

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO



**FACULTAD DE INGENIERIA**  
**CARRERA DE ELECTRONICA Y**  
**TELECOMUNICACIONES**

Proyecto de Investigación previo a la obtención del título de Ingeniero en Electrónica y  
Telecomunicaciones

TRABAJO DE TITULACIÓN

Proyecto de Investigación

**SIMULACIÓN DE NANO SISTEMAS DE COMUNICACIONES EN**  
**NS3 EN FUNCIÓN A LOS COMPONENTES COMUNICACIONALES**  
**ESTABLECIDOS POR EL ESTÁNDAR IEEE 1906.1**

Autor: Alexis Gabriel Rivera Gaibor

Tutor: Ing. Yesenia Cevallos, PhD.

**Riobamba - Ecuador**

**Año 2021**

Los miembros del tribunal de graduación del proyecto de investigación de título: **“SIMULACIÓN DE NANO SISTEMAS DE COMUNICACIONES EN NS3 EN FUNCIÓN A LOS COMPONENTES COMUNICACIONALES ESTABLECIDOS POR EL ESTÁNDAR IEEE 1906.1”**, presentador por: Alexis Gabriel Rivera Gaibor, dirigido por Dra. Yesenia Cevallos.

Una vez escuchada la defensa oral y revisado el informe final del proyecto de investigación con fines de graduación escrito en la cual se ha constatado el cumplimiento de las observaciones realizadas, remite la presente para uso y custodia en la biblioteca de la Facultad de Ingeniería de la UNACH.

Para constancia de lo expuesto firman.

Mgs. Geovanny Cuzco  
**Presidente del Tribunal:**



Firma

PhD. Leonardo Renteria  
**Miembro del Tribunal**



Firma

PhD. Luis Tello  
**Miembro del Tribunal**

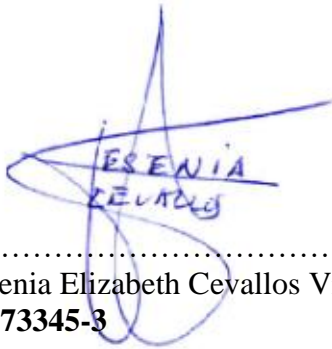


Firma

## **DECLARACIÓN EXPRESA DE TUTORÍA**

En calidad de tutor del tema de investigación: “**SIMULACIÓN DE NANO SISTEMAS DE COMUNICACIONES EN NS3 EN FUNCIÓN A LOS COMPONENTES COMUNICACIONALES ESTABLECIDOS POR EL ESTÁNDAR IEEE 1906.1**”, realizado por el Sr. **Alexis Gabriel Rivera Gaibor**, para optar por el título de Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones, considero que reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sustentada públicamente y evaluada por el jurado examinador que se designe.

Riobamba, Abril 2021



Handwritten signature in blue ink, reading "YESENIA CEVALLOS". The signature is stylized and overlaps the printed name below it.

.....  
Dra. Yesenia Elizabeth Cevallos Villacrés. PhD  
**C.I 060273345-3**

**TURORA**

## AUTORÍA DE LA INVESTIGACIÓN

La responsabilidad del contenido de este proyecto de investigación corresponde exclusivamente a **Alexis Gabriel Rivera Gaibor, Dra. Yesenia Elizabeth Cevallos Villacrés. PhD** y el patrimonio intelectual de la misma a la Universidad Nacional de Chimborazo.



.....  
Alexis Gabriel Rivera Gaibor  
C.I. 0604686964

## ÍNDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN .....	X
CAPÍTULO I .....	4
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	4
1.2. OBJETIVOS .....	6
1.2.1 GENERAL.....	6
1.2.2 ESPECÍFICOS.....	6
CAPÍTULO II.....	7
2. MARCO TEÓRICO.....	7
2.1. COMUNICACIÓN MOLECULAR .....	7
2.1.1 FUNCIONAMIENTO GENERAL DE UNA MC .....	8
2.1.2. MODELO FUNCIONAL DE UNA MC .....	9
2.1.3. MODELO MATEMÁTICO DE UNA MC .....	11
2.1.3.1 TEORÍA MICROSCÓPICA DE DIFUSIÓN.....	12
2.1.3.2. TEORÍA MACROSCÓPICA DE DIFUSIÓN .....	12
2.1.3.2.1. LEYES DE FICK.....	12
2.2. INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES PARA UNA MC.....	14
2.2.1. TÉCNICAS DE MODULACIÓN .....	15
2.2.2. MODELOS DE CANAL .....	16
2.2.3. TÉCNICAS DE CODIFICACIÓN .....	18
2.2.4. ARQUITECTURA Y PROTOCOLOS DE RED.....	19
2.2.5. ESTANDARIZACIÓN Y HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN .....	21
CAPITULO III.....	22
3. METODOLOGÍA.....	22
3.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN .....	22
3.2. MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN.....	22
3.3. POBLACIÓN Y MUESTRA.....	23
3.3.1. POBLACIÓN.....	23
3.4. FUENTES DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN .....	24
3.5. PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS.....	24
3.6. OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES .....	25
3.7. PROCEDIMIENTO Y ANÁLISIS.....	25
3.7.1. SIMULACIÓN DEL EJEMPLO MOLECULAR .....	26
3.7.1.1. CREACIÓN DEL AYUDANTE.....	28

3.7.1.2. CREACIÓN DE LOS NODOS .....	30
3.7.1.3. CREACIÓN DEL MEDIO Y DE LA COMPONENTE DE MOVIMIENTO .....	30
3.7.1.4. CREACIÓN DE COMPONENTES Y DISPOSITIVOS .....	31
3.7.1.5. ESTABLECER LA POSICIÓN Y MODELO DE MOVILIDAD DEL DISPOSITIVO TRANSMISOR Y RECEPTOR.....	32
3.7.1.6. CONECTAR DISPOSITIVOS, NODOS, MEDIO, COMPONENTES Y ENTIDADES .....	34
3.7.1.7. CREACIÓN DEL PAQUETE.....	34
3.7.1.8. ENVÍO DEL MENSAJE .....	35
3.7.2. PROCESO DE COMUNICACIÓN ENTRE COMPONENTES .....	35
3.7.2.1. CLASE MESSAGECARRIER.....	38
3.7.2.2. CLASE PERTURBATION .....	39
3.7.2.3. CLASE MOTION.....	41
3.7.2.4. CLASE FIELD .....	44
3.7.2.5. CLASE SPECIFICITY .....	45
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	49
4.1. TOPOLOGÍA DE SIMULACIÓN .....	49
4.2. OBTENCIÓN DE RESULTADOS .....	50
4.3. RENDIMIENTO DE LA COMUNICACIÓN .....	50
4.4. PROPAGACIÓN DEL PULSO MOLECULAR.....	50
4.5. PULSO DE RETARDO.....	57
4.6. ANCHO DEL PULSO MOLECULAR Y VELOCIDAD DE TRANSMISIÓN DE DATOS.....	61
4.7. RELACIÓN DE SEÑALES .....	63
4.8. CAPACIDAD DEL CANAL.....	66
4.9. ANÁLISIS DE LAS COMPONENTES DE LA COMUNICACIÓN.....	67
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	69
5.1 CONCLUSIONES .....	69
5.2 RECOMENDACIONES.....	70
BIBLIOGRAFÍA .....	72

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Difusión ideal de moléculas de información en tres dimensiones en un medio de propagación ilimitado.....	7
<b>Figura 2.</b> Formas sencillas de generar una señal molecular binaria .....	9
<b>Figura 3.</b> Modelo de una MC.....	10
<b>Figura 4.</b> Modelo de una MC extendido.....	10
<b>Figura 5.</b> Técnicas de modulación .....	16
<b>Figura 6.</b> Representación de un canal de comunicaciones.....	17
<b>Figura 7.</b> Clases de códigos de error y detección .....	18
<b>Figura 8.</b> Flujo de información a través de una red de comunicación molecular modelada a partir de la arquitectura de Internet. ....	19
<b>Figura 9.</b> Procesamiento y análisis de la investigación .....	24
<b>Figura 10.</b> Diagrama de flujo de archivo EjemploMolecular.cc.....	27
<b>Figura 11.</b> Declaración del método para visualizar registros.....	29
<b>Figura 12.</b> Vista de los nodos por el comando --visualize.....	33
<b>Figura 13.</b> Diagrama de flujo proceso de comunicación entre clases.....	37
<b>Figura 14.</b> Creación de la portadora.....	38
<b>Figura 15.</b> Señales contenidas en la portadora.....	40
<b>Figura 16.</b> Modulación OOK de la señal molecular .....	41
<b>Figura 17.</b> Movimiento en los tres ejes.....	42
<b>Figura 18.</b> Ecuación de pulso (distancia=0.1m, distancia=1m).....	43
<b>Figura 19.</b> Velocidad de transmisión .....	46
<b>Figura 20.</b> Obtención de variable del tiempo.....	47
<b>Figura 21.</b> Ancho de pulso vs Distancia de transmisión.....	48
<b>Figura 22.</b> Topología de la simulación .....	49
<b>Figura 23.</b> Resultado del Pulso molecular en función del tiempo obtenido a partir de la simulación en NS3. ....	51
<b>Figura 24.</b> Concentración molecular en función de la distancia y el tiempo obtenido de la simulación. ....	52
<b>Figura 25.</b> Movimiento de las moléculas en el medio obtenido de la simulación por medio de las librerías GSL y exportadas a Mathematica.....	54
<b>Figura 26.</b> Resultados por consola y gráficos de la comunicación a diferentes distancias (a) 0.04m (superior) y (b) 0.05m (inferior). ....	55
<b>Figura 27.</b> Archivo (.sh) para obtención de resultados .....	57
<b>Figura 28.</b> Pulso de retardo obtenido de la simulación con rango de comunicación entre 0m a 0.1m.....	58
<b>Figura 29.</b> Envío de un mensaje a dos nanoreceptores ubicados a diferentes distancias con un coeficiente de difusión igual a $1\text{nm}^2/\text{ns}$ . ....	59
<b>Figura 30.</b> Envío de un mensaje a dos nanoreceptores ubicados a diferentes distancias con un coeficiente de difusión igual a $10\text{nm}^2/\text{ns}$ . ....	60
<b>Figura 31.</b> Ancho de pulso molecular obtenido en la simulación para 100 realizaciones a diferentes distancias .....	62
<b>Figura 32.</b> Resultados obtenidos de la velocidad de transmisión en el canal molecular .	62
<b>Figura 33.</b> Componente de perturbación creando la componente portadora del mensaje	64

<b>Figura 34.</b> Vista general de la relación de señales en una MC. ....	65
<b>Figura 35.</b> Capacidad de canal obtenida a partir de la simulación MC. ....	66
<b>Figura 36.</b> Archivo zip de Estándar IEEE 1906.1.....	74
<b>Figura 37.</b> Comando para descomprimir el archivo descargado .....	75
<b>Figura 38.</b> Archivos descomprimidos.....	75
<b>Figura 39.</b> Estructura de directorios.....	76
<b>Figura 40.</b> Declaración del módulo y sus dependencias .....	76
<b>Figura 41.</b> Declaración de archivos fuente para el ejemplo MC .....	77
<b>Figura 42.</b> Declaración de archivos de cabecera.....	77
<b>Figura 43.</b> Declaración de librerías en el modelo MC.....	78
<b>Figura 44.</b> Compilación del software con el nuevo módulo P1906.....	78
<b>Figura 45.</b> Código que implementa el mensaje en el portador .....	79
<b>Figura 46.</b> Código en el que se calcula el pulso de retardo de la señal.....	79
<b>Figura 47.</b> Código para detectar la compatibilidad de la señal molecular en el receptor	80
<b>Figura 48.</b> Código para la recepción del mensaje .....	80
<b>Figura 49.</b> Código para mostrar el mensaje enviado e iniciar el método de transmisión	81



## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Servicios y características de capas TCP/IP en una MC.....	20
<b>Tabla 2.</b> Operacionalización de las variables.....	25
<b>Tabla 3.</b> Funciones de la clase Helper.....	28
<b>Tabla 4.</b> Comandos para declarar el ayudante P1906.....	29
<b>Tabla 5.</b> Declaración de Nodos.....	30
<b>Tabla 6.</b> Declaración de los objetos Medio y movimiento.....	31
<b>Tabla 7.</b> Declaración de componentes y dispositivos.....	31
<b>Tabla 8.</b> Declaración del modelo de movilidad de los nodos contenedores.....	33
<b>Tabla 9.</b> Declaración de la función connect del ayudante P1906.....	34
<b>Tabla 10.</b> Declaración del paquete de información.....	35
<b>Tabla 11.</b> Valores de concentración obtenidos en la simulación a diferentes distancias y dos valores de coeficiente de difusión.....	53
<b>Tabla 12.</b> Condicionales de la componente de especificidad para determinar la compatibilidad entre TX y RX.....	56
<b>Tabla 13.</b> Valores de Pulso de retardo obtenidos a diferentes distancias.....	58
<b>Tabla 14.</b> Pulso de retardo obtenido a la distancia de 0.04m y 0.1m.....	60
<b>Tabla 15.</b> Pulso de retardo obtenido a la distancia de 0.04m y 0.1m y un coeficiente de difusión mayor.....	61
<b>Tabla 16.</b> Velocidad de transmisión obtenida para diferentes valores de intervalo de pulso.....	63
<b>Tabla 17.</b> Intensidades de señales obtenidos en base a la ecuación 18.....	65
<b>Tabla 18.</b> Características de las componentes implementadas en la investigación.....	67

## RESUMEN

La comunicación molecular (Molecular Communication, MC) en los últimos cinco años ha surgido como una técnica de transmisión y recepción de información prometedora para aplicaciones principalmente relacionadas a la medicina. La MC nace como un área de investigación interdisciplinaria en la cual interactúa la nanotecnología, la biología y la ingeniería en comunicaciones. Para este nuevo paradigma se utilizan moléculas como transporte de información entre nanodispositivos en dimensiones pequeñas y entornos específicos. En este contexto esta tesis pretende analizar y simular en el simulador de eventos discreto (NS3) el escenario de comunicación molecular propuestos por el estándar IEEE 1906.1. Además, por medio del análisis dar a conocer el funcionamiento y detallar cada una de las componentes comunicacionales que intervienen en una MC, haciendo uso de definiciones teóricas y prácticas del estándar IEEE 1906.1. Además, se pretende dar a conocer los desafíos que tiene este tipo de comunicaciones. En el capítulo 1 se detalla el problema que impulso la realización de esta investigación y se plantean los objetivos de la misma. En el capítulo 2 se describe las comunicaciones moleculares de manera teórica en base a libros, revistas y publicaciones científicas relacionadas con el tema, de modo que pretende ser un análisis inicial al tema propuesta. En el capítulo 3 se realiza un análisis metodológico del estándar IEEE 1906.1 y se detalla el papel que realiza cada una de las componentes del estándar y las entidades que intervienen en la transmisión y recepción de información molecular en el simulador, se detallan las clases, métodos y funciones que se implementan en cada una de las componentes del estándar. En el capítulo 4 se muestran resultados obtenidos a partir de las simulaciones de una comunicación molecular en el software NS3 y se hace un análisis del funcionamiento de las mismas, además se mide el rendimiento en base a la modificación de variables que influyen en la comunicación. En el capítulo 5 se dan conclusiones al trabajo de investigación realizado y recomendaciones que podrían ayudar a futuras investigaciones relacionadas al tema propuesto en esta tesis.

**Palabras clave:** Numero de moléculas, Distancia entre nodos, Intervalos de pulso, Clases moleculares, Estándar de comunicación molecular.

## ABSTRACT

Molecular Communication (MC) over the past five years has emerged as a promising information transmission and receiving technique for applications primarily related to medicine. The MC started as an area of interdisciplinary research in which nanotechnology, biology and communications engineering interact. For this new paradigm, molecules are used as a transport of information between nanodevices in small dimensions and specific environments. In this context, this thesis work aims to analyze and simulate in the discrete event simulator (NS3) the molecular communication scenario proposed by the IEEE 1906.1 standard. In addition, through the analysis, it reports the operation and detailing each of the communication components involved in an MC, making use of theoretical and practical definitions of the IEEE 1906.1 standard. In addition, it is intended to report the challenges of this type of communications. Chapter 1 details the problem that motivated the development of this investigation and sets out its objectives. Chapter 2 describes molecular communications theoretically based on books, journals and scientific publications related to the subject, so that it is intended to be an initial analysis of the proposed topic. Chapter 3 performs a methodological analysis of the IEEE 1906.1 standard and details the role of each one of the standard components and entities involved in the transmission and reception of molecular information in the simulator, detailing the classes, methods and functions that are implemented in each of the standard components. Chapter 4 shows the results obtained from simulations of molecular communication in NS3 software and analyses how they work, and measures performance based on the modification of variables influencing communication. Chapter 5 provides conclusions to the research work carried out and recommendations that could assist future research on the subject proposed in this thesis work.

**Keywords:** number of molecules, distance between nodes, pulse intervals, molecular classes, molecular communication standard.

Reviewed by:  
Mgs. Geovanny Armas Pesántez  
**ENGLISH PROFESSOR**  
C.C. 0602773301

## INTRODUCCIÓN

Actualmente los sistemas de comunicaciones modernos son capaces de abarcar la demanda de transporte de información de la sociedad mediante señales eléctricas o electromagnéticas. Sin embargo, existen aplicaciones en las cuales esto es ineficiente e inapropiado, como por ejemplo en aplicaciones donde las dimensiones de los dispositivos de comunicación son extremadamente pequeñas en los cuales la información tiene que ser procesada de diferente manera entre el transmisor y el receptor de la comunicación (Aminian, Ghazani, Mirmohseni, & Fekri, 2016).

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. Esta capacidad permitiría el monitoreo de escenarios en una gran cantidad de aplicaciones potenciales en campos tan variados como la biomedicina, la biología sintética, la ciencia ambiental y la industria, entre muchos otros (Akyildiz & Jornet, 2010). De hecho, una de las aplicaciones más prometedoras de estos nanodispositivos tiene como objetivo mejorar la medicina, ya que diversos datos médicos (como la presión arterial, la detección de virus y los niveles de oxígeno en la sangre) podrían recolectarse en tiempo real y transmitirse directamente al personal médico.

Hasta ahora se han previsto dos alternativas principales para comunicarse a nanoescala: la comunicación electromagnética (EM) y la comunicación molecular (MC). La EM se basa en el uso de ondas electromagnéticas para transmitir un mensaje entre dos nanodispositivos (Vacca, 2019).

Por otro lado, la MC se define como la transmisión y recepción de información codificada en moléculas orgánicas (Kulakowshi, Solarczyk, & Wojcik, 2017). Los transeptores moleculares están diseñados para facilitar su integración en nanodispositivos debido a su tamaño extremadamente pequeño y dominio de operación limitado. Estos transeptores

pueden reaccionar cuando reciben ciertas moléculas y liberan otras como respuesta a la estimulación o después de ejecutar algún proceso. La MC tiene 2 ventajas principales sobre los sistemas de comunicación por radio propagación: la compatibilidad biológica y la eficiencia energética de los procesos bioquímicos con baja dispersión de calor (Zambrano, 2015).

Se espera que la comunicación a nanoescala ofrezca beneficios sin precedentes. Para avanzar en el desarrollo de esta tecnología, se necesitan definiciones comunes y claras además de un marco conceptual para solidificar y guiar la investigación hacia sistemas prácticos. En este contexto, el estándar IEEE 1906.1 surge como el primer enfoque para llenar un vacío de investigación importante y para normalizar diversos aspectos relacionados con las comunicaciones a nanoescala, teniendo en cuenta las comunicaciones EM y MC (Bush, 2015). Bajo esta premisa general, el estándar IEEE 1906.1 primero define el concepto de una red de comunicación a nanoescala en sí misma, para luego proponer un marco conceptual para el desarrollo de las comunicaciones.

El estándar IEEE 1906.1 para el marco de comunicaciones moleculares y a nanoescala proporciona una definición precisa de comunicación en la escala nanométrica y un marco general que equilibra la precisión de definición con una amplia aplicabilidad. Esto incluye métricas, casos de uso y un modelo de referencia implementado en el entorno de simulación Network Simulation 3 (NS-3) (Bush, 2015). Los estudios que utilizan las pautas de este estándar contribuirían a la implementación de una pila de protocolos viable basada en los componentes y procedimientos especificados. Por lo tanto, los resultados obtenidos para cada diseño podrían compartirse y compararse a partir de un conjunto común de métricas de rendimiento definidas por el estándar (Carrasco, Garcia, & Garcia, 2018), se espera que con la guía del estándar la investigación y desarrollo de las comunicaciones moleculares sean más coherentes y permitan la colaboración de la comunidad científica además de un avance más rápido a esta tecnología.

Los componentes de MC difusivos de NS3 proporcionan un mecanismo de comunicación para que las nanomáquinas se comuniquen a corta distancia a través de la propagación de moléculas en un medio acuoso. Sus componentes principales consisten en nanomáquinas emisoras, nanomáquinas receptoras y moléculas transportadoras. El nanonodo emisor envía las moléculas a los nanonodos receptores al liberar moléculas transportadoras en el medio ambiente, estos datos que son recibidos por los nanonodos receptores se decodifican y se presentan como la información que previamente se envió (Gul, Atakan, & Akan, 2010).

## CAPÍTULO I

### 1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La MC es un tema de investigación prometedor en el área de las comunicaciones, y ha sido estudiada dando paso a teorías basadas en el conocimiento del cuerpo humano; este tipo de comunicaciones ha existido desde siempre y entenderla nos ayuda a comprender cómo podemos aprovechar los procesos naturales para implementar soluciones en áreas como la medicina (Vargas, 2015).

A diferencia de otros tipos de comunicaciones, las comunicaciones moleculares han sido poco analizadas en nuestro país tanto más en la Universidad Nacional de Chimborazo, por lo cual se vuelve una necesidad entender el funcionamiento preciso y analizar los parámetros que intervienen en una comunicación de este tipo.

El despliegue de nanodispositivos tiene profundas implicaciones tecnológicas y abre oportunidades únicas en una amplia gama de aplicaciones, particularmente en la medicina, para la detección, control y tratamiento de enfermedades, donde nanomáquinas o moléculas pueden ser introducidas al cuerpo humano para mejorar el tratamiento de enfermedades o para monitorear la salud de una persona. Cada nanodispositivos solo tiene una capacidad operativa muy limitada. Para aumentar su capacidad en tareas complicadas, como se requiere en muchas aplicaciones de nanotecnología y biotecnología, es esencial prever las nanoredes y estudiar la comunicación a nanoescala (Gohari, Mirmohseni, & Nasiri-Kenari, 2016).

El tamaño y el consumo de energía de los transeptores hacen que la comunicación basada en ondas electromagnéticas presente problemas y sea inadecuada para interconectar nanomáquinas. Esto motiva el uso de la MC como un mecanismo de comunicación prometedor. Además, siendo el mecanismo de comunicación predominante en la naturaleza entre los organismos vivos, la nanonetwork puede usar los microorganismos existentes,

como las bacterias y las células, como parte de la red además de ser más compatible con el cuerpo humano, una característica que es necesaria para aplicaciones biomédicas (Grover, 2014).

En relación a la problemática expuesta el estudio del estándar IEEE 1906.1 para comunicaciones moleculares permite entender de forma teórica como funciona una MC, pero para tener un análisis profundo de los parámetros que influyen en este tipo de comunicaciones se hace viable la simulación de modelos propuesto por el estándar. Esto ayudaría a una mejor comprensión del estándar ya que si bien el lenguaje unificado de modelado (UML) es proporcionado por los autores de la norma, en este se precisa que algunos detalles entre las relaciones de los objetos son omitidos.

Es por ello que se pretende analizar a través de un modelo de simulación el escenario molecular propuesto por el estándar IEEE 1906.1 en código abierto en el software NS3, esto permitiría comprender la influencia de los componentes comunicacionales del estándar en los escenarios de transmisión también propuestos por el estándar; además se contribuiría a una comprensión adecuada del funcionamiento de una comunicación molecular y los parámetros que intervienen en este tipo de comunicaciones; el estudio del estándar IEEE 1906.1 también abre muchas más pautas de investigación acerca de las comunicaciones a nanoescala principalmente en aplicaciones orientadas a la medicina.



## **1.2. OBJETIVOS**

### **1.2.1 GENERAL**

- Analizar y simular en NS-3 escenarios de comunicación molecular establecidos por el estándar IEEE1906.1 para comprender la influencia de los componentes comunicacionales que se prevé en estos escenarios de transmisión.

### **1.2.2 ESPECÍFICOS**

- Analizar el escenario molecular propuesto por el estándar IEEE1906.1 en función de los parámetros de configuración o componentes previstos en el mismo estándar, de modo que se pueda comprender cómo influyen tales componentes y sus modificaciones en la forma en que se transmite la información molecular.
- Implementar el escenario de comunicación molecular propuesto por el estándar IEEE 1906.1 utilizando el simulador de red de eventos discretos NS3.
- Modificar los componentes comunicacionales del estándar para realizar una simulación con diferentes características de transmisión que las previstas originalmente en el estándar.

## CAPÍTULO II

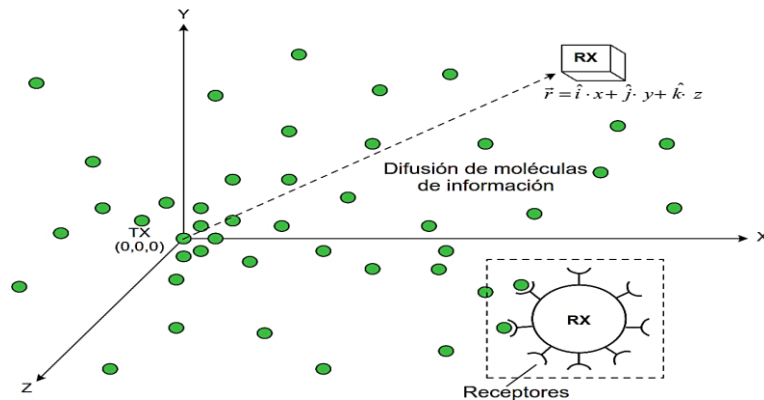
### 2. MARCO TEÓRICO

#### 2.1. COMUNICACIÓN MOLECULAR

Según (Nakano, Suzuki, & Moore, 2017) la comunicación molecular en general requiere conocimientos interdisciplinarios de varios campos técnicos de estudio que van desde la ciencia de los materiales a través de la biofísica y la informática hasta la ingeniería eléctrica (por ejemplo, sistemas de comunicación y redes informáticas).

La comunicación molecular es un paradigma del campo de la comunicación a nanoescala, en esta las nanomáquinas se comunican a través de moléculas que son liberadas en un medio por una entidad y recibidas por otra.

Un sistema de MC genérico consta de un transmisor (TX), un receptor (RX) y un medio de propagación entre ellos también conocido como canal.



**Figura 1.** Difusión ideal de moléculas de información en tres dimensiones en un medio de propagación ilimitado.

**Fuente:** (Nakano, Suzuki, & Moore, 2017)

En la figura (1) se observa una comunicación molecular basada en la difusión de moléculas entre un TX y un RX. En este escenario, las moléculas liberadas experimentan una difusión

ideal es decir un movimiento libre en tres dimensiones en el medio de propagación, mientras se rigen por un proceso de difusión aleatorio. Cuando una molécula alcanza el RX, el cual está ubicado a una distancia  $r$  del TX, se activan las respuestas de información contenidas en las moléculas transmitidas las cuales pueden ser la activación de un evento o la respuesta a un químico. Como ejemplos biológicos de moléculas de información tenemos proteínas y iones que contienen información para ser transmitida, y como ejemplos de medios de propagación tenemos el agua, plasma sanguíneo y el aire (Nakano & Eckford, Molecular communication Paradigm, 2013).

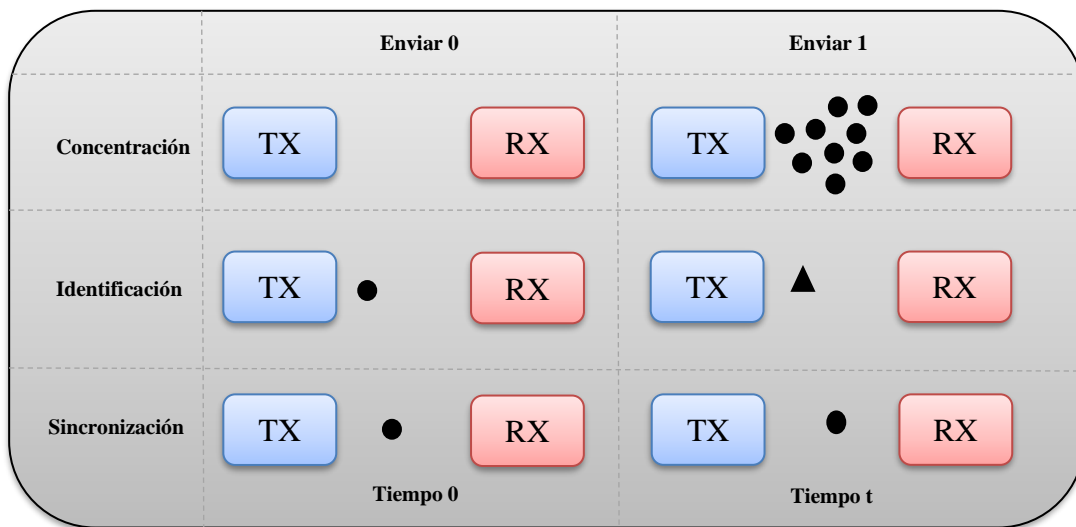
### **2.1.1 FUNCIONAMIENTO GENERAL DE UNA MC**

Para comprender cuál es el funcionamiento general de una MC debemos tener en claro lo que entendemos por comunicación. En este sentido nos centramos en la comunicación artificial, donde un mensaje creado por el hombre debe transmitirse de un punto a otro. Un mensaje puede ser discreto (como una secuencia de bits o como en un paquete IP) o continuo (como una forma de onda analógica). Para poder entender la MC de una forma general se asume que el mensaje es discreto.

En la forma más simple de comunicación, hay dos terminales: un transmisor, que envía el mensaje, y un receptor, que recibe el mensaje. Para comunicarse, el transmisor realiza un cambio físico en su entorno, ese cambio es detectado por el receptor y representado como información. En la MC, el cambio debe ser molecular, es decir el transmisor libera moléculas en un medio, estas se propagan y son detectadas por el receptor (Haraguchi, Eckford, & Nakano, 2013).

Para transmitir mensajes distintos, cada mensaje debe ser representado con una señal molecular visto como un patrón único de moléculas para cada mensaje, el cual puede ser detectado por el receptor. Por ejemplo, al querer enviar un mensaje que consta de un solo bit (0 o 1). Existen tres formas posibles:

- **Señalización con cantidad:** En esta se envía una cierta cantidad de moléculas para representar el bit-1 y por lo contrario no se envían moléculas para representar el bit-0.
- **Señalización con identidad:** En esta se utiliza dos tipos de moléculas, molécula A y molécula B para representar un bit-0 o un bit-1, respectivamente.
- **Señalización con sincronización:** En esta se utilizan tiempos de sincronización, donde para representar el bit-0 se envían moléculas en un tiempo y el bit-1 se representará enviando moléculas en un tiempo distinto.



**Figura 2.** Formas sencillas de generar una señal molecular binaria

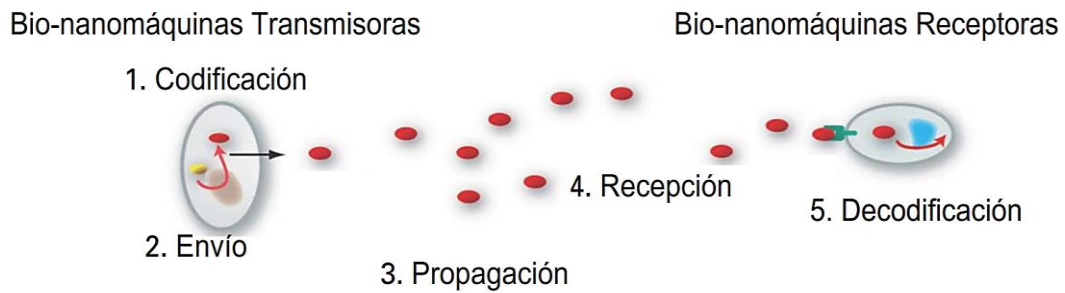
**Fuente:** (Haraguchi, Eckford, & Nakano, 2013)

En la figura (2) se observa las formas de generar una señal molecular binaria en los cuales la propagación de moléculas desde el transmisor al receptor tiene lugar a través de una difusión aleatoria.

### 2.1.2. MODELO FUNCIONAL DE UNA MC

El modelo básico de comunicación molecular puede describirse en base al modelo de comunicación de Shannon que consiste en componentes que funcionan como:

- Moléculas de información que representan el mensaje que será transmitido
- Bio-nanomáquinas trasmisoras que liberan las moléculas de información
- Bio-nanomáquinas receptoras que detectan las moléculas de información
- Medio en el que las moléculas de información se propagan

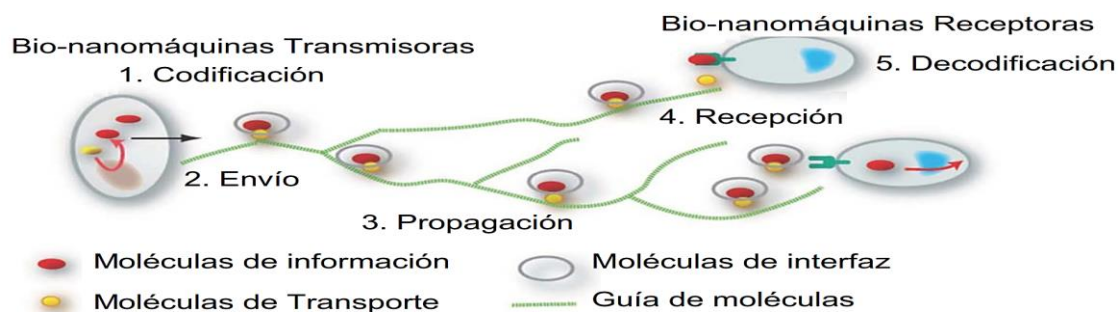


**Figura 3.** Modelo de una MC

**Fuente:** (Haraguchi, Eckford, & Nakano, 2013)

También se puede incluir otro tipo de componentes especializados como:

- Moléculas de transporte que mueven moléculas de información
- Guías de moléculas para dirigir el movimiento de las moléculas de transporte
- Moléculas de interfaz que permite que las moléculas de transporte muevan selectivamente las moléculas de información
- Interfaz de moléculas que especifican la bio-nanomáquina receptora



**Figura 4.** Modelo de una MC extendido

**Fuente:** (Haraguchi, Eckford, & Nakano, 2013)

Los procesos de comunicación se pueden dividir en cinco partes entre un transmisor, un receptor y un medio de propagación.

1. Codificación de información en una molécula, el cual es el proceso en el que una bio-nanomáquina transmisora introduce el mensaje en moléculas de información que la bio-nanomáquina receptora pueda detectar.
2. Envío de la molécula de información al medio ambiente en donde una bio-nanomáquina emisora libera moléculas de información al medio ambiente.
3. Propagación de la molécula de información a través del medio ambiente en el cual las moléculas de información se mueven desde una bio-nanomáquina emisora a través del medio hasta la bio-nanomáquina receptora.
4. Recepción de la molécula de información por el receptor, donde la bio-nanomáquina receptora captura las moléculas de información que se propagan en el medio ambiente.
5. Decodificación de la molécula de información por el receptor en el cual la bio-nanomáquina receptora captura las moléculas de información y reacciona a esa información.

### **2.1.3. MODELO MATEMÁTICO DE UNA MC**

En una comunicación molecular la propagación típica de la señal se produce mediante la difusión de partículas a través de un medio fluido, que suele definirse como movimiento browniano.

Para comprender cómo se realiza la propagación de moléculas de información de una manera sencilla se pueden explicar dos teorías principales, una en donde en la difusión se supone que existe una gran cantidad de moléculas de información y por ende el proceso de difusión se explica mediante el número promedio de moléculas en el sistema, conocido como teoría macroscópica. Y otro en el que la propagación es de una sola molécula emitida, conocida como teoría microscópica.

### **2.1.3.1 TEORÍA MICROSCÓPICA DE DIFUSIÓN**

La teoría microscópica de difusión explica la propagación de una única molécula que se transmite del transmisor al receptor. Las moléculas libres en un fluido se propagan a través de un movimiento pasivo, conocido como movimiento browniano en donde el movimiento es aleatorio inducido por colisiones con las moléculas del fluido. Este movimiento siempre está disponible y tiene la ventaja de que no tiene ningún costo energético (Nakano, Suzuki, & Moore, 2017).

### **2.1.3.2. TEORÍA MACROSCÓPICA DE DIFUSIÓN**

La teoría macroscópica de difusión explica cómo se mueven las moléculas a partir de la concentración molecular, es decir, el número de moléculas que son enviadas por el transmisor y recogidas por el receptor.

La teoría macroscópica de difusión de moléculas en un fluido se puede explicar por medio de 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 (Nakano, Suzuki, & Moore, 2017).

#### **2.1.3.2.1. LEYES DE FICK**

La primera ley de Fick establece que el flujo neto de moléculas en  $x$  es proporcional a la pendiente de la función de concentración (gradiente de concentración) en  $x$ , siendo la constante de proporcionalidad igual a  $-D$  denominada coeficiente de difusión (Nakano, Suzuki, & Moore, 2017). Por lo cual, la primera ley de Fick puede expresarse como

$$J_x = -D \frac{\partial U}{\partial x}. \quad (1)$$

Se puede decir que no habrá ningún flujo de partículas si las moléculas se distribuyen uniformemente en el espacio, por lo tanto, la distribución de moléculas no cambiará con el tiempo si  $J_x = 0$ .

En el caso tridimensional, las moléculas de información se propagan de forma independiente en tres dimensiones, por lo que las ecuaciones de difusión también se pueden escribir en tres dimensiones, considerando las constantes de difusión independientes en cada dimensión, se puede escribir las ecuaciones para el flujo molecular neto y las concentraciones como:

$$J_x = -D_x \frac{\partial U}{\partial x}, \quad J_y = -D_y \frac{\partial U}{\partial y}, \quad J_z = -D_z \frac{\partial U}{\partial z}. \quad (2)$$

Como el movimiento en tres dimensiones se la realiza en el mismo medio, se puede entender que las constantes de difusión son iguales.

La segunda ley de Fick es una ecuación diferencial que se obtiene a partir de la primera ley de Fick, esta nos indica la concentración de una sustancia en función del tiempo y el espacio. Esta ley representa la tasa de cambio de la concentración de las moléculas de información en el tiempo. Se puede expresar como

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \frac{\partial J_x}{\partial x}, \quad (3)$$

reemplazando (1) en (3) se obtiene

$$\frac{\partial U}{\partial t} = D \frac{\partial^2 U}{\partial x^2}. \quad (4)$$

Si el grado de concentración  $\frac{\partial U}{\partial t}$  es constante  $\left( \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} = 0 \right)$ , entonces la concentración es estacionaria  $\frac{\partial U}{\partial t} = 0$ , lo que significa que el número de moléculas de información que se difunden será igual a la constante de difusión.



Cuando las moléculas se liberan en un espacio tridimensional la ecuación de difusión se puede encontrar como:

$$U(r, t) = \frac{Q_0}{(4\pi Dt)^{\frac{3}{2}}} \exp\left(-\frac{r^2}{4Dt}\right), \quad (5)$$

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 decir que  $U(r, t)$  indica las moléculas de información disponibles en la distancia  $r$  y tiempo  $t$ .

Las soluciones a las leyes de Fick nos proporcionan la concentración promedio de moléculas de información disponibles en una nanomáquina receptora, esto es muy importante debido a que nos ayudan a comprender la dinámica de difusión y las características dependientes del rango y la velocidad de comunicación de un sistema MC.

## **2.2. INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES PARA UNA MC**

La comunicación molecular es el método principal entre microorganismos y células del cuerpo humano, esta comunicación esta literalmente a nuestro alrededor y a pesar de su importancia, solo en la última década se ha estudiado la MC en relación con la ingeniería de comunicación. El estudio de la MC en relación con la ingeniería en comunicaciones se puede dividir en cinco temas, que son:

- Técnicas de modulación

- Modelos de canal
- Técnicas de codificación
- Arquitectura y protocolos de red
- Herramientas de simulación

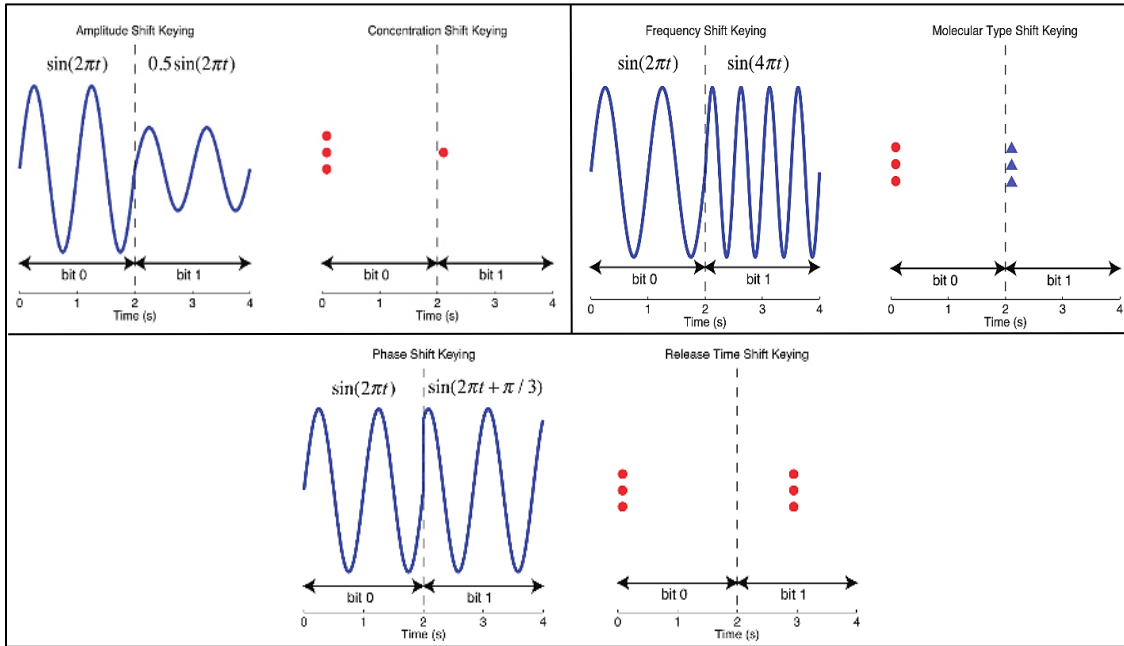
### **2.2.1. TÉCNICAS DE MODULACIÓN**

La modulación como ya se conoce es el proceso de variar una o más propiedades de la señal portadora de acuerdo con el símbolo de transmisión. De esta manera los símbolos de transmisión se codifican en cambios de las propiedades de la señal portadora.

Para los sistemas de comunicación inalámbrica ya conocidos que se basan en las ondas de radio, el portador de información son las ondas electromagnéticas. Estas ondas de radio son señales sinusoidales que se pueden caracterizar por su amplitud, frecuencia y fase. En las cuales la amplitud afecta la altura pico a pico de la señal, la frecuencia afecta el número de ciclos por cada segundo y la fase afecta el desplazamiento desde el origen de la señal. En este sentido la señal de información se puede modular en amplitud, fase y frecuencia o la combinación de estas (Haraguchi, Eckford, & Nakano, 2013).

En una MC los portadores de información son moléculas muy pequeñas, por ende, la información de estas puede modularse sobre algunas propiedades de las moléculas de información, que son:

- Número de moléculas
- Tipo de moléculas
- Tiempo de liberación



**Figura 5. Técnicas de modulación**

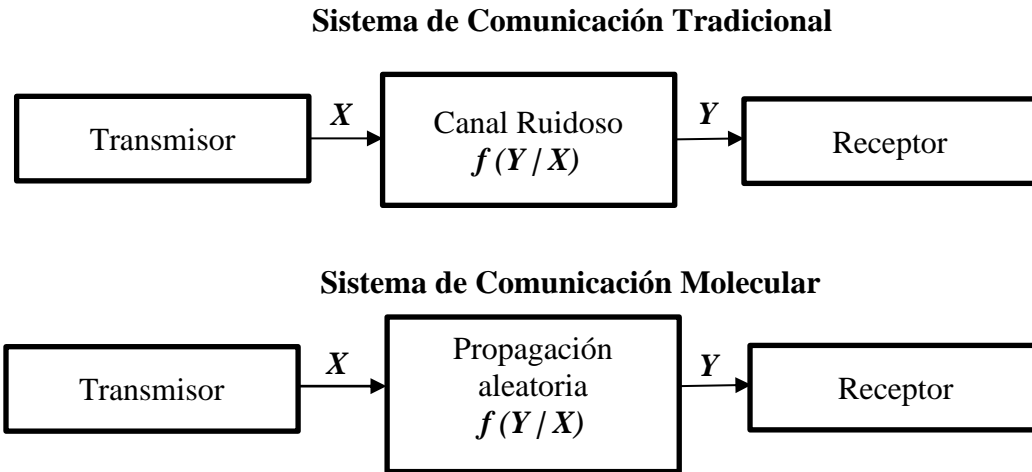
**Fuente:** (Farsad, Yilmaz, Eckford, Chae, & Guo, 2016)

En la figura (5) se puede ver la comparación de cómo se realiza la modulación de señales en una comunicación tradicional y una comunicación molecular.

### 2.2.2. MODELOS DE CANAL

Uno de los modelos teóricos más básicos para un sistema de comunicación es el modelo del canal. Un canal de comunicación, hablando físicamente, es el entorno sobre el que se produce la propagación de una señal. Matemáticamente hablando, el canal relaciona la información que se transmitió con la información que se recibió, para así conocer si la señal que se transmitió es la misma que se recibió o si presenta variaciones debido al ruido introducido por el canal.

Como se menciona en (Farsad, Yilmaz, Eckford, Chae, & Guo, 2016) uno de los problemas que abordan los ingenieros de comunicaciones es modelar el canal de una MC, ya que se presentan diferentes esquemas de propagación.



**Figura 6.** Representación de un canal de comunicaciones  
**Fuente:** (Farsad, Yilmaz, Eckford, Chae, & Guo, 2016)

En una MC la capacidad del canal se calcula de diferente manera a los conocidos en las comunicaciones tradicionales. En este caso sea  $x^n$  una secuencia de  $n$  símbolos transmitidos consecutivamente e  $y^n$  la secuencia correspondiente de  $n$  símbolos recibidos consecutivamente, como se menciona en (Cevallos, Tello, Inca, Palacios, & Renteria, 2019) se utiliza el teorema de Shannon para determinar la velocidad de transferencia máxima de información, por lo cual, la capacidad del canal estará dada por

$$C = \max\{I(X; Y)\}, \quad (6)$$

donde  $I(X; Y)$  es la entropía de información mutua entre  $x$  e  $y$  (Haraguchi, Eckford, & Nakano, 2013). También puede estar representada como

$$\begin{aligned} I(X; Y) &= H(Y) - H(Y|X) \\ I(X; Y) &= H(X) - H(X|Y) \\ I(X; Y) &= H(X) + H(Y) - H(Y, X). \end{aligned} \quad (7)$$

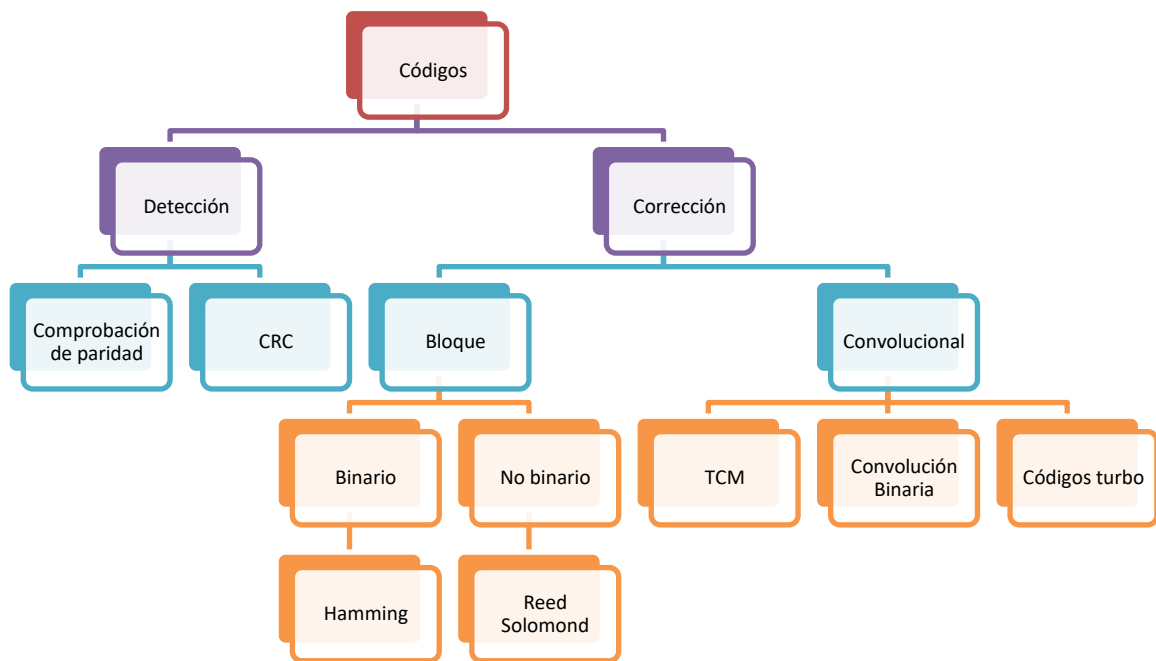
En (Haraguchi, Eckford, & Nakano, 2013) se menciona que se han desarrollado un modelo completo de extremo a extremo de MC basado en la difusión (transporte pasivo) y otro

modelo basado en motores moleculares (transporte activo) siendo estos los más aceptados para este tipo de comunicaciones.

### 2.2.3. TÉCNICAS DE CODIFICACIÓN

Dado que un canal MC es diferente, puede ser necesario nuevos códigos de corrección de errores, estos códigos se utilizan para mitigar los efectos de ruido y desvanecimiento de la señal de información.

Para un sistema de comunicación molecular, el ruido que resulta de ISI (interferencia entre símbolos) puede causar una distorsión de la información transmitida, por lo que es necesario utilizar la teoría de codificación para controlar errores y lograr una transmisión de datos confiable. Los códigos se pueden dividir en códigos que detectan errores y códigos que detectan errores y los corrigen.



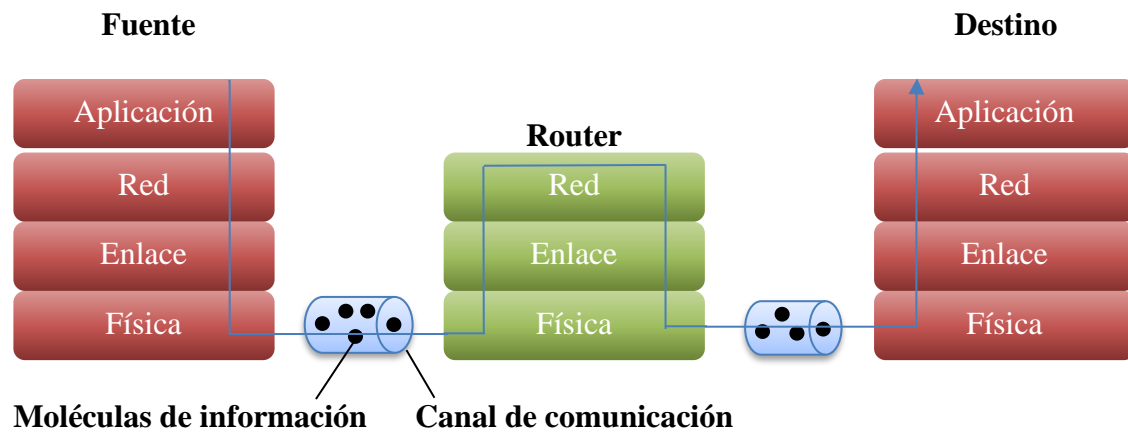
**Figura 7.** Clases de códigos de error y detección

**Fuente:** (Nakano, Suzuki, & Moore, 2017)

## 2.2.4. ARQUITECTURA Y PROTOCOLOS DE RED

En la ingeniería en comunicaciones la arquitectura de un sistema de comunicación se puede implementar por una pila de capas, en la que cada capa proporciona un servicio. Este enfoque por capas se las realiza porque permite dividir el desarrollo del sistema de comunicaciones, en consecuencia, el diseño de una capa no afecta a la otra.

Modelos de referencia de comunicaciones tradicionales pueden dar una pauta de inicio para realizar una arquitectura de MC, uno de los ejemplos más claros es el modelo de referencia TCP/IP que proporciona un punto de partida para el desarrollo de una arquitectura.



**Figura 8.** Flujo de información a través de una red de comunicación molecular modelada a partir de la arquitectura de Internet.

**Fuente:** (Haraguchi, Eckford, & Nakano, 2013)

En la arquitectura presentada en la figura (8) se supone que la fuente, el enrutador y el destino están en un rango donde las moléculas pueden ser detectadas. Similar al modelo de referencia TCP/IP, las capas proporcionan servicios que se describen en la tabla 1:

**Tabla 1.** Servicios y características de capas TCP/IP en una MC

**Fuente:** Autor en base a (Haraguchi, Eckford, & Nakano, 2013)

Capa	Características	Servicios
<b>Física</b>	Servicios relacionados con la transmisión, propagación y recepción de moléculas de información	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hardware e interfaz</li> <li>• Modulación de señal</li> <li>• Propagación de señal</li> <li>• Amplificación de señal</li> <li>• Capacidad del canal</li> </ul>
<b>Enlace</b>	Conjunto de mecanismos para que un grupo de bio-nanomáquinas comuniquen de manera confiable la información dentro de un rango de comunicación	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Manejo de errores</li> <li>• Control de flujo</li> <li>• Control de acceso a los medios</li> <li>• Sincronización</li> <li>• Medición de distancia</li> </ul>
<b>Red</b>	Mecanismos para que un grupo de bio-nanomáquinas comuniquen información en un rango mayor que el rango de comunicación obtenido por la capa de enlace	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Formación de red</li> <li>• Enrutamiento de red</li> <li>• Procesamiento de red</li> <li>• Control de congestión</li> </ul>
<b>Transporte</b>	Mecanismos para transmitir información de manera confiable de extremo a extremo entre nanomáquinas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Manejo de errores</li> <li>• Control de flujo</li> <li>• transmisión en secuencia de moléculas de información</li> </ul>
<b>Aplicación</b>	Las funcionalidades que proporciona esta capa serán evidentes con el desarrollo de aplicaciones.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reacciones o respuestas de información</li> </ul>

### **2.2.5. ESTANDARIZACIÓN Y HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN**

En comunicación molecular, el grupo de trabajo de estándares IEEE P1906.1 para Nanonetworking se estableció en 2011 para promover la estandarización de la comunicación molecular. El objetivo a corto plazo del grupo de trabajo es proporcionar una definición, un marco conceptual y una terminología común para la comunicación molecular. El objetivo a largo plazo es identificar una arquitectura práctica y un conjunto de protocolos reutilizables para la comunicación molecular a través del diseño, implementación y evaluación de sistemas de comunicación molecular.

Con respecto a los simuladores de comunicaciones moleculares se han desarrollado varios, los cuales consideran diferentes características de una MC. Algunos más robustos que otros, siendo el simulador NS3 un simulador de eventos discretos, que con respecto a una MC se centra principalmente en las propiedades del canal y el número de moléculas recibidas en función del tiempo, al cual el grupo de trabajo IEEE 1906.1 ha establecido como simulador base de una MC.



## **CAPITULO III**

### **3. METODOLOGÍA**

#### **3.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN**

La investigación explorativa nos permite conocer mejor el tema de investigación para así poder ser tratada con mayor profundidad, es decir ayuda a obtener información básica relacionada con el problema de investigación, esta nos permite tener un enfoque más general del objeto de estudio (Cazau, 2006). En este caso nos permite conocer de mejor manera el estándar IEEE 1906.1 en el cual se sustenta esta investigación para así poder simular una comunicación a nanoescala además de analizar los parámetros que influyen en las comunicaciones moleculares y entenderlas de modo preciso.

#### **3.2. MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN**

##### **Método Experimental**

El rendimiento de la MC en esta investigación se mide en función a los resultados obtenidos a partir de modificar las características de la variable independiente (número de moléculas, distancia entre nodos, intervalo de pulso, coeficiente de difusión) y en base a la modificación de estos parámetros obtener métricas de rendimiento como: el pulso de retardo, el ancho del pulso molecular, el retardo en el pulso, la velocidad de transmisión de los datos y la capacidad del canal. En efecto, por medio del método experimental se harán simulaciones, en las cuales se manipularán estas variables con el propósito de observar y analizar las consecuencias que resultan de la variación de estos parámetros en la comunicación a través de una medición indirecta utilizando herramientas de simulación que nos permitan capturar los valores deseados, en este sentido permitirá:

- Manipular los parámetros que intervienen en una comunicación molecular por medio de una simulación hecha por computadora en el software NS3, para observar el comportamiento de la comunicación.
- Adquisición e interpretación de resultados de la comunicación molecular.

### **Método Descriptivo**

Una vez que se realizan los experimentos, el método descriptivo nos permitirá describir las características y el comportamiento de la comunicación, se podrá:

- Analizar las variables que se manipulan y describir los resultados de la comunicación molecular en función a esas modificaciones.

### **Método Analítico**

Es aquel método de investigación que consiste en descomponer el objeto de estudio en sus partes fundamentales para así realizar el análisis y evaluación de cada una en particular. Mediante este método de investigación se podrá realizar:

- Interpretación y análisis de los diagramas de lenguaje unificado de modelado (UML) propuestos en el estándar IEEE 1906.1 para una comunicación molecular.
- Comprender el funcionamiento de las comunicaciones moleculares en NS-3.

## **3.3. POBLACIÓN Y MUESTRA**

### **3.3.1. POBLACIÓN**

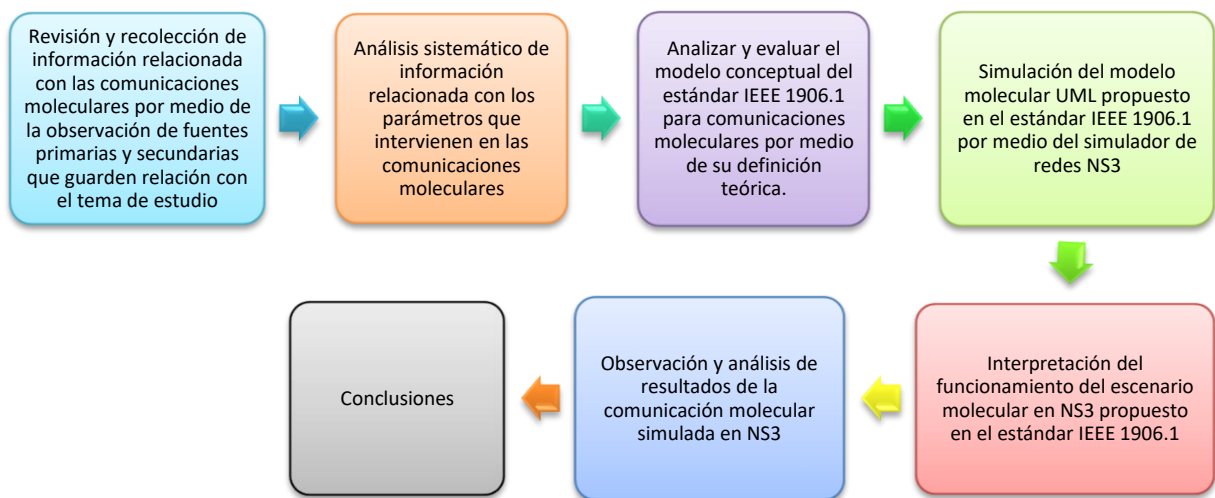
La población está compuesta por los 100 valores de rendimiento medidos a partir de la modificación de cada uno de los parámetros que caracterizan la variable independiente. De estas modificaciones se analizan métricas claves del rendimiento de la comunicación como

el pulso de retardo, el ancho del pulso molecular, el retardo en el pulso, la velocidad de transmisión de los datos y la capacidad del canal.

### 3.4. FUENTES DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN

Las fuentes de recopilación de información serán primarias, estas son fuentes de información científica que serán obtenidas a partir de las necesidades del estudio como la observación. Y fuentes secundarias relacionadas con el tema de estudio, además de investigaciones similares que guarden una estrecha relación con el estándar IEEE 1906.1 que permitan conocer de mejor manera el funcionamiento de las comunicaciones moleculares, estas pueden ser (libros, artículos científicos, reportes) en repositorios de universidades nacionales e internacionales, informes de entes dedicados a la investigación de comunicaciones, considerando publicaciones de los últimos 5 años tanto en inglés como en español que permitan extraer información relevante.

### 3.5. PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS



*Figura 9. Procesamiento y análisis de la investigación*

*Fuente: Autor*

### 3.6. OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES

*Tabla 2. Operacionalización de las variables*

*Fuente: Autor*

VARIABLES		CONCEPTO	INDICADORES	INSTRUMENTOS
<b>Independiente</b>	<b>Clase molecular</b>	Esta clase está caracterizada por todos los parámetros configurables en la simulación, es decir el número de moléculas, la distancia entre nodos, el coeficiente de difusión y el intervalo de pulso.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Distancia entre nodos</li> <li>• Coeficiente de difusión</li> <li>• Número de moléculas</li> <li>• Intervalo del pulso molecular</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Software de simulación NS-3</li> <li>• Fundamentos conceptuales</li> <li>• Observación directa a través del modelo de simulación molecular del estándar IEEE 1906.1</li> </ul>
<b>Dependiente</b>	<b>Rendimiento de transmisión y recepción</b>	Comprende las métricas comunes que las simulaciones de redes de comunicación a nanoescala deben calcular para presentar información interoperable entre componentes del sistema, estos son el pulso molecular, el pulso de retardo, el ancho de pulso molecular, la velocidad de transmisión de los datos, la relación de señales moleculares obtenidas y la capacidad del canal.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pulso molecular</li> <li>• Pulso de retardo en el medio</li> <li>• Ancho del pulso molecular</li> <li>• Velocidad de transmisión de los datos</li> <li>• Relación de señales moleculares obtenidas</li> <li>• Capacidad del canal molecular</li> </ul>	

### 3.7. PROCEDIMIENTO Y ANÁLISIS

Para evaluar el comportamiento de la comunicación se analizan los parámetros que intervienen en cada una de las componentes de la MC. Así se puede comprender como afectan ciertos parámetros en el rendimiento de la misma. Estos resultados se presentan a partir de valores y características ingresadas por el usuario, en este se establece el número de moléculas transmitidas  $Q = 50000$ , la distancia entre el transmisor y receptor  $r = 0.001\text{m}$ , el coeficiente de difusión  $D = 1 \text{ nm}^2/\text{ns}$  y el intervalo del pulso molecular igual a  $1\text{ms}$ . Estos valores se introducen con el fin de dar a conocer a los usuarios el comportamiento de la

simulación y pueden ser modificados para el análisis del mismo. Además, se evalúan características de la simulación con diferentes parámetros para poder comparar otros escenarios de simulación. En base a lo antes expuesto se realiza la implementación de las clases que permiten simular las componentes del estándar y en base a ellas medir el rendimiento de la comunicación según la modificación de variables como:

- El coeficiente de difusión
- La distancia entre nodos
- El intervalo del pulso molecular

Valores que nos permiten conocer características que afectan al rendimiento de la comunicación molecular como:

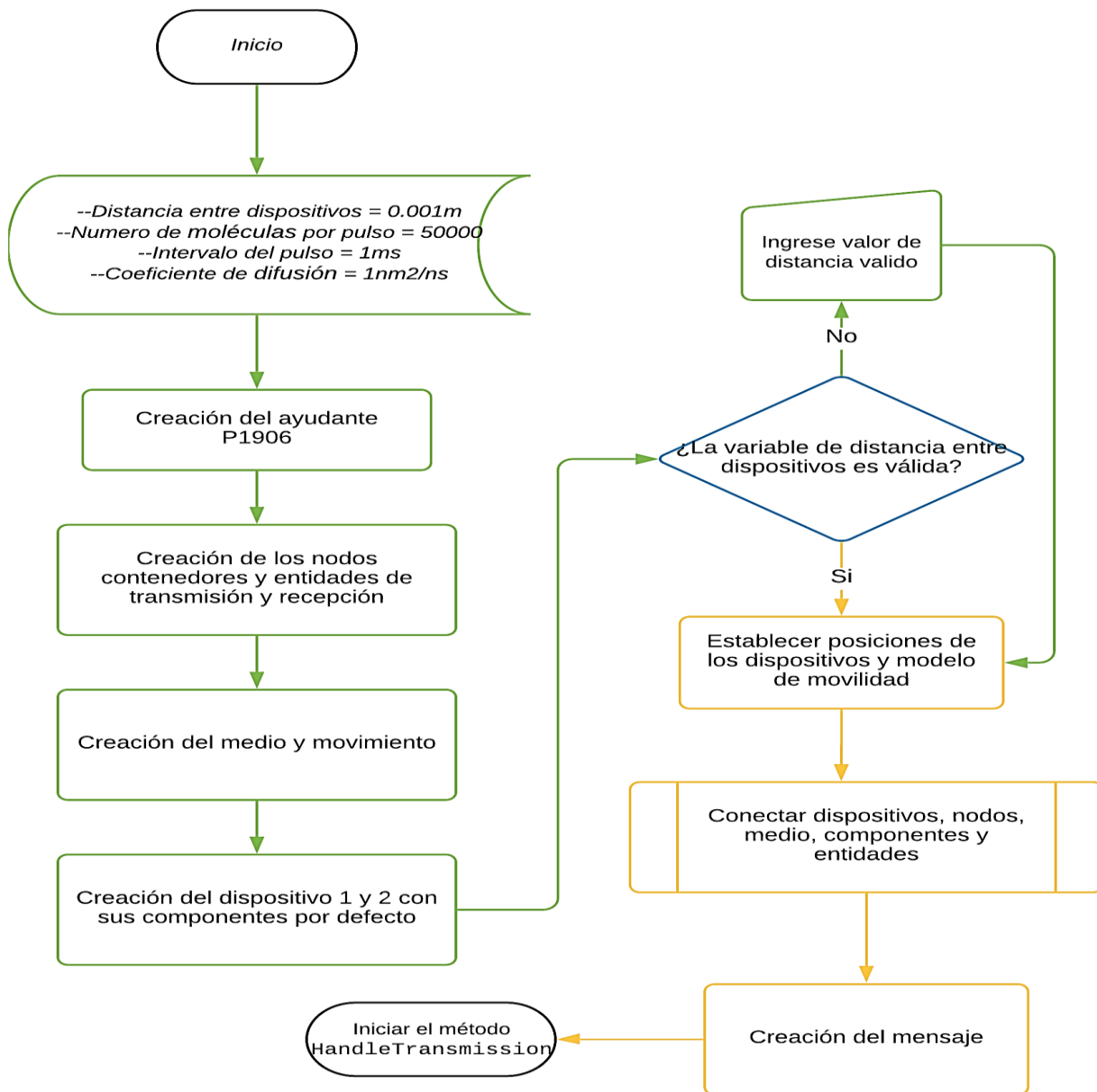
- Pulso molecular
- El pulso de retardo en el medio
- El ancho del pulso molecular
- La velocidad de transmisión de los datos
- La relación de señales moleculares obtenidas
- La capacidad del canal molecular

### **3.7.1. SIMULACIÓN DEL EJEMPLO MOLECULAR**

La implementación de la comunicación molecular del estándar IEEE 1906.1 en NS3 se puede dividir en los siguientes pasos:

1. Crear el ayudante P1906
2. Crear los nodos
3. Crear el medio y el componente de movimiento
4. Crear las componentes/ entidades además de los dispositivos 1 y 2 que participan en la comunicación

5. Establecer las posiciones de los dispositivos
6. Conectar dispositivos, nodos, medio, componentes y entidades
7. Crear un mensaje para enviarlo a la red
8. Enviar el mensaje



**Figura 10.** Diagrama de flujo de archivo *EjemploMolecular.cc*

**Fuente:** Autor

### 3.7.1.1. CREACIÓN DEL AYUDANTE

El ayudante del marco P1906 se encarga de gestionar y crear objetos de nanomáquinas y habilitar todos los componentes de registro relacionados con el marco P1906, la función más importante de esta clase es conectar las componentes y atributos de los dispositivos.

*Tabla 3. Funciones de la clase Helper*

*Fuente: Autor*

P1906 HELPER
<code>void EnableLogComponents (void)</code>
<code>void Connect (Ptr&lt;Node&gt; n, Ptr&lt;P1906NetDevice&gt; d, Ptr&lt;P1906Medium&gt; m, Ptr&lt;P1906CommunicationInterface&gt; c, Ptr&lt;P1906Field&gt; fi, Ptr&lt;P1906Perturbation&gt; p, Ptr&lt;P1906Specificity&gt; s)</code>

Para poder visualizar el proceso que sigue la comunicación se utilizan registros implementados en el método `EnableLogComponents`, el cual permite mostrar mensajes de depuración del programa. Estos registros se dividen según la información que se muestra en la simulación, estos pueden ser:

**LOG\_ERROR:** Muestran mensajes de error.

**LOG\_WARN:** Muestran mensajes de aviso.

**LOG\_DEBUG:** Muestran mensajes de depuración.

**LOG\_INFO:** Muestran mensajes sobre el progreso del programa.

**LOG\_FUNCTION:** Muestran mensajes descriptivos.

**LOG\_LOGIC:** Muestran mensajes relacionados con la lógica del programa.

**LOG\_ALL:** Muestran mensajes relacionados con todo tipo de registros.

El método `EnableLogComponents` proporciona las funciones para trabajar con los registros y así poder visualizar el proceso de la simulación.

```

void
P1906Helper::EnableLogComponents (void)
{
    LogComponentEnable ("P1906NetDevice", LOG_LEVEL_ALL);
    LogComponentEnable ("P1906Medium", LOG_LEVEL_ALL);

    LogComponentEnable ("P1906MessageCarrier", LOG_LEVEL_ALL);
    LogComponentEnable ("P1906CommunicationInterface", LOG_LEVEL_ALL);
    LogComponentEnable ("P1906TransmitterCommunicationInterface", LOG_LEVEL_ALL);
    LogComponentEnable ("P1906ReceiverCommunicationInterface", LOG_LEVEL_ALL);
    LogComponentEnable ("P1906Field", LOG_LEVEL_ALL);
    LogComponentEnable ("P1906Motion", LOG_LEVEL_ALL);
    LogComponentEnable ("P1906Perturbation", LOG_LEVEL_ALL);
    LogComponentEnable ("P1906Specificity", LOG_LEVEL_ALL);
}

```

**Figura 11.** Declaración del método para visualizar registros

*Fuente: Autor*

En la figura (11) se visualiza el método `EnableLogComponents` para las clases del modelo núcleo del módulo P1906, en este se utiliza todos los niveles de registro habilitados, por lo cual, se mostrará los mensajes de error, aviso, depuración, progreso y lógica de la simulación.

El método `connect` del ayudante P1906 permite conectar los componentes, atributos y dispositivos que intervienen en la comunicación, el objetivo principal del método es facilitar la implementación e interacción de todos los componentes de la comunicación molecular. En relación con ayudantes ya definidos por el software NS3 se podría decir que ejecuta las mismas funciones que las clases `PointToPointHelper`, `CsmaHelper`, entre otras.

Las siguientes líneas de código muestran cómo se declara el ayudante P1906 y se habilitan sus funciones.

**Tabla 4.** Comandos para declarar el ayudante P1906

*Fuente: Autor*

Creación del ayudante P1906 y declaración de sus funciones
<pre> P1906Helper helper; helper.EnableLogComponents ();  helper.Connect (n.Get (0), dev1, medium, c1, fi1, p1, s1); helper.Connect (n.Get (1), dev2, medium, c2, fi2, p2, s2); </pre>



### 3.7.1.2. CREACIÓN DE LOS NODOS

Los nodos se pueden crear de dos maneras por medio de las clases `NetdeviceContainer` o `NodeContainer`.

La clase `NetDeviceContainer` nos ayuda a crear varios dispositivos con las mismas características. La clase ayuda cuando se necesitan definir una gran cantidad de componentes de red. La clase `NodeContainer` se utiliza para instalar un cierto número de nodos que comparten las mismas características, esta clase contiene múltiples nodos definidos como un `Ptr<Node>` el cual se utiliza para referirse a cada uno de los nodos que contiene.

**Tabla 5. Declaración de Nodos**

**Fuente:** Autor

Creación de los nodos
<pre>NodeContainer n; NetDeviceContainer d; n.Create (2);</pre>

La tabla (5) muestra cómo se crean los nodos contenedores que posteriormente serán parte de la entidad transmisora y receptora.

### 3.7.1.3. CREACIÓN DEL MEDIO Y DE LA COMPONENTE DE MOVIMIENTO

Para crear los componentes y entidades del módulo P1906 se utilizan punteros, los cuales especifica una dirección de memoria. Estos punteros contienen el tipo de variable al cual apunta. Para crear un puntero se lo realiza de la siguiente forma:

```
➤ Ptr<tipodevariable> nombre_variable = CreateObject  
  <tipodevariable> ();
```

Para el marco IEEE 1906 se definen nuevos tipos de variables en el software, estas variables se relacionan con las componentes y entidades que participan en la comunicación, en consecuencia, para declarar una variable de tipo medio y movimiento del módulo P1906 se definirá como se muestra a continuación:

**Tabla 6. Declaración de los objetos Medio y movimiento**

**Fuente:** Autor

Creación de la componente Medio y Movimiento
<pre>Ptr&lt;P1906Medium&gt; medium = CreateObject&lt;P1906Medium&gt; (); Ptr&lt;P1906MOLMotion&gt; motion = CreateObject&lt;P1906MOLMotion&gt; (); motion-&gt;SetDiffusionCoefficient (diffusionCoefficient); medium-&gt;SetP1906Motion (motion);</pre>

La tabla (6) detalla cómo se crea las variables Medium y MolMotion. Por medio del símbolo “->” se accede a los atributos y métodos del objeto creado, donde se establece el coeficiente de difusión para la componente de movimiento y se define el movimiento que tendrá lugar en el medio.

### 3.7.1.4. CREACIÓN DE COMPONENTES Y DISPOSITIVOS

Al igual que se describió en el apartado anterior la creación de nuevas variables se las realiza por medio de los punteros.

**Tabla 7. Declaración de componentes y dispositivos**

**Fuente:** Autor

Creación del dispositivo y las componentes IEEE 1906
<pre>Ptr&lt;P1906NetDevice&gt; dev1 = CreateObject&lt;P1906NetDevice&gt; (); Ptr&lt;P1906MOLCommunicationInterface&gt; c1 = CreateObject&lt;P1906MOLCommunicationInterface&gt; (); Ptr&lt;P1906MOLSpecificity&gt; s1 = CreateObject&lt;P1906MOLSpecificity&gt; (); Ptr&lt;P1906MOLField&gt; fil = CreateObject&lt;P1906MOLField&gt; (); Ptr&lt;P1906MOLPerturbation&gt; p1 = CreateObject&lt;P1906MOLPerturbation&gt; (); p1-&gt;SetPulseInterval (Milliseconds(pulseInterval)); p1-&gt;SetMolecules (nbOfMoleculas); s1-&gt;SetDiffusionCoefficient (diffusionCoefficient);</pre>

Las variables que se crean en esta sección del código se refieren al dispositivo de red, la interfaz de comunicación, la componente de especificidad, campo y perturbación. Los métodos y atributos de cada uno de estos valores se discuten en la sección 3.7.2.

### **3.7.1.5. ESTABLECER LA POSICIÓN Y MODELO DE MOVILIDAD DEL DISPOSITIVO TRANSMISOR Y RECEPTOR**

Escoger un modelo de movilidad para los nodos dependerá de la aplicación a la cual está destinada la simulación. Estos modelos de movilidad generalmente se agregan a los nodos para proporcionarles los comportamientos de movimiento, entre ellos existen:

- ns3::ConstatPositionMobilityModel**
- ns3::ConstatVelocityModel**
- ns3::ConstatAccelerationModel**
- ns3::GaussMarkovModel**
- ns3::RandomDirection2DModel**
- ns3::RandomWalk2DModel**
- ns3::RandomWaypointModel**
- ns3::SteadyStateRandomWaypointModel**
- ns3::WaypointModel**

Las posiciones de los nodos se establecen con un `PositionAllocator` y generalmente solo se usan al principio para establecer la posición inicial de los nodos. Existen varias formas de establecer estas posiciones iniciales, dependerá de la aplicación a la que va destinada la simulación para elegir una, los más conocidos son:

- ns3::ListPositionAllocator**
- ns3::GridPositionAllocator**
- ns3::RandomRectanglePositionAllocator**
- ns3::RandomBoxPositionAllocator**

ns3::RandomDiscPositionAllocator

ns3::UniformDiscPositionAllocator

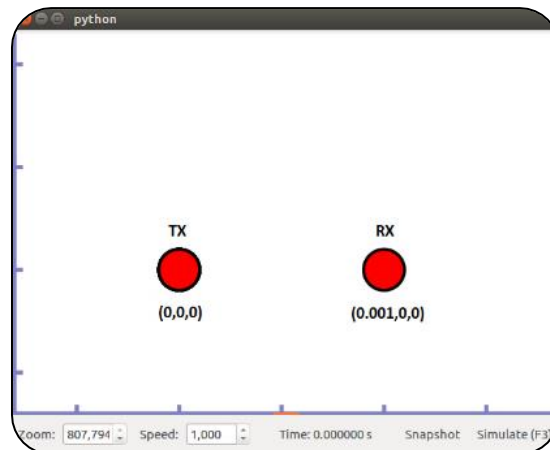
En el caso de la simulación molecular se establece una lista con dos posiciones, correspondientes a la entidad de transmisión/recepción y se le asigna un modelo de movilidad constante, por lo cual, los nodos permanecerán en la posición de inicio.

**Tabla 8.** Declaración del modelo de movilidad de los nodos contenedores

*Fuente:* Autor

Establecimiento de posición de los dispositivos
<pre>Ptr&lt;ListPositionAllocator&gt; positionAlloc =     CreateObject&lt;ListPositionAllocator&gt; (); positionAlloc-&gt;Add (Vector(0, 0, 0)); positionAlloc-&gt;Add (Vector(nodeDistance, 0, 0)); MobilityHelper mobility; mobility.SetMobilityModel ("ns3::ConstantPositionMobilityModel"); mobility.SetPositionAllocator (positionAlloc); mobility.Install (n);</pre>

En la tabla (8) se observa que los nodos fueron colocados en la posición (0,0,0) y (0.001,0,0), que corresponde a la distancia entre nodos que fue ingresada por el usuario.



**Figura 12.** Vista de los nodos por el comando --visualize

*Fuente:* Autor

La distancia y el modelo de movilidad se configuran constantes para estos nodos, debido que representan a la nanomáquina transmisora y receptora de la MC, estas son las encargadas de iniciar los procesos de comunicación, por ende, el mensaje viajará de una nanomáquina a otra utilizando otros modelos de propagación definidos en el estándar.

### 3.7.1.6. CONECTAR DISPOSITIVOS, NODOS, MEDIO, COMPONENTES Y ENTIDADES

Cuando queremos conectar las características de una red, podría verse tediosa la tarea de asignar a cada uno de los nodos características como la interfaz del dispositivo, el canal, entre otras. Por lo cual existen ayudantes que permiten realizar esta tarea de una forma más simplificada que están disponibles en el software NS3.

La clase `helper` por medio de su método `connect` ayuda a realizar esta función, con la cual se especifican el nodo, dispositivo, medio y componentes que comprende la topología. Haciendo una comparación a manera de ejemplo, sería como simplificar la tarea de conectar un host con su interfaz de red y esta a su vez conectarla por medio de un cable ethernet (medio) a otro host.

**Tabla 9.** Declaración de la función `connect` del ayudante P1906

*Fuente: Autor*

Conexión de entidades
<pre>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);</pre>

### 3.7.1.7. CREACIÓN DEL PAQUETE

La información que será enviada se la implementa por medio de la clase `Packet`, esta clase nos ayuda a crear paquetes que pueden ser enviados entre nodos. Existen varias

formas de crear un paquete, nuevamente dependerá de la aplicación a la cual está dirigida la simulación para escoger la manera como se crea el paquete. Por ejemplo, para realizar pruebas simples de conexión se crean paquetes vacíos que son enviados para conocer si existe conectividad entre nodos.

En el caso del ejemplo molecular se crea una cadena de caracteres llena de ceros equivalente a un byte de información, la misma cadena que será enviada por la interfaz del transmisor.

**Tabla 10.** Declaración del paquete de información

*Fuente: Autor*

Creación del paquete
<pre>int pktSize = 1; //Bytes uint8_t *buffer = new uint8_t[pktSize]; for (int i = 0; i &lt; pktSize; i++) {     buffer[i] = 0; //Informacion } Ptr&lt;Packet&gt; message = Create&lt;Packet&gt;(buffer, pktSize);</pre>

### 3.7.1.8. ENVÍO DEL MENSAJE

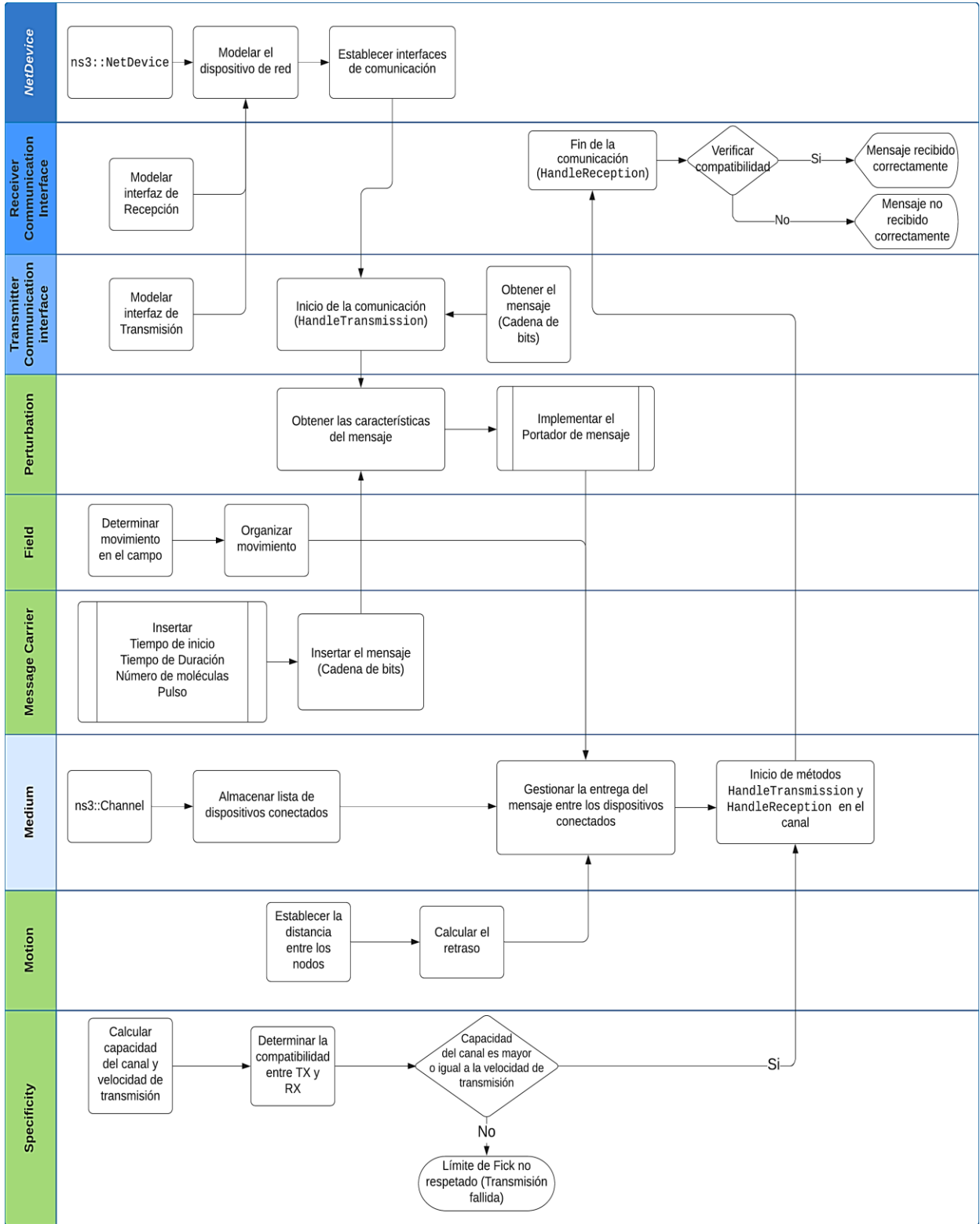
El envío del mensaje se lo realiza por medio de la interfaz de comunicación del transmisor, esta interfaz inicia el proceso de comunicación, el cual accederá a todos los componentes y métodos que intervienen en la comunicación.

### 3.7.2. PROCESO DE COMUNICACIÓN ENTRE COMPONENTES

El proceso de comunicación que sigue el marco es:

1. La clase `NetDevice` recibe un mensaje de las capas superiores y lo entrega a la interfaz de comunicación del transmisor.

2. Se crea el portador del mensaje con la ayuda del componente de perturbación
3. La interfaz de comunicación del transmisor activa la propagación en el medio y envía las componentes de portador del mensaje, perturbación y campo.
4. El componente de movimiento modifica las propiedades del portador de mensajes.
5. El portador del mensaje se entrega al receptor y el componente de especificidad verifica la compatibilidad.
6. Si el mensaje es compatible el mensaje se entrega a las capas superiores
7. El mensaje es recibido por las capas superiores



**Figura 13.** Diagrama de flujo proceso de comunicación entre clases

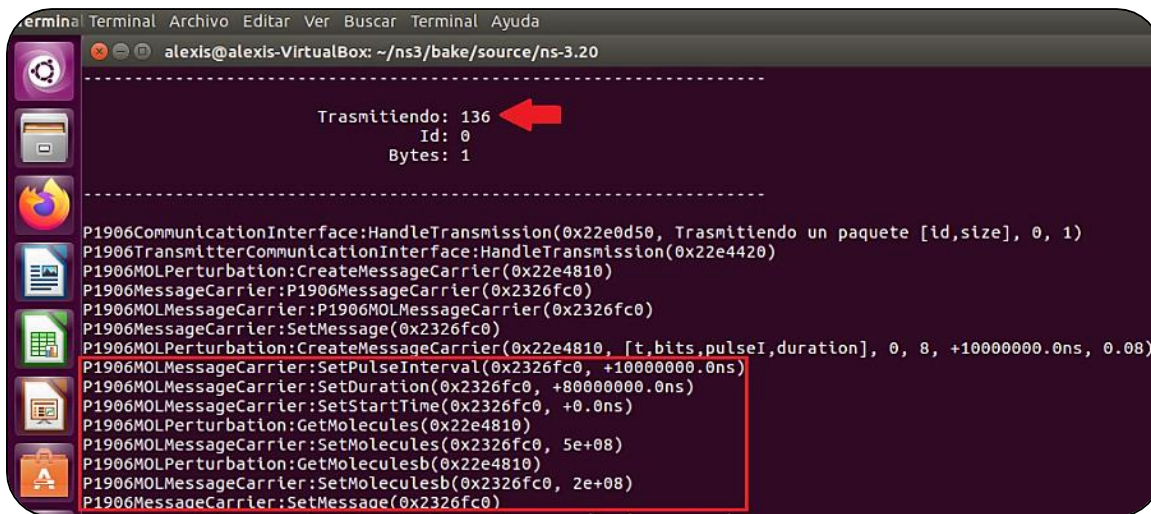
**Fuente:** Autor



### 3.7.2.1. CLASE MESSAGECARRIER

En un sistema de comunicación a nanoescala el portador puede ser una partícula cuyo movimiento está definido por la difusión libre y por lo tanto proporciona el servicio de contener y transportar un mensaje.

La clase núcleo del portador del mensaje es extendida en esta clase MolMessagecarrier, en donde se añade al portador; no solo el mensaje sino la duración, el pulso de intervalo en que se liberan las moléculas, el tiempo de inicio en el cual se transmite la información y el número de moléculas por cada pulso de intervalo. El método SetMessage y GetMessage son funciones heredadas del modelo núcleo, estos capturan el mensaje y lo deposita en el portador.



```
Terminal Terminal Archivo Editar Ver Buscar Terminal Ayuda
alexis@alexis-VirtualBox: ~/ns3/bake/source/ns-3.20
-----
Trasmitiendo: 136
Id: 0
Bytes: 1
-----
P1906CommunicationInterface:HandleTransmission(0x22e0d50, Trasmitiendo un paquete [id,size], 0, 1)
P1906TransmitterCommunicationInterface:HandleTransmission(0x22e4420)
P1906MOLPerturbation:CreateMessageCarrier(0x22e4810)
P1906MessageCarrier:P1906MessageCarrier(0x2326fc0)
P1906MOLMessageCarrier:P1906MOLMessageCarrier(0x2326fc0)
P1906MessageCarrier:SetMessage(0x2326fc0)
P1906MOLPerturbation:CreateMessageCarrier(0x22e4810, [t, bits, pulseI, duration], 0, 8, +10000000.0ns, 0.08)
P1906MOLMessageCarrier:SetPulseInterval(0x2326fc0, +10000000.0ns)
P1906MOLMessageCarrier:SetDuration(0x2326fc0, +80000000.0ns)
P1906MOLMessageCarrier:SetStartTime(0x2326fc0, +0.0ns)
P1906MOLPerturbation:GetMolecules(0x22e4810)
P1906MOLMessageCarrier:SetMolecules(0x2326fc0, 5e+08)
P1906MOLPerturbation:GetMoleculesb(0x22e4810)
P1906MOLMessageCarrier:SetMoleculesb(0x2326fc0, 2e+08)
P1906MessageCarrier:SetMessage(0x2326fc0)
```

*Figura 14. Creación de la portadora*

*Fuente: Autor*

En la figura (14) se observa las funciones llamadas por el portador del mensaje para un paquete que tiene el tamaño igual a un byte y un pulso de intervalo en el que las moléculas se liberan cada 1ms.

### 3.7.2.2. CLASE PERTURBATION

Esta clase implementa la componente de perturbación del módulo P1906 y define la señal transportada por el portador de mensaje. La componente de perturbación se la puede considerar como la que realiza la modulación de la señal ya que varía la concentración o el movimiento según sea necesario para la señal.

Para generar el componente portador de mensaje, la componente de perturbación utiliza el método `CreateMessageCarrier` el cual codifica la información a transmitir y lo coloca en el portador. En el ejemplo molecular se aumentan funcionalidades que ayudan a crear el portador del mensaje con las características de una señal molecular.

Esta componente permite almacenar la información sobre el número de moléculas transmitidas por cada pulso y el intervalo de tiempo entre dos pulsos consecutivos, esta información se coloca dentro del portador de mensajes al momento de iniciar la comunicación.

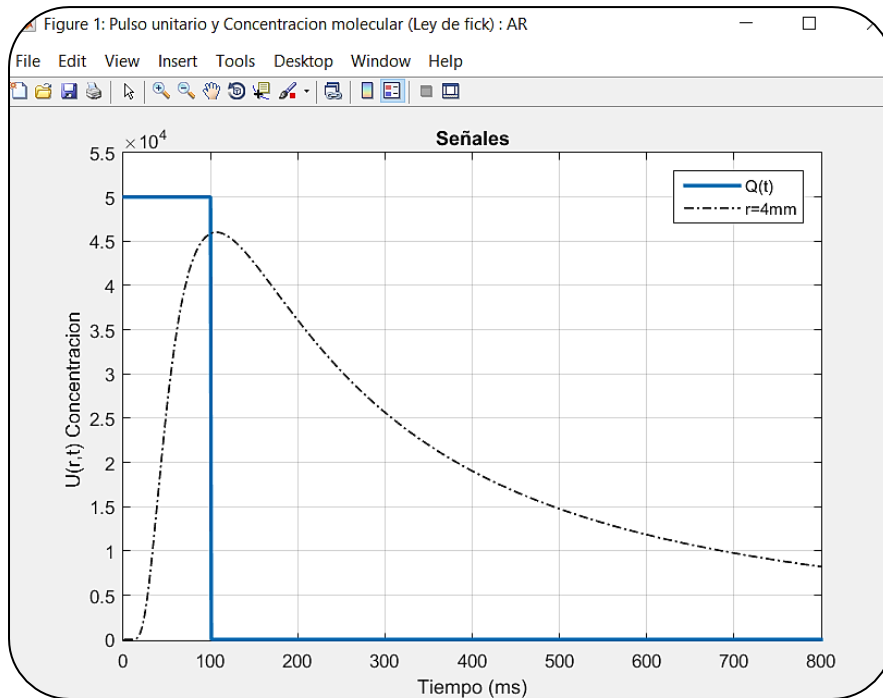
Como se observa en la figura (14) se envía un paquete con el tamaño de un byte, en consecuencia, existirán 8 pulsos en el cual se liberan o no las moléculas, para enviar el valor especificado en la simulación (valor del mensaje igual a 136) se enviarán dos pulsos activos en los cuales se liberan las moléculas y seis pulsos inactivos.

Esta simulación tiene un esquema de modulación OOK basado en pulsos, donde el transmisor envía un pulso de moléculas para representar el bit-1 y no envía moléculas para representar el bit-0.

Este tipo de modulación se representa de la siguiente manera:

$$f(t) = \begin{cases} Q_1\Pi(t), & \text{bit 1} \\ 0, & \text{bit 0} \end{cases} \quad (8)$$

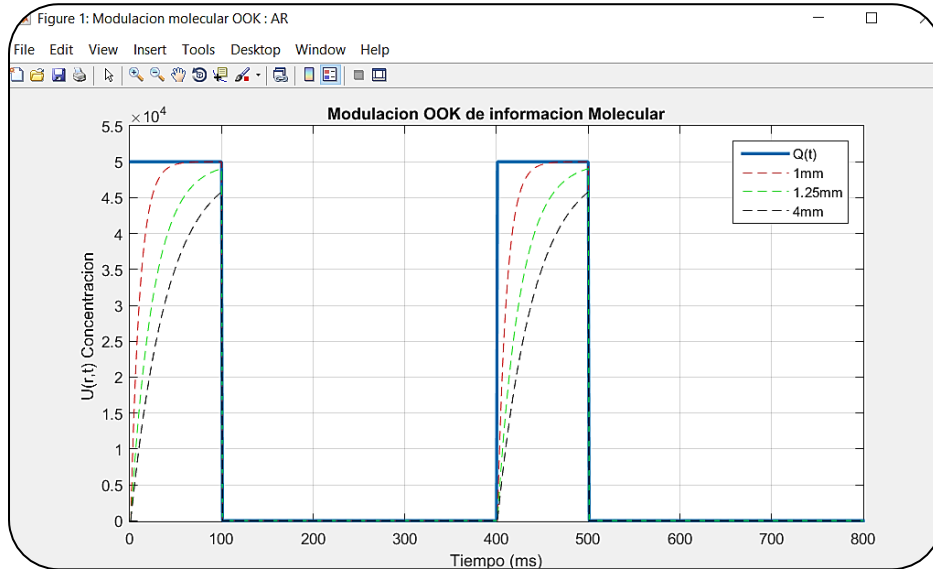
donde  $Q_1$  representa la concentración molecular y  $\Pi(t)$  denota un pulso rectangular con amplitud unitaria, esta amplitud del pulso es la unidad de tiempo desde que inicia un pulso y comienza el siguiente.



**Figura 15.** Señales contenidas en la portadora

**Fuente:** Autor

Para entender el rendimiento de la modulación OOK en señales moleculares se analiza el rendimiento de un solo pulso, para esto la concentración molecular se divide por cada uno de los intervalos de pulsos, debido a que la modulación presenta la activación de pulsos de acuerdo al bit que se envía. La componente de perturbación se encarga de variar la concentración según sea necesario, a medida que se envía cada uno de los bits de información esta componente activa o desactiva la señal.



**Figura 16.** Modulación OOK de la señal molecular

**Fuente:** Autor

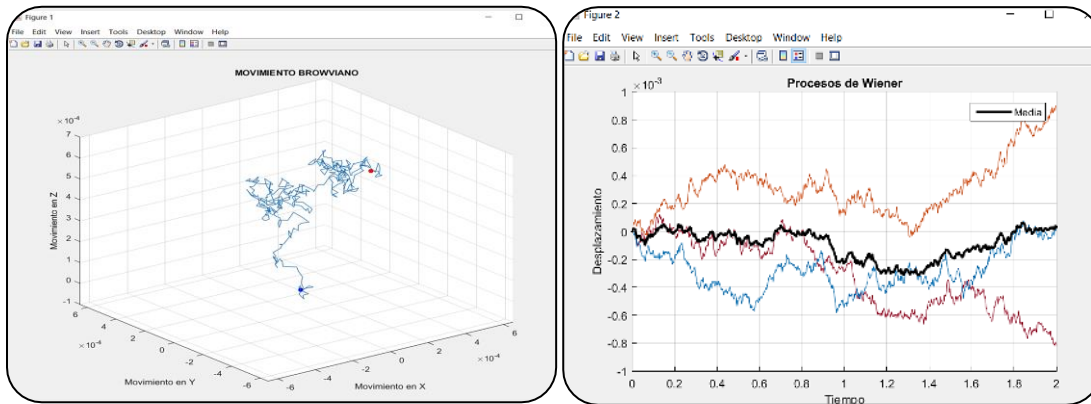
La figura (16) muestra las señales de salida de varios rangos de comunicación cuando el transmisor envía pulsos con un ancho de 100ms. Se puede notar que mientras más grande es la distancia existe menor concentración molecular. Cabe recalcar que se muestra una modulación ideal, es decir, se asume que cada intervalo de pulso es independiente del anterior, lo cual para un fin de análisis es conveniente, pero en la realidad es impreciso debido a que las moléculas de información al estar regidas con un movimiento browniano podrían permanecer en el medio por mucho más tiempo, esto podría llevar a tener un mayor nivel de ISI en cada bit.

### 3.7.2.3. CLASE MOTION

Esta clase implementa el componente de movimiento del módulo P1906, se implementa un modelo de propagación que se basa principalmente en (Llatser, Cabellos, Pierobon, & Alarcon, 2013), en el cual se presentan técnicas de detección para comunicaciones moleculares basada en la difusión ideal.

Este componente proporciona el servicio de movimiento para el portador del mensaje en cualquier dirección, ayuda a obtener el potencial necesario para transportar la información a través de un canal de comunicación.

El movimiento de cada una de las moléculas liberadas por el transmisor se modela mediante un movimiento browniano, que representa un movimiento libre en el espacio. En la simulación se toma la consideración de que no existe obstáculos entre el transmisor y el receptor, por lo tanto, el movimiento es ideal y no se ve afectado por otras entidades. Este movimiento browniano se puede modelar mediante un proceso de Wiener que sigue la notación de  $x \sim N(m, \sigma^2)$ .



**Figura 17.** *Movimiento en los tres ejes*

**Fuente:** *Autor*

En la figura (17) se muestra el movimiento que experimenta una sola molécula con un modelo de movilidad browniano además de los procesos de Wiener que contempla el movimiento, la señal naranja, azul, violeta corresponde al movimiento en el eje x, y, z respectivamente.

Cada vez que el transmisor necesita comunicar información libera un pulso de moléculas. Esto crea un pico de concentración molecular en la ubicación del transmisor que luego se propaga por todo el espacio. La propagación de este pulso se modela analíticamente

resolviendo las leyes de difusión de Fick (Llatser, Cabellos, Pierobon, & Alarcon, 2013) y viene dada por la siguiente ecuación:

$$c(r, t) = \frac{Q}{(4\pi Dt)^{3/2}} e^{-\frac{r^2}{4Dt}}, \quad (9)$$

donde

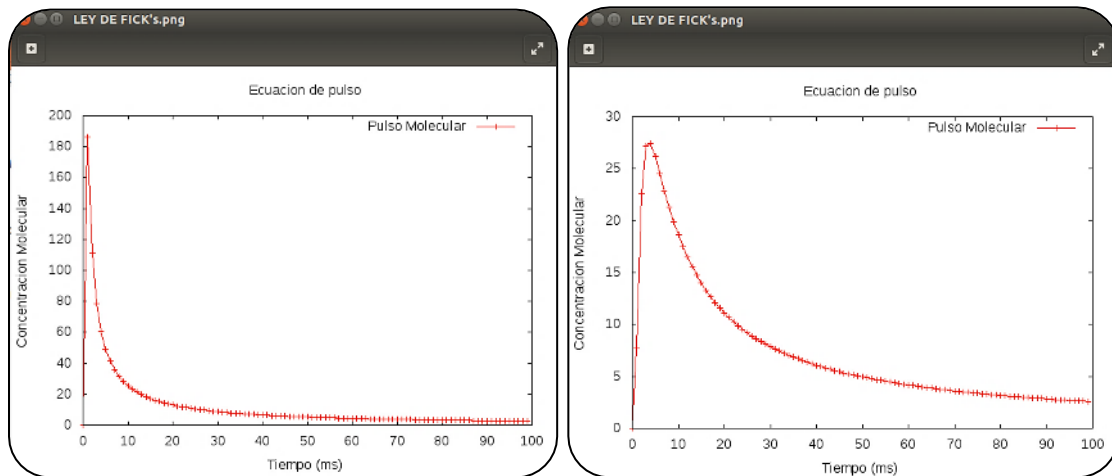
$D$  Es el coeficiente de difusión en el medio

$t$  Es el tiempo

$r$  Es la distancia desde el transmisor

$Q$  Es el número de moléculas

Esta ecuación conocida como ecuación de pulso, permite modelar métricas de MC en el módulo P1906 como el retardo, el ancho de pulso mínimo y la capacidad del canal.



**Figura 18.** Ecuación de pulso (distancia=0.1m, distancia=1m)

**Fuente:** Autor

En la figura (18) se observa la concentración molecular con respecto al tiempo en un medio libre. La componente de movimiento del módulo P1906 explota la ley de Fick para evaluar

el retraso de propagación en el medio. Este retraso se calcula el instante de tiempo en el cual el pulso alcanza su máximo valor y viene dado por la siguiente expresión:

$$t_d = \frac{r^2}{6D}, \quad (10)$$

donde

$r$  representa la distancia entre el transmisor y el receptor

$D$  representa el coeficiente de difusión

De la ecuación (10) se entiende que el retraso es inversamente proporcional al coeficiente de difusión, por lo tanto, mientras mayor sea el coeficiente de difusión más rápido se propagaran los pulsos moleculares.

Con la ayuda del módulo Mobility de NS3 se obtiene un movimiento basado en las propiedades estocásticas del movimiento y la ley de Fick para una concentración de moléculas, este a su vez calcula el retardo de la propagación por medio de modelos matemáticos y retorna el mensaje a través del medio.

#### **3.7.7.4. CLASE FIELD**

Este componente organiza a la componente de movimiento, es decir, guía al movimiento en una dirección. Haciendo una analogía con las comunicaciones EM, se consideraría que la componente de campo realiza la función de una guía de onda ya que el servicio que proporciona es la capacidad de dirigir un portador de mensajes a su destino.

La componente de campo del módulo P1906 implementado en esta investigación es nulo, por lo cual, el movimiento que realicen las moléculas no estará sesgado en una dirección

en concreto y en consecuencia la difusión de las moléculas de información será omnidireccional.

En el análisis teórico de la MC se encuentra una forma de sesgar el movimiento en una dirección, en la cual, las moléculas viajan a través de un nanotubo de carbono (CNT), este método se implementa en una versión no estandarizada de las MC, la cual no está contemplada en esta investigación, pero serviría para conocer más a profundidad esta componente en futuras investigaciones.

### **3.7.7.5. CLASE SPECIFICITY**

Esta clase implementa el componente de especificidad del módulo P1906 dedicada al ejemplo molecular, además proporciona el servicio de detección o recepción de un portador de mensaje.

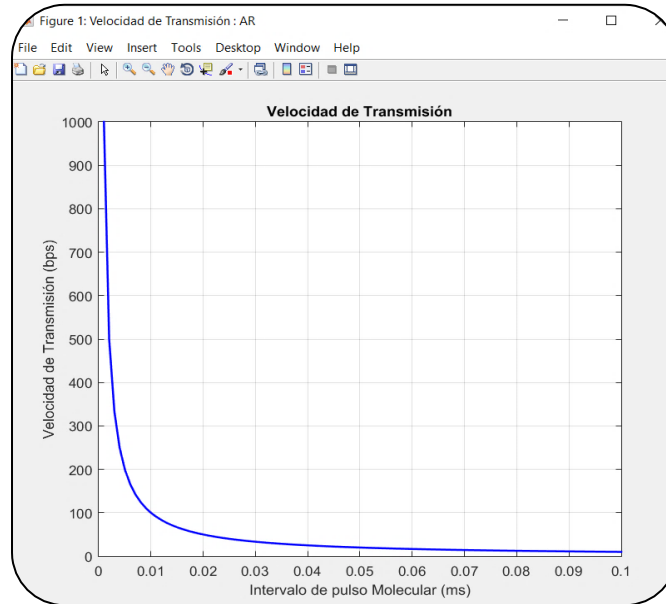
Esta clase en particular, verifica que la interfaz física pueda recibir e interpretar correctamente el mensaje transmitido, para este fin la clase hace uso del método `CheckRxCompatibility` que durante el proceso de recepción verifica la compatibilidad entre el portador de mensajes recibido y el receptor, retornando como resultado un dato booleano (verdadero o falso) en caso de que se respete la compatibilidad del transmisor y el receptor.

En el caso de que exista compatibilidad la componente de especificidad verifica que la capacidad del canal es mayor o igual a la velocidad de transmisión. La velocidad de transmisión se calcula como la inversa del intervalo de pulso molecular

$$v_t = \frac{1}{I_p}. \quad (11)$$



Así se concibe que mientras más grande sea el intervalo de pulso, menor será la velocidad de transmisión.



**Figura 19.** *Velocidad de transmisión*

**Fuente:** *Autor*

Con la velocidad de transmisión, la componente de especificidad calcula la capacidad del canal asumiendo el uso de un esquema de detección de amplitud de pulso, el cual tiene un impacto clave en la detección de las señales moleculares. Para calcular la capacidad del canal es importante conocer el ancho del pulso molecular, debido que este será la principal limitación en la velocidad de transmisión alcanzable. Este ancho de pulso lo analizamos en el intervalo de tiempo en el que el pulso tiene una amplitud mayor a la mitad de su valor máximo, es decir, se calcula a un nivel en el que la concentración molecular es del 50% de su máximo nivel. Para esto se toma la ecuación (9) de pulso y se despeja la variable  $t$ . Este procedimiento se puede realizar con la ayuda de la función solve en el software Wolfram Mathematica.

```

Despeje de t en ecuacion de pulso.nb * - Wolfram Mathematica 10.4
Archivo Edición Insertar Formato Celda Gráficos Evaluación Paletas Ventana Ayuda

In[20]= Solve[(q / (4 * Pi * d * t)^(3/2)) * E^(-((r^2) / (4 * d * t))) == c / 2, t]
Out[20]= {{t -> -\frac{r^2}{6 d \text{ProductLog}\left[\frac{(-2)^{1/3} e^{2/3} \pi r^2}{3 q^{2/3}}\right]}}}}

```

**Figura 20.** Obtención de variable del tiempo

**Fuente:** Autor

La función Productlog que se muestra en la figura (20) también se lo conoce como la función W de Lambert, esta se define como la inversa de  $f(w) = We^W$ , donde  $e^W$  es una función exponencial natural y  $W$  es cualquier número complejo. En consecuencia, la variable de tiempo se expresa como:

$$t = -\frac{r^2}{6DW\left(-\frac{1}{2^{2/3}e}\right)}, \quad (12)$$

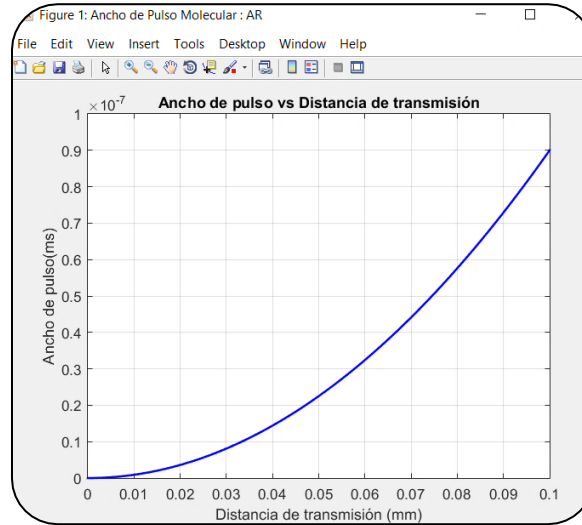
donde W es la función de Lambert, esta ecuación tiene dos soluciones en las que se toman los dos valores de tiempo en el cual la amplitud del pulso molecular es igual a la mitad de su valor máximo, los cuales son:

$$t_1 = \frac{0.0728 r^2}{D}, \quad t_2 = \frac{0.5229 r^2}{D}.$$

La resta de estas dos, nos permitirá conocer la expresión del ancho de pulso

$$t_a = t_2 - t_1 = \frac{0.4501 r^2}{D}. \quad (13)$$

De la ecuación (13) se puede deducir que el ancho de pulso es inversamente proporcional al coeficiente de difusión del medio.



**Figura 21.** Ancho de pulso vs Distancia de transmisión

**Fuente:** Autor

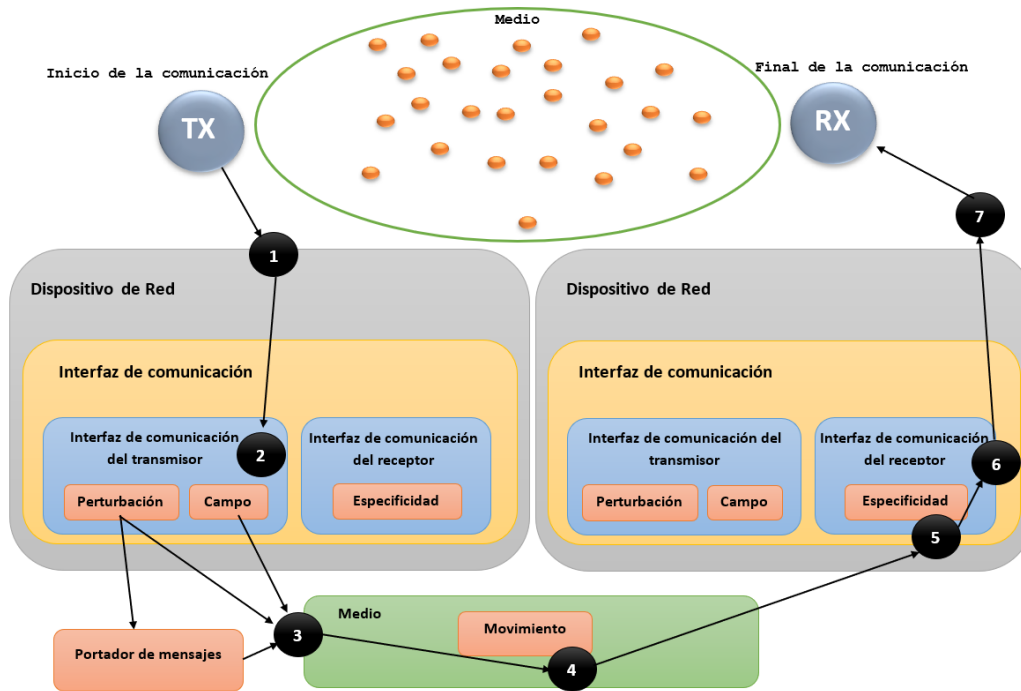
La inversa del ancho de pulso será igual a la capacidad máxima del canal soportado. Este valor se tomará para comprobar los límites de Fick en el medio. El modelo molecular del estándar P1906 envía un verdadero en caso de que el límite de Fick se cumpla y un falso si la capacidad del canal molecular es menor a la velocidad de trasmisión, por lo que, el límite de Fick no se respeta, en consecuencia, la comunicación falla. Esta comprobación ayuda al receptor a entender la compatibilidad del mensaje con su interfaz.

# CAPÍTULO IV

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se presenta y analiza los resultados obtenidos a partir de la implementación de la simulación del estándar IEEE 1906.1 para comunicaciones moleculares.

### 4.1. TOPOLOGÍA DE SIMULACIÓN



*Figura 22. Topología de la simulación*

*Fuente: Autor*

La topología implementada se muestra en la figura (22), esta utiliza una conexión punto a punto (PtP) en donde el medio por el cual se conectan los nanodispositivos no presenta ningún obstáculo ni agente externo que interfiera en la comunicación y en el cual según la componente de campo se realiza un movimiento omnidireccional de las señales moleculares. Gracias a esta topología es posible analizar métricas de rendimiento como la propagación del pulso molecular, el pulso de retardo en el medio, el ancho del pulso molecular, la velocidad de transmisión de los datos, la relación de señales moleculares

obtenidas y la capacidad del canal molecular. En esta topología se varían valores como el número de moléculas enviadas, intervalo del pulso, distancia entre nodos y coeficiente de difusión en las diferentes componentes del estándar, en consecuencia, las características que presentan estas componentes cambian de acuerdo a los valores ingresados.

## **4.2. OBTENCIÓN DE RESULTADOS**

Con la ayuda del software Matlab y Mathematica se analizan los resultados obtenidos de la simulación del estándar IEEE 1906.1, por medio de las librerías científicas (GSL) habilitadas en NS3 podemos exportar archivos con los resultados de la simulación y graficarlos.

Además, se implementan archivos con extensión .sh en los que se declaran un cierto número de comandos que permiten insertar valores por defecto en la simulación y en consecuencia comparar los resultados obtenidos.

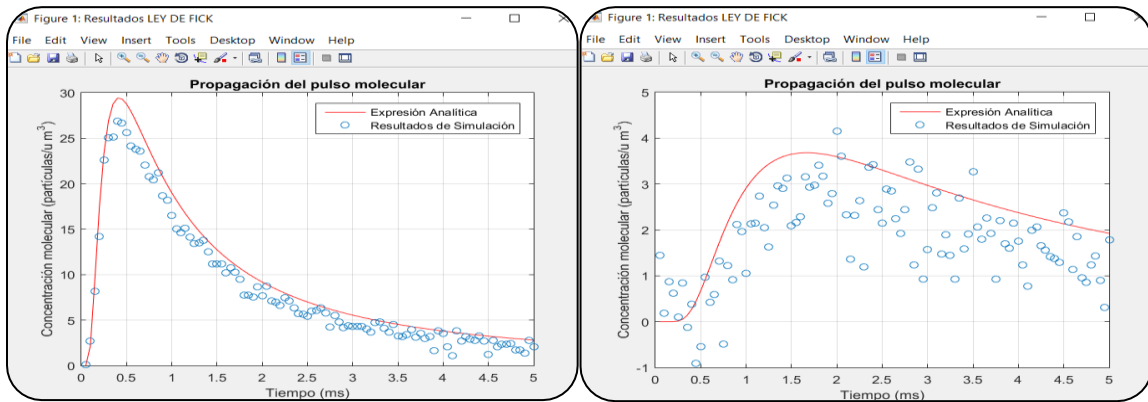
## **4.3. RENDIMIENTO DE LA COMUNICACIÓN**

Cuando se habla del rendimiento de una comunicación se deben analizar cada uno de los elementos que intervienen para que esa comunicación sea factible. Estos elementos concebidos como componentes de una MC muestran resultados que pueden demostrar los alcances de este tipo de comunicación. A continuación, se muestran resultados obtenidos a partir de la simulación molecular del estándar IEEE 1906.1.

## **4.4. PROPAGACIÓN DEL PULSO MOLECULAR**

La propagación del pulso obtenida a partir de las leyes de Fick tiene un impacto importante en el rendimiento de la comunicación molecular, como se muestra en la ecuación (9) esta propagación depende de varios parámetros para los cuales la alteración de uno, resultaría en un cambio importante en el rendimiento de la comunicación.

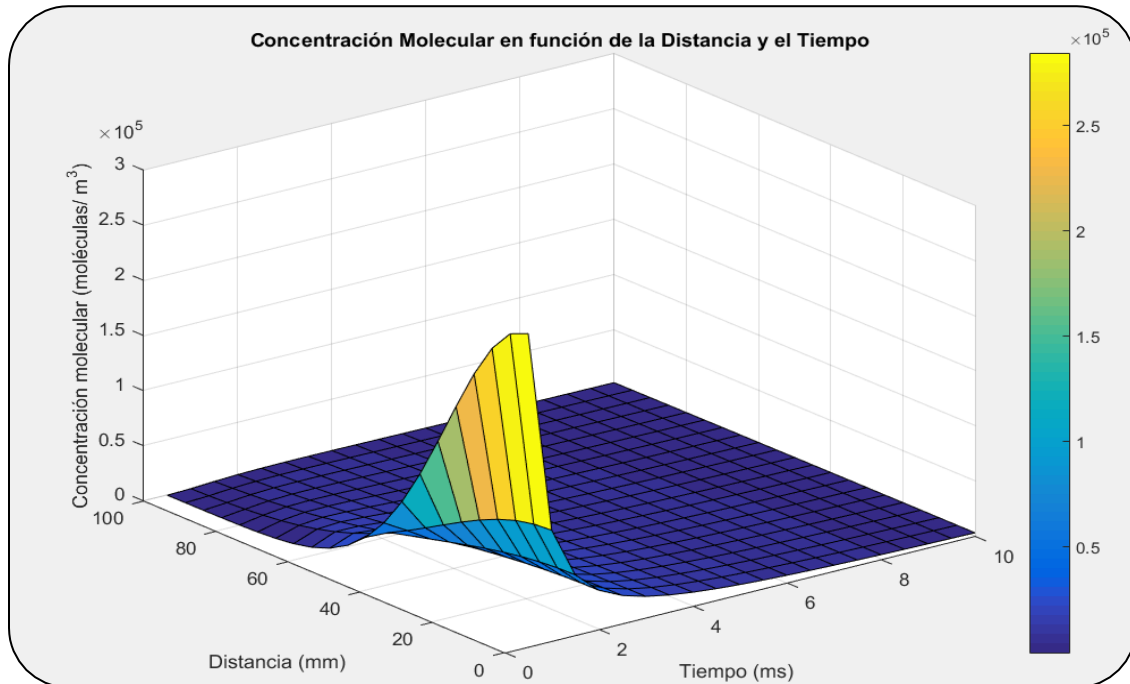
Uno de los parámetros más importantes en lo que a comunicación molecular se refiere, es la distancia a la cual están colocados los nodos TX y RX. Esto debido que a una mayor distancia entre nodos podría derivar en un problema de rendimiento en la comunicación, debido a lo que se conoce como ruido de difusión. Para poder obtener un análisis del comportamiento de la propagación se modificó la distancia entre los nodos, esto permite conocer la distancia máxima a la cual una MC con características concebidas como el intervalo del pulso, el número de moléculas y el coeficiente de difusión (valores descritos en la sección 3.7) puede tener éxito.



**Figura 23.** Resultado del Pulso molecular en función del tiempo obtenido a partir de la simulación en NS3.

**Fuente:** Autor

En la figura (23) se muestra el resultado de la expresión analítica y el resultado de la simulación del pulso molecular obtenido. Se puede notar que en el resultado existe pérdidas en la propagación del pulso molecular, esto es debido al ruido de difusión que se presenta como consecuencia de la naturaleza estocástica del movimiento browniano, este ruido es más evidente a manera que los nodos se alejan entre ellos, afectando así el rendimiento de la comunicación. Esto demuestra que enfoques deterministas como el uso de la ley de Fick pueden dar resultados engañosos.



**Figura 24.** Concentración molecular en función de la distancia y el tiempo obtenido de la simulación.

**Fuente:** Autor

Las leyes de Fick permiten conocer los valores mínimos a los cuales un nodo TX puede estar distanciado del nodo RX y que este no presente fallos en la detección de las señales moleculares, por ejemplo, se demuestra que la comunicación molecular en la que su nodo receptor tiene un esquema de detección de concentración molecular, puede ser satisfactoria dependiendo sus parámetros. Así para un nodo RX ubicado a una gran distancia del nodo TX la concentración molecular no sobrepasará el umbral determinado y en consecuencia no se recibirá el mensaje. En la figura (24) se muestra la concentración molecular que se obtiene en la simulación, como esta se basa en una difusión ideal en el medio de propagación cada una de las moléculas liberadas tiene la misma probabilidad de dar el siguiente paso hacia la derecha o hacia la izquierda desde su posición anterior.

**Tabla 11.** Valores de concentración obtenidos en la simulación a diferentes distancias y dos valores de coeficiente de difusión

**Fuente:** Autor

Simulación	Distancia entre nodos (m)	Coefficiente de difusión	Concentración molecular (Simulación)	Concentración molecular (Analítica)
<b>10</b>	0.00909	1nm <sup>2</sup> /ns	3.6891e+03	3.7180e+03
<b>20</b>	0.01919	1nm <sup>2</sup> /ns	1.1960e+03	1.2120e+03
<b>30</b>	0.02929	1nm <sup>2</sup> /ns	6.2939e+02	6.4274e+02
<b>40</b>	0.03939	1nm <sup>2</sup> /ns	4.0327e+02	4.1211e+02
<b>50</b>	0.04949	1nm <sup>2</sup> /ns	2.8440e+02	2.9261e+02
<b>60</b>	0.00909	10nm <sup>2</sup> /ns	1.1195e+02	1.1758e+02
<b>70</b>	0.01919	10nm <sup>2</sup> /ns	34.7484	38.3324
<b>80</b>	0.02929	10nm <sup>2</sup> /ns	18.4471	20.3280
<b>90</b>	0.03939	10nm <sup>2</sup> /ns	10.1928	13.0345
<b>100</b>	0.04949	10nm <sup>2</sup> /ns	6.33073	9.25540

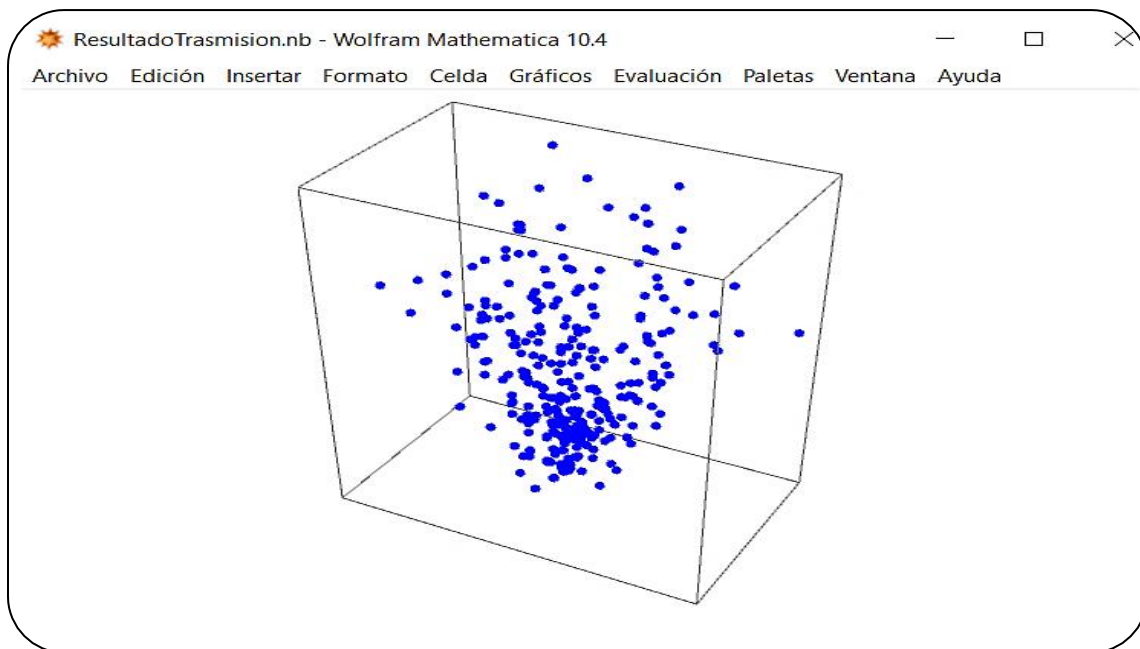
La tabla (11) muestra valores obtenidos de concentración en base a la modificación de parámetros como la distancia entre los nodos y el coeficiente de difusión. Al compara la simulación con los mismos valores de distancia entre nodos y diferentes valores de coeficiente de difusión se nota que mientras más grande sea el coeficiente de difusión, menor concentración molecular existirá.

De acuerdo a los resultados obtenidos se entiende que el valor máximo de distancia entre los nodos en el cual la comunicación es fiable dependerá del coeficiente de difusión del medio, así las moléculas permanecen más tiempo en el canal de comunicación lo que podría ayudar a que nodos ubicados a mayores distancias sean capaces de detectar un determinado umbral de concentración molecular. Esto siempre que exista una relación entre el coeficiente de difusión y los intervalos de pulso, debido que si una señal se difunde con una velocidad en la cual el nodo receptor no es capaz de capturar la concentración



molecular en ese intervalo podría afectar al símbolo transmitido. En base a la figura (24) se puede decir que:

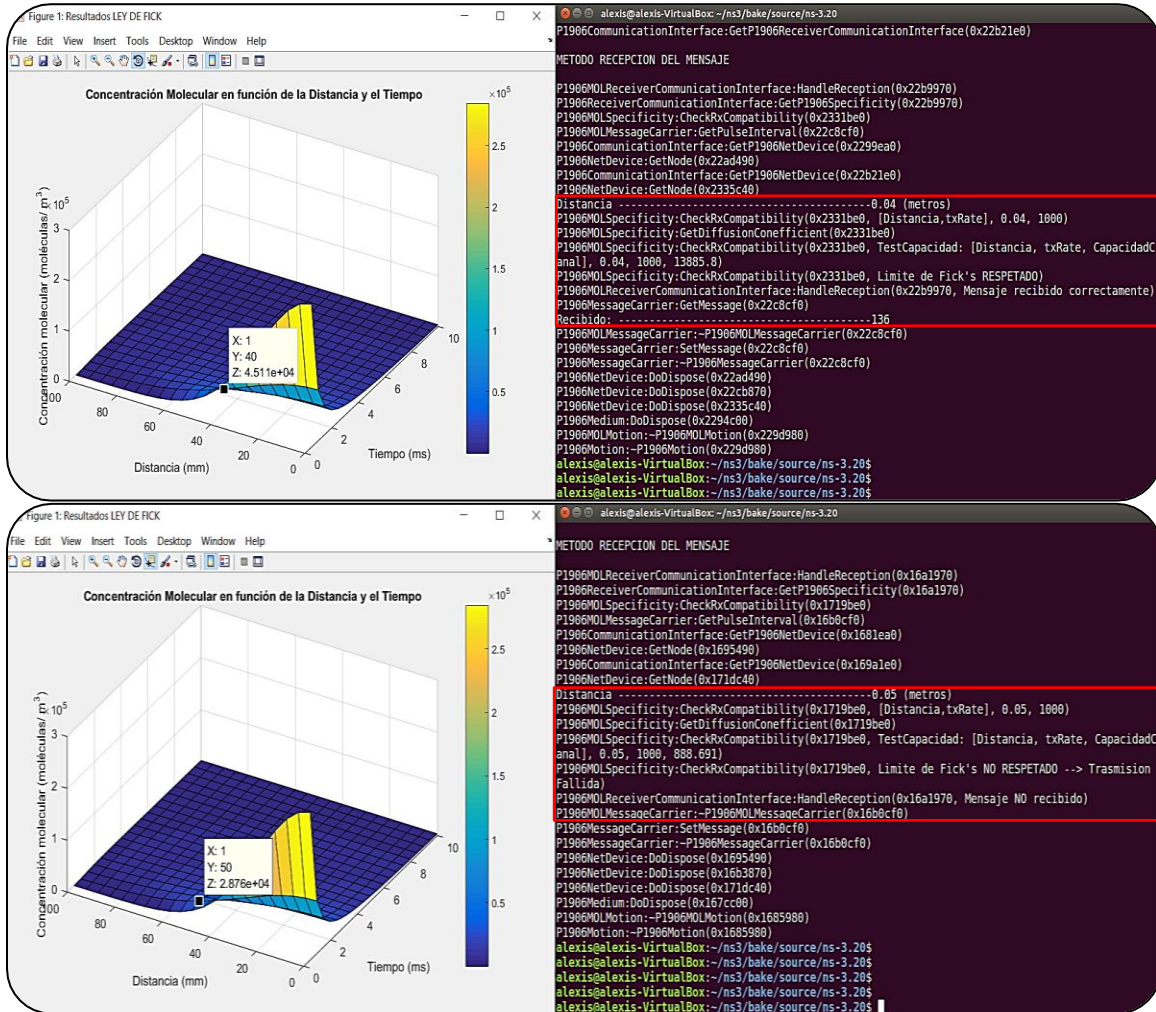
- En cuanto mayor sea la distancia entre los nodos, la concentración molecular será menor.
- El tiempo en el cual la concentración molecular se desvanece depende del coeficiente de difusión.
- Mientras mayor sea el coeficiente de difusión más rápido se transmitirá el pulso molecular y por lo tanto menor será el tiempo de detección en el receptor.



**Figura 25.** *Movimiento de las moléculas en el medio obtenido de la simulación por medio de las librerías GSL y exportadas a Mathematica*

**Fuente:** Autor

En la simulación se hace uso de la modulación OOK para la transmisión de información, esta se implementa gracias a la componente de perturbación que encapsula en la señal portadora las características de una señal modulada por amplitud, en consecuencia, el umbral de detección de receptor comprueba que se determine la concentración molecular y decidir si recibió el bit-1 o el bit-0 de acuerdo a los tiempos de intervalos de cada bit.



**Figura 26.** Resultados por consola y gráficos de la comunicación a diferentes distancias (a) 0.04m (superior) y (b) 0.05m (inferior).

**Fuente:** Autor

Como se puede observar en la figura (27) se envió información a diferentes distancias en (a) se ve que la comunicación fue satisfactoria debido a que se cumplió con los límites propuestos en el umbral de concentración molecular y en (b) la cantidad de moléculas que captura el RX no es suficiente como para cumplir con el umbral de concentración, en consecuencia, la transmisión falla y no se recibe el mensaje.

El umbral de recepción del mensaje se determina en base a la capacidad del canal y a la velocidad de trasmisión de la señal molecular, de este proceso de encarga la componente

de especificidad de quien depende que la señal sea detectada solo si el límite de Fick se cumple.

**Tabla 12.** Condicionales de la componente de especificidad para determinar la compatibilidad entre TX y RX

*Fuente:* Autor

Evento	Descripción	Resultado
<b>Capacidad del canal mayor o igual a la Velocidad de transmisión</b>	Este evento se genera cuando el número de moléculas que ingresan al receptor respeta los límites propuestos por la ley de Fick.	El método que se encarga de chequear la compatibilidad del receptor envía un dato booleano (true) para que el mensaje pase a capas superiores y pueda ser mostrado.
<b>Capacidad del canal menor a la Velocidad de transmisión</b>	Este es el resultado de tener un canal sobresaturado de moléculas que impiden que el receptor identifique correctamente un bit.	El método que se encarga de chequear la compatibilidad del receptor envía un dato booleano (false), de modo que los límites de Fick no se respetan y por tanto la comunicación falla.

En la tabla (11) se muestran los resultados de los eventos que determinan el umbral de recepción. De estos eventos depende la recepción de la información por medio del nodo receptor.

## 4.5. PULSO DE RETARDO

En la simulación existen métricas importantes que han sido implementadas para conocer el rendimiento de la comunicación. Una de estas métricas es el pulso de retardo entre el transmisor y el receptor en base a las señales moleculares. Para análisis de este retraso se hace uso de la ecuación (10) que fue implementada en la componente de movimiento del estándar IEEE 1906.

Este retardo en el pulso de transmisión se mide por cada distancia a la cual se coloca el nodo receptor, por lo que el resultado de cada una de las distancias nos permitió conocer cómo afecta este retardo en la comunicación.

Para obtener estos resultados se ejecutan archivos (.sh), los cuales ayudan a realizar varias simulaciones y capturar los valores deseados, en este caso el pulso de retardo.

```

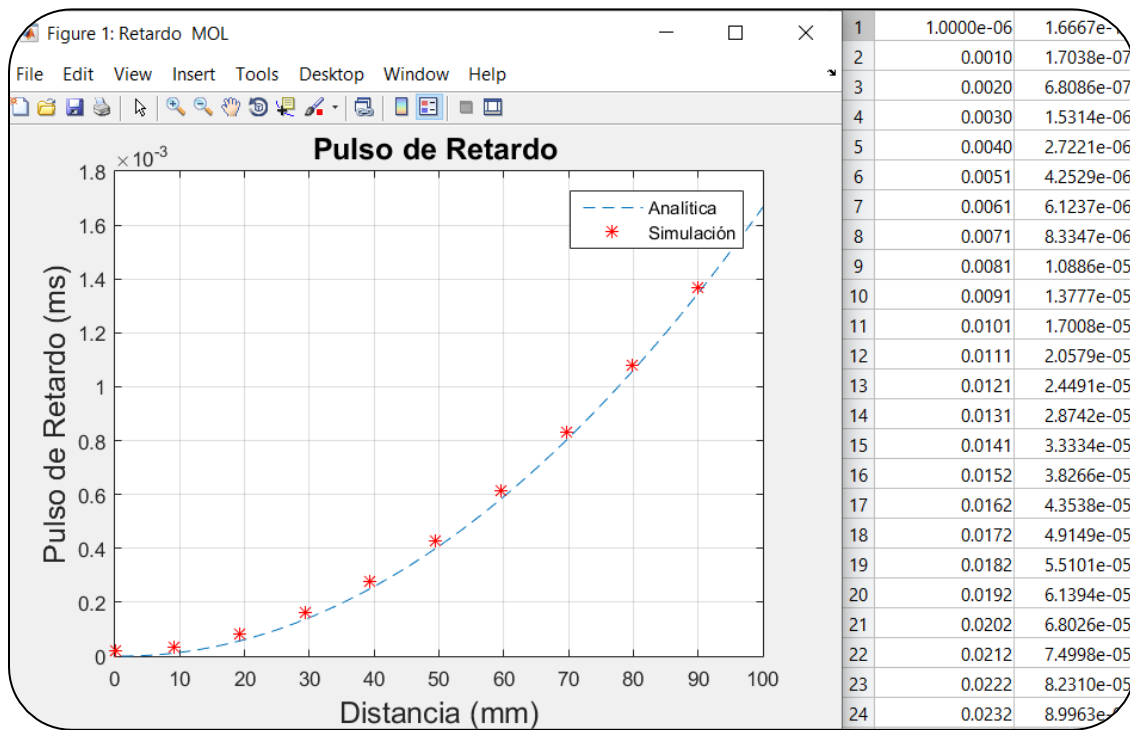
for nodeDistance in 1.000000000000000e-06 0.00101109090909091 0.00202118181818182
0.00707163636363637 0.00808172727272727 0.00909181818181818 0.0101019090909091
0.0151523636363636 0.0161624545454545 0.0171725454545455 0.0181826363636364
0.0232330909090909 0.0242431818181818 0.0252532727272727 0.0262633636363636
0.0313138181818182 0.0323239090909091 0.0333340000000000 0.0343440909090909
0.0393945454545455 0.0404046363636364 0.0414147272727273 0.0424248181818182
0.0474752727272727 0.0484853636363636 0.0494954545454546 0.0505055454545455
0.0555560000000000 0.0565660909090909 0.0575761818181818 0.0585862727272727
0.0636367272727273 0.0646468181818182 0.0656569090909091 0.0666670000000000
0.0717174545454546 0.0727275454545455 0.0737376363636364 0.0747477272727273
0.0797981818181818 0.0808082727272727 0.0818183636363636 0.0828284545454546
0.0878789090909091 0.0888890000000000 0.0898990909090909 0.0909091818181818
0.0959596363636364 0.0969697272727273 0.0979798181818182 0.100000000000000

do
    Directorio/ Archivo de simulacion
    Variable a
    modificar
    ./waf --run "scratch/MolecularSim --nodeDistance=${nodeDistance}" &> tmp_out
    grep PulsoDeRetardo tmp_out | awk '{print $5, $6}' > tmp_select
    sed 's/,/ /g' tmp_select > tmp_select2
    mv tmp_select2 tmp_select
    sed 's/)/ /g' tmp_select > tmp_select2
    mv tmp_select2 tmp_select
    cat tmp_select >> ResultadoRetardoPulso
    rm tmp_*
  
```

Figura 27. Archivo (.sh) para obtención de resultados

Fuente: Autor

La figura (27) muestra el archivo .sh que ejecuta por medio de un ciclo for, 100 veces la simulación con un valor de distancia entre los nodos TX y RX que va desde 0m a 0.1m.



**Figura 28.** Pulso de retardo obtenido de la simulación con rango de comunicación entre 0m a 0.1m

**Fuente:** Autor

La figura (28) muestra el resultado del retraso de pulso obtenido a partir de la simulación molecular en donde se transmitió un pulso de 50000 moléculas con un coeficiente de difusión igual a  $1\text{nm}^2/\text{ns}$ . Este resultado se comparó con la expresión analítica que se implementa en la componente de movimiento del estándar, comprobando su validez.

**Tabla 13.** Valores de Pulso de retardo obtenidos a diferentes distancias

**Fuente:** Autor

Simulación	Distancia entre nodos (m)	Pulso de retardo (s)
10	0.00909	1.37769e-05
20	0.01919	6.13935e-05
30	0.02929	1.43020e-04
40	0.03939	2.58655e-04
50	0.04949	4.08300e-04

<b>60</b>	0.05959	5.91954e-04
<b>70</b>	0.06969	8.09618e-04
<b>80</b>	0.07979	0.00106129
<b>90</b>	0.08989	0.00134697
<b>100</b>	0.10000	0.00166667

En la tabla (13) se muestra algunos valores ingresados por medio del archivo .sh para el parámetro de distancia entre nodos y el resultado del pulso de retardo obtenido para esas distancias. Bajo términos de rendimiento, un retardo en el pulso tiende a ser un problema en cualquier comunicación es por ello que analizando los datos obtenidos se observa que a manera que la distancia entre el transmisor y el receptor se incrementa el pulso de retardo es mayor y por tanto más tiempo le tomara al pulso molecular propagarse a través del medio hacia el receptor dando como resultado el fallo en la detección de la señal molecular.

Al conocer que este retraso es inversamente proporcional al coeficiente de difusión basta con aumentar el valor del coeficiente para que el pulso molecular se propague más rápido por el medio y en consecuencia se pueda detectar información a distancias más grandes.

```

METODO RECEPCION DEL MENSAJE                               Receptor 1
P1906MOLReceiverCommunicationInterface:HandleReception(0x19e6970)
P1906ReceiverCommunicationInterface:GetP1906Specificity(0x19e6970)
P1906MOLSpecificity:CheckRxCompatibility(0x1a5ebe0)
P1906MOLMessageCarrier:GetPulseInterval(0x19f5cf0)
P1906CommunicationInterface:GetP1906NetDevice(0x19c6ea0)
P1906NetDevice:GetNode(0x19da490)
P1906CommunicationInterface:GetP1906NetDevice(0x19df1e0)
P1906NetDevice:GetNode(0x1a62c40)
Distancia -----0.04 (metros)
P1906MOLSpecificity:CheckRxCompatibility(0x1a5ebe0, [Distancia,txRate], 0.04, 1000)
P1906MOLSpecificity:GetDiffusionCoefficient(0x1a5ebe0)
P1906MOLSpecificity:CheckRxCompatibility(0x1a5ebe0, TestCapacidad: [Distancia, txRate, CapacidadCanal], 0.04, 1000, 1388.58)
P1906MOLSpecificity:CheckRxCompatibility(0x1a5ebe0, Limite de Fick's RESPETADO)
P1906MOLReceiverCommunicationInterface:HandleReception(0x19e6970, Mensaje recibido correctamente) ← Comprobacion del
P1906MessageCarrier:GetMessage(0x19f5cf0)                  mensaje
Recibido: -----128
P1906Medium:HandleReception(0x19c1c00)
P1906CommunicationInterface:GetP1906ReceiverCommunicationInterface(0x19db0a0)

METODO RECEPCION DEL MENSAJE                               Receptor 2
P1906MOLReceiverCommunicationInterface:HandleReception(0x19d94c0)
P1906ReceiverCommunicationInterface:GetP1906Specificity(0x19d94c0)
P1906MOLSpecificity:CheckRxCompatibility(0x1a4ab70)
P1906MOLMessageCarrier:GetPulseInterval(0x19f5cf0)
P1906CommunicationInterface:GetP1906NetDevice(0x19c6ea0)
P1906NetDevice:GetNode(0x19da490)
P1906CommunicationInterface:GetP1906NetDevice(0x19db0a0)
P1906NetDevice:GetNode(0x19f8870)
Distancia -----0.1 (metros)
P1906MOLSpecificity:CheckRxCompatibility(0x1a4ab70, [Distancia,txRate], 0.1, 1000)
P1906MOLSpecificity:GetDiffusionCoefficient(0x1a4ab70)
P1906MOLSpecificity:CheckRxCompatibility(0x1a4ab70, TestCapacidad: [Distancia, txRate, CapacidadCanal], 0.1, 1000, 222.173)
P1906MOLSpecificity:CheckRxCompatibility(0x1a4ab70, Limite de Fick's NO RESPETADO --> Trasmision Fallida) ← Fallo de
P1906MOLReceiverCommunicationInterface:HandleReception(0x19d94c0, Mensaje NO recibido)  recepcion

```

**Figura 29.** Envió de un mensaje a dos nanoreceptores ubicados a diferentes distancias con un coeficiente de difusión igual a  $1 \text{ nm}^2/\text{ns}$ .

**Fuente:** Autor



En la figura (29) se muestra el envío de señales moleculares hacia nanoreceptores ubicados a 0.04 metros y 0.1 metros con un coeficiente de difusión de  $1\text{nm}^2/\text{ns}$ .

**Tabla 14.** Pulso de retardo obtenido a la distancia de 0.04m y 0.1m

*Fuente: Autor*

Simulación	Distancia entre nodos (m)	Coefficiente de difusión	Pulso de retardo (s)	Detección de señal en el receptor
1	0.04	$1\text{nm}^2/\text{ns}$	2.720890e-04	Si
2	0.1	$1\text{nm}^2/\text{ns}$	0.001666670	No

En la (14) se muestra el resultado del experimento a diferentes distancias con un mismo valor de coeficiente de difusión. el mensaje es recibido correctamente por el nanoreceptor a una distancia de 0.04 metros y a una distancia de 0.1 metros el mensaje no es recibido debido que la concentración molecular en ese nanoreceptor no supera el umbral propuesto por el límite de Fick, esto debido que el coeficiente de difusión no permitió que esas señales se propaguen por el medio con mayor rapidez para que el receptor ubicado a mayor distancia pueda ser capaz de detectar su umbral de concentración.

```

METODO RECEPCION DEL MENSAJE
Receptor 1
P1906MOLReceiverCommunicationInterface:HandleReception(0x21d4970)
P1906ReceiverCommunicationInterface:GetP1906Specificity(0x21d4970)
P1906MOLSpecificity:CheckRxCompatibility(0x224cbe0)
P1906MOLMessageCarrier:GetPulseInterval(0x21e3cf0)
P1906CommunicationInterface:GetP1906NetDevice(0x21b4ea0)
P1906NetDevice:GetNode(0x21c8490)
P1906CommunicationInterface:GetP1906NetDevice(0x21cd1e0)
P1906NetDevice:GetNode(0x2250c40)
Distancia -----0.04 (metros)
P1906MOLSpecificity:CheckRxCompatibility(0x224cbe0, [Distancia,txRate], 0.04, 1000)
P1906MOLSpecificity:GetDiffusionCoefficient(0x224cbe0)
P1906MOLSpecificity:CheckRxCompatibility(0x224cbe0, TestCapacidad: [Distancia, txRate, CapacidadCanal], 0.04, 1000, 13885.8)
P1906MOLSpecificity:CheckRxCompatibility(0x224cbe0, Limite de Fick's RESPETADO)
P1906MOLReceiverCommunicationInterface:HandleReception(0x21d4970, Mensaje recibido correctamente)
P1906MessageCarrier:GetMessage(0x21e3cf0)
Recibido: -----128
P1906MOLReceiverCommunicationInterface:HandleReception(0x21d4970)
P1906CommunicationInterface:GetP1906ReceiverCommunicationInterface(0x21c90a0)

METODO RECEPCION DEL MENSAJE
Receptor 2
P1906MOLReceiverCommunicationInterface:HandleReception(0x21c74c0)
P1906ReceiverCommunicationInterface:GetP1906Specificity(0x21c74c0)
P1906MOLSpecificity:CheckRxCompatibility(0x2238b70)
P1906MOLMessageCarrier:GetPulseInterval(0x21e3cf0)
P1906CommunicationInterface:GetP1906NetDevice(0x21b4ea0)
P1906NetDevice:GetNode(0x21c8490)
P1906CommunicationInterface:GetP1906NetDevice(0x21c90a0)
P1906NetDevice:GetNode(0x21e6870)
Distancia -----0.1 (metros)
P1906MOLSpecificity:CheckRxCompatibility(0x2238b70, [Distancia,txRate], 0.1, 1000)
P1906MOLSpecificity:GetDiffusionCoefficient(0x2238b70)
P1906MOLSpecificity:CheckRxCompatibility(0x2238b70, TestCapacidad: [Distancia, txRate, CapacidadCanal], 0.1, 1000, 2221.73)
P1906MOLSpecificity:CheckRxCompatibility(0x2238b70, Limite de Fick's RESPETADO)
P1906MOLReceiverCommunicationInterface:HandleReception(0x21c74c0, Mensaje recibido correctamente)
P1906MessageCarrier:GetMessage(0x21e3cf0)
Recibido: -----128
  
```

**Figura 30.** Envío de un mensaje a dos nanoreceptores ubicados a diferentes distancias con un coeficiente de difusión igual a  $10\text{nm}^2/\text{ns}$ .

*Fuente: Autor*

En la figura (30) se comprueba que el mensaje es recibido por los dos nanoreceptores una vez que el coeficiente de difusión aumento, debido que el pulso molecular se difundió por el medio con una mayor rapidez y en consecuencia el nanoreceptor ubicado a 0.1 metros es capaz de detectar el pulso molecular que se envió debido que el pulso de retardo es más pequeño, esto se detalla en la tabla 15.

**Tabla 15.** Pulso de retardo obtenido a la distancia de 0.04m y 0.1m y un coeficiente de difusión mayor

**Fuente:** Autor

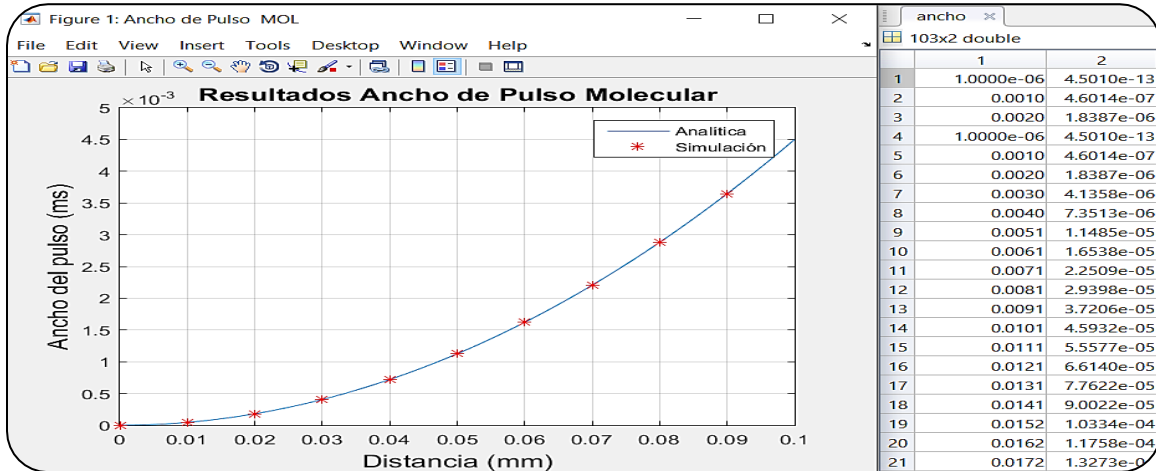
Simulación	Distancia entre nodos (m)	Coefficiente de difusión	Pulso de retardo (s)	Detección de señal
1	0.04	10nm <sup>2</sup> /ns	2.720890e-05	Si
2	0.1	10nm <sup>2</sup> /ns	0.0001666670	Si

#### 4.6. ANCHO DEL PULSO MOLECULAR Y VELOCIDAD DE TRANSMISIÓN DE DATOS

El ancho del pulso molecular es muy importante en esta simulación, debido que nos indica las velocidades de transmisión que se puede alcanzar por la comunicación. Uno de los objetivos que tiene una MC es tener la tasa de datos más alta posible entre el nanotransmisor y el nanoreceptor, esta velocidad de transmisión se relaciona con la duración de los símbolos transmitidos es decir el ancho del pulso molecular que se transmite por cada símbolo.

Este ancho de pulso se obtiene en la componente de especificidad y es la que nos permite conocer la capacidad de canal molecular, para el análisis de esta métrica se hace uso de la ecuación (13).

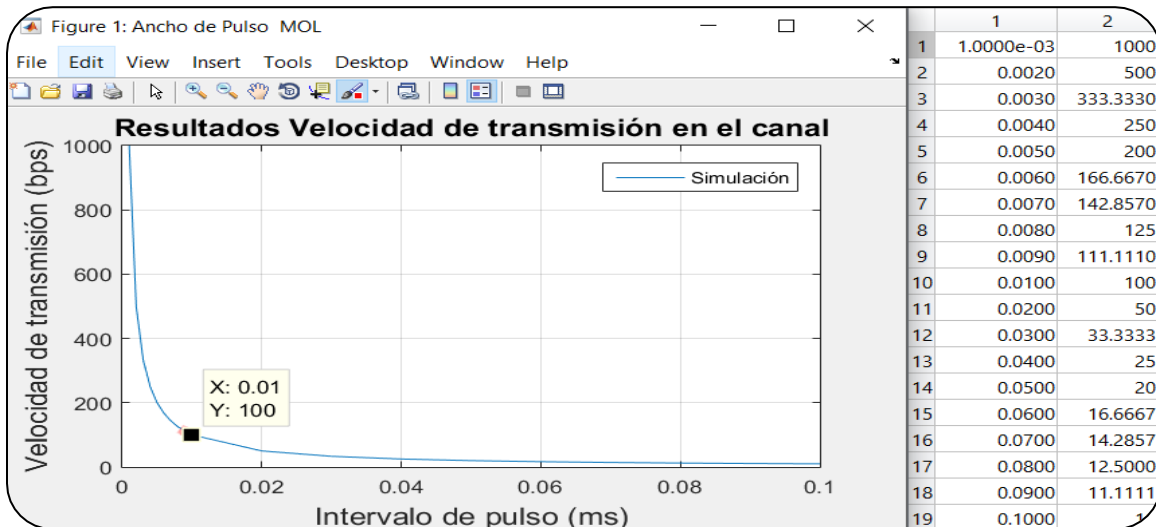




**Figura 31.** Ancho de pulso molecular obtenido en la simulación para 100 realizaciones a diferentes distancias

**Fuente:** Autor

La figura (31) muestra los resultados del ancho de pulso en función de la distancia de trasmisión obtenidos a partir de la simulación, estos resultados se validaron con la expresión analítica, se observa que los valores obtenidos en la simulación y de la ecuación analítica son parecidos por lo cual se confirma su validez.



**Figura 32.** Resultados obtenidos de la velocidad de transmisión en el canal molecular

**Fuente:** Autor

En la figura (32) se observa el resultado de la velocidad de transmisión en el canal molecular cuando se hace uso de diferentes valores de intervalos de pulso ( $Q(t)$ ). Los valores de la velocidad alcanzable de información entre un TX y RX según investigaciones realizadas por la comunidad científica son una cuestión abierta debido que estos dependen del sistema particular bajo investigación.

**Tabla 16.** Velocidad de transmisión obtenida para diferentes valores de intervalo de pulso

*Fuente:* Autor

Simulación	Intervalo de pulso (ms)	Velocidad de transmisión (bps)
1	0.001	1000
2	0.002	500
3	0.003	333.333
4	0.004	250
5	0.005	200
6	0.006	166.667
7	0.007	142.857
8	0.008	125
9	0.009	111.111
10	0.010	100

Para el escenario molecular implementado en esta investigación los resultados que se muestran en la tabla (16) reflejan que mientras el intervalo de pulso aumenta las respuestas a la velocidad máxima soportada por el enlace o canal molecular es negativa y por lo tanto el desvanecimiento de las señales moleculares es más evidente, esto tiene mucho que ver con las características propias de un sistema de difusión macroscópico que nos aporta la naturaleza de la ley de Fick.

#### 4.7. RELACIÓN DE SEÑALES

Se tiene un esquema de difusión implementado en la simulación, en consecuencia, el modelo del canal está basado en la ecuación de difusión continua. Para estos canales las moléculas se mueven al azar, esto podría generar ISI. Con el fin de reducir este efecto de

pérdida se utilizan tiempos de duración de cada símbolo. En el caso de la simulación se añaden intervalos de pulso que nos indican el tiempo en el cual un símbolo es transmitido para que el siguiente no presente fallos de lectura. Como resultado, un mensaje de 1 byte de información constará de 8 pulsos de 0.001 segundos y por lo tanto para transmitir el mensaje, la componente del portador indicará el tiempo de duración de ese mensaje en 0.008 segundos.

```

METODO CREACION DE LA PORTADORA Y PERTURBACION
P1906MOLPerturbatton:CreateMessageCarrier(0x2236a20)
P1906MessageCarrier:P1906MessageCarrier(0x2254cf0)
P1906MOLMessageCarrier:P1906MOLMessageCarrier(0x2254cf0)
P1906MessageCarrier:SetMessage(0x2254cf0)
P1906MOLPerturbatton:CreateMessageCarrier(0x2236a20, [Tiempo,Bits,IntervaloPulso,Duracion], 0, 8, +1000000.0ns, 0.008)
P1906MOLMessageCarrier:SetPulseInterval(0x2254cf0, +1000000.0ns)
P1906MOLMessageCarrier:SetDuration(0x2254cf0, +8000000.0ns)
P1906MOLMessageCarrier:SetStartTime(0x2254cf0, +0.0ns)
P1906MOLPerturbatton:GetMolecules(0x2236a20)
P1906MOLMessageCarrier:SetMolecules(0x2254cf0, 50000)
P1906MessageCarrier:SetMessage(0x2254cf0)
P1906TransmitterCommunicationInterface:GetP1906Medium(0x222abd0)
P1906Medium:HandleTransmsion(0x2220c00)
    
```

**Figura 33.** Componente de perturbación creando la componente portadora del mensaje

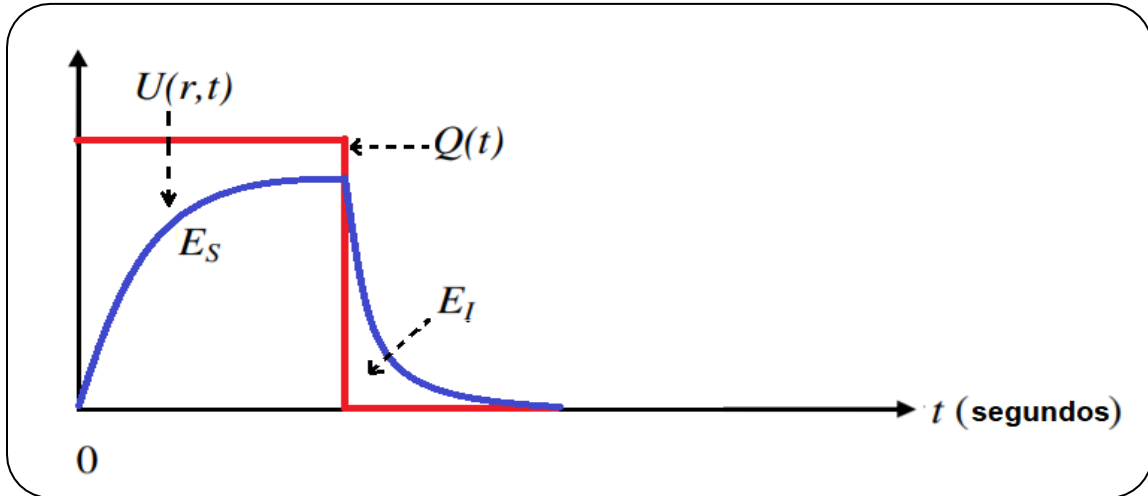
**Fuente:** Autor

Los impedimentos más importantes de la componente de perturbación en base a la modulación OOK son las moléculas residuales que se mantienen en el medio durante más tiempo del que le corresponde a un solo bit, este problema es evidente cuando el coeficiente de difusión es bajo y en conclusión las moléculas interfieren en la detección del siguiente bit.

Como se observa en la figura (33) el TX libera moléculas a una tasa fija de 50000 moléculas por cada 0.001 segundos en base a la secuencia de bits que se envió. La componente de perturbación implementa una modulación OOK en la señal portadora del mensaje, por lo tanto, para medir el rendimiento de esta señal se analiza la relación de intensidad de señal deseada ( $E_S$ ) y la intensidad de interferencia recibida ( $E_I$ ).

$$E_S = \int_0^{T_{obs}} S_{out}(t) dt \quad E_I = \int_0^{T_{obs}} i(t) dt \quad (14)$$

Las señales  $S_{out}(t)$  e  $i(t)$  corresponden a la señal de salida del transmisor y a la señal de interferencia captado por el receptor respectivamente.



**Figura 34.** Vista general de la relación de señales en una MC.

**Fuente:** Autor

El  $T_{obs}$  (tiempo de observación) es igual al número total de bits a transmitir multiplicado por la duración del bit, como se muestra en la figura (34) el  $T_{obs}$  configurado en el portador del mensaje será igual a 8000000 ns.

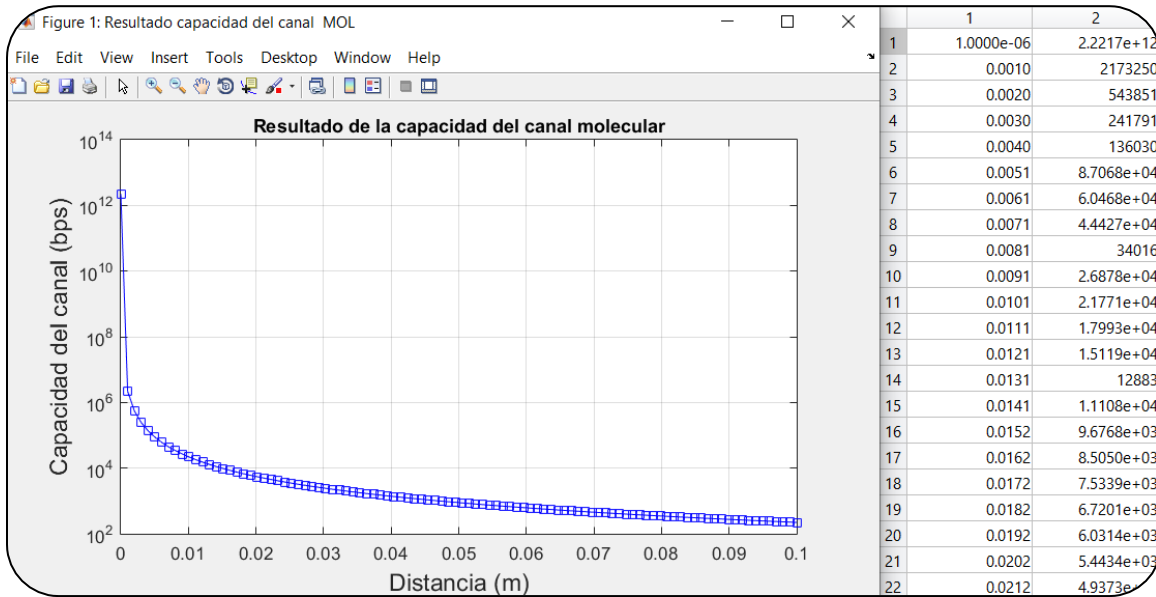
**Tabla 17.** Intensidades de señales obtenidos en base a la ecuación 18

**Fuente:** Autor

Simulación	Distancia entre nodos (m)	$E_S$	$E_I$
1	0.001	3.95378e+06	2.52922e-07
2	0.002	1.96434e+06	5.09076e-07
3	0.003	1.3012e+06	7.68521e-07
4	0.004	770683	1.29755e-06
5	0.005	543325	1.84051e-06
6	0.006	417020	2.39796e-06
7	0.007	173950	5.74877e-06
8	0.008	55118	1.81428e-05
9	0.009	21077.7	4.74435e-05
10	0.010	17077.1	5.85579e-05

#### 4.8. CAPACIDAD DEL CANAL

La capacidad del canal que se experimenta en el enlace de comunicación puede variar en base a las características físicas implementadas, es decir, cuando se cambia el número de moléculas o el coeficiente de difusión. A continuación, se muestra el resultado de la simulación con las características expuestas en la sección 3.7 a diferentes distancias de transmisión.



**Figura 35.** Capacidad de canal obtenida a partir de la simulación MC.

*Fuente: Autor*

La figura (35) muestra los resultados de la capacidad del canal obtenido en la simulación, concluyentemente se entiende que, a mayor rango de comunicación, el canal no es apto para una comunicación fiable entre nanodispositivos. Un análisis más profundo de esto nos permite encontrar un beneficio que contempla la MC en base a su capacidad del canal, la cual se detalla como la posibilidad de enviar direccionamiento en la comunicación por medio de la variación del número de moléculas que se trasmite. Este es uno de los objetivos que persiguen investigaciones desarrolladas por la comunidad científica.

#### 4.9. ANÁLISIS DE LAS COMPONENTES DE LA COMUNICACIÓN

Para concluir en la tabla (13) se resume las características de las componentes implementadas en la simulación.

**Tabla 18.** Características de las componentes implementadas en la investigación

**Fuente:** Autor

Componente	Parámetros	Objetivo	Implementación
<b>Portador del mensaje</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Número de moléculas</li> <li>• Intervalo de pulso</li> <li>• Hora de inicio</li> <li>• Duración</li> <li>• Paquete (Mensaje)</li> </ul>	Contener el mensaje	Por medio del método <code>createmessagecarrier</code> implementado en la componente de perturbación se generó la señal portadora del mensaje.
<b>Campo</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Señal portadora</li> </ul>	Capacidad de las moléculas para dirigirse a un sitio en particular	Se asumió una transmisión omnidireccional por lo cual el direccionamiento del movimiento no está contemplado en esta investigación y en consecuencia la componente de campo se define con una noción empírica.

<b>Perturbación</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Número de moléculas</li> <li>• Intervalo de pulso</li> </ul>	Crear la señal portadora	Se utilizó la componente de perturbación para generar la señal portadora y enviarla con una modulación OOK.
<b>Movimiento</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Coeficiente de difusión</li> </ul>	Generar el modelo de propagación de las moléculas	En esta componente se implementó un modelo de propagación basado en la difusión de moléculas que nos permite conocer características del movimiento como el retardo de propagación.
<b>Especificidad</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Capacidad del canal</li> <li>• Velocidad de transmisión</li> </ul>	Capacidad de detectar las moléculas	La implementación de esta componente permitió verificar la correcta detección del mensaje enviado por medio de sus métodos de verificación de compatibilidad del mensaje.

## CAPÍTULO V

### 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1 CONCLUSIONES

- Se logro simular el escenario molecular del estándar IEEE 1906.1 y en base a este analizar la influencia que tienen todas y cada una de las componentes comunicacionales de una MC, esto nos permitió conocer las capacidades actuales de una comunicación de este tipo y cuáles serían las metas de este nuevo método de comunicación.
- Los resultados presentados nos permitieron analizar e implementar las 9 clases y 21 archivos en los cuales se detallan todas las componentes y entidades necesarias del escenario 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 numero de moléculas enviadas de tal manera que modificando una de estas se comprendido como la comunicación molecular es factible bajo ciertos parámetros previstos bajo modelos de propagación específicos y a su vez podrían funcionar de mejor manera configurando valores a los cuales las predicciones de concentración molecular propuestas por la ley de difusión de Fick y el movimiento browniano nos permiten trabajar bajo un sistema que podamos conocer, lo cual ayudaría a trabajar mejor con modelos de modulación.



- Por medio del simulador de eventos discretos NS3 se implementó una comunicación molecular, este simulador nos permite la interacción de componentes y entidades durante el intercambio de un mensaje además nos ayudó a comprender las estructuras jerárquicas y modelos centrales que intervienen en el marco de comunicación molecular.
- Se realizaron modificaciones a las componentes comunicacionales del estándar, lo que nos permitió conocer el comportamiento de la comunicación bajo características diferentes a las previstas por el estándar IEEE 1906.1, una de las más importantes es la implementación de nuevos métodos en las componentes de perturbación y portador de mensaje, lo que permitió enviar dos tipos de moléculas en un solo canal a través del medio y activar los procesos de recepción en diferentes nodos receptores para medir el rendimiento de la comunicación en dos receptores ubicados a diferentes distancias.

## **5.2 RECOMENDACIONES**

- El estándar IEEE 1906.1 es de código abierto y libre para investigadores en general, para evitar confusiones la descarga de este estándar debe ser de páginas oficiales de la IEEE, debido que existen versiones encontradas en páginas no oficiales que presentan errores y no permite la implementación del mismo de una forma segura.

- Para la obtención de resultados se recomienda analizar los archivos .sh del estándar, ya que estos nos permiten la extracción de información bajo parámetros propuestos en estos archivos, además que pueden ser modificados en base al fin del estudio.
- Para futuras investigaciones se recomienda explorar versiones que aún no están estandarizadas pero que son desarrolladas por los mismos autores del estándar IEEE 1906.1 y que pretenden dar a conocer otro tipo de movimiento en la componente de movimiento.

## BIBLIOGRAFÍA

- Akyildiz, I., & Jornet, J. M. (2010). Electromagnetic Wireless NanoSensor Networks. *Nano Communication Networks*, 3-5.
- Aminian, G., Ghazani, M., Mirmohseni, M., & Fekri, F. (2016). On the Capacity of Point-to-Point and Multiple Access Molecular Communications with Ligand - Receptors. *IEEE*.
- Bush, S. (2015). Defining Communication at the Bottom. *IEEE*.
- Campanile, L., Gribaudo, M., Iacono, M., Marulli, F., & Mastroianni, M. (2020). Computer Network Simulation with ns-3: A Systematics Literature Review. *Electronics*.
- Carrasco, S., Garcia, J., & Garcia, J. (2018). The IEEE 1906.1 Standard: Some guidelines for Strengthening future normalization in Electromagnetic Nanocommunications. *IEEE Communications Standards Magazine*.
- Cazau, P. (2006). *Introduccion a la investigacion en ciencias sociales*. Buenos Aires.
- Cevallos, Y., Tello, L., Inca, D., Palacios, C., & Renteria, L. (2019). Genetic Expression in Biological Systems: A digital Communication Perspective. *The open Bioinformatics journal*.
- Farsad, N., Yilmaz, B., Eckford, A., Chae, C.-B., & Guo, W. (2016). A comprehensive survey of recent advancements in molecular communication. *IEEE*.
- Gul, E., Atakan, B., & Akan, O. (2010). NanoNS: a Nanoscale network simulator framework for molecular communications. *Nano Communication Networks*.
- Haraguchi, T., Eckford, A., & Nakano, T. (2013). *Molecular Communication*. Cambridge.
- Huang, X. (2016). Graphene-Based Nano-Patch Antenna for Terahertz Radiation. Manchester.
- Hwang, S.-W., Tao, H., Cheng, H., & et. (2012). A physically transient form of silicon electronics. *Science*.
- IEEE. (2015). IEEE Recommended Practice for Nanoscale and Molecular Communication Framework. *IEEE Communications, Society*.
- ISO/TS, 2. (2008). *Nanotechnologies - Terminology and definitions for nano-objects-nanopartivule, nanofibre and nanoplate*.
- Jornet, J., & Akyildiz, I. (2014). Graphene-Based Plasmonic Nano-Transceiver for Terahertz Band Communication. Netherlands.
- Kulakowshi, P., Solarczyk, K., & Wojcik, K. (2017). Routing in FRETBased Nanonetworks.
- Leeson, M. (2011). Communicating at the nanoscale. *ResearchGate*.
- Llatser, I., Cabellos, A., Pierobon, M., & Alarcon, E. (2013). Tecnicas de deteccion para la comunicacion molecular basada en difusion. *IEEE*.
- Nakano, T., & Eckford, A. (2013). Molecular communication Paradigm. *Cambridge University Press*.
- Nakano, T., Suzuki, J., & Moore, M. (2017). Modeling, Methodologies and Tools for Molecular and Nano-Scale Communications. Springer.
- Riley, G., & Henderson, T. (2010). The ns-3 Network Simulator. *Springer*.

- Vacca, J. (2019). *Nanoscale Networking and communications Handbook*. Boca raton: CRC Press.
- Zambrano, M. (2015). Comunicacion Molecular: Retos y oportunidades. *Prisma tecnologico*.
- Zhou, Y., Chen, Y., & Murch, R. (2017). Simulation framework for Touchable Communication. *IEEE*.

# ANEXOS

## ANEXO 1

### Descarga del módulo P1906

El estándar IEEE 1906.1 es de código abierto y está disponible en la página oficial de IEEE, en el apartado de estándares y archivos ejecutables. Para poder descargar la última versión estable se debe dirigir a la dirección <https://standards.ieee.org/downloads.html> y buscar el archivo 1906.1-2015.



*Figura 36. Archivo zip de Estándar IEEE 1906.1*

*Fuente: Autor*

Una vez descargado, nos dirigimos a la carpeta de descargas y procedemos a extraer el archivo zip por medio del comando unzip.

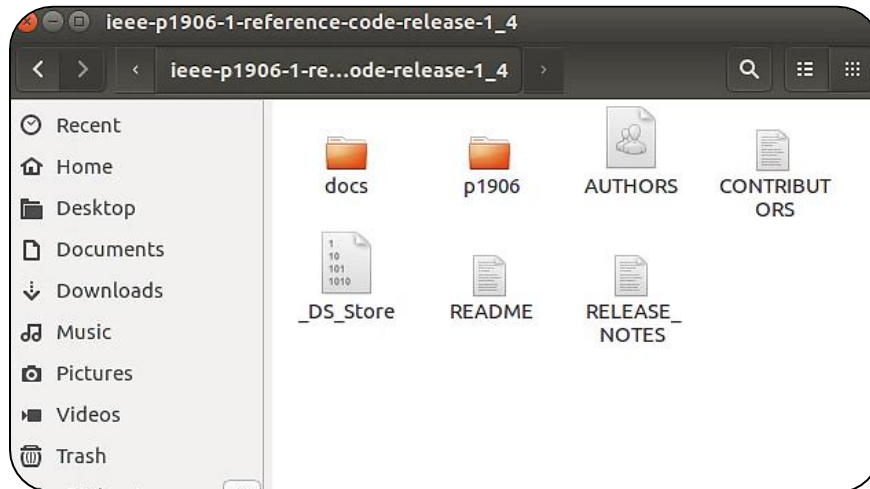
- *cd Descargas/*
- *ls*
- *unzip 1906.1-2015\_downloads.zip*

```
alexis@alexis-VirtualBox: ~/Descargas
alexis@alexis-VirtualBox:~$ cd Descargas/
alexis@alexis-VirtualBox:~/Descargas$ ls
1906.1-2015_downloads.zip
alexis@alexis-VirtualBox:~/Descargas$ unzip 1906.1-2015_downloads.zip
Archive: 1906.1-2015_downloads.zip
  creating: 1906.1-2015_downloads/
  inflating: 1906.1-2015_downloads/ieee-1906-1-reference-code-release-1_4.zip
  creating: __MACOSX/
  creating: __MACOSX/1906.1-2015_downloads/
```

*Figura 37. Comando para descomprimir el archivo descargado*

*Fuente: Autor*

Al extraer el archivo obtendremos el módulo P1906, además de la documentación necesaria para comprender el funcionamiento del mismo, como se muestra en la figura (38):



*Figura 38. Archivos descomprimidos*

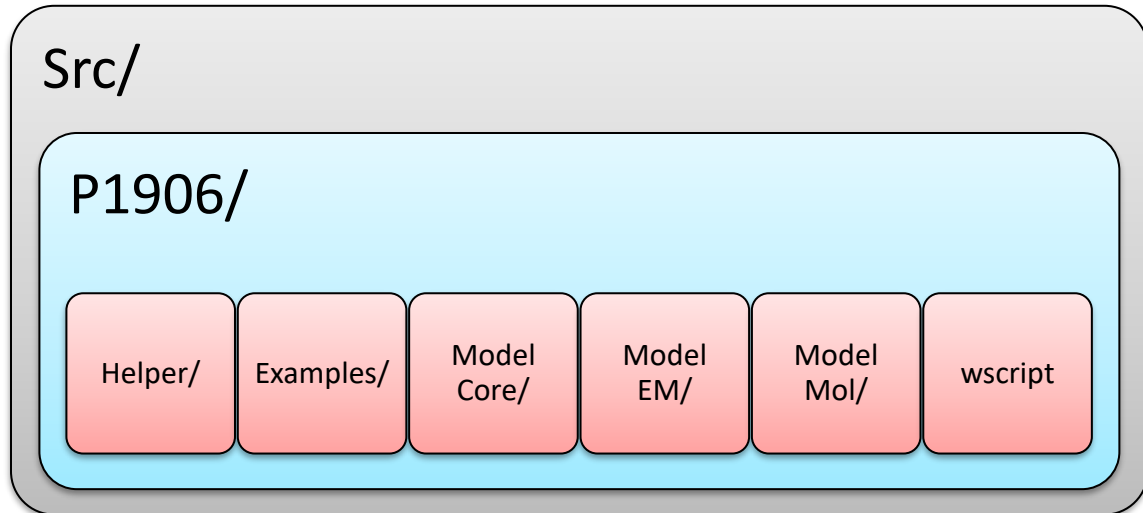
*Fuente: Autor*

## **ANEXO 2**

### **Agregar e Instalar el módulo P1906**

Un módulo en NS3 es un grupo de clases, ejemplos y pruebas relacionadas a una tecnología, el cual puede ser utilizado con módulos NS3 existentes para realizar simulaciones. Como el módulo P1906 implementado por el grupo de trabajo IEEE 1906 no existe en la actualización del software NS3 se lo agrega por medio del archivo wscript,

el cual se encarga de implementar las clases y librerías nuevas que se utilizarán por este módulo. El módulo P1906 tiene la siguiente estructura de directorios:



**Figura 39.** Estructura de directorios

*Fuente:* Autor

Todos los módulos de NS3 dependen del módulo principal y generalmente de otros módulos. Estas dependencias se especifican en el archivo wscript, el módulo P1906 depende del módulo network y spectrum correspondientes a NS3. Por lo cual al declarar el nuevo módulo P1906 se especifica sus dependencias.

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

**Figura 40.** Declaración del módulo y sus dependencias

*Fuente:* Autor

Una vez declarado el nuevo módulo con sus dependencias, se procede a especificar sus archivos fuente, estos archivos corresponden al modelo núcleo, EM y MC del módulo P1906. Como esta investigación va dedicada tan solo al modelo molecular del estándar IEEE 1906 nos limitamos a incluir los archivos que se muestran en la figura (41).

```

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

```

**Figura 41.** Declaración de archivos fuente para el ejemplo MC

**Fuente:** Autor

Para que los archivos fuentes se puedan utilizar por los demás módulos se definen los archivos de cabecera, en los cuales se especifican los modelos del módulo P1906.

```

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-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',
]

```

**Figura 42.** Declaración de archivos de cabecera

**Fuente:** Autor

Como se observa en la figura (42) al agregar cabeceras de esta manera, los archivos serán accesibles para los usuarios del módulo P1906 con declaraciones como:



```

#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"

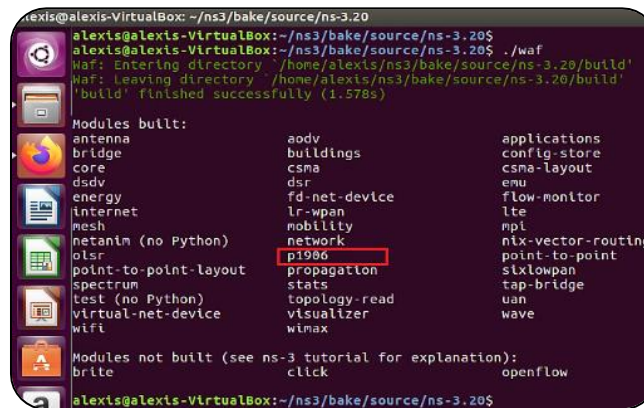
```

**Figura 43.** Declaración de librerías en el modelo MC

**Fuente:** Autor

Agregado el archivo wscript del módulo se procede a copiar el directorio P1906 y pegarlo en la carpeta src del software NS3. Una vez copiado el directorio, se debe compilar nuevamente el software para que NS3 almacene en su cache la nueva información de sus archivos wscript, o de lo contrario el nuevo módulo no se añadirá. La compilación del software se lo realiza por medio de los comandos:

- `cd ns3/bake/source/ns-3.20/`
- `./waf configure`
- `./waf`



**Figura 44.** Compilación del software con el nuevo módulo P1906

**Fuente:** Autor

En la figura (44) se muestra la compilación de todos los módulos en el sistema y se comprueba que se añadió el módulo p1906 correspondiente al estándar para comunicaciones a nanoescala y moleculares.

## ANEXO 3

Método en el cual se añade el portador de mensaje con otro tipo de moléculas

```
Ptr<P1906MessageCarrier>
P1906MOLPerturbation::CreateMessageCarrier (Ptr<Packet> p)
{ std::cout << "\nMETODO CREACION DE LA PORTADORA Y PERTURBACION\n" << std::endl;
  NS_LOG_FUNCTION (this);
  Ptr<P1906MOLMessageCarrier> carrier = CreateObject<P1906MOLMessageCarrier> ();

  double duration = m_pulseInterval.GetSeconds () * p->GetSize () * 8;
  double now = Simulator::Now ().GetSeconds ();

  NS_LOG_FUNCTION (this << "[Tiempo,Bits,IntervaloPulso,Duracion]" << now << p->GetSize() * 8
    << m_pulseInterval << duration);

  carrier->SetPulseInterval (m_pulseInterval);
  carrier->SetDuration (Seconds(duration));
  carrier->SetStartTime (Simulator::Now ());
  carrier->SetMolecules (GetMolecules ());
  carrier->SetMoleculesb (GetMoleculesb ());
  carrier->SetDistancia (GetDistancia ());
  carrier->SetMessage (p);

  return carrier;
}
```

*Figura 45. Código que implementa el mensaje en el portador*

*Fuente: Autor*

## ANEXO 4

Método de cálculo del pulso de retardo en la propagación

```
double
P1906MOLMotion::ComputePropagationDelay (Ptr<P1906CommunicationInterface> src,
Ptr<P1906CommunicationInterface> dst,
Ptr<P1906MessageCarrier> message,
Ptr<P1906Field> field)
{
  std::cout << "\nMETODO MOVIMIENTO (CALCULO DE RETARDO DE PROPAGACION)\n" << std::endl;
  NS_LOG_FUNCTION (this << "Fick's Bajo");

  Ptr<MobilityModel> srcMobility = src->GetP1906NetDevice ()->GetNode ()->GetObject<MobilityModel> ();
  Ptr<MobilityModel> dstMobility = dst->GetP1906NetDevice ()->GetNode ()->GetObject<MobilityModel> ();

  double distance = dstMobility->GetDistanceFrom (srcMobility);
  double delay = pow(distance,2)/(GetDiffusionConefficient ()*6);
  NS_LOG_FUNCTION (this << "[Distancia,Difusion,Retardo]" << distance << GetDiffusionConefficient () << delay);

  return delay;
}
```

*Figura 46. Código en el que se calcula el pulso de retardo de la señal*

*Fuente: Autor*

## ANEXO 5

### Método de chequeo de compatibilidad en la componente de especificidad

```
Ptr<P1906MOLMessageCarrier> m = message->GetObject <P1906MOLMessageCarrier>();
double transmissionRate = 1. / m->GetPulseInterval ().GetSeconds ();
double mol = m->GetMolecules ();

double distancia = m->GetDistancia ();
double mola = m->GetMoleculesb ();
std::cout << "MOLECULAS -----" << distancia << std::endl;

Ptr<MobilityModel> srcMobility = src->GetP1906NetDevice ()->GetNode ()->GetObject<MobilityModel> ();
Ptr<MobilityModel> dstMobility = dst->GetP1906NetDevice ()->GetNode ()->GetObject<MobilityModel> ();
double distance = dstMobility->GetDistanceFrom (srcMobility);
std::cout << "Distancia -----" << distance << " (metros)" << std::endl;
NS_LOG_FUNCTION (this << "[Distancia,txRate]" << distance << transmissionRate);

double minPulseWidth = (0.4501/GetDiffusionCoefficient ()) * pow(distance,2);
double channelCapacity = 1. / minPulseWidth;

double umbral = 5000;
NS_LOG_FUNCTION (this << "TestCapacidad: [Distancia, txRate, CapacidadCanal]" << distance << transmissionRate << channelCapacity);

// ECUACION PULSO MOLECULAR
std::cout << "\n-----\n" << std::endl;
double difu = GetDiffusionCoefficient ();
double r=distance;
double deno;
int i;
double mole=m->GetMoleculesb ();
double con;
double por;

for (i=0; i<100; i = i + 1){
deno=(4*3.141516*1*i)*1.5;
por=std::exp(-((r*std::sqrt(2))/(4*difu*i)));
con=((mole/deno)*por);

std::cout << "Tiempo: "<< i << " Distancia: "<< r << " Concentracion: " <<con << std::endl;
```

Figura 47. Código para detectar la compatibilidad de la señal molecular en el receptor

Fuente: Autor

## ANEXO 6

### Método captura del mensaje recibido

```
Ptr<P1906MOLMessageCarrier> x = message->GetObject <P1906MOLMessageCarrier>();
double mol = x->GetMolecules ();
double mola = x->GetMoleculesb ();
std::cout << "METODO RECEPCION DE PORTADORA\n" << std::endl;
NS_LOG_FUNCTION (this << "Calculando mensaje");
std::cout << "MOLECULAS TIPO (A) EN LA PORTADORA-----" << mol<< std::endl;
std::cout << "MOLECULAS TIPO (B) EN LA PORTADORA-----" << mola<< std::endl;
return message;
```

Figura 48. Código para la recepción del mensaje

Fuente: Autor

## ANEXO 7

Código para el envío y muestra del mensaje

```
std::cout << "\n-----MENSAJE-----\n" << std::endl;
// Create a message to sent into the network
int pktSize = 1; //bytes
uint8_t buffer = 136;
uint8_t buf = 255;

Ptr<Packet> message = Create<Packet>(&buffer, pktSize);
Ptr<Packet> messageb = Create<Packet>(&buf, pktSize);

uint8_t contenido=0;
message->CopyData(&contenido, message->GetSize());

std::cout << "-----\n" << std::endl;
std::cout << "          Trasmitiendo: " << (int)contenido << std::endl;
std::cout << "          Id: " << message->GetUid()<< std::endl;
std::cout << "          Bytes: " << message->GetSize()<< std::endl;
std::cout << "\n-----\n" << std::endl;

c1->HandleTransmission (message);
//c2->HandleReception (messageb);
```

**Figura 49.** Código para mostrar el mensaje enviado e iniciar el método de transmisión

**Fuente:** Autor