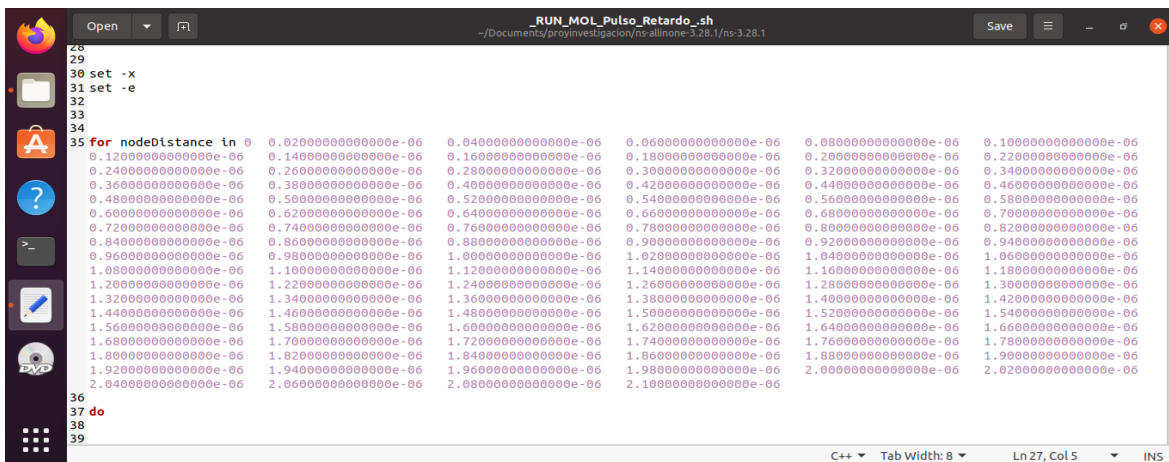
Figura 44. Vista por consola de la ejecución del estándar IEEE1906.1 mediante el archivo mol-example.cc, representando la recepción y procesamiento de la compatibilidad en el receptor, obtiene la modulación asociada a la portadora y comienza el proceso de demodulación y el manejo de la información.

Fuente: Autor

ANEXO V

Obtención de resultados

En este anexo se presenta el método usado para obtener los resultados de la simulación del escenario 1. Se ejecutan archivos `.sh`, los cuales facilitan la realización de múltiples simulaciones y la captura de los valores deseados, como por ejemplo el pulso de retardo.

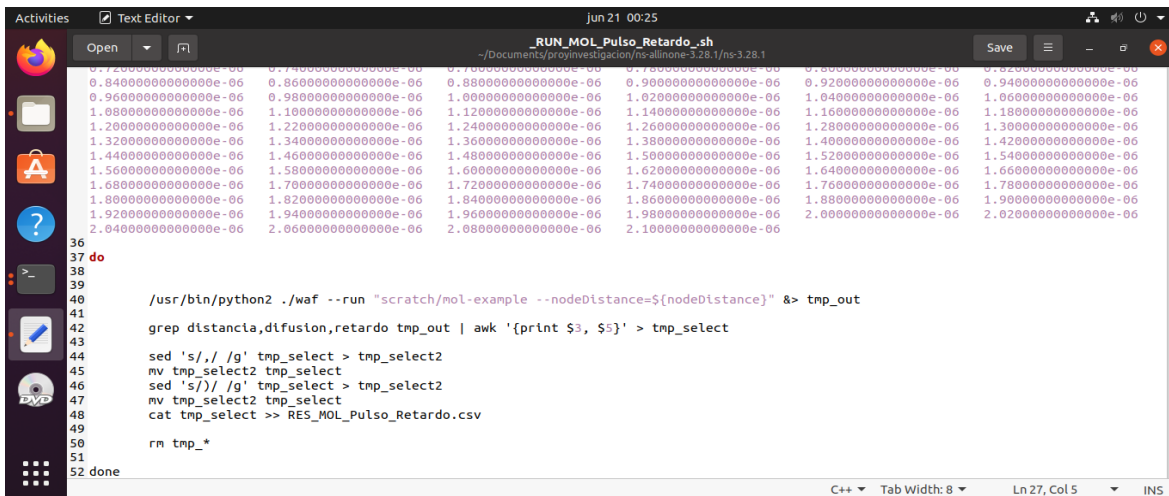


```
28
29
30 set -x
31 set -e
32
33
34
35 for nodeDistance in 0 0.020000000000000e-06 0.040000000000000e-06 0.060000000000000e-06 0.080000000000000e-06 0.100000000000000e-06
0.120000000000000e-06 0.140000000000000e-06 0.160000000000000e-06 0.180000000000000e-06 0.200000000000000e-06 0.220000000000000e-06
0.240000000000000e-06 0.260000000000000e-06 0.280000000000000e-06 0.300000000000000e-06 0.320000000000000e-06 0.340000000000000e-06
0.360000000000000e-06 0.380000000000000e-06 0.400000000000000e-06 0.420000000000000e-06 0.440000000000000e-06 0.460000000000000e-06
0.480000000000000e-06 0.500000000000000e-06 0.520000000000000e-06 0.540000000000000e-06 0.560000000000000e-06 0.580000000000000e-06
0.600000000000000e-06 0.620000000000000e-06 0.640000000000000e-06 0.660000000000000e-06 0.680000000000000e-06 0.700000000000000e-06
0.720000000000000e-06 0.740000000000000e-06 0.760000000000000e-06 0.780000000000000e-06 0.800000000000000e-06 0.820000000000000e-06
0.840000000000000e-06 0.860000000000000e-06 0.880000000000000e-06 0.900000000000000e-06 0.920000000000000e-06 0.940000000000000e-06
0.960000000000000e-06 0.980000000000000e-06 1.000000000000000e-06 1.020000000000000e-06 1.040000000000000e-06 1.060000000000000e-06
1.080000000000000e-06 1.100000000000000e-06 1.120000000000000e-06 1.140000000000000e-06 1.160000000000000e-06 1.180000000000000e-06
1.200000000000000e-06 1.220000000000000e-06 1.240000000000000e-06 1.260000000000000e-06 1.280000000000000e-06 1.300000000000000e-06
1.320000000000000e-06 1.340000000000000e-06 1.360000000000000e-06 1.380000000000000e-06 1.400000000000000e-06 1.420000000000000e-06
1.440000000000000e-06 1.460000000000000e-06 1.480000000000000e-06 1.500000000000000e-06 1.520000000000000e-06 1.540000000000000e-06
1.560000000000000e-06 1.580000000000000e-06 1.600000000000000e-06 1.620000000000000e-06 1.640000000000000e-06 1.660000000000000e-06
1.680000000000000e-06 1.700000000000000e-06 1.720000000000000e-06 1.740000000000000e-06 1.760000000000000e-06 1.780000000000000e-06
1.800000000000000e-06 1.820000000000000e-06 1.840000000000000e-06 1.860000000000000e-06 1.880000000000000e-06 1.900000000000000e-06
1.920000000000000e-06 1.940000000000000e-06 1.960000000000000e-06 1.980000000000000e-06 2.000000000000000e-06 2.020000000000000e-06
2.040000000000000e-06 2.060000000000000e-06 2.080000000000000e-06 2.100000000000000e-06
36
37 do
38
39
```

Figura 45. Vista del fragmento de código del archivo `_RUN_MOL_Pulso_Retardo.sh` para la obtención de resultado.

Fuente: Autor

El archivo `_RUN_MOL_Pulso_Retardo.sh` se puede obtener en la carpeta `examples` del archivo `p1906.zip`. La Figura 45 muestra el primer fragmento de código, donde el programa modifica el comportamiento de la terminal al ejecutar el script con la ayuda de los comandos `'set-x'` y `'set -e'` que son de ayuda para rastrear y comprender el flujo de la ejecución. El bucle `'for'` itera a través de la lista de valores en función de la distancia asignando el valor actual de la variable `'nodeDistance'` del archivo `mol-example.cc`.



```
0.720000000000000e-06 0.740000000000000e-06 0.760000000000000e-06 0.780000000000000e-06 0.800000000000000e-06 0.820000000000000e-06
0.840000000000000e-06 0.860000000000000e-06 0.880000000000000e-06 0.900000000000000e-06 0.920000000000000e-06 0.940000000000000e-06
0.960000000000000e-06 0.980000000000000e-06 1.000000000000000e-06 1.020000000000000e-06 1.040000000000000e-06 1.060000000000000e-06
1.080000000000000e-06 1.100000000000000e-06 1.120000000000000e-06 1.140000000000000e-06 1.160000000000000e-06 1.180000000000000e-06
1.200000000000000e-06 1.220000000000000e-06 1.240000000000000e-06 1.260000000000000e-06 1.280000000000000e-06 1.300000000000000e-06
1.320000000000000e-06 1.340000000000000e-06 1.360000000000000e-06 1.380000000000000e-06 1.400000000000000e-06 1.420000000000000e-06
1.440000000000000e-06 1.460000000000000e-06 1.480000000000000e-06 1.500000000000000e-06 1.520000000000000e-06 1.540000000000000e-06
1.560000000000000e-06 1.580000000000000e-06 1.600000000000000e-06 1.620000000000000e-06 1.640000000000000e-06 1.660000000000000e-06
1.680000000000000e-06 1.700000000000000e-06 1.720000000000000e-06 1.740000000000000e-06 1.760000000000000e-06 1.780000000000000e-06
1.800000000000000e-06 1.820000000000000e-06 1.840000000000000e-06 1.860000000000000e-06 1.880000000000000e-06 1.900000000000000e-06
1.920000000000000e-06 1.940000000000000e-06 1.960000000000000e-06 1.980000000000000e-06 2.000000000000000e-06 2.020000000000000e-06
2.040000000000000e-06 2.060000000000000e-06 2.080000000000000e-06 2.100000000000000e-06
36
37 do
38
39
40 /usr/bin/python2 ./waf --run "scratch/mol-example --nodeDistance=${nodeDistance}" && tmp_out
41
42 grep distancia,difusion,retardo tmp_out | awk '{print $3, $5}' > tmp_select
43
44 sed 's/,/ /g' tmp_select > tmp_select2
45 mv tmp_select2 tmp_select
46 sed 's/)/ /g' tmp_select > tmp_select2
47 mv tmp_select2 tmp_select
48 cat tmp_select >> RES_MOL_Pulso_Retardo.csv
49
50 rm tmp_*
51
52 done
```

Figura 46. Vista del fragmento de código del archivo `_RUN_MOL_Pulso_Retardo.sh` para la obtención de resultado.

Fuente: Autor

La Figura 46 representa la continuación del código, que ejecuta el programa y guarda la salida en un archivo temporal *'tmp_out'*. Luego, se realiza una serie de manipulaciones en el contenido del archivo para extraer la información específica y guardarla en *'tmp_select'*. Finalmente, los resultados se agregan al archivo *'RES_MOL_Pulso_Retardo.csv'* y se eliminan los archivos temporales. Para ejecutar el programa desde la terminal en Ubuntu, se debe dar permisos de ejecución mediante el siguiente comando:

```
santiago@unach:~/Documents/proyinvestigacion/ns-allinone-3.28.1/ns-3.28.1$ chmod +x _RUN_MOL_Pulso_Retardo_.sh
```

Y se inicia la ejecución en el entorno de NS-3 mediante el siguiente comando:

```
santiago@unach:~/Documents/proyinvestigacion/ns-allinone-3.28.1/ns-3.28.1$ ./_RUN_MOL_Pulso_Retardo_.sh
```

Exportación de datos en MatLab

Para generar las gráficas, los datos son cargados desde los archivos .csv en variables definidas por el usuario en el entorno de MatLab. A continuación, se realiza el cálculo analítico para representar las curvas resultantes y poder realizar la comparación de resultados analíticos con los datos de la simulación.

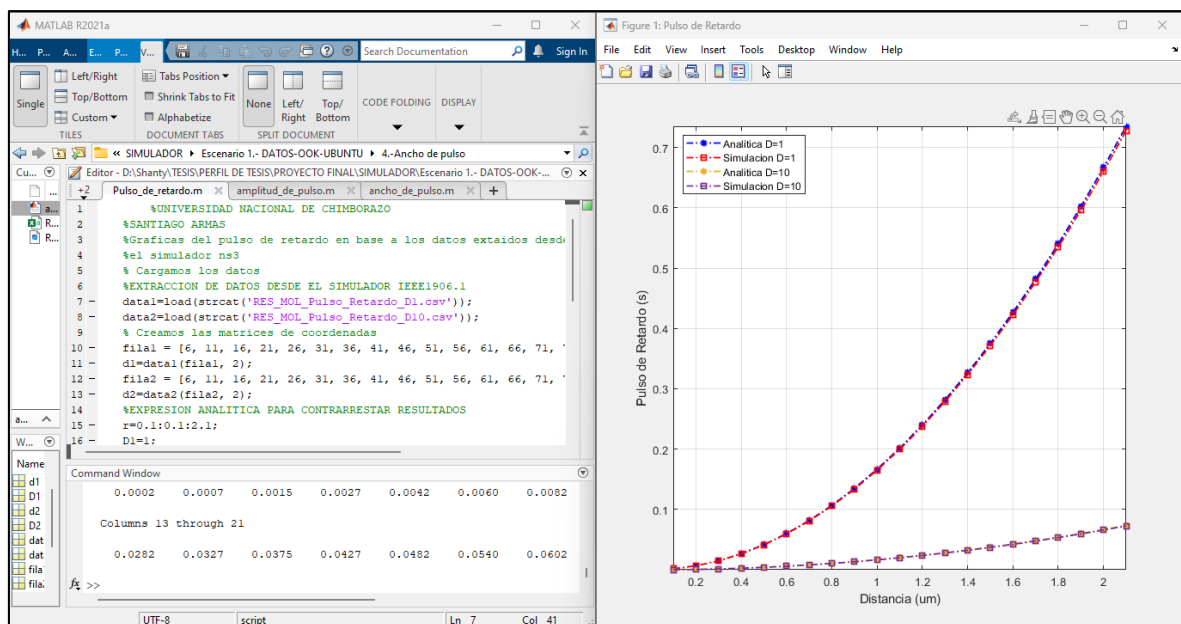


Figura 47. Vista del código de MatLab para la obtención de las gráficas del pulso de retardo.

Fuente: Autor

Técnica del error cuadrático medio

En la Figura 48 se muestra el resultado del cálculo para obtener el error cuadrático medio con la ayuda del software IBM SPSS Statistics mediante el análisis y evaluación, implicando los valores simulados de los valores de las métricas de comunicación. Se cargan los datos

provenientes de la simulación, como los del cálculo de la métrica con la ayuda de MatLab y mediante la formula del ECM se puede incluir la nueva variable para luego realizar un análisis descriptivo y obtener la media del error cuadrático medio.

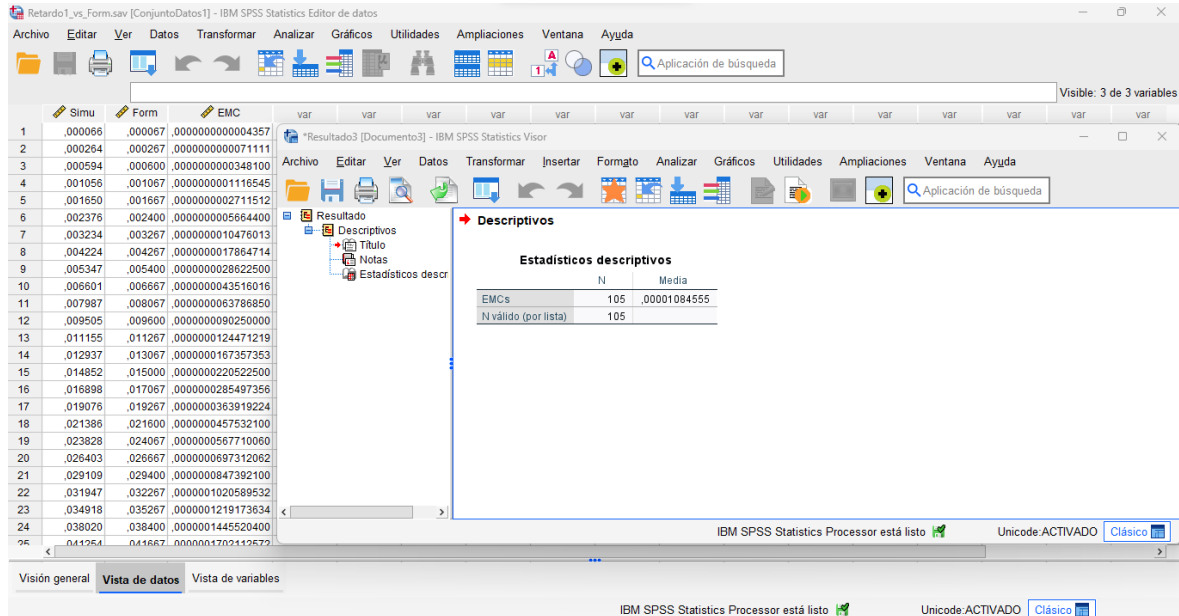


Figura 48. Vista del ECM para la evaluación del sistema con la ayuda del software SPSS Statistics.

Fuente: Autor