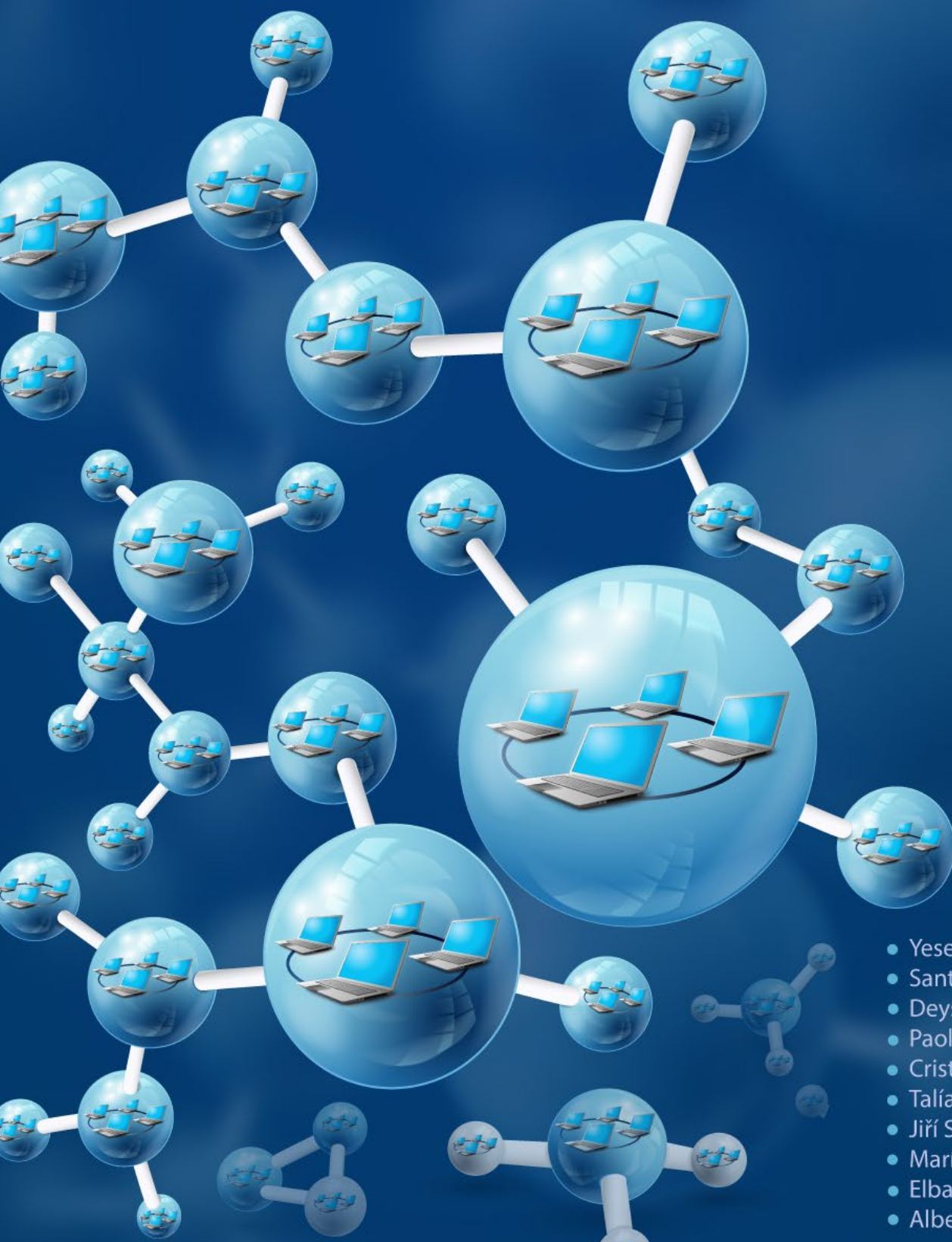


# ESTÁNDARES DE NANOCOMUNICACIONES BIOLÓGICAS:

## Fundamentos y Simulación



- Yesenia Cevallos
- Santiago Armas
- Deysi Inca
- Paola Vinueza
- Cristian Vacacela Gómez
- Talía Tene
- Jiří Svozilík
- María Isabel Uvidia-Fassler
- Elba Boderó-Poveda
- Albert Espinal



# **ESTÁNDARES DE NANOCOMUNICACIONES BIOLÓGICAS:**

## **Fundamentos y Simulación**

*Primera Edición*

Yesenia Cevallos  
Santiago Armas  
Deysi Inca  
Paola Vinueza  
Cristian Vacacela Gómez  
Talía Tene  
Jiří Svozilík  
María Isabel Uvidia-Fassler  
Elba Boderó-Poveda  
Albert Espinal

**Revisión Técnica:**

Editorial CEDIA

**Corrección de Estilo:**

Editorial CEDIA

**Diseño de portada:** José Luis Hermida

**Diagramación:** Paz Cordero González

**Coordinación:**

Laura Malache S. - Editorial CEDIA

Una publicación de la Editorial CEDIA,  
arbitrada por pares académicos de doble ciego.

The logo for CEDIA, consisting of the word "cedia" in a bold, lowercase, blue sans-serif font.**CEDIA**

Gonzalo Cordero 2-111 y  
J. Fajardo  
Cuenca - Ecuador  
[cedia.edu.ec](https://cedia.edu.ec)

*Primera edición*

**ISBN:** 978-9942-7178-8-7

**DOI:** <https://doi.org/10.48661/3517-9F74>

**Citación:**

Cevallos, Y., Armas, S., Inca, D., Vinueza Naranjo, P. G., Vacacela Gomez, C., Tene, T., Svozilík, J., Uvidia-Fassler, M., Boderó Poveda, E. M., & Espinal, A. (2024). ESTÁNDARES DE NANOCOMUNICACIONES BIOLÓGICAS: Fundamentos y Simulación (Version 1). CEDIA. <https://doi.org/10.48661/3517-9F74>

Riobamba, Ecuador  
Octubre de 2024



## **Supervisores Técnicos**

Silvana Guitarra

**Instituto de Micro y Nanoelectrónica,  
Universidad San Francisco de Quito**

Luis Miguel Procel

**Instituto de Micro y Nanoelectrónica,  
Universidad San Francisco de Quito**

Jesús B Alonso

**Universidad de Las Palmas de Gran Canaria**

Jennyfer Granizo

**Hospital Metropolitano**

Danilo Chávez

**Escuela Politécnica Nacional**

Yoskira Naylett Cordero de Jiménez

**Dirección Académica de Posgrado de Educación  
Universidad Tecnológica Empresarial de Guayaquil**

Luis Patricio Tello-Oquendo

**Universidad Nacional Chimborazo**

Lorena Molina-Valdiviezo

**Universidad Nacional Chimborazo**

Ana C Ríos-Rivera

**Universidad Nacional Chimborazo**

***Todos los derechos reservados.***

Prohibida la reproducción total o parcial de esta obra, por cualquier medio o método sin autorización por escrito del editor.

### ***Yesenia Cevallos***

Ingeniera en Electrónica y Telecomunicaciones por la  
Escuela Politécnica Nacional (Ecuador)

Magister en Tecnologías de la Información por la  
Universidad Técnica de Ambato (Ecuador)

Doctora en Ciencias y Tecnologías de los Sistemas  
Complejos por la Università della Calabria (Italia)

Docente/Investigadora por la Universidad Nacional  
de Chimborazo (Ecuador)

CCNA, CCNAI por la Universidad Nacional de  
Chimborazo (Ecuador)

Profesora invitada no titular por el Instituto de Micro y  
Nanoelectrónica, Universidad San Francisco de Quito

### ***Santiago Armas***

Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones por la  
Universidad Nacional de Chimborazo (Ecuador)

### ***Deysi Inca B.***

Ingeniera en Electrónica y Computación por la Escuela  
Superior Politécnica del Chimborazo (Ecuador)

Magister en Comunicación de Redes por la Pontificia  
Universidad Católica (Ecuador)

Docente/Investigadora por la Universidad Nacional  
de Chimborazo (Ecuador)

### ***Paola G. Vinueza-Naranjo***

Ingeniera en Sistemas y Computación por la Universidad  
Nacional de Chimborazo (Ecuador)

Doctora en Telecomunicaciones por la Università  
La Sapienza di Roma (Italia)

Docente/Investigadora por la Universidad Nacional  
de Chimborazo (Ecuador)

Editora Académica. IEEE-UNACH Council

### ***Cristian Vacacela Gómez***

Biofísico por la Escuela Superior Politécnica  
de Chimborazo (Ecuador)

Doctor en Física y Tecnologías Cuánticas por la  
Università della Calabria (Italia)

Docente/Investigador por la Escuela Superior  
Politécnica de Chimborazo (Ecuador)

Editor Académico/Revisor en Revistas Internacionales de  
Nanomateriales y Nanocomunicaciones

### ***Talía Tene***

Biofísica por la Escuela Superior Politécnica  
de Chimborazo (Ecuador)

Doctora en Física y Tecnologías Cuánticas por la Università  
della Calabria (Italia)

Docente/Investigadora por la Universidad Técnica  
Particular de Loja (Ecuador)

### ***Jiří Svozilík***

Grado en Óptica y Opto-electrónica por la  
Universidad Palacký (República Checa)

Grado en Informática Aplicada por la  
Universidad Palacký (República Checa)

Magister en Óptica y Opto-electrónica por la  
Universidad Palacký (República Checa)

Doctor en Óptica y Opto-electrónica por la  
Universidad Palacký (República Checa)

Doctor en Fotónica por la Universidad Politécnica  
de Cataluña - Instituto de Ciencias Fotónicas (España)

Experto en el área de las comunicaciones moleculares en la teoría  
cuántica de comunicación, caracterización de los  
sistemas cuánticos abiertos y los efectos del ruido

Experto en computación cuántica y óptica cuántica

Docente/Investigador por la Escuela Superior  
Politécnica de Chimborazo (Ecuador)

### ***María Isabel Uvidia-Fassler***

Ingeniera en Sistemas Informáticos por la Escuela  
Superior Politécnica del Chimborazo (Ecuador).

Magister en Gerencia Informática por la  
Pontificia Universidad Católica (Ecuador).

Máster Universitario en Análisis y Visualización de Datos  
Masivos / Visual Analytics and Big Data por  
la Universidad Internacional de la Rioja (España)

Docente/Investigadora por la Universidad  
Nacional de Chimborazo (Ecuador).

## ***Elba Bodero-Poveda***

Ingeniera en Sistemas Informáticos por la Escuela  
Superior Politécnica de Chimborazo (Ecuador)

Magíster en Tecnologías de la Información por la  
Universidad Técnica de Ambato (Ecuador)

Doctora Ph.D. en Ciencias Informáticas por la  
Universidad Nacional de La Plata (Argentina)

Miembro Distinguido de la Junta Directiva del  
Consortio Iberoamericano de Ciencia y Tecnología - ISTE  
por la Universidad Nacional de La Plata (Estados Unidos)

Docente/Investigadora por la Universidad  
Nacional de Chimborazo (Ecuador)

Editora Asociada de la Revista digital de Ciencia,  
Ingeniería y Tecnología NOVASINERGIA - Facultad de Ingeniería -  
UNACH - ISSN 2631-2654 (Ecuador)

Editora en Jefe de la Revista ESPRINT Investigación  
- ESPRINT - ISSN 2960-8317 (Ecuador)

## ***Albert Espinal***

Ingeniero en Computación por la Escuela  
Superior Politécnica del Litoral (Ecuador)

Magister en Sistemas de Información Gerencial por  
la Escuela Superior Politécnica del Litoral (Ecuador)

Doctor en Ingeniería por la Universidad Nacional de Cuyo (Argentina)

Docente/Investigador por la Escuela  
Superior Politécnica del Litoral (Ecuador)

CCNA, CCNP, CCAI - Cisco Networking Academy

Main contact Cisco ASC / ITC - Corporación Ecuador Sin Brecha Digital

CEO en SOL & TECH Soluciones y Tecnología



## ***Dedicación y agradecimiento:***

*A Dios, por sustentar nuestras vidas en  
cada instante en todo...  
y a nuestros seres queridos, por su amor y  
apoyo constantes...*





# ÍNDICE

## 01

*Pg. 20*

### **Nanocomunicaciones en Sistemas Biológicos**

- 1.1 Elementos de una comunicación a nanoescala
- 1.2 Comunicaciones Moleculares entre células
- 1.3 Arquitectura de las Comunicaciones Moleculares
- 1.4 Propagación de señales físicas en Comunicaciones Moleculares
- 1.5 Interacción de señales químicas en Comunicaciones Moleculares

## 02

*Pg. 64*

### **Análisis comunicacional de los estándares IEEE 1906.1 y 1906.1.1**

- 2.1 Prospectiva de la necesidad para establecer un estándar de nanocomunicaciones
- 2.2 Análisis general de los estándares IEEE 1906.1 y 1906.1.1
- 2.3 Modelo de datos para sistemas de comunicación a nanoescala según los estándares IEEE 1906.1 y 1906.1.1
- 2.4 Características de nanocomunicaciones establecidas en los estándares IEEE 1906.1 y 1906.1.1
- 2.5 Ejemplo de simulación genérica proporcionado por los estándares IEEE 1906.1 y 1906.1.1

## 03

*Pg. 114*

### **Caracterización de elementos de Nanocomunicaciones Biológicas en NS-3**

- 3.1 Modelo de funcionamiento para las simulaciones
- 3.2 Evaluación de las métricas de comunicación

# PREFACIO

Las Comunicaciones Moleculares (CM) se refieren a la transferencia de información en entidades biológicas o seres vivos. Su análisis se realiza utilizando técnicas descritas en las TIC (Tecnologías de la Información y Comunicación), en las telecomunicaciones y en las teorías y postulados subyacentes de las matemáticas que sustentan los sistemas de comunicación convencionales. Lógicamente, tales bases conceptuales deben ser modificadas para que puedan describir correctamente el comportamiento de los elementos que conforman los sistemas de CM, denominados también sistemas de comunicación biológicos o simplemente sistemas biológicos.

Los sistemas de comunicación tradicionales y los biológicos cuentan con ventajas, en el caso de los sistemas de telecomunicaciones se tienen grandes anchos de banda, altas velocidades de transmisión y gran eficiencia en el control de errores de la información. En el caso de los sistemas de CM, estos poseen biocompatibilidad y su uso energético es óptimo.

Así, las características de un sistema se pueden abstraer al otro para vencer eventuales desventajas. Un ejemplo futurístico de lo mencionado en este último párrafo consiste en el uso de potentes códigos correctores de errores de los sistemas de telecomunicaciones en procesos biológicos de expresión genética, con el fin de anular (teóricamente) la mutación de genes que producen enfermedades. Otro caso (realizado exitosamente) de la utilización dual de técnicas de comunicación convencionales se produjo cuando características de TCP (Transmission Control Protocol) se emplearon para el suministro de medicamentos en células cancerosas. La célula maligna se localizó efectivamente por mecanismos similares a la solicitud de conexión que realiza TCP. Posteriormente, ya en la dosificación precisa del medicamento, la célula destino emulando los procesos de acuse de recibo de TCP, indicaba que recibió la dosis exacta de medicina; produciéndose de esta manera una transmisión eficiente de información (medicamento), sin pérdidas ni afectación a otras células.

En este contexto, materiales bio-híbridos o sintéticos de dimensiones a nanoescala se inyectan en el ser humano, posibilitando entonces que el cuerpo se convierta en una “red de computadoras” o red BAN (Body Area Network); aquí, cada nanoelemento puede desempeñar el rol de sensor o actuador que transfiere información a otro componente que realiza las funciones de nanorouter (u otro tipo de conmutador) el cual se comunica con un elemento micro/macro en el cuerpo (como pulseiras, relojes, etcétera) y este a su vez, puede alertar mediante Internet a un familiar o médico a cargo de una persona con una enfermedad crítica que requiere monitoreo permanente de señales biológicas para evitar situaciones letales en el paciente. Este entorno descrito constituye la estructura de lo que se denomina IoBNT (Internet of the BioNano Things). Por lo anteriormente señalado las CM son una de las aristas fundamentales de la ciencia moderna. Consecuentemente, las nanocomunicaciones (de las cuales son parte las CM) son uno de los ejes principales de la investigación actualmente, debido principalmente a que han efectivizado tratamientos médicos (innovativos que pueden mejorar la calidad de vida de pacientes con enfermedades graves) y aplicaciones en áreas militares, ambientales, agrícolas, ciencia de los materiales, industria, entre otros campos.

De esta manera, IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) ha definido dos estándares para sistemas de comunicaciones a nanoescala. El primero de ellos fue el estándar 1906.1 (aprobado en el año 2015) el cual contiene un modelo conceptual y terminología explícita para redes de comunicación ad hoc operando a nanoescala y CM, con la consideración de los niveles pertinentes de abstracción desde los sistemas de telecomunicaciones a los sistemas a nanoescala; de modo que exista un mapeo entre conceptos de alto nivel como codificación, señalización, direccionamiento, enrutamiento, jerarquías de capas de red y confiabilidad.

La segunda versión de los estándares IEEE de nanocomunicaciones fue el 1906.1.1 (que se aprobó en el año 2020) y establece un modelo de datos común definido como YANG (Yet Another Next Generation) el cual puntualiza detalles que su antecesor no proveía para eventuales implementaciones en la industria, investigación y academia.

El marco normativo de los estándares de la familia IEEE 1906 puede ser comparado con las reglas de comunicación en redes de computadoras proporcionadas por el modelo ISO/OSI (International Standard Organization/Open System Interconnection) tal como se especifica en la Figura a. En razón del tamaño de los elementos que intervienen en una comunicación a nanoescala, estos son más simples y menos fáciles de ser programados (en el sentido, que no obedecerían exactamente la compilación de una sintaxis de programación) que sus contrapartes a macroescala debido a que el marco normativo de estos estándares representa elementos de la naturaleza, propios de los sistemas biológicos.

Modelo ISO/OSI	Mapeo de componentes definidos en los estándares 1906			Equivalencia
Aplicación				No se define componente en la familia de estándares 1906
Presentación				No se define componente en la familia de estándares 1906
Sesión				No se define componente en la familia de estándares 1906
Transporte				No se define componente en la familia de estándares 1906
Red		Campo		El componente de Campo puede habilitar al componente Portadora de Mensajes a través de múltiples nodos
Enlace de Datos	Especificidad			El componente de Movimiento habilitado por los componentes de Campo y Especificidad posibilitan al componente Portadora de mensajes a alcanzar el siguiente nodo
Física	Portadora de Mensajes	Movimiento	Perturbación	El componente de Perturbación crea la señal que se transporta a través del componente Portadora de Mensajes usando el componente de Movimiento

**Figura a. Comparación del funcionamiento de los elementos del marco de referencia de los estándares IEEE 1906 y el modelo de networking ISO/OSI.**

En la Figura a, se visualiza el nivel de comparación entre los sistemas de networking y aquellos a nanoescala, así un mensaje de información biológica se puede interpretar como una PDU (Protocol Data Unit) y se instauran los siguientes componentes:

- 1.** Portadora de Mensajes. Definiendo señales de información.
- 2.** Movimiento. Definiendo la propagación de información.
- 3.** Campo. Definiendo una comunicación entre nodos adyacentes.
- 4.** Perturbación. Definiendo aspectos de modulación o codificación de la información.
- 5.** Especificidad. Definiendo el direccionamiento entre elementos que se encuentran adyacentes.

Como se puede notar los sistemas de comunicación a nanoescala se conceptualizan en forma muy similar a sus contrapartes de telecomunicaciones en cuanto a la transmisión, propagación y recepción de información. Por consiguiente, en este libro se utiliza este paradigma comunicacional dual para considerar los estándares IEEE 1906 y casos de estudio en el software de simulación NS-3 que los estándares soportan. Por lo que, la estructuración de capítulos se establece de la siguiente manera:

En el Capítulo 1 se describen fundamentos de comunicación de los sistemas de transmisión/recepción moleculares y la biología pertinente en ellos.

En el Capítulo 2 se estudian a profundidad los estándares IEEE 1906.1 y 1906.1.1.

En el Capítulo 3 se analizan casos de estudio de sistemas de nanocomunicaciones biológicos simulados en NS-3 de acuerdo con los requerimientos que establecen los estándares de la familia protocolaria IEEE 1906.



Esta obra académica se ha desarrollado para aportar a la literatura correspondiente a nanocomunicaciones en idioma español la cual es muy escasa.

En consistencia con el contenido del libro, se requiere el conocimiento ingenieril pertinente sobre programación informática, sistemas de comunicaciones, redes de computadoras, sistemas de comunicación molecular biológicos, y el manejo de las teorías de la información, matemáticas y técnicas probabilísticas subyacentes.

# Nanocomunicaciones en Sistemas Biológicos

01

En este capítulo se detallan definiciones y características de los sistemas de comunicación biológicos o sistemas de Comunicaciones Moleculares (CM). Particularmente estos sistemas se analizan desde la perspectiva de los componentes básicos de un sistema de comunicación tradicional, es decir, transmisor, canal de propagación y receptor. Este enfoque es el paradigma desde el cual se realizan las investigaciones de CM modernamente [1-9].

Tales definiciones básicas propiciarán la asociación de los elementos de un sistema de nanocomunicaciones, con aplicaciones potenciales extremadamente importantes, concretamente en el área de las ciencias médicas [10-16].

## 1.1

### ELEMENTOS DE UNA COMUNICACIÓN A NANOESCALA

Las entidades fundamentales que intervienen en el intercambio de información a escala molecular o nanométrica se denominan nanomáquinas, mismas que dependiendo del proceso biológico que describen se pueden convertir en transmisoras y/o receptoras e incluso podrían realizar algunas funciones de un conmutador, equivalentemente a sus contrapartes de networking. En los próximos párrafos se discute sobre los elementos referidos [1-9].

#### 1.1.1 Nanomáquinas y máquinas moleculares

Una entidad o “máquina” se puede definir como un ensamblaje cooperativo de acciones y componentes diseñados para ejecutar una función específica. El diseño y construcción de entidades útiles con el propósito esencial de aportar a la tecnología, puntualmente a la nanotecnología (si se trabaja con elementos operando a nanoescala con dimensiones en el rango aproximado de 1 a 100 nanómetros) origina las nanomáquinas. Las cuales se definen como entidades artificiales cuyos componentes se encuentran en el orden de nanómetros, y son capaces de cumplir tareas de transmisión, recepción, almacenamiento, procesamiento, actuación, determinación de niveles de señales de información, entre otras funciones [17-28].

De manera análoga una máquina molecular se conceptualiza similarmente a una nanomáquina pero con una estructura molecular, y en razón de que tales estructuras se presentan en seres vivos o biológicos, entonces es común usar el término bio-nanomáquinas. Actualmente, es común el empleo de nanomáquinas (nanotubos de carbono, o nanocables de semiconductor, de origen puramente sintético), bio-nanomáquinas o nanomáquinas híbridas en aplicaciones especializadas de la nanotecnología [17-28].

Existen dos paradigmas científicos para el análisis de entidades nanométricas. El primero se denomina “top-down”, el segundo se conoce como “bottom-up”. Los métodos tradicionales de microfabricación para el desarrollo de componentes cada vez más pequeños mediante técnicas ópticas y electrónicas de litografía son de utilización frecuente en la perspectiva top-down. Desde el paradigma bottom-up se toma

la inspiración de procesos de autoensamble de bloques constitutivos ejerciendo control en procedimientos que regulan el tamaño, forma, estructura, y funcionalidades químicas [17-28].

Si se presta atención a las nanomáquinas de la naturaleza se puede visualizar claramente procesos de autoensamble, y por tanto se produce una inferencia hacia el enfoque bottom-up. Por ejemplo, los cloroplastos en células vegetales se consolidan como nanomáquinas que incluyen conjuntos de moléculas actuando como antenas ópticas sintonizadas para captar y transformar la energía solar. Las funcionalidades presentes en la labor conjunta en la colonización de bacterias, detectando y distribuyendo información entre sí, también constituyen otro caso de bio-nanomáquinas en la perspectiva bottom-up [17-28].

### **1.1.2 Nanorobots**

Los dispositivos robóticos que son capaces de realizar funciones a nanoescala se denominan nanorobots o simplemente nanobots. La tecnología nanorobótica analiza el diseño, componentes, programación y control de sistemas de nanobots. Fundamentalmente, un nanobot incluye cualquier tipo de estructura activa y semejantemente a sus contrapartes biológicos, debe ser capaz de cumplir algunas funciones entre las cuales se encuentran la propulsión, la manipulación de señales, el procesamiento simple o relativamente complejo, a más de roles como sensor y/o actuador [17-28].

Los nanobots son esenciales para servicios en los que, entre otros componentes, elementos sintéticos o bio-híbridos, determinan niveles de señales médicas; como es el caso en la interconexión entre nanoelementos desplegados en diferentes zonas corporales y dispositivos de networking tradicionales [11]. Para llevar acabo esta clase de aplicaciones se requiere caracterizar a los nanobots en cuatro grupos principales [17].

En su primera categoría los nanobots adquieren funciones de nanomanipulación es decir, presentan muchos grados de libertad en la captación de imágenes o áreas a nanoescala, lo que permite la ubicación de

elementos con gran destreza y precisión. Hoy en día, esta clase de nanobots se emplean como sensores y actuadores para cumplir funciones altamente especializadas de control [17,29-31].

La segunda categoría de nanobots forman sistemas nanorobóticos establecidos en base a componentes biológicos de ADN (Ácido Desoxirribonucleico) y proteínas. El objetivo de su uso radica en que varios de estos elementos ejecuten las funciones biológicas pertinentes para las que fueron programados, entre las que se cuentan el movimiento y la señalización química como resultado de un estímulo externo. Esta categoría de nanobots se solapan en definición con las bio-nanomáquinas [17,32-34].

El tercer grupo de nanobots son elementos guiados magnéticamente y poseen componentes artificiales. Su complejidad es notoriamente menor que las otras dos categorías anteriores, en razón de que por ejemplo un nanobot guiado por señales electromagnéticas puede ser una simple nanopartícula conteniendo materiales ferromagnéticos cuyo comportamiento y propulsión se pueden controlar externamente por un campo magnético [17,35-37].

La cuarta categoría de nanobots la conforman aquellos basados en bacterias, en los que estas se desplazan en fluidos y pueden manipular elementos u objetos diminutos dentro del fluido. Adicionalmente la utilización de bacterias gobernadas por estímulos externos (como campos magnéticos) también se enfocan en esta categoría [17,38-40].

El uso de nanobots en la práctica requiere un conjunto de ellos formando una red a nanoescala. En este sentido, la acción conjunta de una colonia de bacterias para informar a sus pares características químicas de un fluido para multiplicarse se considera como un sistema de comunicación, en el que cada una de las bacterias realizan funciones como sensores y actuadores para posibilitar su reproducción.

### **1.1.3 Nanomáquinas sintéticas basadas en la biología molecular**

El descubrimiento de la lógica matemática en los procesos de regulación genética y la tecnología de recombinación del ADN ha cimentado el comienzo para el gran desarrollo de la biología sintética moderna. La cual se puede definir como el campo científico que combina la naturaleza biológica con elementos de la ingeniería. La biología sintética se ha enfocado profundamente en la creación y perfeccionamiento de componentes genéticos y pequeños módulos construidos a partir de la combinación de los componentes mencionados. La concepción de que una célula se comporta como una “entidad programable” establece estrategias efectivas para ensamblar componentes y módulos complejos a gran escala [7,11,17].

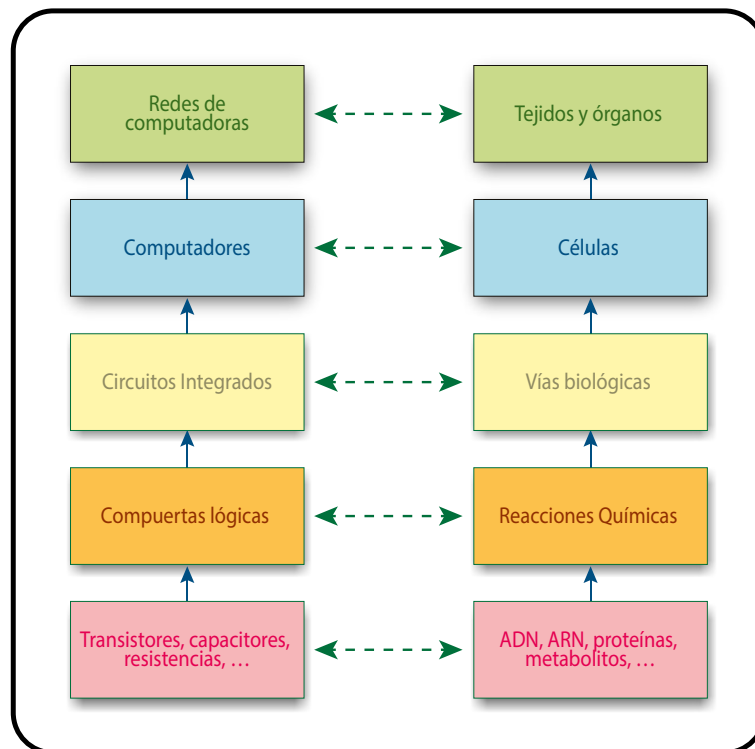
La biología sintética ha modificado las interacciones humanas con su entorno y fundamentalmente con las aplicaciones médicas en función de la fabricación de organismos capaces de depurar desechos contaminantes en lugares inaccesibles, monitorear sustancias químicas y producir la respuesta pertinentemente adecuada, generación de combustibles limpios en forma eficiente y sustentable, o detectar tumores y destruirlos. Para estratificar la biología sintética desde el punto de vista conceptual, de manera útil y análoga a la ingeniería computacional jerárquica se tendría el esquema que se observa en la Figura 1.1 [17] y se puede interpretar como [7,11,17]:

- 1.** En la parte final de la jerarquía de la Figura 1.1, la biología sintética incluye los bloques elementales de estructuras vivientes, estos son, ADN, ARN (Ácido Ribonucleico), proteínas y metabolitos (lípidos, carbohidratos, aminoácidos y nucleótidos), dichos elementos son equivalentes a los componentes constitutivos más ínfimos de los dispositivos electrónicos, es decir, transistores, capacitores, resistencias, etcétera [17].
- 2.** Seguidamente en la jerarquía descrita se presentan las reacciones químicas que regulan consecutivamente la manipulación de procesos fisiológicos. Tales procesos pueden ser similares a la funcionalidad de compuertas lógicas en computación [17].
- 3.** A continuación, la biología sintética emplea diversas “librerías” (en relación con el término de entidades usado en software) para combinar complejas vías biológicas equivalentes a sus contrapartes de semiconductores, o circuitos integrados [17].
- 4.** La conexión de vías biológicas con otras y su integración en células anfitrionas faculta a la biología sintética extender o modificar el comportamiento celular mediante su programación. La factibilidad de programar células estimula su utilización para intentar solucionar problemas no resueltos, entre los que encuentran el uso de bacterias como entidades computacionales programables en terapias para la eliminación de tumores. Consecuentemente, con el empleo de compuertas lógicas del tipo AND y la determinación de dos clases de condiciones, entonces la bacteria programada invade un tumor detectado hasta destruirlo [17]. En la Figura 1.1 las células programables se asemejan a una computadora ejecutando funciones de programación [17].



5. Como los tejidos se establecen por la agrupación de células, se pueden llevar a cabo funciones más complejas que las que solamente realiza una célula programable. Igualmente, a las acciones fisiológicas confiables (en un organismo sano) que efectúan los tejidos, en la biología sintética las CM intercelulares forman células más predecibles y confiables. Adicionalmente, la biología sintética puede coordinar la comunicación intercelular de modo que sincronice la operación incluso de células heterogéneas para conseguir funciones altamente sofisticadas. Así, resulta razonable enfocarse en la gestión de sistemas multicelulares para la obtención de sistemas biológicos estables y confiables en la ejecución de tareas complejas [17].

Como la combinación robusta de un conjunto de células en sistemas multicelulares para desempeñar procesos notables, también, las computadoras interconectadas entre si potencian redes de comunicación que efectúan funciones de transmisión y procesamiento de información más eficientemente como nunca antes, de ahí la analogía presentada en la Figura 1.1 [17].



**Figura 1.1.** Estructura jerárquica para realizar la analogía de procesos y componentes entre la ingeniería computacional y la biología sintética.

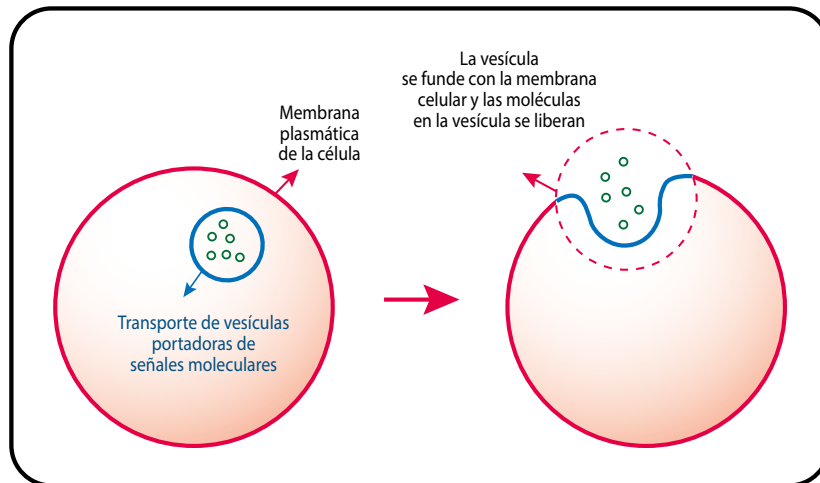
## 1.2

### COMUNICACIONES MOLECULARES ENTRE CÉLULAS

Todos los organismos vivos cuentan con una comunicación inherente interna y externamente para cumplir funciones fisiológicas vitales. Si se menciona el caso de la expresión genética en células eucariotas para citar un caso, la información existente en el núcleo celular presente en las moléculas de ADN se transmiten (por transcripción y traducción) a otros organelos (ribosomas y retículo endoplasmático (RE)) en el interior de la célula hasta finalmente alcanzar el aparato de Golgi (AG) que proporciona la señalización necesaria para que la proteína obtenida pueda ser depositada pertinentemente en el torrente sanguíneo y entonces alcanzar el órgano objetivo correspondiente, mismo que al recibir la información biológica adecuada, efectúa una función en el cuerpo humano de acuerdo a cómo lo determina el sistema endocrino [1-9].

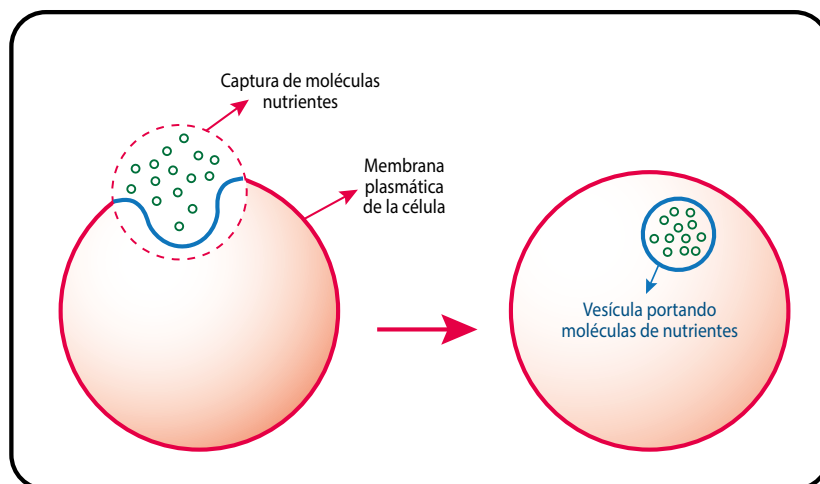
Como es notable la comunicación entre células permite una transmisión armónica de señales de información molecular definidas en proteínas, péptidos, aminoácidos y esteroides. Generalmente, las células de organismos multicelulares son capaces dualmente de transmitir y recibir información. En el proceso de emisión de señales moleculares se identifican tres mecanismos, estos son, exocitosis, difusión a través de la membrana plasmática y por contacto [17,41-43]:

- 1. Exocitosis.** En este proceso, una célula transporta nuevas señales moleculares sintetizadas hacia la membrana plasmática o al entorno extracelular por medio de vesículas. Las vesículas trasladan y almacenan sustancias celulares e incluyen señalización molecular mediante la membrana plasmática de la célula y, por tanto, se liberan moléculas fuera de la célula (Figura 1.2 [17]) [41-43].



**Figura 1.2.** En el proceso de exocitosis una vesícula que porta moléculas de señalización se funde con la membrana plasmática celular, entonces, su contenido se libera en el espacio extracelular.

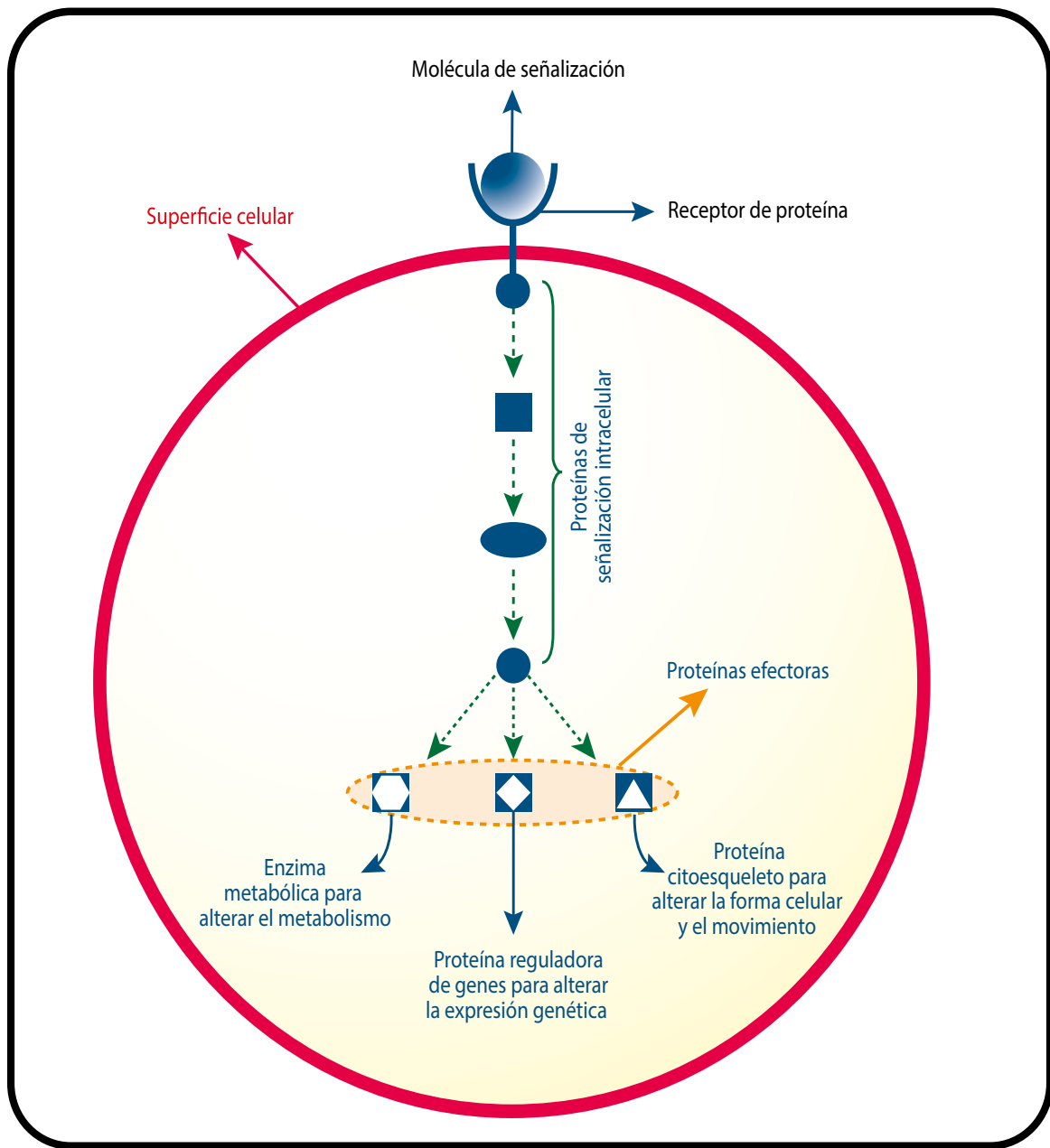
La endocitosis (proceso contrario a la exocitosis) efectiviza la captura de nutrientes importantes (vitaminas, lípidos, colesterol y hierro) desde elementos que se encuentran alrededor de la célula (Figura 1.3 [17]) [41-43].



**Figura 1.3.** En el proceso de endocitosis los nutrientes moleculares alrededor de la célula se capturan y el plasma de la membrana celular transporta las moléculas al interior.

- 2.** La señalización molecular se puede emitir además por mecanismos de difusión hacia afuera de la membrana plasmática celular, por lo que las moléculas que denotan la señalización se propagan extracelularmente. Tal difusión puede ser generada por la diferencia de concentración de señales moleculares entre los entornos interior y exterior de la célula [17].
- 3.** Las denominadas moléculas de señalización pueden permanecer ancladas a la superficie celular que se pueden transferir a las células objetivo (célula receptora cuando existe contacto) [17, 41-43].

De manera independiente al proceso de emisión, la recepción molecular frecuentemente se determina por receptores de proteínas de la superficie celular. Una molécula de señalización (o ligando) se enlaza a un receptor de proteínas, lo que activa y despliega uno o varios procesos de señalización intracelular. De este modo, se desencadena la señalización intracelular de proteínas hacia los diferentes destinos en las células (Figura 1.4 [17]). Estos destinos generalmente son proteínas efectoras. Dependiendo de la señal y el estado de la célula receptora, los efectores pueden ser proteínas de regulación genética, componentes de vías metabólicas o partes de citoesqueleto (Figura 1.4 [17]). Si el receptor de proteínas se localiza al interior de la célula, también, en este caso la molécula de señalización deberá unirse al mismo; lo que implica que tales moléculas sean lo suficientemente pequeñas o hidrofóbicas para propagarse por medio de la membrana plasmática hasta el objetivo correspondiente [17, 41-43].

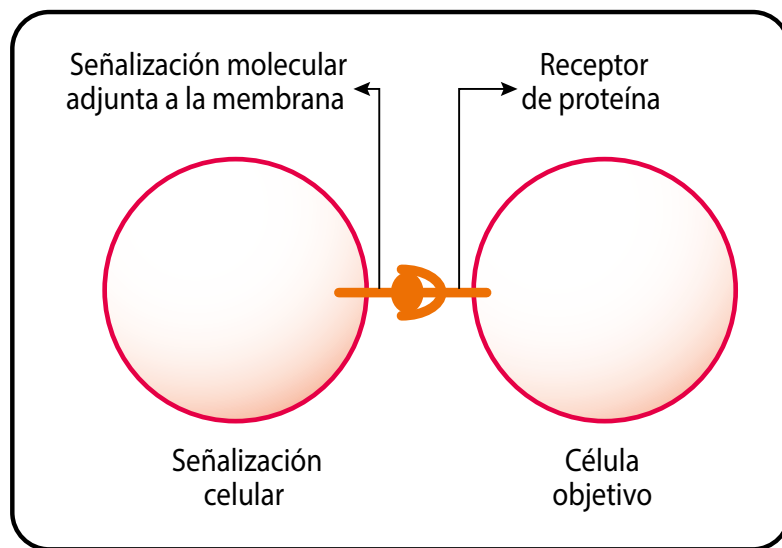


**Figura 1.4.** Enlace de una molécula de señalización a un receptor en la superficie celular y la consecutiva vía de señalización como respuesta al enlace.

Muchas de las moléculas de señalización se transportan en el flujo sanguíneo y otros fluidos extracelulares, y se fijan a las proteínas portadoras hasta alcanzar la célula objetivo. El proceso de endocitosis puede ser considerado adicionalmente como aquel en el que se extraen moléculas de señalización desde el interior de la célula destino para su interacción con receptores moleculares intracelulares de la célula objetivo [17].

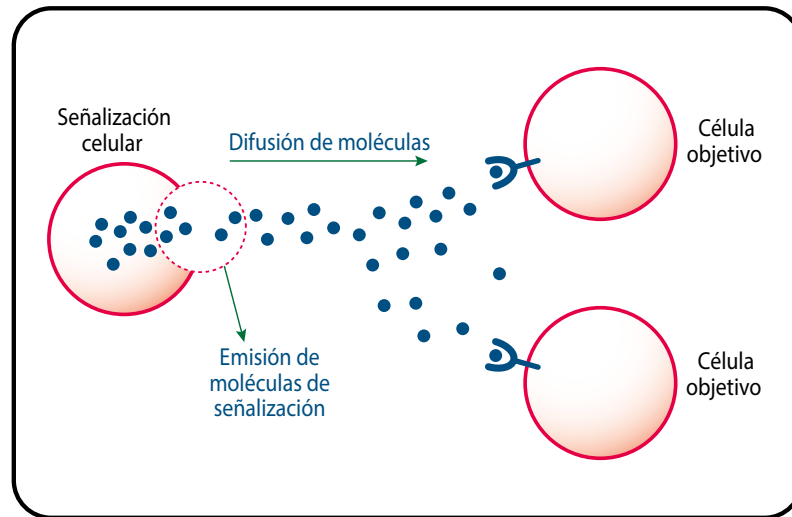
En función del mecanismo de propagación de las moléculas de señalización hacia la célula objetivo y de cómo interactúan con los receptores de proteínas, la comunicación intercelular se clasifica en [17,44-46]:

1. Señalización dependiente de Contacto. Requiere que los elementos de señalización y la célula destino se encuentren en contacto directo, durante el cual aquellas moléculas de señalización que se encuentran adheridas a la superficie de la célula se enlazan al receptor de proteínas de la superficie de la célula objetivo (Figura 1.5 [17]) [44-46].



**Figura 1.5. Señalización por contacto.** Las moléculas de señalización que permanecen unidas a la célula señalizadora se adhieren al receptor de proteínas en la superficie de la célula objetivo.

- 2. Señalización Paracrina.** Comúnmente las células de señalización transmiten moléculas de señalización al entorno extracelular y se propagan por libre difusión (Sección 1.4.1) hasta alcanzar e interactuar con células destino distantes (Figura 1.6 [17]), en lo que se conoce como señalización paracrina. Las señales emitidas funcionan como mediadores locales que interactúan solamente con células alrededor de las células de señalización [17,44-46].

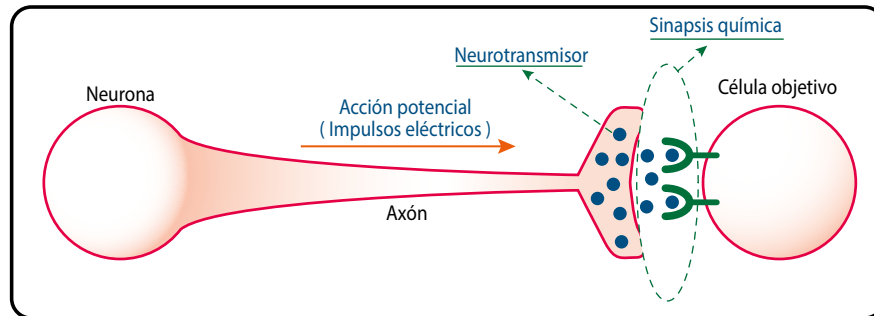


**Figura 1.6.** En la señalización paracrina, una célula señalizadora emite moléculas de señalización que se difunden en el espacio entre esta y las células objetivo. Algunas de tales moléculas interactúan con los receptores de proteínas en la célula objetivo.

- 3. Señalización Sináptica.** Los organismos multicelulares complejos como son los seres humanos requieren mecanismos de señalización sofisticados que operen a distancias considerablemente grandes (a nanoescala) para alcanzar las diferentes partes del cuerpo y coordinar el funcionamiento celular. Los sistemas nervioso y neuronal poseen el proceso más avanzado de señalización denominada sináptica. Aquí, los axones que son prolongaciones filiformes que se extienden desde las neuronas, contactan células objetivo distantes. La punta del axón en las proximidades de la célula destino tiene un sitio especializado llamado sinapsis química. Cuando se activa una neurona en razón de un estímulo externo o por otras células nerviosas, esta envía un impulso eléctrico (que se propaga a través del axón) y se conoce como acción potencial. Cuando el impulso alcanza la sinapsis al final del axón se produce una secreción

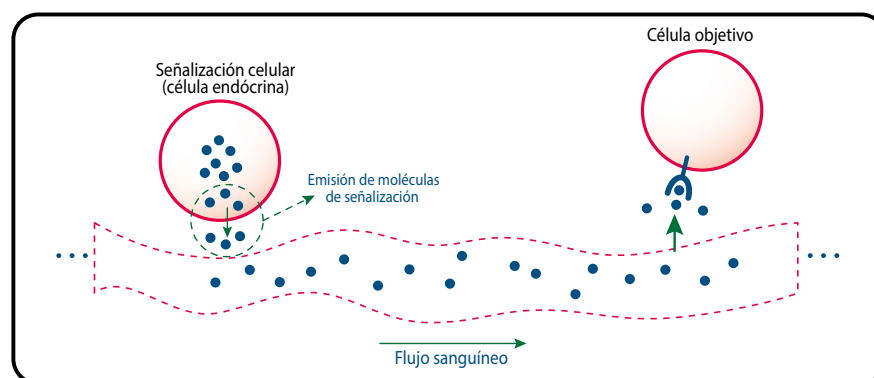


o neurotransmisor. Después, en la sinapsis el neurotransmisor se transporta en forma específica al receptor de la célula destino pertinente (Figura 1.7 [17]). Debido a que la acción potencial es una señal eléctrica su propagación desde la neurona a la sinapsis es rápida. Por otra parte, los neurotransmisores también se transfieren prontamente en la sinapsis y arriban a la célula objetivo pues la longitud de la unión (gap) sináptica es muy pequeña [17,44-46].



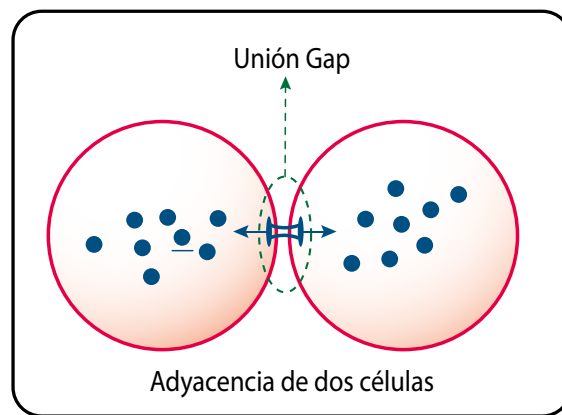
**Figura 1.7.** En la señalización sináptica, una neurona es estimulada por un factor externo u otra neurona, lo cual genera una acción potencial (impulso eléctrico) propagada por el axón. Al final del axón la acción potencial se convierte en una señal química (moléculas de neurotransmisor) que se difunde por medio de la sinapsis química hasta el receptor de la célula destino.

**4. Señalización Endocrina.** La célula de señalización intercelular endocrina libera moléculas de hormonas en el flujo sanguíneo hasta alcanzar e interactuar con células destino distantes (Figura 1.8 [17]) [44-46].



**Figura 1.8.** Una célula endocrina secreta moléculas de hormonas en el torrente sanguíneo hasta arribar e interactuar con células objetivo distantes.

**5. Señalización en Uniones Gap.** En este tipo de señalización el citoplasma de células epiteliales adyacentes se conecta por uniones Gap que son pequeños canales acuosos (Figura 1.9 [17]), los mismos que facilitan el intercambio de iones y otras pequeñas moléculas solubles en agua. De manera diferente a los procesos de señalización previamente descritos, las uniones Gap admiten generalmente la comunicación de células en ambos sentidos. Además, estas uniones efectivizan el efecto de señales extracelulares para difundirse a través de pequeños mediadores intracelulares como el ion  $Ca^{2+}$  [17,44-46].



**Figura 1.9. Moléculas de señalización pueden desplazarse bidireccionalmente en el canal que forma una unión Gap.**

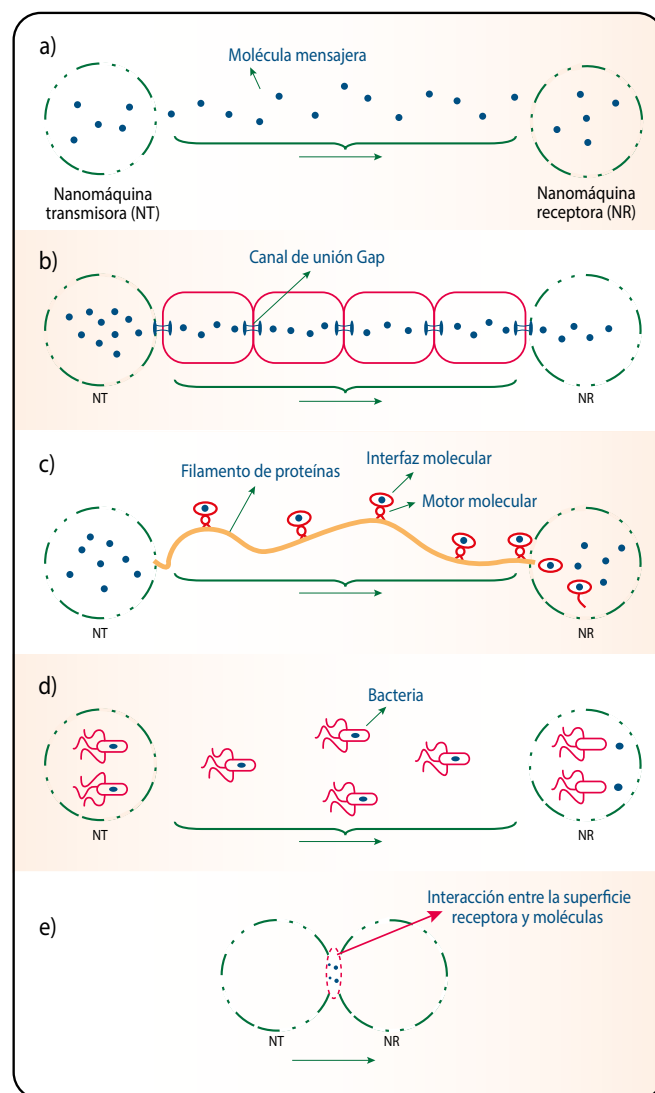
Las CM entre bio-nanomáquinas posibilitan la expansión de las capacidades individuales de cada bio-nanomáquina y forman sistemas de nanocomunicaciones con mayor funcionalidad en aplicaciones que definen mejor control y confiabilidad [17].

Como es notable en los párrafos y secciones precedentes, las CM permiten que las bio-nanomáquinas y nanobots (basados en ADN y proteínas particularmente) transmitan en forma adecuada información de señalización para llevar a cabo funciones biológicas vitales, las cuales son eficientes mediante la comunicación apropiada entre diferentes elementos de una célula y sus pares a corta o larga distancia a nanoescala. De hecho, este es el proceso más acertado por el que los seres vivos han logrado transmitir información a las siguientes generaciones. Este proceso biológico, sin embargo, no está exento de errores, los cuales desde el punto de vista de los sistemas de comunicación convencionales se interpretan como ruido, interferencia, y distorsión, que desde la perspectiva médica se presentan como enfermedades. De ahí la importancia de sustentar conjuntamente las teorías, técnicas, métodos, y ventajas de los sistemas de nanocomunicaciones biológicos y los sistemas de transmisión tradicionales entre sí.

# 1.3

## ARQUITECTURA DE LAS COMUNICACIONES MOLECULARES

Equivalentemente a las telecomunicaciones, los sistemas de CM cuentan con los componentes esenciales para viabilizar la transferencia de información (Figura 1.10 [17]) [1-9]:



**Figura 1.10.** Mecanismos de guía y transporte molecular. a) Libre difusión. b) Canales de uniones Gap. c) Motores moleculares y filamentos de proteína. d) Microorganismos de autopropulsión (bacterias). e) Colisión aleatoria de nanomáquinas móviles y su interacción en la superficie celular.

- 1. Nanomáquina Transmisora (NT).** Se refiere a una nanomáquina (natural o artificial) capaz de sintetizar, almacenar y emitir moléculas mensajeras (información). Tales moléculas deben ser liberadas y este proceso se puede realizar mediante vesículas que transportan mensajeros moleculares adheridos a la superficie de la vesícula y son depositados en el medio celular (Figura 1.2). Los mensajeros moleculares también se pueden difundir a través de la superficie de la NT por diferencia de concentración entre el interior y el exterior del entorno de la NT [17]. Por otra parte, los mensajeros moleculares presentes en la superficie de la NT se pueden desprender por contacto con el destino molecular el cual se denomina Nanomáquina Receptora (NR) [17]. La NT adicionalmente se encarga de la codificación/modulación de la información usando moléculas; así diferentes tipos, concentraciones y frecuencias de emisión de mensajeros moleculares constituyen procesos de codificación/modulación molecular [1-9,17].
- 2. Nanomáquina Receptora (NR).** Captura las moléculas de información que alcanzan el extremo comunicacional destino, de modo que reaccionan químicamente con estas moléculas. Existen varios mecanismos para la detección y captura de la información molecular, por ejemplo, la NR puede poseer una estructura permeable a mensajeros moleculares específicos; la NR también puede tener receptores en los que se enlazan los mensajeros moleculares. Adicionalmente, la NR podría contar con canales superficiales para la captación de información [17].
- 3. Mensajeros Moleculares.** Transportan la información entre los extremos de comunicación molecular. Los mensajeros moleculares también se denominan moléculas de información, y a su vez se constituyen como moléculas portadoras de información; a diferencia de sus pares de sistemas de telecomunicaciones, en los que la portadora no es la información propiamente [9]. Los mensajeros moleculares deben permanecer estables químicamente durante todo el periodo de comunicación aun frente a inconvenientes en la transmisión como ruido (de diversos orígenes), degradación, e interferencia molecular [9,17].
- 4. Moléculas de Interfaz.** Habilitan a las nanomáquinas para la transmisión y recepción de mensajeros moleculares gracias a los mismos procesos de comunicación correspondientemente. Las vesículas son una clase de interfaces, en las que se encapsulan mensajeros moleculares, se evitan reacciones químicas con moléculas del espacio circundante y se previene

la degradación y además se protege del ruido del ambiente [2,9-17]. Como se puede notar esta forma de interfaz efectiviza mejoras en la transmisión de moléculas (confiabilidad).

**5. Mecanismos de Guía y Transporte.** Factibilizan lineamientos de transmisión y propagación de mensajeros moleculares entre las nanomáquinas transmisoras y receptoras. En la Figura 1.10 [17] se visualizan cinco mecanismos para guía y transporte de la información molecular [17].

**a) Libre difusión** (Sección 1.4.1). Ocurre cuando la NT emite mensajeros moleculares que se propagan libremente a su alrededor (Figura 1.10 a)), por lo que algunos mensajeros por transporte aleatorio alcanzarán la NR y así se realizará la decodificación de información molecular.

**b) Canales de Uniones Gap.** Son canales entre células adyacentes o en contacto (Figura 1.10 b)) que permiten la difusión de mensajeros moleculares entre las nanomáquinas transmisoras y receptoras. Funciones de filtrado y conmutación además son posibles en canales de esta naturaleza debido a diversas propiedades de selectividad y permeabilidad [17].

**c) Motores Moleculares.** Conocidos como motores de proteínas, facilitan la transferencia de mensajeros moleculares en base a dos procesos. En el primer caso (Figura 1.10 c)) la información se transporta como carga en el motor molecular que se desplaza a lo largo de una hebra de filamento de proteína. En el segundo caso los filamentos de proteína (como son los microtúbulos) portando mensajeros moleculares se impulsan por motores moleculares los cuales son absorbidos en la superficie planar entre las NT y NR [17].

**d) Microorganismos de autopropulsión.** Esta clase de propagación de mensajeros moleculares (entre los que se tienen a las moléculas de ADN) ocurre por su inserción en bacterias en el transmisor. Subsecuentemente, la NR genera moléculas de atracción para orientar la ruta de la bacteria hasta el extremo de recepción y en consecuencia interpretar la información contenida en los mensajeros moleculares (Figura 1.10 d)) [17].

**e) De manera similar a la comunicación intercelular por contacto** (Figura 1.5) los mensajeros moleculares pueden permanecer anclados a la superficie de la NT. Por tanto,

estas moléculas se pueden liberar por la NR, cuando la NT y NR aleatoriamente colisionan, por lo que las moléculas en la superficie de la NT se enlazan a los receptores superficiales de la NR (Figura 1.10 e)) [17].

Las CM se realizan además por procesos de transporte activo y pasivo [17].

En el transporte pasivo la información molecular se propaga espontáneamente en el entorno de transmisión sin requerir ningún elemento o proceso energético adicional para la transmisión de la información. En el literal a) se ha descrito esta categoría de transporte [17].

En los literales b) al e) se ejemplifican mecanismos de transporte activo el cual se produce utilizando energía química para la transmisión de mensajeros moleculares [17].

Dependiendo de cuál sea la guía y el proceso de transporte, los sistemas de CM se categorizan como CM pasivas o CM activas. Si las CM se realizan usando receptores absorbentes o de complejo ligando-receptor se denotan como CM pasivas. En tanto, se clasifican como CM activas a los motores moleculares, uniones Gap, microorganismos de autopropulsión y nanomáquinas basadas en contacto [17].

## 1.4

### PROPAGACIÓN DE SEÑALES FÍSICAS EN COMUNICACIONES MOLECULARES

#### 1.4.1 Propagación basada en difusión

La difusión (o libre difusión propiamente) de moléculas se refiere al Movimiento Browniano (o random walk/movimiento aleatorio), debido al incremento de energía térmica molecular. Este tipo de movimiento es simple y eficiente y no requiere de energía externa adicional para producirse. En la naturaleza el movimiento por difusión ocurre en células de señalización de calcio, comunicación vía feromonas entre animales, propagación de moléculas de enlaces de ADN sobre segmentos de ADN propiamente, entre otros [9,18, 46-51].

Las leyes de difusión de Fick sustentan el movimiento Browniano. En la consideración de la primera ley de Fick se visualiza el escenario de la Figura 1.11, en la cual moléculas se desplazan posicionalmente en el eje  $X$  a pasos de  $\Delta x$  en el tiempo  $\Delta T$ . Se asume que cada molécula se

desplaza independientemente y con equiprobabilidad de propagarse hacia adelante y atrás correspondiente a  $1/2$ .  $N(x)$  denota el número de moléculas en la posición  $x$  y al tiempo  $t$ . Durante el intervalo  $[t, t + \Delta T]$  se espera que la mitad de las moléculas en  $x$  se traslade a  $x + \Delta x$  y atraviese la superficie normal al eje  $X$ , la cual en la figura se ha colocado en  $(x + \Delta x)/2$ . Simultáneamente, se supone que la mitad de las moléculas en  $x + \Delta x$  cruce la superficie en dirección opuesta; por tanto, el número neto esperado de moléculas que llegan a  $x + \Delta x$  será  $\frac{1}{2}[N(x) - N(x + \Delta x)]$ . Si la superficie de área  $S$  se divide y se toma pasos de tiempo  $\Delta T$ , el flujo neto  $J_{Dif}$  que atraviesa la superficie por difusión es [18]:

$$J_{Dif}|_{1D} = -\frac{1}{2\Delta T} \frac{[N(x + \Delta x) - N(x)]}{S} \quad (1.1)$$

Si se multiplica la parte derecha de la Ecuación 1.1 por  $\Delta x^2 / \Delta x^2$  se obtiene [18]:

$$\begin{aligned} J_{Dif}|_{1D} &= -\frac{1}{\Delta x} \frac{\Delta x^2}{2\Delta T} \frac{[N(x + \Delta x) - N(x)]}{S\Delta x} \\ &= -\frac{1}{\Delta x} \frac{\Delta x^2}{2\Delta T} [C(x + \Delta x) - C(x)] \end{aligned} \quad (1.2)$$

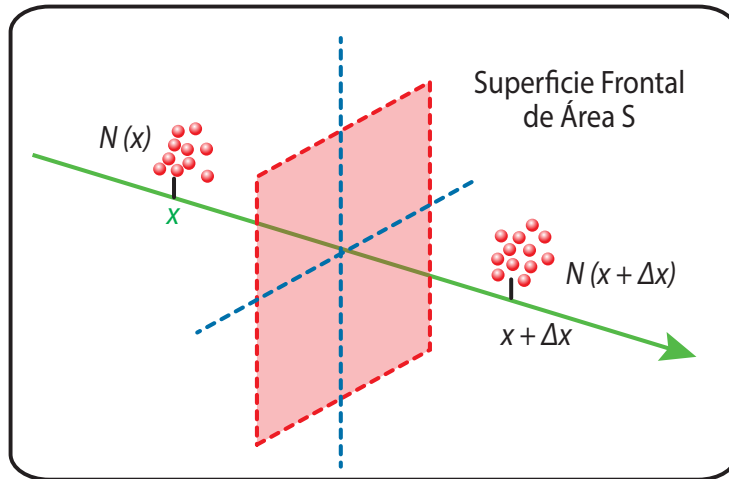
Donde  $C(x + \Delta x) = N(x + \Delta x)/S\Delta x$  y  $C(x) = N(x)/(S\Delta x)$  son las concentraciones moleculares a las posiciones  $x + \Delta x$  y  $x$ , respectivamente. Si se considera que  $\Delta x \rightarrow 0$  y se establece el coeficiente de difusión  $D = \Delta x^2 / (2\Delta T)$ , la Ecuación 1.3 representa la primera ley de Fick en una dimensión [18]:

$$J_{Dif}|_{1D} = -D \frac{\partial C(x, t)}{\partial x} \quad (1.3)$$

Concomitantemente, la primera ley de Fick en tres dimensiones se expresa en la Ecuación 1.4 [18]:

$$J_{Dif}|_{1D} = -D \frac{\partial C(\mathbf{d}, t)}{\partial x} \quad (1.4)$$

Donde el vector  $\mathbf{d} = [x, y, z]$  especifica la posición molecular [9,10,18, 46-51].



**Figura 1.11.** Modelo macroscópico de propagación aleatoria (random walk/movimiento aleatorio). Los pequeños círculos representan moléculas que se mueven en el eje  $X$ . El plano punteado es ortogonal al eje  $X$ .

La primera ley de Fick cuantifica la relación entre el flujo de difusión y el gradiente de concentración. El valor del coeficiente de difusión  $D$  depende de características del espacio molecular como temperatura y viscosidad, así como también del tamaño y forma de las moléculas. El valor de  $D$  determina la rapidez con la que una molécula se mueve. Por ejemplo, en cierto medio las moléculas más pequeñas podrían tender a propagarse más rápido. No obstante, aunque el coeficiente de difusión de una molécula se encuentra en el orden de  $1.000 \mu\text{m}^2/\text{s}$  se estima que le toma aproximadamente la mitad de  $1 \text{ ms}$  a tal molécula para propagarse a una distancia de  $1 \mu\text{m}$  (que es el ancho de una bacteria). Con lo que se demuestra que el proceso de difusión es lento [9,18].

El impacto de las variaciones de concentración y difusión concretan la segunda ley de Fick [9,18]:

$$\frac{\partial C(\mathbf{d}, t)}{\partial t} = D \nabla^2 C(\mathbf{d}, t) \quad (1.5)$$

La solución de la Ecuación 1.5 se puede obtener por condiciones iniciales y de borde que dependen de las características del entorno molecular.



### 1.4.2 Propagación mediante advección

La difusión molecular se puede acelerar por otros fenómenos físicos [9,18,46-51]:

1. El arrastre (drift) por fuerza de inducción.
2. Advección por flujo masivo (bulk flow).

La fuerza que se induce por el arrastre es el resultado de la aplicación de fuerzas externas y no por el contenido interno del fluido. Entre estas fuerzas se tienen aquellas que se generan por campos electromagnéticos (nanopartículas magnéticas), campos eléctricos (en partículas cargadas) y por fuerzas gravitacionales (en particular cuando se considera masa suficiente). La advección se refiere al transporte molecular asistido por el movimiento masivo del fluido entero propiamente, el mismo que incluye las moléculas de interés. La señalización endócrina en vesículas sanguíneas y la manipulación de fluidos son casos de esta clase de transporte [9,18,46-51].

La advección produce concentración de flujo a través de una superficie en una región específica. La concentración referida será variante en el tiempo, por lo que el flujo por advección  $J_{Adv}$  con una velocidad  $\mathbf{u}$  se describe por la Ecuación 1.6 [9,18,46-51]:

$$J_{Adv} = \mathbf{u}C \quad (1.6)$$

Los cambios en el tiempo de concentración se determinan por el flujo de difusión y el flujo de advección [18]:

$$CdV - \frac{\partial}{\partial t} \int_V (J_{Dif} + J_{Adv}) \cdot \mathbf{n} dS \quad (1.7)$$

Donde  $V$  es el volumen de una región cuyo elemento diferencial es  $dV$ ,  $S$  es la superficie de volumen con elemento diferencial  $dS$ , y  $\mathbf{n}$  es el vector unitario normal saliente. La sustitución de las Ecuaciones 1.4 y 1.6 en la Ecuación 1.7 más el uso del teorema de divergencia conlleva a la Ecuación 1.8 [18, 46-51]:

$$\frac{\partial C}{\partial t}(\mathbf{d}, t) = D\nabla^2 C(\mathbf{d}, t) - \mathbf{u} \cdot \nabla C(\mathbf{d}, t) \quad (1.8)$$

De la ecuación anterior se puede notar que la velocidad  $u$  ejerce un impacto en la distribución de la concentración de moléculas. Además, la clasificación y caracterización del comportamiento en la propagación de fluidos se establece por los números de Reynolds y Péclet [18, 46-51].

1. *Número de Reynolds (Re)*. Se define como:

$$Re = \frac{\rho u_{ef} d}{\mu} \quad (1.9)$$

Donde  $\rho$  es la densidad de flujo,  $u_{ef}$  es la velocidad promedio,  $\mu$  es la viscosidad del fluido dinámico,  $d$  es la escala de longitud, y para fluidos en un cilindro se convierte en el diámetro del mismo. El número de Reynolds discrimina si el fluido se encuentra en régimen laminar o turbulento. En el primer caso el número de Reynolds es comúnmente inferior a 2300, en tanto en un régimen turbulento es superior a 2300.

En canales a microescala (en fluidos sintéticos o en vesículas sanguíneas) el número de Reynolds es menor a 20 y así se trata de un régimen laminar. Se ha demostrado que generalmente la mayoría de las vesículas de la sangre (excepto en la aorta, en las que aparece  $Re \in [1200, 4500]$ ) se asumen flujos laminares.

Típicamente entre los fluidos laminares se encuentran los flujos de Poiseuille en los que existe disminución de la presión entre el interior y exterior del microfluído. Si el movimiento se orienta en dirección de  $x$ , y si la sección transversal del canal es circular, la velocidad de distribución  $u_x(r)$  se pueden expresar como [18, 46-51]:

$$u_x(r) = \frac{\Delta P}{4\mu L} (R^2 - r^2) \quad (1.10)$$

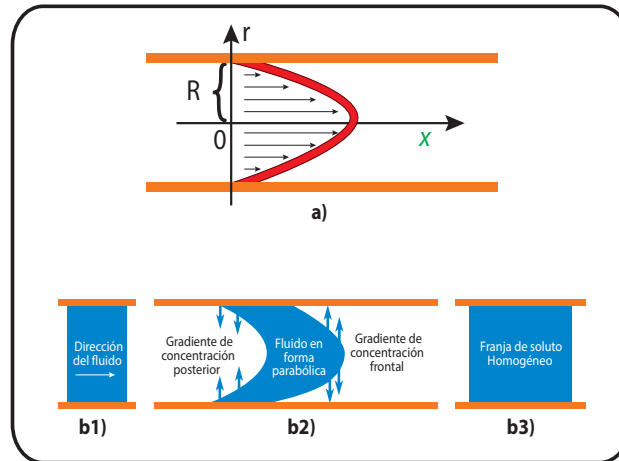
Donde  $\Delta P$  representa la disminución de presión,  $L$  es la longitud del canal,  $R$  es el radio de la sección transversal y  $r$  es la localización radial. La Ecuación 1.10 indica que la velocidad se incrementa desde los bordes al centro del canal [18, 46-51].

2. *Número de Péclet (Pe)*. Compara la importancia relativa entre la difusión y la advección [18]:

$$Pe = \frac{u_{ef} L}{D} \quad (1.11)$$

Cuando  $Pe = 0$  el movimiento molecular es puramente de difusión, si  $Pe \rightarrow \infty$  el movimiento se torna masivo puramente [18].

El número de Péclet es adecuado al predecir la dispersión molecular bajo la dispersión de Taylor y describe como la advección axial y la difusión radial afectan conjuntamente el transporte molecular en un fluido masivo controlado por presión. Específicamente como se esquematiza en la Figura 1.12 [18], una franja homogénea de soluto se inyecta en  $x = 0$  para su propagación en un microcanal cilíndrico de radio  $R$ . Poco tiempo después, las moléculas del soluto se estrechan a manera de parábola por el movimiento de fluido cuya velocidad se expresa en la Ecuación 1.10. Luego, se establecen dos gradientes de concentración, uno frontal y otro posterior, consecuentemente, ocurre una migración neta de concentración molecular de soluto en áreas de mayor concentración (interfaz frontal en el centro del canal) a menor concentración (en los extremos del canal); adicionalmente, existe una migración neta de moléculas en la interfaz posterior desde los límites del canal hacia las zonas centrales del mismo. Se empleará  $R^2/(4D)$  para particularizar el tiempo de difusión a lo largo de la dirección radial y  $L/u_{ef}$  para representar el tiempo de transporte molecular con una velocidad promedio del fluido  $u_{ef}$  en la distancia  $L$ . Si  $R^2/(4D) \gg L/u_{ef}$  (equivalente a  $Pe \gg 4L^2/R^2$ ) por ende la difusión en la sección transversal no se puede ignorar y se establece un soluto a manera de parábola que propicia una distribución uniforme de tal soluto en la sección transversal [18, 46-51].

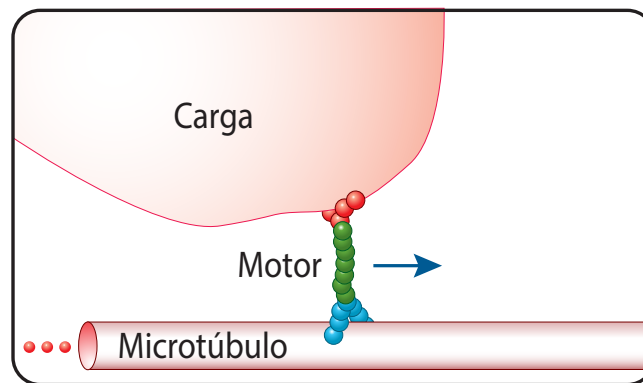


**Figura 1.12.** Esquema de la dispersión de Taylor en un fluido de Poiseuille. a) En un canal de microfluído la velocidad se incrementa desde los bordes hacia el interior de acuerdo a la distribución parabólica de la Ecuación 1.10 (donde  $R$  es el radio de la sección transversal,  $r$  es la posición radial y  $x$  es la dirección del fluido). b) Progresión en la dispersión de Taylor en un canal de microfluído. b1) Una banda de soluto homogéneo se inyecta en el canal. b2) Posterior a la inyección, la banda de soluto se estrecha en forma de parábola, debido precisamente a la velocidad que sigue una distribución parabólica; entonces la concentración de gradientes genera fronteras hacia adelante y atrás, por lo que se produce un movimiento neto de las moléculas del soluto. b3) Finalmente las moléculas se distribuyen uniformemente en la sección transversal.

### 1.4.3. Propagación basada en carga

La propagación de señales mediante mecanismos que portan moléculas como carga en contenedores biológicos se considera como transporte activo, en razón de la energía invertida en cargar, descargar, trasladar y desplazar tal contenedor. Estos procesos de transporte se utilizan en la naturaleza para sobrellevar las limitaciones de rapidez y direccionamiento propias de la señalización por difusión. Entre los tipos de propagación para movimiento de carga se tienen [18,26,27,52-55]:

1. Motores moleculares. Ocurren en organismo eucariotas o procariotas que transportan de manera intracelular carga y se desplazan a lo largo del citoesqueleto y así usan motores moleculares. El citoesqueleto se compone de diversos elementos o “caminos” que administran el movimiento, la forma, y la división celular. Los motores son proteínas que se clasifican en una de tres familias; miosina, quinesina y dineína. Los motores de miosina se trasladan a través de filamentos de actina, en tanto, los motores de quinesina y dineína se desplazan a lo largo de microtúbulos (Figura 1.13 [18]). Cada categoría de motor se enlaza (en uno de sus extremos conocido como cabeza) al citoesqueleto y se une a su carga o al contenedor de la carga (en el otro extremo que se denomina cola). Una serie de reacciones hidroliza el ATP (Adenosine Triphosphate) para inducir cambios en la conformación de enlaces del motor en la cabeza para que este se pueda mover a lo largo del citoesqueleto [18, 26, 27, 52-55].



**Figura 1.13.** Representación de un motor de proteína que porta una carga alrededor del microtúbulo. Los motores de proteína se usan para el transporte en el interior de una célula. Típicamente, tales motores cuentan con una cabeza (de color celeste en la figura) que se desplaza a lo largo del citoesqueleto, y una cola (de color rojo en la figura) que se enlaza a su carga, además se tiene un tallo largo (de color verde en la figura) que une la cabeza y la cola. La carga propiamente puede ser más grande que el motor, ejemplos de carga son las vesículas y la mitocondria.

Las cargas de los motores incluyen la mitocondria (que origina el ATP), el ARN mensajero (moléculas intermedias requeridas en la obtención de proteína), y una variedad de vesículas. La función frecuente de esta clase de transporte es trasladar la carga desde donde se sintetiza hasta dónde se usa en la célula. Uno de estos casos, se presenta cuando una vesícula secretora se puede adherir a un motor para portar señalización molecular externa desde el aparato de Golgi, donde las referidas vesículas se forman y liberan. La carga de un motor puede ser mucho más grande que él mismo. Velocidades relativamente altas (desde el enfoque molecular) son factibles en esta variedad de transporte, así se han puntualizado velocidades en la propagación de vesículas secretoras hasta de 10  $\mu\text{m/s}$  [18].

La estructura de los motores moleculares para su desplazamiento sobre elementos del citoesqueleto establece un comportamiento estadístico en periodos cortos de tiempo, debido al tiempo precisamente para que sucedan las reacciones de hidrólisis del ATP. Los motores se pueden desprender, difundir alrededor, y volver a enlazar al citoesqueleto. Por ende, de manera análoga a la propagación por difusión, su modelo se puede aplicar también al transporte de esta naturaleza [18, 26, 27, 52-55].

La señalización centrada en motores moleculares se ha constituido como uno de los primeros mecanismos propuestos por la biología sintética y en trabajos experimentales, pero en muy pocas investigaciones se ha caracterizado la comunicación molecular en un sistema de transmisión cuyos elementos se conecten mediante el citoesqueleto para viabilizar que el motor se pueda desplazar en él. Algunos trabajos se han orientado al diseño sintético de sistemas con roles reversos a los del citoesqueleto y sus motores moleculares, en estos sistemas los elementos del citoesqueleto se han transformado en moléculas de información; en los mencionados sistemas una superficie se cubre con un motor de proteínas, y estas impulsan microtúbulos entre los extremos comunicacionales. Los sistemas descritos constituyen lo que se denomina “lab-on-a-chip” [18,26,27,52-55].

- 2. Quimiotaxis.** Dentro del esquema para el transporte basado en carga molecular, se tiene el comportamiento bacteriano que ocurre durante la quimiotaxis. En este mecanismo las bacterias se orientan en función a gradientes de concentración, aunque además la quimiotaxis puede ser referida al movimiento de organismos en respuesta a un estímulo químico. Si se toma en cuenta el caso bacteriano, estas ejercen el papel de sensores para especificar condiciones que les posibiliten trasladarse a una fuente de luz o de alimentación y alejarse de toxinas. Las bacterias pueden ejercer mejor sus

funciones si trabajan en conjunto, logrando una comunicación exitosa entre sí, lo que incluye transferir información genética [18]. Tal comportamiento en comunidades es completamente similar a aquel que desde el punto de vista de la ingeniería realizan las redes de computadoras desempeñando funciones altamente estructuradas y complejas que no fueran factibles a través de un rendimiento individual.

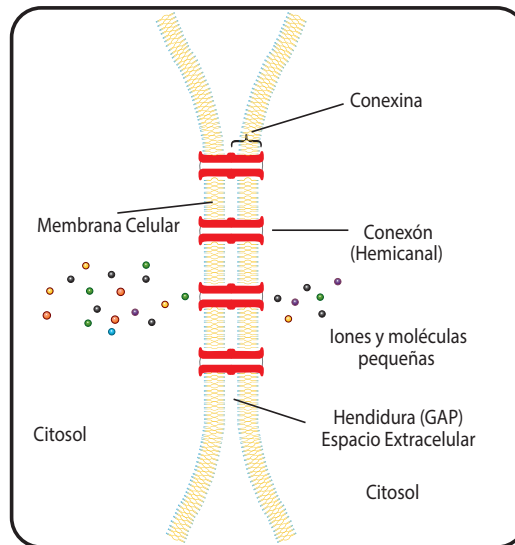
Con esta perspectiva se han empleado bacterias para operar en un entorno de “networking” transportando cargas. El proceso de comunicación inicia cuando el nodo receptor libera moléculas que atraen bacterias (portando cargas) que se localizan en los puntos de transmisión, así la información (carga) es compartida entre las bacterias y los nodos por plásmidos de conjugación [18, 52-57]. Acarrear carga como concepto general se ha utilizado adicionalmente para la administración de medicina en la que nanomáquinas transportan en su carga el medicamento correspondiente para cumplir tareas terapéuticas [18].

La propagación de señales por quimiotaxis posee múltiples componentes, moléculas de atracción y repulsión, el desplazamiento celular (o concretamente de nanomáquinas) en respuesta a gradientes moleculares, y el proceso de conjugación propiamente. El movimiento bacteriano como consecuencia de determinar condiciones y producir el traslado de información, se puede modelar en función de la física detrás de la propagación por difusión, misma que, se adopta cuando se emplean sistemas de nanomáquinas bacterianas transportando información basada en carga [18, 26, 27, 52-57].

#### **1.4.4. Propagación basada en contacto**

El desplazamiento molecular que implica la comunicación de información por contacto se puede realizar directa o indirectamente entre elementos y suele ser de mayor confiabilidad, entre las diferentes formas de este tipo de desplazamiento de señales moleculares constan [18, 58-61]:

1. Uniones Gap (UG). Son grupos de canales de membrana que conectan células adyacentes presentes en cada tejido de cualquier organismo multicelular. Las uniones dan lugar a la difusión de pequeñas moléculas directamente desde el citoplasma de una célula hasta el de su célula vecina, evitando la matriz extracelular [18, 58-61]. La estructura de una UG se compone de dos hemicanales contruidos por proteínas específicas (conexinas) de cada célula adyacente (Figura 1.14 [18]). Su disposición de enrejado hexagonal es tal que acoplan el plasma de células vecinas. Cada hemicanal (conexón) se compone de seis subunidades que crean poros cilíndricos que enlazan las células [18,58-61].



**Figura 1.14. Estructura de una unión Gap. Proteínas individuales (conexinas) forman un hemicanal o conexón. Dos conexones de células adyacentes se unen para la conformación de una hendidura (Gap). El canal se abre selectivamente propiciando el paso de iones y pequeñas moléculas.**

En razón de que las UG determinan vías biológicas entre células, ejercen un papel fundamental en la comunicación intercelular pues permite el intercambio de iones, microARN y otras pequeñas moléculas como metabolitos y segundos mensajeros. La regulación de las UG para la apertura y cierre se gestiona por vías químicas, eléctricas y mecánicas. Dos de estos mecanismos se mencionan a continuación [18,58-61].

- a)** Paso rápido. En el que la rectificación de corrientes iónicas circulando en un canal totalmente abierto mediante permeabilidad selectiva, produce transiciones para la regulación del canal de modo que sean rápidas, y se conocen tres estados intermedios entre la apertura y cierre.
- b)** Paso progresivo a través de la sensibilidad de voltaje. Es un mecanismo de apertura y cierre cíclico y las transiciones entre estos estados ocurren en muchos, pero pequeños pasos graduales.

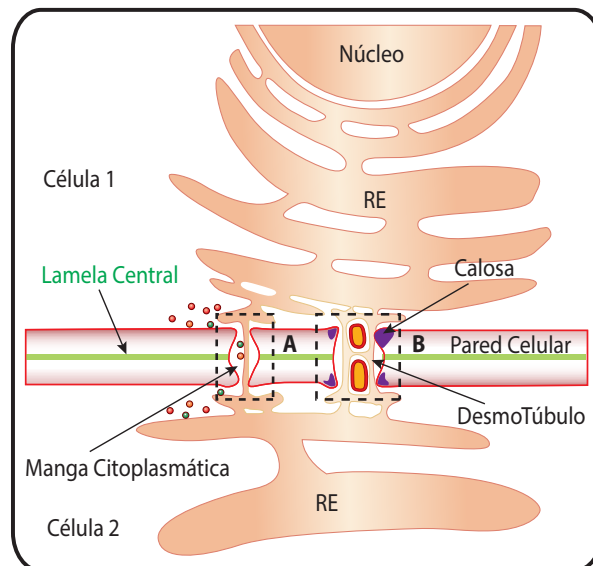
La regulación de la permeabilidad de UG se organiza por una barrera electrostática creada por iones de  $Ca^{2+}$ . Estos iones se enlazan a ciertas cadenas laterales en cada hemicanal generando un gradiente positivo que inhibe cualquier otro ion positivo (como  $K^+$ ) [18,58-61].

La fosforilación de proteínas (por variaciones estructurales debido a la adición en un grupo fosfato) es otro proceso importante para la regulación de UG, y actúa en algunos ni-

veles afectando el tráfico de conexinas desde el interior de la célula a la membrana plasmática, además, al agrupamiento localizado, y reciclaje de UG. Los canales individuales de UG cuentan con una conmutación rápida, habilitando el ajuste del nivel de comunicación entre las dos células que crean la unión Gap, esto sucede por la modulación del número de conexones que cada célula aporta, y por tanto se establece el área de la superficie del enrejado [18,58-61].

Sistemas sintéticos de UG han transmitido exitosamente células Hela modificadas genéticamente a una velocidad aproximada de  $5 \mu\text{m/s}$  por medio de la propagación de ondas de calcio. Adicionalmente, modelos teóricos de transmisión de información (capacidad del canal de transmisión de UG) se han usado para correlacionar el incremento de enfermedades cardiacas [18].

2. **Plasmodesmos.** En plantas las estructuras que son comparables a las UG se conocen como plasmodesmos. Las células de vegetales están recubiertas por una pared rígida que provee una estructura sólida que limita la circulación de moléculas y por ende su comunicación. Para vencer la referida barrera los plasmodesmos actúan como canales en la pared celular que conectan células adyacentes (Figura 1.15 [18]). Comunicando virtualmente cada célula de una planta, los plasmodesmos forman un camino que da lugar a la transferencia de metabolitos, nutrientes, y señales hasta los tejidos más remotos [18,58-61].



**Figura 1.15. Estructura de los plasmodesmos.** En A y B se observan estructuras simples y complejas respectivamente. En la figura, células adyacentes se conectan por el citoplasma y por el RE vía desmotúbulos. Las moléculas pueden pasar desde la manga citoplasmática. La calosa engloba al canal. Las paredes de cada célula se separan mediante la lamela central.

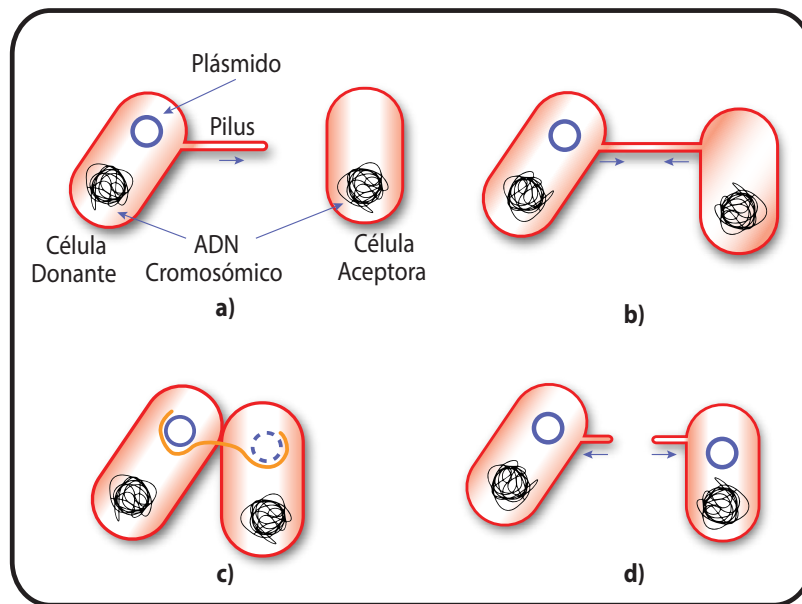


Los plasmodesmos son estructuras a nanoescala y sus canales son membranas lineales que se unen sutilmente con la pared celular. Lo que implica que existe una membrana plasmática continua entre diferentes células, que posibilita a su vez la comunicación del retículo endoplasmático RE de cada célula con su vecina. En el centro y a lo largo de la longitud del canal adyacente aparece una estructura conocida como desmotúbulo, que interactúa con la membrana a su alrededor por espigas (spikes). Las moléculas se trasladan por la hendidura entre el desmotúbulo y la membrana plasmática, es decir por medio de la manga citoplasmática. La regulación del tráfico efectuada por los plasmodesmos se presume ocurre por el ajuste del ancho de la manga citoplasmática y por la presencia o ausencia de la proteína calosa alrededor del diámetro del canal del plasmodesmo [18].

**3.** Comunicación basada en apéndices. En esta forma de señalización física molecular se tienen la conjugación bacteriana, los nanotubos de túnel y los telocitos, en los que las células se relacionan con sus vecinas por la presencia de apéndices [18,56,57].

**a)** La conjugación es un proceso de intercambio genético entre bacterias, y es un factor clave en la plasticidad del genoma microbiano, también facilita la transmisión de ADN entre células cercanas. Diferentes tipos de elementos genéticos móviles son responsables de iniciar y establecer la conjugación. Los plásmidos de conjugación son los elementos genéticos móviles más conocidos, identificables y ubicuos de entre las especies bacterianas. A la vez, los plásmidos son fundamentales en la patogenicidad y en el desarrollo de la resistencia antibiótica en seres procariotas. Los plásmidos se constituyen como elementos de doble hebra de ADN separados del genoma bacteriano. Los plásmidos contienen todas las secuencias pertinentes para codificar su propia replicación y transferirla a otras células [18,56,57].

La conjugación se activa generalmente cuando una célula donante porta el plásmido para ser trasladado. Una estructura de apéndices de filamentos rectos y rígidos que se denomina pilus se elonga hacia la célula aceptora (Figura 1.16 [18]). Subsecuentemente, al contacto el pilus se fusiona con la membrana de la célula vecina. El plásmido de conjugación será entonces separado a una sola hebra de ADN, una de las cuales se transporta a través del canal que se ha abierto en la célula aceptora. Simultáneamente, en ambas células la hebra simple se retrae y se convierte en doble hebra; efectuado el intercambio de ADN el pilus se extiende en los extremos de las células para separarlas y es reciclado posteriormente en la separación final [18,56,57].

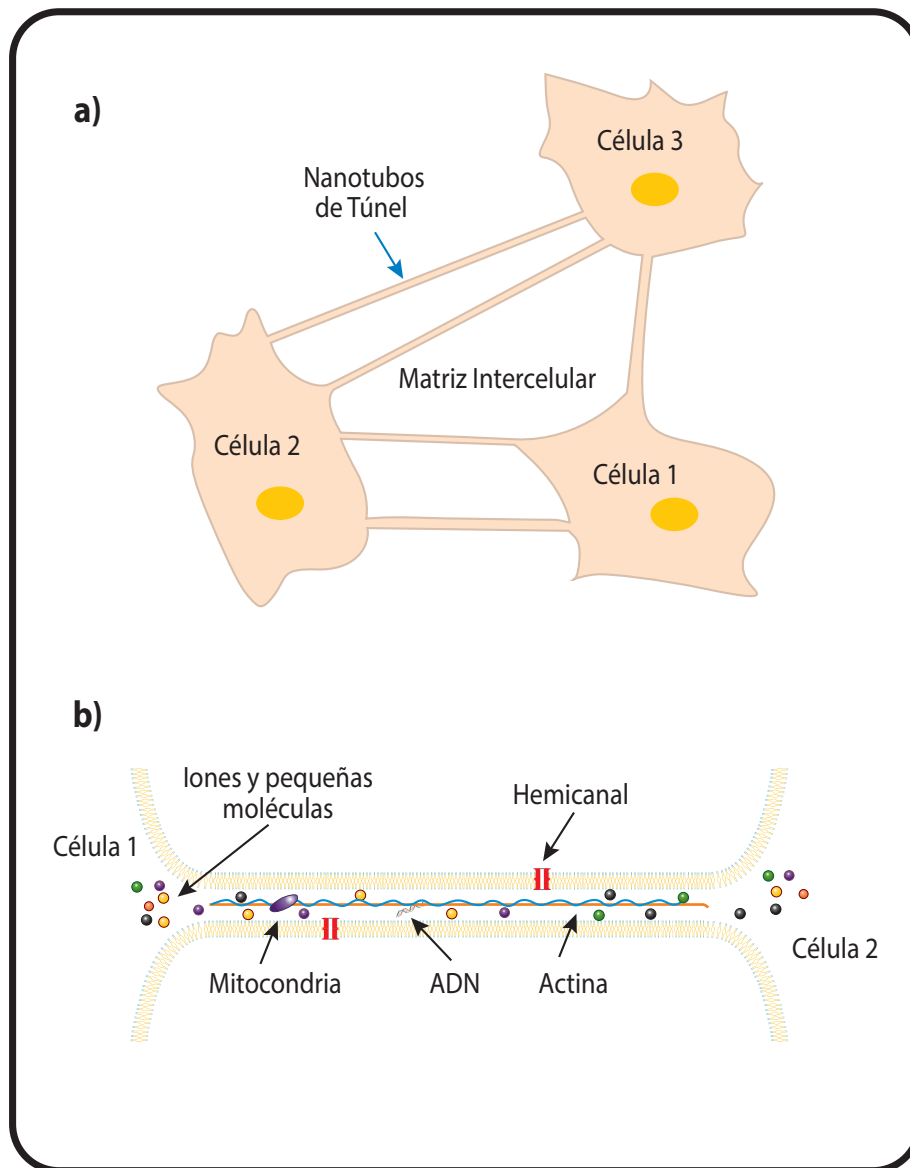


**Figura 1.16.** Pasos en la conjugación bacteriana. a) La célula donante porta el plásmido de conjugación (círculos azules en la figura) que extiende el pilus hacia la célula aceptora mediante quimiotaxis. b) Después de la conexión, el pilus se contrae para aproximar las dos células que intervienen en el proceso, de modo que se contacten. c) Como el plásmido de ADN se replica (color café en la figura) en la célula donante, se desplaza simultáneamente como una sola hebra en el canal abierto a la célula aceptora; y se transforma nuevamente en doble hebra de ADN cíclico (círculos punteados de color azul en la figura). d) En la parte final del proceso las células se separan, el pilus extendido se destruye y se recicla.

Otro elemento genético móvil son los transposones conjugativos que pueden ser más abundantes y de mayor importancia que los plásmidos en la comunicación bacteriana [18].

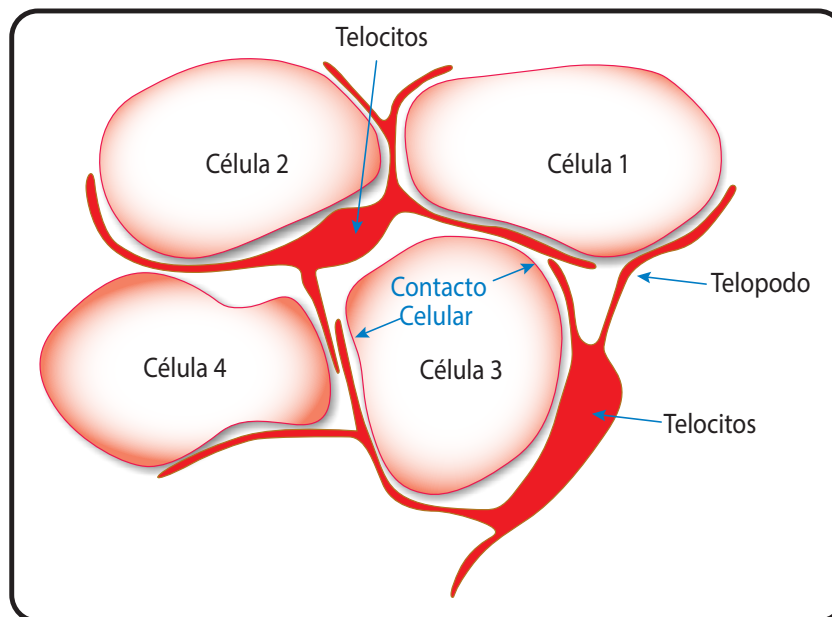
En la biología sintética se han propuesto investigaciones de sistemas de CM bajo el paradigma de la ingeniería, que se han enfocado en la fenomenología subyacente a la conjugación bacteriana en lo que se refiera a la cuantificación de información [18].

**b)** Un tipo de estructuras (temporales) que establecen largos canales (hasta varios *um*) y que se forman entre células, son los nanotubos de túnel. Estos se crean de manera dinámica en pocos minutos y comunican el citoplasma de las células en contacto (Figura 1.17 [18]). En tanto que iones y pequeñas moléculas se difunden libremente en los nanotubos de túnel, estos, facilitan el transporte activo de diversas moléculas, organelos, y micro-vesículas (como la mitocondria y componentes de membrana) [18,62-64].



**Figura 1.17. Estructura de los nanotubos de túnel.** a) Los nanotubos de túnel comunican células adyacentes a distancias relativamente grandes. b) Los iones y pequeñas moléculas se difunden libremente a través del canal, mientras que moléculas más grandes y organelos se propagan activamente vía filamentos de actina.

- c) Células especializadas llamadas telocitos conforman una red en la matriz extracelular en todos los tejidos corporales. Esta red se compone de largos y finos canales (telopodos) entre células de telocitos (Figura 1.18 [18]). Así los canales se comunican intercelularmente en su entorno mediante difusión, por contacto, y por señales eléctricas y mecánicas. El rol de los telocitos facilita procesos fisiológicos en animales, los que incluyen señalización celular, liberación de vesículas extracelulares, soporte mecánico a tejidos adyacentes, actividad muscular, orientación para células migrantes, homeostasis de tejidos, y transmisión de señales neuronales con otras células especializadas [18,65,66].



**Figura 1.18.** Los telocitos conectan varias clases de células vía apéndices (telopodos). Los telopodos se conectan entre sí posibilitando la transferencia de información entre células a largas distancias (a nanoescala).

## 1.5

### INTERACCIÓN DE SEÑALES QUÍMICAS EN COMUNICACIONES MOLECULARES

La maquinaria bioquímica para la transmisión y recepción de señales celulares resulta compleja y ejerce un papel preponderante en el funcionamiento celular. Por ejemplo, los iones se usan frecuentemente para la señalización y la regulación directa del comportamiento. En consecuencia, las señales proporcionadas por iones de  $Ca^{2+}$  controlan la contracción molecular, la división celular, la exocitosis, la fertilización, el metabolismo, la transmisión sináptica neuronal, el movimiento y muerte celular, entre otras funciones. La propagación de iones comúnmente ocurre por difusión [18,67-69].

#### 1.5.1 Proceso de transmisión molecular

En un sistema de CM, el transmisor debe generar y emitir señales moleculares. Tales moléculas pueden provenir del interior del transmisor, de sus alrededores o ser sintetizadas por los elementos constitutivos del transmisor mismo. Si las moléculas no requieren su liberación inmediata, el transmisor además tendrá que almacenarlas. Uno de tantos casos de almacenamiento de información molecular se da cuando el RE desprende iones de  $Ca^{2+}$  que ha conservado para poder restablecer la concentración de iones citosólicos [18, 77-79].

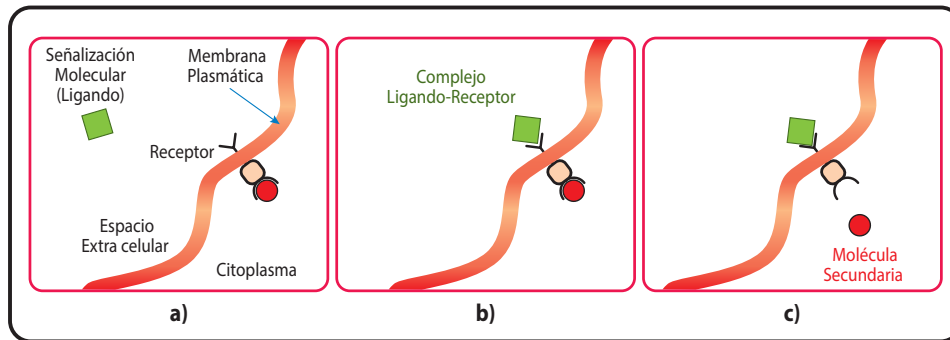
En células eucariotas una técnica usual de almacenamiento consiste en la utilización de vesículas que aproximadamente son esféricas, que se componen de una bicapa lipídica. El tamaño vesicular varía entre 50 *nm* (vesículas sinápticas) y algunos micrones de diámetro. Las vesículas más pequeñas pueden contener muchos miles de moléculas. Para vaciar el contenido molecular, las vesículas se adhieren a otra bicapa (como la membrana plasmática celular), y sueltan sus moléculas vía exocitosis. Por lo que, las moléculas se emiten directamente desde una vesícula intracelular al espacio extracelular, lo cual ocurre muy rápidamente; las vesículas sinápticas desprendidas por neuronas pueden vaciar su contenido en aproximadamente *ms* o menos [18, 67-69].

### 1.5.2 Proceso de recepción y respuesta molecular

En un sistema de CM el extremo destino que incluye la célula, tejido u órgano al que se dirige la transmisión de información, se conoce como “receptor” utilizando clásicamente las teorías comunicacionales. Sin embargo, habrá que tener en cuenta que este término debe ser clarificado. En los sistemas de comunicación tradicionales, los tres componentes esenciales para que probabilísticamente exista la transferencia de información son transmisor (u origen de la información), canal de comunicación, y receptor (o destino de la información). En sistemas de CM o sistemas biológicos las células destino contienen muchos elementos (que reconocen las señales dirigidas a ellos) denominados receptores (o receptores biológicos propiamente). En este contexto, si se es purista en la terminología, entonces, el destino comunicacional está conformado por receptores biológicos que son los que inicializan la captación de señales moleculares dentro del proceso de recepción/respuesta en el extremo destino, que no obstante, por la inercia en la terminología de los sistemas de transmisión convencionales simplemente se le conoce como “receptor” [9].

En el destino molecular el receptor debe ser capaz de detectar y actuar (responder) frente a estímulos provocados por señales de información que han arribado al mismo. Dependiendo del tipo de molécula o de la sensibilidad del receptor se puede requerir un umbral de moléculas para la interpretación y efectivizar la respuesta [18,67-69]:

1. Procesos de recepción molecular. La tipología de las moléculas de recepción extracelular se indica en los siguientes párrafos [18,67-69].
  - a) Moléculas suficientemente pequeñas o hidrofóbicas para cruzar fácilmente la membrana celular del receptor y activar enzimas intracelulares o enlazarse a receptores intracelulares de proteína. Este proceso se conoce en CM como recepción pasiva. Gases disueltos y hormonas esteroideas son casos de esta forma de recepción molecular.
  - b) Moléculas muy grandes o muy hidrofílicas para atravesar la membrana celular del receptor, propician el envío de información por medio de receptores en la superficie de la célula objetivo mediante la membrana celular. La recepción molecular descrita se denomina activa. La gran mayoría de señales moleculares extracelulares son de esta categoría. Su detección demanda el uso de receptores superficiales de proteína (Figura 1.19 [8]).



**Figura 1.19. Pasos en un proceso genérico de recepción de información molecular.** a) Existe un receptor embebido en la membrana plasmática que separa el citoplasma del espacio extracelular. El receptor puede enlazarse al ligando (molécula de señalización). b) El ligando se adhiere al receptor para constituir el complejo ligando-receptor, esta unión propicia la conformación de cambios en el receptor. c) Las modificaciones realizadas en el receptor promueven una respuesta, por ejemplo, la liberación de moléculas de señalización internas secundarias.

2. Proceso de respuesta molecular. Existe una gran diversidad de cómo los receptores bioquímicos responden a una señal molecular e incluso receptores sensibles de la misma clase de molécula de señalización se pueden comportar diferentemente en diversas células. Uno de estos casos ocurre en respuesta a la acetilcolina que incluyen decrementos en el disparo del potencial de acción estimulando la contracción muscular y la producción de saliva. Otro ejemplo es la señalización de calcio; el mismo estímulo puede desencadenar una onda de  $Ca^{2+}$  a través de una célula y oscilaciones locales de calcio en otra célula u ocasionar solamente incrementos localizados en la concentración en otras células. Estas diferentes respuestas ocurren por la factibilidad de los iones de  $Ca^{2+}$  para unirse a una gran cantidad de proteínas. Por tanto, la misma señal activa diferentes vías de señalización de acuerdo al tipo de célula y a la proteína disponible [18, 67-69].

La diversidad de respuestas bioquímicas denota que cierto receptor (o una colección de ellos) posee propiedades muy particulares. El tiempo de respuesta es variable así se tienen: *ms* para el control muscular y otro tipo de respuestas sinápticas, *segundos* en el caso de bacterias que emplean quimiotaxis como respuesta a los cambios en el gradiente de concentración química, y *horas* o *días* para modificaciones en el comportamiento celular (regulación genética, diferenciación, y muerte

celular). Correspondientemente, la persistencia de una respuesta llega a ser muy breve (como usualmente se requiere en la sinapsis) o permanente. La sensibilidad a una señal se puede controlar por el número de receptores presentes, o por la intensidad de una señal secundaria creada por un receptor activado. La complejidad progresiva de una respuesta se administra utilizando procesamiento de señales bioquímicas, como retroalimentación en la implementación de conmutadores u osciladores. Contrariamente, una señal molecular puede coordinar respuestas múltiples en formas simultánea al interior de la misma célula, para procesos en los que se define el crecimiento y la división celular por ejemplo [18].

En el panorama general, aunque los sistemas de CM poseen características únicas establecidas solo en su naturaleza, cuentan con una similitud sorprendente con los sistemas de transmisión de telecomunicaciones. Ciertamente cada componente biológico a nanoescala no se puede comparar explícitamente con un dispositivo electrónico de los sistemas de comunicación típicos, no obstante, los sistemas de comunicación biológicos se comportan casi idealmente como sus pares de comunicación a micro/macro escala. Es esta la razón por la que en los últimos años los sistemas de CM se han convertido en una rama de estudio importante de networking.

Actualmente cada vez es más común el apareamiento de simuladores que tratan de efectivizar procesos biológicos de comunicación e incluso existen múltiples formas de experimentación como resultado posterior de la simulación. Sin embargo, la multiplicidad de elementos de software y/o experimentación de manera general, no permiten interoperabilidad entre sí. Por lo que, para evitar la incompatibilidad entre simuladores y herramientas experimentales es imprescindible establecer un conjunto de normas y protocolos de nanocomunicaciones para ser estandarizados. Es así como IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) ha desarrollado dos estándares protocolarios para comunicaciones a nanoescala, el Capítulo 2 analiza a profundidad los mismos. En tanto, el Capítulo 3 denota la aplicación de estos estándares a casos de CM en escenarios con condiciones diversas de modulación en el extremo de transmisión, diferentes métodos de propagación física en el canal de transmisión, y varias clases de receptores de información en el extremo destino.





## Referencias bibliográficas

- [1] Y. Cevallos *et al.*, "Theoretical Basis for Gene Expression Modeling Based on the IEEE 1906.1 Standard," in *International Conference on Bio-inspired Information and Communication Technologies*, pp. 145–162, 2021.
- [2] Y. Cevallos, L. Molina, A. Santillán, F. De Rango, A. Rushdi, and J. B. Alonso, "A digital communication analysis of gene expression of proteins in biological systems: A layered network model view," *Cognit. Comput.*, vol. 9, no. 1, pp. 43–67, 2017.
- [3] Y. Cevallos *et al.*, "Modelamiento comunicacional de la expresión genética y el transporte de proteínas mediante un sistema de transmisión digital extremo a extremo," 2022.
- [4] Y. Cevallos, L. Tello-Oquendo, D. Inca, C. Palacios, and L. Rentería, "Genetic Expression in Biological Systems: A Digital Communication Perspective," *Open Bioinforma. J.*, vol. 12, no. 1, 2019.
- [5] Y. Cevallos, L. Tello-Oquendo, D. Inca, D. Ghose, A. Z. Shirazi, and G. A. Gomez, "Health Applications Based on Molecular Communications: A Brief Review," in *2019 IEEE International Conference on E-health Networking, Application & Services (HealthCom)*, pp. 1–6, 2019.
- [6] Y. Cevallos *et al.*, "On the efficient digital code representation in DNA-based data storage," in *Proceedings of the 7th ACM International Conference on Nanoscale Computing and Communication*, pp. 1–7, 2020.
- [7] Y. Cevallos *et al.*, "A brief review on dna storage, compression, and digitalization," *Nano Commun. Netw.*, vol. 31, p. 100391, 2022.
- [8] Y. Cevallos *et al.*, "Modeling Gene Expression and Protein Delivery as an End-to-End Digital Communication System," *Open Bioinforma. J.*, vol. 14, no. 1, 2021.
- [9] Y. Cevallos *et al.*, "Comunicaciones Moleculares Un análisis desde el paradigma protocolario de IEEE," 2023.
- [10] M. Egan *et al.*, "Toward interdisciplinary synergies in molecular communications: Perspectives from synthetic biology, nanotechnology, communications engineering and philosophy of science," *Life*, vol. 13, no. 1, p. 208, 2023.
- [11] L. Kong *et al.*, "A Survey for Possible Technologies of Micro/nano-machines Used for Molecular Communication within 6G Application Scenarios," *IEEE Internet Things J.*, 2023.

- [12] U. A. K. Chude-Okonkwo, R. Malekian, B. T. Maharaj, and A. V Vasilakos, "Molecular communication and nanonetwork for targeted drug delivery: A survey," *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 19, no. 4, pp. 3046–3096, 2017.
- [13] X. Huang, Y. Fang, and N. Yang, "A survey on estimation schemes in molecular communications," *Digit. Signal Process.*, vol. 124, p. 103163, 2022.
- [14] Y. Chahibi, "Molecular communication for drug delivery systems: A survey," *Nano Commun. Netw.*, 2017.
- [15] K. Yang *et al.*, "A comprehensive survey on hybrid communication in context of molecular communication and terahertz communication for body-centric nanonetworks," *IEEE Trans. Mol. Biol. Multi-Scale Commun.*, vol. 6, no. 2, pp. 107–133, 2020.
- [16] A. Etemadi, M. Farahnak-Ghazani, H. Arjmandi, M. Mirmohseni, and M. Nasiri-Kenari, "Abnormality detection and localization schemes using molecular communication systems: A survey," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 1761–1792, 2022.
- [17] B. Atakan, *Molecular Communications and Nanonetworks*. Springer, 2016.
- [18] D. Bi, A. Alimpanis, A. Noel, Y. Deng, and R. Schober, "A survey of molecular communication in cell biology: Establishing a new hierarchy for interdisciplinary applications," *IEEE Commun. Surv. & Tutorials*, 2021.
- [19] L. Chouhan and M.-S. Alouini, "Interfacing of Molecular Communication System with Various Communication Systems over Internet of Every Nano Things," *IEEE Internet Things J.*, 2023.
- [20] L. Felicetti, M. Femminella, G. Reali, and P. Liò, "Applications of molecular communications to medicine: A survey," *Nano Commun. Netw.*, vol. 7, pp. 27–45, 2016.
- [21] M. Kuscu, E. Dinc, B. A. Bilgin, H. Ramezani, and O. B. Akan, "Transmitter and receiver architectures for molecular communications: A survey on physical design with modulation, coding, and detection techniques," *Proc. IEEE*, vol. 107, no. 7, pp. 1302–1341, 2019.
- [22] N. Farsad, H. B. Yilmaz, A. Eckford, C.-B. Chae, and W. Guo, "A comprehensive survey of recent advancements in molecular communication," *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 18, no. 3, pp. 1887–1919, 2016.

- [23] M. Şükrü Kuran, H. B. Yilmaz, I. Demirkol, N. Farsad, and A. Goldsmith, "A survey on modulation techniques in molecular communication via diffusion," *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 23, no. 1, pp. 7–28, 2020.
- [24] T. Nakano, M. J. Moore, F. Wei, A. V Vasilakos, and J. Shuai, "Molecular communication and networking: Opportunities and challenges," *IEEE Trans. Nanobioscience*, vol. 11, no. 2, pp. 135–148, 2012.
- [25] C. A. Söldner *et al.*, "A survey of biological building blocks for synthetic molecular communication systems," *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 22, no. 4, pp. 2765–2800, 2020.
- [26] S. Lotter *et al.*, "Experimental research in synthetic molecular communications-part ii," *IEEE Nanotechnol. Mag.*, 2023.
- [27] S. Lotter *et al.*, "Experimental Research in Synthetic Molecular Communications--Part I: Overview and Short-Range Systems," *arXiv Prepr. arXiv2301.06417*, 2023.
- [28] V. Jamali, A. Ahmadzadeh, W. Wicke, A. Noel, and R. Schober, "Channel modeling for diffusive molecular communication—A tutorial review," *Proc. IEEE*, vol. 107, no. 7, pp. 1256–1301, 2019.
- [29] C. Shi *et al.*, "Recent advances in nanorobotic manipulation inside scanning electron microscopes," *Microsystems Nanoeng.*, vol. 2, no. 1, pp. 1–16, 2016.
- [30] Y. Shen and T. Fukuda, "State of the art: micro-nanorobotic manipulation in single cell analysis," *Robot. Biomimetics*, vol. 1, no. 1, pp. 1–13, 2014.
- [31] Y. Wen, H. Lu, Y. Shen, and H. Xie, "Nanorobotic Manipulation System for 360° Characterization Atomic Force Microscopy," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 67, no. 4, pp. 2916–2924, 2019.
- [32] R. Farazkish, "Robust and reliable design of bio-nanorobotic systems," *Microsyst. Technol.*, vol. 25, pp. 1519–1524, 2019.
- [33] Y.-C. Lee, J.-Y. Moon, Y.-C. Lee, and J.-Y. Moon, "Bio-nanorobotics: Mimicking life at the nanoscale," *Introd. to Bionanotechnol.*, pp. 93–114, 2020.
- [34] A. U. Zammoev, "Prospects for the development of methods and means of evolutionary modeling for the virtual prototyping of bionanorobotics devices and systems," *News Kabard. Sci. Cent. RAS*, no. 62, pp. 157–164, 2018.

- [35] H. Zhou, C. C. Mayorga-Martinez, S. Pané, L. Zhang, and M. Pumera, "Magnetically driven micro and nanorobots," *Chem. Rev.*, vol. 121, no. 8, pp. 4999–5041, 2021.
- [36] H. Torlakcik et al., "Magnetically Guided Catheters, Micro-and Nanorobots for Spinal Cord Stimulation," *Front. Neurobot.*, vol. 15, p. 749024, 2021.
- [37] F. Soto and R. Chrostowski, "Frontiers of medical micro/nanorobotics: in vivo applications and commercialization perspectives toward clinical uses," *Front. Bioeng. Biotechnol.*, vol. 6, p. 170, 2018.
- [38] A. Pedram and H. Nejat Pishkenari, "Smart micro/nano-robotic systems for gene delivery," *Curr. Gene Ther.*, vol. 17, no. 2, pp. 73–79, 2017.
- [39] G. Giri, Y. Maddahi, and K. Zareinia, "A brief review on challenges in design and development of nanorobots for medical applications," *Appl. Sci.*, vol. 11, no. 21, p. 10385, 2021.
- [40] M. T. Nistor and A. G. Rusu, "Nanorobots with applications in medicine," in *Polymeric nanomaterials in nanotherapeutics*, Elsevier, pp. 123–149, 2019.
- [41] M. Abu-Farha, T. A. Thanaraj, M. G. Qaddoumi, A. Hashem, J. Abubaker, and F. Al-Mulla, "The role of lipid metabolism in COVID-19 virus infection and as a drug target," *Int. J. Mol. Sci.*, vol. 21, no. 10, p. 3544, 2020.
- [42] P. Moreno-Layseca, J. Icha, H. Hamidi, and J. Ivaska, "Integrin trafficking in cells and tissues," *Nat. Cell Biol.*, vol. 21, no. 2, pp. 122–132, 2019.
- [43] S. Nahavandi et al., "Microfluidic platforms for the investigation of intercellular signalling mechanisms," *Small*, vol. 10, no. 23, pp. 4810–4826, 2014.
- [44] V. Kumar and S. Varghese, "Ex vivo tumor-on-a-chip platforms to study intercellular interactions within the tumor microenvironment," *Adv. Healthc. Mater.*, vol. 8, no. 4, p. 1801198, 2019.
- [45] I. Potolicchio et al., "Connexin-dependent signaling in neuro-hormonal systems," *Biochim. Biophys. Acta (BBA)-Biomembranes*, vol. 1818, no. 8, pp. 1919–1936, 2012.
- [46] S. Ramachandran and V. Palanisamy, "Horizontal transfer of RNAs: exosomes as mediators of intercellular communication," *Wiley Interdiscip. Rev. RNA*, vol. 3, no. 2, pp. 286–293, 2012.

- [47] N. Varshney, A. Patel, W. Haselmayr, A. K. Jagannatham, P. K. Varshney, and A. Nallanathan, "Impact of intermediate nanomachines in multiple cooperative nanomachine-assisted diffusion advection mobile molecular communication," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 67, no. 7, pp. 4856–4871, 2019.
- [48] D. T. McGuinness, S. Giannoukos, A. Marshall, and S. Taylor, "Modulation analysis in macro-molecular communications," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 11049–11065, 2019.
- [49] L. Chouhan, N. Varshney, and P. K. Sharma, "On gradient descent optimization in diffusion-advection based 3-D molecular cooperative communication," *IEEE Trans. Nanobioscience*, vol. 19, no. 3, pp. 347–356, 2020.
- [50] F. Vakilipoor, F. Ratti, H. Awan, and M. Magarini, "Low complexity receiver design for time-varying poisson molecular communication channels with memory," *Digit. Signal Process.*, vol. 124, p. 103187, 2022.
- [51] Y.-C. Lee, J.-M. Wu, and M.-H. Hsieh, "First arrival position in molecular communication via generator of diffusion semigroup," *arXiv Prepr. arXiv2201.04476*, 2022.
- [52] K. Eskandar, "Revolutionizing biotechnology and bioengineering: unleashing the power of innovation," *J Appl Biotechnol Bioeng*, vol. 10, no. 3, pp. 81–88, 2023.
- [53] J. Chen, S. J. Wezenberg, and B. L. Feringa, "Intramolecular transport of small-molecule cargo in a nanoscale device operated by light," *Chem. Commun.*, vol. 52, no. 41, pp. 6765–6768, 2016.
- [54] K. R. Pilkievicz, P. Rana, M. L. Mayo, and P. Ghosh, "Molecular Communication and Cellular Signaling from an Information-Theory Perspective," *Nanoscale Netw. Commun. Handb.*, p. 235, 2019.
- [55] B. Atakan and B. Atakan, "Active Molecular Communication," *Mol. Commun. Nanonetworks From Nat. To Pract. Syst.*, pp. 145–179, 2014.
- [56] S. Qiu, W. Haselmayr, B. Li, C. Zhao, and W. Guo, "Bacterial relay for energy-efficient molecular communications," *IEEE Trans. Nanobioscience*, vol. 16, no. 7, pp. 555–562, 2017.
- [57] S. Balasubramaniam, N. Lyamin, D. Kleyko, M. Skurnik, A. Vinel, and Y. Koucheryavy, "Exploiting bacterial properties for multi-hop nanonetworks," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 52, no. 7, pp. 184–191, 2014.

- [58] T. Nakano, Y. Okaie, S. Kobayashi, T. Hara, Y. Hiraoka, and T. Haraguchi, "Methods and applications of mobile molecular communication," *Proc. IEEE*, vol. 107, no. 7, pp. 1442–1456, 2019.
- [59] B. Mattes and S. Scholpp, "Emerging role of contact-mediated cell communication in tissue development and diseases," *Histochem. Cell Biol.*, vol. 150, pp. 431–442, 2018.
- [60] A. M. Koshy, I. Jeerapan, and C. Manjunatha, "New insights on molecular communication in nano communication networks and their applications," *ECS Trans.*, vol. 107, no. 1, p. 9295, 2022.
- [61] O. B. Akan, H. Ramezani, T. Khan, N. A. Abbasi, and M. Kuscu, "Fundamentals of molecular information and communication science," *Proc. IEEE*, vol. 105, no. 2, pp. 306–318, 2016.
- [62] R. Mittal *et al.*, "Cell communication by tunneling nanotubes: Implications in disease and therapeutic applications," *J. Cell. Physiol.*, vol. 234, no. 2, pp. 1130–1146, 2019.
- [63] J. Ariazi *et al.*, "Tunneling nanotubes and gap junctions--their role in long-range intercellular communication during development, health, and disease conditions," *Front. Mol. Neurosci.*, vol. 10, p. 333, 2017.
- [64] E. A. Eugenin, P. J. Gaskill, and J. W. Berman, "Tunneling nanotubes (TNT) a potential mechanism for intercellular trafficking," *Commun. Integr. Biol.*, vol. 2, no. 3, pp. 243–244, 2009.
- [65] D. Cretoiu *et al.*, "Simulation and modeling of telocytes behavior in signaling and intercellular communication processes," *Int. J. Mol. Sci.*, vol. 21, no. 7, p. 2615, 2020.
- [66] L. Ibba-Manneschi, I. Rosa, and M. Manetti, "Telocyte implications in human pathology: An overview," in *Seminars in Cell & Developmental Biology*, vol. 55, pp. 62–69, 2016.
- [67] M. Pierobon, I. F. Akyildiz, and others, "Fundamentals of diffusion-based molecular communication in nanonetworks," *Found. Trends<sup>®</sup> in Netw.*, vol. 8, no. 1–2, pp. 1–147, 2014.
- [68] M. C. Gursoy, E. Basar, A. E. Pusane, and T. Tugcu, "Index modulation for molecular communication via diffusion systems," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 67, no. 5, pp. 3337–3350, 2019.
- [69] Z. Wei, W. Yuan, S. Li, J. Yuan, and D. W. K. Ng, "Transmitter and receiver window designs for orthogonal time-frequency space modulation," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 69, no. 4, pp. 2207–2223, 2021.

**Análisis comunicacional  
de los estándares IEEE  
1906.1 y 1906.1.1**

02



La fundamentación conceptual de los principios establecidos en las TIC (Tecnologías de la Información y Comunicación), en los sistemas de telecomunicaciones (particularmente en los sistemas de networking), y en las ciencias exactas (que describen la propagación de señales de información) han posibilitado que los sistemas de Comunicaciones Moleculares (CM) o sistemas de comunicación biológicos se puedan comprender adecuadamente para potenciar aplicaciones médicas de tecnología avanzada de la ingeniería en seres humanos. Tales aplicaciones, sin embargo, se deben desarrollar de manera que los diferentes esfuerzos de investigación a nivel mundial se tornen compatibles entre sí, para lograr el mejor beneficio colectivo. Esto es factible si existen normas estandarizadas para que independientemente de la “arquitectura” del sistema de CM examinado, se pueda predecir y especificar los resultados esperados. Lo previamente mencionado, es precisamente el enfoque por el cual IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) definió los estándares de nanocomunicaciones 1906.1 y 1906.1.1 que se estudian a detalle en el presente capítulo [1].

## 2.1

### **PROSPECTIVA DE LA NECESIDAD PARA ESTABLECER UN ESTÁNDAR DE NANOCOMUNICACIONES**

Las redes de nanocomunicaciones se han discutido ampliamente desde hace aproximadamente quince años, cuando estas redes empezaron a ser observadas como un nuevo paradigma de comunicación, en el que existía la expectativa de la eventual aplicación de las técnicas de transmisión/recepción de la información de las telecomunicaciones y de las tecnologías de la información. El enfoque de análisis de “esta nueva forma de comunicación” a nivel nano (o molecular, propiamente) no ha causado, sin embargo, el mayor de los impactos en la ciencia, esta situación se produce, básicamente, por dos razones. La primera se debe a la carencia de un marco referencial protocolario común que denote la posibilidad de unificar esfuerzos individuales, de manera que cada investigación en el tema se solidifique y se torne en el punto de inicio de la siguiente. La segunda razón radica en que para el hardware que sustenta la experimentación en CM, era imprescindible su validación universal, además de su coherencia pertinente en los entornos de simulación correspondientes. Por otra parte, el desarrollo de nuevas tecnologías requiere el apoyo y la aceptación de la industria y la academia para poder garantizar la sobrevivencia y sustentar la vigencia de tal tecnología. Este núcleo conceptual comunicacional, que amalgama industria, academia y tecnología (definida en aplicaciones útiles para la humanidad), demanda un marco referencial común o estandarizado para asegurar que todas y cada una de las aristas de tal núcleo se logren consolidar en consenso a través de definiciones precisas de diferentes elementos de comunicación a nanoescala que intervienen en la transferencia de información biológica o molecular [2,3].

La ausencia de un estándar origina que investigadores de diferentes áreas científicas se encuentren aparentemente dispersos en el establecimiento de conceptos en los que, por ejemplo, el término “comunicación” llegue a significar para la biología “el manejo de entidades moleculares que se encuentran en contacto directo, priorizando siempre los mecanismos en los que se deben comprender los sistemas y su causalidad, la interacción de fenómenos y procesos que producen efectos medibles”; en tanto, el mismo término “comunicación” parecería ser definido en forma diversa para la ingeniería de las teorías de la información, en las que la importancia se centra en la entropía de la información inmersa en una comunicación y la eventual posibilidad de obtener simulaciones y el entendimiento de los sistemas de comunicación subyacentes [2,3].

Otra motivación importante para propender a una estandarización es el direccionamiento del problema originado en el desarrollo de componentes de simulación de redes de comunicación a nivel nano con interfaces diferentes, pero no interoperables, además del apareamiento de módulos de simulación que no se pueden reusar en otras investigaciones [2,3].

Teniendo en cuenta toda la connotación precedente que vislumbra la ineludible necesidad de generar la estandarización de procesos inmersos en comunicaciones a nanoescala (de tipo electromagnético y molecular), en el año 2015, IEEE establece un marco de referencia conceptual para las nanocomunicaciones, mediante el estándar 1906.1, en el documento denominado “Recommended Practice for Nanoscale and Molecular Communication Framework” [4] y, posteriormente, en el año 2020 con el estándar 1906.1.1, en el documento titulado “IEEE Standard Data Model for Nanoscale Communication Systems”, el cual adjunta un modelo de información YANG (Yet Another Next Generation) para la puesta en marcha del modelo conceptual establecido en el estándar 1906.1 [5]. Una vez definidos los protocolos IEEE en el área de las nanocomunicaciones, se optimiza el tiempo en el desarrollo de prototipos y, colaboraciones de investigación, y se minimiza el riesgo inmerso en pruebas de tecnologías y sus aplicaciones, en particular, en lo que respecta a situaciones clínicas y de la salud de seres vivos [2,3,6–21]. El objetivo de IEEE con la estandarización incluye la especificación de características y definiciones únicas (sin explicitar algún protocolo comunicacional en específico) que se encuentran en las nanocomunicaciones mientras se potencia la compatibilidad y la interdisciplinariedad científica (las nanocomunicaciones moleculares son un puente entre las comunicaciones en ingeniería, sistemas digitales, y las redes de computadoras con la biología molecular y la bioingeniería [12,13]) enfocadas hacia la implementación [2,3].

Con la presencia de los estándares 1906.1 y 1906.1.1, las redes de comunicación creadas por humanos se extienden a nanoescala, lo cual incluye experimentos *in vivo*, simulaciones, CM, materiales inteligentes, sensores moleculares, además de la habilidad de operar en entornos realmente imposibles para comunicaciones macro (por ejemplo, cavidades del cuerpo humano) [9]. Para alcanzar tales objetivos de comunicación los estándares de tipo nano de IEEE se estructuran mediante cuatro aspectos [22]:

- 1.** Definiciones.
- 2.** Marco referencial.
- 3.** Métricas.
- 4.** Modelo de capas protocolarias [22].

## 2.2

### **ANÁLISIS GENERAL DE LOS ESTÁNDARES IEEE 1906.1 Y 1906.1.1**

La información que proveen los dos estándares de IEEE de comunicaciones al nivel nano se presenta, básicamente, desglosada en secciones, cada una de ellas complementa a las demás; el empleo de esta perspectiva seccional permite que se estratifique el complejo marco informativo y de procesos de simulación de una manera metódica, comprensible y simplificada, centrándose, particularmente, en el contenido de cada sección, con lo que la densa cantidad de información global de las nanocomunicaciones de los estándares 1906.1 y 1906.1.1 se exhibe en forma modular, clara y precisa. A continuación, se consideran, brevemente, cada una de tales secciones para concebir una connotación general de la amplia información proporcionada por los estándares y, a partir de la Sección 2.2.4 de este capítulo, se explican detalladamente cada uno de los diversos elementos que integran estos estándares.

#### **2.2.1 Sección de definiciones**

La primera parte de la documentación de los estándares IEEE de tipo nano denota una completa y detallada sección referente a las definiciones de redes de nanocomunicaciones, dichas definiciones son el soporte para futuros estudios en el área, y propenden, de forma estricta, a establecer los fundamentos conceptuales de las comunicaciones a nivel nano (tanto para comunicaciones electromagnéticas como para CM). Por lo que, lógicamente, la primera especificación de ambos estándares se enmarca en puntualizar que el término “nano” hace referencia al rango dimensional entre 1 *nm* y 100 *nm*, el límite inferior del rango se selecciona, simplemente, para excluir el uso de átomos aislados en los sistemas a nivel nano. En contraste, el límite superior corresponde al tamaño al cual las propiedades de los materiales varían sustancialmente de macro a nanoescala. Por consiguiente, los nodos que transferirán información a nivel nano deberán enmarcarse en dicho rango dimensional. Los elementos básicos de un sistema de comunicaciones como transmisor, receptor, canal de comunicaciones, mensajes de información y portadoras<sup>i</sup> (o moléculas portadoras propiamente)

---

i. A diferencia de las telecomunicaciones (que distinguen claramente entre la señal portadora y la señal de información), en las CM, las señales de información o moléculas de información son ellas mismas sus propias portadoras, ya que tales moléculas definen y ejecutan mecanismos para viajar en el entorno que las rodea hacia el receptor.

de mensajes, también se explicitan en la sección de definiciones de los estándares de la familia protocolaria IEEE 1906, aunque no son estrictamente detallados [22].

### **2.2.2 Sección de marco referencial (framework)**

La segunda sección de los estándares de nanocomunicaciones de IEEE provee un marco de referencia “framework” comunicacional conceptual, general y a nanoescala, el cual consiste en un número específico de componentes interoperables entre sí y con funciones definidas con precisión. En la Sección 2.4 del presente capítulo se analizarán dichos componentes, los cuales son [22]:

- 1.** Componente de portadora<sup>ii</sup> de mensajes. Se describe como una entidad física que transporta los mensajes (información) a través del medio de transmisión.
- 2.** Componente de movimiento. Representa el fenómeno físico que efectiviza el movimiento de la portadora de mensajes; este componente puede producir una propagación aleatoria de movimiento, este grado de aleatoriedad se controla mediante el componente de campo.
- 3.** Componente de campo. Organiza y guía el movimiento del componente previo.
- 4.** Componente de perturbación. Se refiere al mecanismo necesario para adecuar el componente de portadora de mensajes al medio de transmisión, para transferir la señal asociada al contenido de la información del mensaje.
- 5.** Componente de especificidad. Establece los requerimientos para la recepción pertinente de la información en el destino comunicacional.

---

ii. Se emplea el término “portadora” y no portador para que exista coherencia entre los sistemas de nanocomunicaciones y los tradicionales en cuanto al género femenino al hacer referencia a la “señal” portadora del mensaje.

Este marco de referencia conformado por los cinco componentes mencionados se compara con el modelo de referencia de siete capas protocolarias ISO/OSI (International Organization of Standardization/Open Systems Interconnection) lo cual se puede notar en la Figura 2.1 [22] y, en razón de la escala dimensional y sus correspondientes aspectos físicos, el marco de referencia de los estándares IEEE de nivel nano se sitúa en las capas inferiores del modelo ISO/OSI [22].

Capas protocolarias de acuerdo al modelo ISO/OSI	Marco de referencia para componentes a nanoescala		
Aplicación	—		
Presentación	—		
Sesión	—		
Transporte	—		
Red		Componente de Campo	
Enlace de Datos	Componente de Especificidad		
Física	Componente de Portadora de mensajes	Componente de Movimiento	Componente de Perturbación

**Figura 2.1. Mapeo de los componentes del marco de referencia de los estándares IEEE 1906.1 y 1906.1.1 con las capas protocolarias del modelo de referencia ISO/OSI.**

En razón de la funcionalidad de los componentes del marco de referencia y de los elementos de comunicación de los sistemas a nivel nano, estos sistemas resultan menos complejos y de programación más simple<sup>iii</sup> que sus contrapartes de telecomunicaciones. Además, el marco de referencia para nanocomunicaciones de IEEE resulta ser en realidad representativo en relación a los elementos de los sistemas naturales a nanoescala que existen en los sistemas de comunicación biológicos. Así, por ejemplo, el componente de perturbación tiende a estar supeditado a la parte de la mecánica en la implementación; el componente de movimiento, ciertamente, es de tipo aleatorio adyacente a fenómenos resultantes de fuerzas Brownianas, por lo que se requiere cierta clase de direccionalidad o gradiente por parte del componente de campo para generar movimientos controlados, de alguna manera el grado de control adicional se produce a través del componente de especificidad (particularmente referente a funciones de direccionamiento de la información) [4].

iii. El término “programación” para entidades biológicas se refiere a la ejecución de una tarea, relativamente sencilla, la cual dista enormemente de aquellas realizadas en la programación altamente estructurada y que son el resultado de una compilación de una gran cantidad de instrucciones en el lenguaje de programación correspondiente.

Un problema con la utilización del modelo de referencia ISO/OSI consiste en la carencia de un marco de referencia detallado que permita que se pueda describir explícitamente la matemática detrás de una red de comunicaciones a nivel nano, por lo que los estándares de IEEE 1906.1 y 1906.1.1 han diseñado su framework lo más minuciosamente posible como prerrequisito para el diseño protocolario y sus eventuales aplicaciones. La relación entre las capas protocolarias ISO/OSI y el framework nano se especifican así [4]:

- a) *Mensaje*. En razón de que el mensaje se refiere al elemento comunicacional a ser transmitido se relaciona con una PDU (Protocol Data Unit) convencional de las redes de computadoras tradicionales, por lo que se lo puede interpretar en el contexto de una trama, paquete o cualquier unidad informativa protocolaria.
- b) *Componente de portadora de mensajes*. Se denomina componente 0 en los estándares IEEE de tipo nano, y se relaciona con cualquier característica de codificación de la señal de información (capa 1<sup>iv</sup>).
- c) *Componente de movimiento*. Llamado componente 1 y su accionar corresponde (aproximadamente<sup>v</sup>) a funciones de propagación de una señal de información, es decir, de capa 1.
- d) *Componente de campo*. Conocido como componente 2, y sus funciones se asocian con tareas de capa 2 en lo que concierne a asegurar que la información fluya entre nodos en enlaces de comunicaciones que se encuentran en un rango directo (adyacente) de distancia, y se le otorga cierta funcionalidad de direccionamiento a nivel de capa 3.
- e) *Componente de perturbación*. Se identifica como componente 3 y se lo puede vincular con tareas que se realizan en la capa 1, en lo relativo a la modulación o cambios que ocurren en la señal a ser transmitida.
- f) *Componente de especificidad*. Se denomina componente 4 y sus funcionalidades se supeditan al direccionamiento que se lleva a cabo en la capa 2.

---

iv. En este libro se hará alusión a las capas del modelo de referencia ISO/OSI.

v. Para poder aplicar las TIC en los sistemas de comunicación biológicos o moleculares se deben suponer ciertas abstracciones debido a que, siendo sistemas de comunicación de naturaleza diversa, las analogías y el comportamiento comunicacional no son idénticos.

### 2.2.3 Sección de métricas

La tercera sección de los estándares a nanoescala de IEEE denota la definición de métricas comunes para proporcionar la información de cómo operan entre sí los elementos de un sistema de comunicación, los mecanismos de cómputo y los parámetros que determinan el rendimiento de una red de nanocomunicación. Evaluando estas métricas, los investigadores pueden medir y comparar objetivamente el grado de optimización de sus diseños [4,5].

El estándar clasifica las métricas en función de cada componente del *framework*. En consecuencia, las métricas relacionadas con el componente de portadora de mensajes se encargan de la medición de cómo se transmite la información. Métricas de *internetwork* típicas como “El tiempo de vida” o TTL (Time To Live) ocasionan que el componente en mención opte por descartar la información cuando se excede este valor de tiempo; la energía asociada a la señal de información se traduce a nivel nano como la energía requerida para transportar la información desde el emisor hasta la portadora de mensajes, lo cual también es una métrica [4,5].

Por otra parte, las métricas referentes al componente de movimiento difieren de las métricas usuales de las redes de computadoras y se enfocan en la física detrás del transporte de la información del componente O (o portadora de mensajes) a través del canal de comunicación. Se debe notar que tales métricas, principalmente, evalúan la comunicación molecular al nivel físico, este hecho también ocurre en las métricas para el componente de campo, en el cual es preponderante el control del mecanismo que permite que el componente O se pueda guiar (por ejemplo, bajo un gradiente). Las métricas para el componente de especificidad se orientan hacia la capacidad del componente O para producir el transporte de información a un destino en particular (direccionamiento) de forma que las métricas de este componente gestionan los porcentajes de componente O que no se dirigen a un destino puntual, por lo que, no son procesados como información al llegar al receptor [22].

Los estándares para nanocomunicaciones de IEEE proporcionan otras métricas generales para examinar el rendimiento de la nanored en conjunto, por ejemplo, la métrica “relación ancho de banda-volumen” (Sección 2.2.4.5.5 del presente capítulo) se emplea para la evaluación de la cantidad total de información que intercambian los nanonodos que conforman la nanored encontrándose en un volumen específico del total de la distribución espacial de nanonodos [22].



Para proveer una herramienta de programación de nanoredes, los estándares de la familia protocolaria IEEE 1906 establecen el empleo del simulador de eventos discretos de código abierto y de estructura modular NS-3 (Network Simulator-3) como el entorno común de desarrollo, el cual integra todos los componentes y elementos de nanocomunicaciones que los estándares sustentan. El objetivo de la utilización de NS-3 es que cada aplicación realizada en él pueda ser reusada por otros investigadores [22].

#### **2.2.4 Parámetros informacionales establecidos en las secciones de los estándares IEEE 1906.1 y 1906.1.1**

La amplia documentación proporcionada por los dos estándares de tipo nano de IEEE determina definiciones y conceptos precisos para no generar ambigüedad en el contexto del análisis y diseño de los escenarios de comunicaciones a nivel nano para los investigadores, la academia y la industria, así como su correspondiente interacción. En los párrafos siguientes se discuten estos parámetros de comunicación que fundamentan el análisis genérico de un sistema de comunicación de tipo nano.

##### **2.2.4.1 Sección de introducción en el estándar IEEE 1906.1**

En la transferencia de información de un sistema de CM (o sistema de comunicación biológico) se deben tener en cuenta las siguientes especificaciones [4,9]:

- a)** En nanocomunicaciones se asume que las moléculas se desplazan en el medio de transmisión obedeciendo las leyes de Fick (Sección 1.4.1 del Capítulo 1); es decir, se propagan mediante el movimiento omnidireccional.
- b)** El número de moléculas que se transmiten en cada pulso de una comunicación se debe conocer explícitamente, este parámetro se puede, por ejemplo, determinar por medio del tipo de modulación molecular.
- c)** Se debe evaluar el retardo de propagación en el enlace molecular.
- d)** Se tendrá que estimar la máxima capacidad del canal de transmisión, según el tipo de CM.

#### **2.2.4.2 Sección de definiciones en los estándares IEEE 1906.1 (Secciones 3 y 4 de la documentación del estándar) y 1906.1.1 (Sección 3 de la documentación del estándar)**

En la transferencia de información de un sistema de CM (o sistema de comunicación biológico) se requiere delimitar las condiciones [3-9]:

- a)** Una red molecular consiste en un sistema diseñado por humanos para la comunicación al nivel nano, usando para este propósito principios de la física cuántica que se adecuan pertinentemente a los sistemas a nanoescala.
- b)** La comunicación se puntualiza mediante el acto de transmitir un mensaje desde una entidad emisora a una entidad receptora que se encuentra en el destino de tal comunicación, lo cual incluye los elementos mensaje, transmisor, receptor, medio de transmisión, y portadora de mensajes, elementos necesarios para proveer un servicio de comunicación propiamente en la red. Al menos uno de tales componentes debe tener dimensiones nano.
- c)** Una red activa es un sistema en el que se transfieren paquetes a través de una red de comunicaciones, la cual modifica dinámicamente su operación. Un paquete es una unidad de información encapsulada para ser transportada por dicha red de comunicación.
- d)** Los mensajes se refieren a la información a ser transmitida entre los extremos de la comunicación, la cual es conocida por el emisor y desconocida, pero reconocible para el receptor. Un mensaje se relaciona con las unidades de información de las redes de computadoras convencionales; es decir, tramas, paquetes o cualquier tipo de PDU.
- e)** La portadora de mensajes es una entidad física que transporta un mensaje a través del medio de comunicación, este componente se relaciona con las características de una señal de información (o su representación) que se modificarán en la transmisión.
- f)** Transmisor (emisor o fuente) es un dispositivo (nodo) que se emplea para transferir un mensaje a un receptor.
- g)** El destino molecular es un dispositivo que recolecta los mensajes desde varias fuentes.

- h)** Receptor<sup>vi</sup> es un elemento (nodo) que recibe varias señales.
- i)** Repetidor es un componente que facilita la comunicación entre el extremo origen y el extremo destino y entre nodos intermedios. La motivación de los estándares para mencionar este elemento de comunicación es posibilitar el envío de mensajes a través de enlaces a larga distancia a nivel nano, lo cual puede producirse, por citar un caso, mediante amplificación de la señal de información (Sección 5.3.2 de la documentación estándar 1906.1).
- j)** El medio de transmisión se refiere al entorno molecular de tipo gaseoso, gel o líquido que permite la conexión entre los extremos de la comunicación.
- k)** Especificidad es la medida de la proporción de ocurrencia de aquellos eventos en las señales portadoras de mensajes que arriban a un destino sin estar direccionadas explícitamente y, por tanto, no se procesará la información que portan.
- l)** La sensibilidad evalúa la proporción de aquellos eventos en las señales portadoras de mensajes que alcanzan un destino estando direccionadas explícitamente y, consecuentemente, se procesará la información que portan. La especificidad y la sensibilidad son ampliamente analizadas en la Sección 6.12 de la documentación del estándar 1906.1, y se tratan en la Sección 2.2.4.5.4 del presente capítulo.
- m)** La señalización molecular y los receptores que se encuentran en la superficie de una célula biológica actúan como mensaje y procesador de la información, respectivamente, en el punto de recepción final de los datos moleculares.

---

vi. El término “receptor” es ampliamente empleado en telecomunicaciones en relación al extremo destino o extremo comunicacional al que se le transmite la información desde un origen, fuente o emisor; sin embargo, debido a que en los estándares de tipo nano de IEEE se refieren a “receptor” como “aquellos elementos biológicos (generalmente proteínas) que se encuentran en la superficie de una célula”, en este libro se enfatizará el contexto para determinar en cuál de los dos escenarios se hace referencia a dicho término; es decir, en telecomunicaciones o como “receptores celulares” en el extremo destino de un sistema celular.

### 2.2.4.3 Sección de marco de referencia (framework) en los estándares IEEE 1906.1 (Secciones 5.2 de la documentación del estándar) y 1906.1.1 (Sección 3.1 de la documentación del estándar)

En la transferencia de información de un sistema de comunicación molecular (o sistema de comunicación biológico) se deben tener en cuenta las siguientes especificaciones [4,5,9]:

- a) *Componente 0 (Portadora de mensajes)*. Provee los servicios de transporte del mensaje; así, una portadora puede ser una onda o partícula, o una combinación de las dos. La estructura molecular puede codificar la información que transporta la portadora a través de cualquier cambio molecular como, por ejemplo, concentración, número de moléculas, tiempo de liberación molecular, etcétera. En el estándar 1906.1.1 se definen las especificaciones para el caso de motores moleculares como portadoras de mensajes (Sección 5.3.3.3.2 de la documentación del estándar).
- b) *Componente 1 (Movimiento)*. Define la capacidad de movimiento del componente 0 (portadora de mensajes); el componente 1 (movimiento) brinda el servicio de movilidad en cualquier dirección como resultado de una fuerza o empuje aplicados al componente 0 (portadora de mensajes). Adicionalmente el componente 1 (movimiento) otorga el potencial pertinente para la transferencia de información a través del canal de comunicaciones, independientemente del tipo de transporte generado por la portadora de mensajes (transporte activo-generando su propio movimiento o pasivo-propagación en función del medio). Los ejemplos en este componente incluyen la difusión molecular mediante fluidos, movimiento Browniano o de autopropulsión. En el estándar 1906.1.1 (Sección 5.3.3.3.2 de la documentación del estándar) se puntualizan especificaciones de este componente, los cuales incluyen los procesos de difusión.
- c) *Componente 2 (Campo)*. Organiza el desplazamiento del componente 1 (movimiento). El componente 2 (campo) establece un servicio direccional en el movimiento para el componente 0 (portadora de mensajes), lo cual es similar a una guía de onda virtual en las comunicaciones convencionales. El componente 2 (campo) se puede implementar interna o externamente en relación al medio de transmisión. Los ejemplos de este componente incluyen implementaciones

internas con movimiento de enjambre o comportamiento de bandadas. Entre las implementaciones externas se cuentan los flujos de fluido no turbulento, campo EM (Electro Magnético), gradiente químico liberado para orientar el movimiento de bacterias, motores moleculares guiados por microtúbulos. En el estándar 1906.1.1 (Sección 5.3.3.3.2 de la documentación del estándar) se precisan especificaciones para este componente, las cuales incluyen concentraciones de gradientes.

- d) Componente 3 (Perturbación).** Define la señal transportada por el componente 0 (portadora de mensajes), y genera el servicio de variación de las características de la portadora de mensajes, proceso imperioso para representar una señal, lo cual se puede efectuar, por ejemplo, mediante modulación. Los ejemplos en la documentación de los estándares IEEE de la familia 1906 incluyen señales que se basan en el número de portadoras de mensajes recibidas, concentraciones de densidades (en mayor grado referidas como densas propiamente o de menor grado referidas como escasas) moleculares controladas y empleo de ADN (Ácido Desoxirribonucleico) para denotar múltiples estados. En el estándar 1906.1.1 (Sección 5.3.3.3.2 de la documentación del estándar) se definen las especificaciones para el componente de perturbación las cuales incluyen las estructuras moleculares.
- e) Componente 4 (Especificidad).** Efectúa la recepción precisa o de direccionamiento explícito de la información del componente 3 (perturbación), el componente 4 (especificidad) proporciona el servicio de captación o recepción de la información que provee la portadora de mensajes en el extremo destino. Los ejemplos que se incluyen en este componente determinan la afinidad de una molécula con un destino objetivo (por ejemplo, un órgano objetivo), la complementariedad del ADN para la hibridación, etcétera. En la Sección 5.3.3.3.2 de la documentación del estándar 1906.1.1 se establecen algunas especificaciones para este componente, entre las que se encuentran la sensibilidad de un receptor molecular.
- f)** La Tabla 2.1 indica ejemplos de los componentes del *framework* al nivel nano de los estándares IEEE 1906.1 (Sección 5.4 de la documentación del estándar) y 1906.1.1 (Secciones 5.4.1, 5.5.1 y 5.5.3 de la documentación del estándar).

**Tabla 2.1. Ejemplo de los componentes en el *framework* de tipo nano de IEEE [4,5].**

Componentes IEEE 1906.1 y 1906.1.1	Ejemplo 1: Ondas de Calcio	Ejemplo 2: Ligandos-Receptores	Ejemplo 3: Motores Moleculares	Ejemplo 4: flagelo bacteriano
<b>Portadora de mensajes</b>	Concentración de ondas de calcio	Concentración de ligandos	Motores moleculares y su carga	Carga bacteriana
<b>Movimiento</b>	Difusión	Difusión	Caminata y difusión dirigida	Orientación a objetivos (alimento/luz)
<b>Campo</b>	Gradiente de concentración dirigida	Gradiente de concentración dirigida	Polaridad de microtúbulos y conectividad	Concentración química de partículas de alimento e intensidad de luz
<b>Perturbación</b>	Tasa de transmisión o cambios de concentración	Tasa de transmisión o cambios de concentración	Cambio en el número y tipo de moléculas en la carga	Cambio en el número y tipo de moléculas en la bacteria
<b>Especificidad</b>	Sensores de recepción de calcio Sensibilidad al $Ca^{+}$	Sensibilidad del receptor al ligando	Sensibilidad del receptor a la carga	Sensores de recepción de bacterias o carga

#### **2.2.4.4 Sección de interfaces de los componentes en el marco de referencia (*framework*) en los estándares IEEE 1906.1 (Sección 5.3.5 de la documentación del estándar) y 1906.1.1 (Secciones 5.5.1 y 6.2.2 de la documentación del estándar)**

Para proveer un servicio, cada componente del marco de referencia cuenta con una interfaz general, pero claramente definida, así se tienen las interfaces [4,5,9]:

- a)** Mensaje-a-portadora de mensajes (codificación de la información).
- b)** Portadora de mensajes-a-movimiento (rango de movimiento).
- c)** Movimiento-a-campo (movimiento controlado-guiado).
- d)** Campo-a-perturbación (rápido control del campo).
- e)** Perturbación-a-especificidad (habilidad para modificar dinámicamente la especificidad con el objetivo de codificar el mensaje).
- f)** Especificidad-a-portadora de mensajes (portadora de mensajes y capacidad de producir enlaces moleculares).
- g)** Portadora de mensajes-a-receptor en el destino comunicacional (decodificación de la información).

#### **2.2.4.5 Sección de métricas en los estándares IEEE 1906.1 (Sección 6 de la documentación del estándar) y 1906.1.1 (Sección 6.2.3 de la documentación del estándar)**

En esta sección se indican las métricas comunes que se emplean en las redes de nanocomunicaciones y en las nanocomunicaciones propiamente para presentar la información de interoperabilidad entre los componentes de un sistema, así como para la comparación del rendimiento entre varios sistemas de comunicaciones a nanoescala. En los párrafos posteriores se detallan dichas métricas [4,5].

#### 2.2.4.5.1 Métricas para el componente de portadora de mensajes

Las métricas para este componente analizan la codificación de la información en un mensaje y la influencia que ejercen el medio de comunicación y el destino molecular en el mensaje. Estas métricas son [4,5]:

- a) *Capacidad de entrega del mensaje.* Su notación es  $MD$  (Message Deliverability), esta métrica se encarga de la medición de la posibilidad de si una portadora de mensajes subsiste el tiempo suficiente para suministrar su información al receptor pertinente. La métrica  $MD$  se define como la capacidad del transmisor para aumentar la probabilidad de que el mensaje a ser trasferido pueda ser entregado al receptor a través del medio de comunicación antes de su expiración; esto es, en el tiempo en el que el receptor pueda utilizar el contenido del mensaje o antes de que el mensaje expire, o que las características de movimiento, de flujo o del canal sean alteradas. La capacidad de entrega se mide como una probabilidad (de que el mensaje pueda ser entregado al receptor previsto antes de que expire) asumiendo una transmisión libre de errores, sus unidades son un valor de probabilidad, la métrica asume que los mensajes tienen un tiempo de vida finito ( $TTL$  Time-to-live). Por lo tanto,  $MD = P(t_r < TTL)$ , donde  $t_r$  es la duración del mensaje en el momento de la recepción.
- b) *Tiempo de vida del mensaje (duración del mensaje).* Mide la vida útil de una portadora de mensajes. Una portadora de mensajes se puede diseñar para desintegrarse o volverse ineficaz después de un tiempo de vida específico ( $TTL$ ). La vida útil se define como la cantidad de tiempo que un mensaje persiste antes de degradarse o sufrir modificaciones que alteren su contenido. Por consiguiente, una red de comunicación debe proporcionar la entrega oportuna de algunos mensajes mientras que otros pueden tener una vida útil más larga (durabilidad).
- c) *Densidad de información.* Se refiere a la cantidad de información codificada de una portadora de mensajes por unidad de volumen. Las teorías de la información de Shannon se asumen por defecto, y se incluyen, además, otras formas de medición de la información como la complejidad de Kolmogorov<sup>vii</sup>, o

---

vii. La complejidad de Kolmogorov  $k$  se define como una función de una cadena binaria finita de longitud arbitraria correspondiente al conjunto de los números naturales  $\mathbb{N}$ . Así,  $k: \{0,1\}^* \rightarrow \mathbb{N}$  es una función definida en objetos representados por la cadena binaria [23].



las basadas en la teoría algorítmica de la información<sup>viii</sup>. El volumen incluye tanto el volumen del mensaje como la portadora de mensajes. Las unidades de esta métrica son *bits por nanómetro cúbico*. La densidad de información se vincula con la relación ancho de banda-volumen<sup>ix</sup>, la densidad transportada por una portadora de mensajes puede permitir un mayor ancho de banda dentro de un volumen menor.

- d) *Producto ancho de banda-retardo*. Su acrónimo es BxD en bits, donde B (Bandwidth) representa el ancho de banda en *bits/segundos* y D (Delay) es el retraso del enlace de comunicación en *segundos*. El producto de ancho de banda y retardo es proporcional al número máximo de portadoras de mensajes que se pueden enviar por el canal de transmisión. Para el manejo apropiado de protocolos y algoritmos de comunicación el conocimiento de esta métrica es básico para contar así con un diseño de comunicación óptimo. El producto de ancho de banda y retardo determina la cantidad máxima de bits que se puede transferir por un enlace de comunicación a nanoescala en cualquier momento.
- e) *Energía de la información y comunicación*. La portadora de mensajes necesita energía para su movimiento, propulsión (si se usa movimiento activo) y arrastre (si se utiliza movimiento pasivo), se requiere energía para causar un flujo de fluido circundante o para crear un gradiente de campo. Asimismo, se puede requerir energía en el transmisor y en el receptor para la liberación y recepción de la portadora de mensajes, respectivamente. Esta energía puede ser el resultado de la síntesis de la portadora de mensajes en el transmisor o de las características moleculares de recepción. Esta es la métrica que cuantifica la energía utilizada en las nanocomunicaciones, corresponde a la energía por bit de información transmitida por el componente de movimiento. Se puede considerar como la eficiencia de la portadora de mensajes, y se representa en la Ecuación 2.1.

---

viii. Es la provisión de métodos para la medición de la información intrínseca relacionada con objetos a través de la longitud de su descripción algorítmica.

ix. La relación ancho de banda-volumen tiene en cuenta y combina dos esencias fundamentales de la comunicación molecular y a nivel nano a saber; su tamaño y ancho de banda. La relación ancho de banda-volumen se define como el ancho de banda en *bits por segundo* que ofrece el sistema dividido por el volumen total del sistema, incluidos el transmisor, el receptor y la portadora de mensajes [4, 5].

$$\frac{E_{mc}}{I_{mc}} \quad (2.1)$$

Donde  $E_{mc}$  es la energía requerida para transmitir un mensaje, e  $I_{mc}$  es la información por portadora de mensajes en *bits*.

#### 2.2.4.5.2 Métricas para el componente de movimiento

Se refiere a las métricas que describen el movimiento de la portadora de mensajes, y son [3,4]:

- a) *Comportamiento de la colisión.* El comportamiento de la colisión determina el resultado físico de la colisión entre portadoras de mensajes. Al ocurrir una colisión, el impacto puede producir la unión, fusión, absorción, rebote o reflexión entre portadoras. Esta métrica tiene un impacto significativo sobre si las portadoras de mensajes se dispersan y cómo lo hacen, además de precisar su eficiencia para llegar a sus receptores destino. El comportamiento de la colisión es una medida de la interacción entre las portadoras de mensajes en la colisión misma. Las colisiones pueden ser elásticas, conservando el impulso y la energía cinética, o inelásticas, lo que significa que se conserva solamente el impulso. El grado en que una colisión es elástica o inelástica se cuantifica mediante el coeficiente de restitución, valor que generalmente oscila entre cero y uno. Perfectamente la colisión elástica tiene un coeficiente de restitución de uno, en tanto una colisión perfectamente inelástica posee un coeficiente de restitución de cero, el coeficiente de restitución se cuantifica en la Ecuación 2.2.

$$C_R = \frac{V_{AC}}{V_{BC}} \quad (2.2)$$

Donde  $C_R$  es el coeficiente de restitución,  $V_{AC}$  es la velocidad relativa (energía, masa) entre las portadoras de mensajes después de la colisión (las siglas *AC* corresponden al inglés *After Collision*);  $V_{BC}$  es la velocidad relativa (energía, masa) entre las portadoras de mensajes antes de la colisión (las siglas *BC* corresponden al inglés *Before Collision*).

- b) Desplazamiento de masa.** Las CM pueden asumir que las portadoras de mensajes están compuestas de masa, la cual sufre pequeñas variaciones cuando ocurre la comunicación, especificadas en un cambio continuo de masa, u oscilación de masa. Esta métrica cuantifica los cambios relativos de masa en función del tiempo. La desviación estándar de las fluctuaciones de frecuencia de masa  $\sigma_y(M, T, \tau)$  y  $(M, T, \tau)$ , o varianza de una muestra  $M$  se indica en la Ecuación 2.3.

$$\sigma_y^2(M, T, \tau) = \frac{1}{M-1} \left\{ \sum_{i=0}^{M-1} \left[ \frac{x(iT + \tau) - x(iT)}{\tau} \right]^2 - \frac{1}{M} \left[ \sum_{i=0}^{M-1} \frac{x(iT + \tau) - x(iT)}{\tau} \right]^2 \right\} \quad (2.3)$$

Donde  $x(t)$  es la masa en el tiempo  $t$ ,  $T$  es el periodo de tiempo de muestreo (el tiempo entre cualquier muestra),  $\tau$  es el tiempo de muestreo y  $M$  es el número de muestras.

El promedio fraccional de series de tiempo de frecuencia de masas se detalla en la Ecuación 2.4.

$$\sigma_y^2(M, T, \tau) = \frac{1}{M-1} \left\{ \sum_{i=0}^{M-1} \bar{y}_i^2 - \frac{1}{M} \left[ \sum_{i=0}^{M-1} y \right]^2 \right\} \quad (2.4)$$

Donde  $M$  es el número de muestras de frecuencia usadas para el computo de la varianza,  $T$  es el tiempo entre cada muestreo,  $\tau$  es la duración de tiempo de cada frecuencia estimada.

- c) Precisión en el posicionamiento de las portadoras de mensajes.** Se pueden controlar múltiples grupos de portadoras de mensajes como si fueran organismos unificados, para ser dirigidos a lo largo de rutas predeterminadas hacia el receptor mediante una macro unidad externa. Resultará útil localizar los grupos de portadoras de mensajes desde tal macro unidad. Esta información de ubicación se puede emplear para controlar

de forma adaptativa el movimiento futuro de los grupos, para mejorar la eficacia de la entrega de mensajes al reducir el retardo de propagación y la incertidumbre del entorno. La información de ubicación también se puede utilizar para evaluar la capacidad de control remoto y la rastreabilidad de los grupos. Esta métrica cuantifica la precisión de posicionamiento de los grupos de portadoras de mensajes, y se define como el radio del círculo cuyo centro se posiciona en la media y contiene un porcentaje dado de la mitad de las realizaciones de las estimaciones de ubicación (es decir, la medida del rendimiento del error circular probable en el contexto clásico de geolocalización). Todas las coordenadas de ubicación se deben medir con referencia a un marco global que abarca el supersistema donde reside la nanored IEEE 1906. Las unidades de esta métrica son unidades de *longitud* estándar. La implementación de esta métrica requiere información detallada sobre los mecanismos de control y seguimiento utilizados por la macro unidad.

#### 2.2.4.5.3 Métricas para el componente de campo

Esta métrica se refiere al grado de control (dirección-gradiente) sobre la portadora de mensajes, el flujo de difusión se emplea en ese sentido para “dirigir” el movimiento Browniano, el flujo de difusión se puede modelar mediante un proceso de Wiener<sup>x</sup> o Levy<sup>xi</sup>, y puede ser descrito a través de un proceso de ruido de Langevin (que se detalla en el literal c)) [3,4]:

---

x. Un proceso de Wiener es un modelo simple del movimiento Browniano en el que la fricción es mínima, y se particulariza en términos de una distribución Gaussiana con notación  $x \sim N(m, \sigma^2)$ , en donde  $x$  es la distribución Gaussiana de media  $m$  y varianza  $\sigma^2$ . La función de densidad de probabilidad de  $x$  viene dada por la Ecuación A [23, 24]:

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

Siendo  $\exp(t) = e^t$ . Además, si  $B(t)$  representa la posición de un suceso Browniano al tiempo  $t \geq 0$ , donde  $B(0)$  constituye la posición inicial, entonces,  $B(t)$  es un proceso de Wiener (en una dimensión) si se satisface las dos condiciones siguientes:

1. Para cualquier tiempo  $t_1$  y  $t_2$  con  $t_2 > t_1 \geq 0$  y  $\sigma^2$  cualquier valor constante:

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

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

xi. Un proceso estocástico  $(B_t)_{t \geq 0}$  es un movimiento Browniano si:

- Casi seguro,  $t \mapsto B_t$  se define en forma continua.
- $\forall s, t > 0, B_{s+t} - B_t$  tiene la misma distribución que  $B_s$ .
- $\forall (n \geq 1)$  y  $t, 0 \leq t_0 \leq t_1 \leq \dots \leq t_n$ , las variables aleatorias  $B_{t_0}, B_{t_1} - B_{t_0}, \dots, B_{t_n} - B_{t_{n-1}}$  son independientes.

**a) Longitud de persistencia.** Es una medida del grado en el que una estructura en forma de cadena es blanda (como cilindrillos de espagueti cocido) o rígida (como varillas de metal). Esto tiene un impacto significativo en las portadoras de mensajes que viajan a lo largo de caminos trazados por hebras (*strands*). Si no hay estructuras en forma de cadena que componen el entorno, entonces este parámetro será cero. La longitud de persistencia se establece en unidades de *nanómetros*, donde longitudes más largas definen estructuras más rígidas. La longitud de persistencia es la velocidad a la que las tangentes tomadas a lo largo de cada segmento de una cadena lineal en una red llegan a ser descorrelacionadas de otras. Si  $R(s)$  es un punto en un segmento  $s$ , entonces  $u(s)$  es el vector unitario tangente en la Ecuación 2.5.

$$u(s) = \frac{\partial R}{\partial s} \quad (2.5)$$

Donde  $R(s)$  es un punto en el segmento  $s$ . Las orientaciones del vector unitario tangente para todos los segmentos  $s$  se cuantifican por el producto interno en la Ecuación 2.6.

$$\langle u(s) \times u(0) \rangle = e^{-s/\zeta_p} \quad (2.6)$$

Donde  $\langle x \rangle$ , generalmente, se usa para denotar al valor de expectativa de la variable  $x$ ,  $u(s)$  es el vector unitario tangente en el punto  $s$  dentro del conjunto de segmentos conectados,  $u(0)$  es el vector unitario tangente en el origen o en el comienzo de la cadena de segmentos conectados,  $\zeta_p$  es la longitud de la persistencia (expresado en la Ecuación 2.7).

$$\zeta_p = \frac{B_s}{k_B \times T} \quad (2.7)$$

---

Con tales antecedentes, un proceso estocástico  $(X_t)_{t \geq 0}$  en  $\mathbb{R}^d$  es un proceso de Levy si cumplen las siguientes condiciones:

1. Los incrementos independientes:  $\forall (n \geq 1) y t, 0 \leq t_0 \leq t_1 \leq \dots \leq t_n$  las variables aleatorias  $X_{t_0}, X_{t_1} - X_{t_0}, \dots, X_{t_n} - X_{t_{n-1}}$  son independientes.
2. Los incrementos estacionarios:  $\forall s, t \geq 0$ , la distribución  $X_{s+t} - X_s$  no depende de  $s$ .
3. Casi seguro,  $X_0 = 0$ .

Se tiene la continuidad estocástica  $\mathbb{P}(|X_s - X_t| > \varepsilon) \xrightarrow{s \rightarrow t} 0$ .

Donde  $B_S$  es la rigidez a la flexión,  $k_B$  es la constante de Boltzmann, y  $T$  es la temperatura. La rigidez a la flexión se relaciona con el módulo de Young como se define en la Ecuación 2.8.

$$B_S = Y \times I \quad (2.8)$$

Donde  $Y$  es el módulo de Young e  $I$  es el momento de inercia del área dada por la Ecuación 2.9.

$$I = \frac{\pi \times r^4}{64} \quad (2.9)$$

Donde  $r$  es el radio del momento de inercia. Así, el módulo de Young se relaciona con la longitud de persistencia por medio de la Ecuación 2.10.

$$Y = \frac{64 \times k_B \times T}{\zeta_p \times \pi \times r^4} \quad (2.10)$$

El módulo de Young es la relación entre el esfuerzo (presión) y la deformación (adimensional) y, por lo tanto, sus unidades corresponden a las de *presión*. El conocimiento del módulo de Young permite estimar el grado en que un cilindro (o una estructura tubular) se extenderá por la tensión o se doblará bajo compresión.

- b) Flujo de difusión.** La primera ley de Fick es una de las leyes que gobierna el proceso de difusión, la cual es muy común en la forma de transmitir la información en CM. Esta ley relaciona el flujo de difusión con la concentración bajo el supuesto de un estado estacionario, además, postula que el flujo es transferido de regiones de alta a baja concentración, con una magnitud proporcional al gradiente de concentración. Si se utiliza un sistema referencial de una dimensión, esta ley se expresa en la Ecuación 2.11.

$$J = -D \times \frac{\delta\phi}{\delta x} \quad (2.11)$$

Donde  $J$  es el flujo de difusión, el cual es la cantidad de sustancia por unidad de área por unidad de tiempo o  $\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ ;  $J$  mide la cantidad de sustancia que atravesará una pequeña área durante un pequeño intervalo de tiempo.  $D$  es

el coeficiente de difusión o la difusividad de masa en dimensiones de  $longitud^2 \times tiempo^{-1}$  o  $m^2/s$ . Para mezclas ideales  $\phi$  es la concentración en dimensiones de cantidad de sustancia por unidad de volumen o  $mol/m^3$ ;  $x$  es la posición (*longitud*).

- c) *Ruido de Langevin*. El movimiento aleatorio tiene un impacto significativo en el rendimiento de las portadoras de mensajes (aquellas en forma de partículas) cuando intentan arribar a sus receptores objetivo. El movimiento aleatorio influye en la medida en que el movimiento Browniano por mencionar un caso (ecuación de Langevin) de tipo Random Walk (Sección 1.4.1 del Capítulo 1), implica un proceso de Levy, y entonces, conlleva un proceso de Poisson, y permite que la teoría de colas clásica proporcione resultados válidos. La métrica específica de interés es el término de ruido  $\eta(t)$ . El ruido de Langevin describe el movimiento aleatorio de una partícula en un fluido debido a colisiones con las moléculas del fluido expresado en la Ecuación 2.12.

$$m \times \frac{d^2x}{dt^2} = -\lambda \times \frac{dx}{dt} + \eta(t) \quad (2.12)$$

Donde  $m$  es la masa,  $t$  es el tiempo,  $x$  es la posición,  $\lambda$  es el coeficiente de amortiguamiento. La fuerza que actúa sobre la partícula se describe como la suma de una fuerza viscosa proporcional a la velocidad de la partícula, y un término de ruido  $\eta(t)$  (nombre dado en contextos físicos a términos en ecuaciones diferenciales estocásticas que involucran procesos estocásticos) que representa el efecto de las colisiones con las moléculas del fluido. La fuerza  $\eta(t)$  tiene una distribución de probabilidad Gaussiana con función de correlación que se manifiesta en la Ecuación 2.13.

$$\langle \eta_i(t) \times \eta_j(t') \rangle = 2 \times \lambda \times k_B \times T \times \delta_{ij} \times \delta(t - t') \quad (2.13)$$

Donde  $\langle x \rangle$  denota, comúnmente, el valor esperado de una variable  $x$ ,  $k_B$  es la constante de Boltzmann,  $T$  es la temperatura, y  $\delta$  es la forma de función  $\delta$  de las correlaciones en el tiempo, e indica la suposición de que la fuerza en un tiempo  $t$  no está correlacionada con la fuerza en cualquier otro momento. Esto es una aproximación, la fuerza aleatoria real tiene una correlación temporal distinta de cero con el tiempo de colisión de las moléculas. Sin embargo, los parámetros que se especifican mediante el ruido de Langevin

se usan para describir el movimiento de una partícula “macroscópica” en una escala de tiempo mucho mayor, y en este límite, la correlación  $\delta$  y el ruido de Langevin se vuelven exactos. Por lo que, el incremento de la temperatura o el coeficiente de amortiguamiento amplía el componente aleatorio.

#### 2.2.4.5.4 Métricas para el componente de especificidad

Estas métricas analizan la afinidad de las portadoras de mensajes con su receptor pertinente en el extremo destino, y se describen a continuación [3,4].

- a) Especificidad.** A menudo, la especificidad, la sensibilidad y la afinidad se confunden, pero son métricas muy diferentes. La especificidad (a veces denominada tasa de verdaderos negativos) mide la proporción de negativos que se han identificado como tales (por ejemplo, el porcentaje de portadoras de mensajes no dirigidas a un nodo objetivo previsto y que, por tanto, no son aceptadas por el mismo). La sensibilidad (también llamada tasa de verdaderos positivos) evalúa la proporción de verdaderos positivos que se identifican correctamente (por ejemplo, el porcentaje de las portadoras de mensajes dirigidas a un nodo destino previsto y que consecuentemente son reconocidas y aceptadas por el mismo y procesadas en forma correcta). Estas dos medidas son complementarias de la tasa de falsos positivos y la tasa de falsos negativos, respectivamente. La especificidad se define en la Ecuación 2.14.

$$\frac{T_N}{T_N + F_P} \quad (2.14)$$

Donde  $T_N$  es el número de verdaderos negativos, y  $F_P$  es el número de falsos positivos.

- b) Afinidad.** Es una medida de la afinidad química; sin embargo, se aplica de manera más amplia en los estándares IEEE de la familia 1906, y así se habla de la afinidad de las portadoras de mensajes con sus destinos objetivo previstos, los medios de transmisión y otras portadoras de mensajes. Esta métrica es un elemento clave del componente de especificidad IEEE de la familia 1906. La afinidad es el fenómeno por el cual ciertos átomos o moléculas tienen tendencia a agregarse o unirse. La



definición de la Unión Internacional de Química Pura y Aplicada IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) para la afinidad  $A$  es la derivada parcial negativa de la energía libre  $G$  de Gibbs con respecto al grado de la reacción  $\xi$  a presión y temperatura constantes como lo sugiere la Ecuación 2.15.

$$A = - \left( \frac{\partial G}{\partial \xi} \right)_{P,T} \quad (2.15)$$

Donde  $A$  es la afinidad,  $G$  es la energía libre de Gibbs,  $\xi$  es la reacción cuando la presión y la temperatura permanecen constantes.

- c) Sensibilidad.** Esta métrica se establece en función del tiempo y se puntualiza con base en la cantidad de enlaces moleculares. La sensibilidad del receptor molecular se podría reducir en presencia de un gran número de moléculas enlazadas. En cambio, se puede incrementar una vez que los enlaces moleculares se liberan del receptor. Estos aspectos pueden tener un efecto significativo en el rendimiento de la comunicación a nivel nano. La sensibilidad se expresa en la Ecuación 2.16.

$$\frac{T_P}{T_N + T_P} \quad (2.16)$$

Donde  $T_N$  es el número de verdaderos negativos,  $T_P$  es el número de verdaderos positivos.

- d) Espectro angular (ángulo de llegada).** Cuantifica la distribución de la intensidad de las señales de comunicación a nanoescala captadas por el receptor en función del ángulo de llegada. Para las comunicaciones EM a nivel nano, esta métrica es idéntica al espectro angular de potencia utilizado en los canales inalámbricos convencionales. Para las CM, esta métrica se establece de la siguiente manera: se considerará un receptor bidimensional genérico definido como una curva que encierra un área conectada por puntos, y que incluye el punto de referencia (centro) del área de recepción. Se establece el retardo  $\tau$  y el azimut  $\varphi$  como la hora de llegada y el ángulo de llegada de una portadora de mensajes al receptor.

El retraso se refiere al momento en que el transmisor emitió la portadora que contiene la información, y el azimut se referencia con el centro del área de recepción. La intensidad de la señal recibida dada por el número de portadoras absorbidas por el receptor es una variable aleatoria en el espacio y el tiempo de recepción, en razón de la incertidumbre durante el proceso de propagación causada por movimientos Brownianos aleatorios, degeneración inesperada de las portadoras, etcétera. Se desarrolla una descripción espacio-temporal de los canales de comunicación molecular mediante la introducción del espectro de retardo-azimut  $\Xi_{\tau,\varphi}(\tau, \varphi)$ , definido como el promedio del conjunto de la intensidad de la señal recibida en  $\tau$  y  $\varphi$  específicos sobre múltiples realizaciones del proceso de propagación. El espectro de azimut se determina en la Ecuación 2.17.

$$\Xi_{\varphi}(\varphi) = \int_{\tau} \Xi_{\tau,\varphi}(\tau, \varphi) d\tau \quad (2.17)$$

Donde  $\tau$  es el tiempo de llegada al receptor,  $\varphi$  es el ángulo de arribo al receptor,  $\Xi_{\tau,\varphi}(\tau, \varphi)$  es el espectro de retardo-azimut definido como la intensidad media de la señal recibida en valores específicos de  $\tau$  y  $\varphi$ .

Esta métrica se puede cuantificar empíricamente o derivarse teóricamente. También se la puede utilizar para extraer otros parámetros del canal de comunicación a nivel nano, como la dispersión angular, que mide la cantidad de dispersión de la señal en el dominio angular. La dispersión de ángulo viene dada por la Ecuación 2.18.

$$\sigma_{\varphi} = \sqrt{\int_{\varphi} |\exp(j\varphi) - \mu_{\varphi}|^2 \times \Xi_{\varphi}(\varphi) d\varphi} \quad (2.18)$$

Donde  $\mu_{\varphi} = \int_{\varphi} \exp(j\varphi) \times \Xi_{\varphi}(\varphi) d\varphi$ , es el espectro de azimut especificado en la Ecuación 2.17.

Esta métrica es una función de densidad de probabilidad. Para las CM, la implementación de esta métrica requiere promediar el número de portadoras de mensajes recibidos dentro de un ángulo diferencial sobre un número suficiente de realizaciones del proceso de propagación.

- e) *Espectro de retraso (hora de llegada)*. Cuantifica la distribución de la intensidad de las señales de comunicación a nanoescala recibidas por el receptor en función del tiempo de llegada. Similar al espectro angular, el espectro de retardo se especifica en la Ecuación 2.19.

$$\Xi_{\tau}(\tau) = \int_{\varphi} \Xi_{\tau,\varphi}(\tau, \varphi) d\varphi \quad (2.19)$$

Donde  $\Xi_{\tau,\varphi}(\tau, \varphi)$  es el espectro de retardo-azimut.

Esta métrica se puede evaluar empíricamente o derivarse teóricamente. También se puede emplear para extraer otros parámetros del canal de comunicación a nanoescala, como la dispersión del retardo, que cuantifica la cantidad de dispersión de la señal en el dominio temporal. Si el espectro de retardo es una función no creciente del retardo, la dispersión del retardo viene dada por la Ecuación 2.20.

$$\sigma_{\tau} = \sup \left\{ \Delta\tau \in [0, \tau_{max} - \tau_{min}] : \int_{\tau_{min}}^{\tau_{min} + \Delta\tau} \Xi_{\tau}(\tau) d\tau < \varepsilon \right\} \quad (2.20)$$

Donde  $\tau_{min}$  es el retardo mínimo,  $\tau_{max}$  es el retardo máximo,  $\Delta\tau$  es el valor posible de la dispersión del retardo en el rango entre 0 y  $\tau_{max} - \tau_{min}$ ,  $\Xi_{\tau}(\tau)$  es el espectro de retardo dado en la Ecuación 2.19; finalmente,  $\varepsilon$  es un porcentaje suficientemente grande preespecificado. Esta métrica es una función de densidad de probabilidad. Para las CM, la implementación de esta métrica precisa promediar el número de portadoras de mensajes, recibidas dentro de un retardo diferencial sobre un número suficiente de realizaciones del proceso de propagación.

#### 2.2.4.5.5 Métricas para todo el sistema de comunicación

Las métricas para el sistema de comunicación influyen en todos los componentes de una nanored, todas estas métricas se han de implementar [3,4]:

- a) *Programabilidad de red activa*. Las portadoras de mensajes se pueden programar o codificar para que modifiquen los medios subyacentes de propagación (por ejemplo, microtúbulos) a medida que transportan la información. Cuando se diseñan específicamente para cumplir este propósito, y los cambios son transitorios o permanentes en los medios de transmisión, se las denomina “como portadoras de mensajes activas”. Esta métrica proporciona una medida estándar de cuán “activa” es una portadora de mensajes. Si las portadoras de mensajes no producen modificaciones en el medio, entonces el valor de esta métrica es cero; las unidades de la métrica son cambios en el *flujo* de la portadora de mensajes a través de una *superficie* determinada durante un *tiempo* específico. Una red activa se diseña para permitir, intencionalmente, la transmisión de mensajes e información para modificar y mejorar la propia red.

La portadora de mensajes se puede diseñar para realizar modificaciones en la nanored. En razón de que este tipo de diseños es autorreferencial (elementos de red que construyen/mejoran la red que cambia a su vez el movimiento/comportamiento de los elementos de la red, etcétera), su estudio y cuantificación son notoriamente difíciles. La programabilidad de la red activa se basa en la cantidad y duración del cambio en el estado de la red que una portadora de mensajes individual puede ejercer en la topología de red. Su cuantificación se precisa en la Ecuación 2.21.

$$A = \oint_S \int_t \Delta f(t) dt dS \quad (2.21)$$

Donde  $t$  es el tiempo,  $S$  es una superficie virtual que define el volumen a través del cual la variación del flujo de portadoras de mensajes debe especificarse claramente. El flujo de portadoras de mensajes como función del tiempo es  $f(t)$ , el cual es la razón de cambio del flujo que atraviesa una unidad de área. El cambio intencional  $\Delta f(t)$  en  $f(t)$  es ocasionado por una portadora de mensajes a través de una superficie  $S$ .

El impacto de la variación en el flujo de la portadora de mensajes puede tardar para implementarse y puede no ser permanente, por lo que la integral en el tiempo captura los aspectos temporales de la variación. Una versión discreta

de esta métrica es simplemente el cambio en el flujo de la portadora de mensajes a través del espacio cuando un cambio en la topología de la red ocurre intencionalmente por la acción de una portadora de mensajes. Por ejemplo, una portadora de mensajes podría ocasionar que las particiones de un microtúbulo se unan, separen o reorienten de otra forma. Este efecto se puede medir empleando la teoría de grafos como el cambio en el grafo Laplaciano, una forma discreta del concepto representado por esta métrica. Si  $A$  es el flujo de portadoras de mensajes acumulado a través de un área de superficie dada en un tiempo específico, y si se conocen los bits transportados por la portadora de mensaje, entonces  $A$  puede utilizarse para obtener el ancho de banda a través de un área de superficie definida en el medio de transmisión. Se debe, por tanto, multiplicar  $A$  con los bits por portadora de mensajes y dividir para el tiempo durante el cual se realizó la integración. Si la superficie biseca el medio, se reduce al ancho de banda del canal. La función  $f(t)$  puede ser sustituida por cualquiera de las métricas definidas para el componente de campo.

- b) Tasa de perturbación.** La tasa de perturbación es una medida tanto de la tasa como del control de cualquier tipo de perturbación empleada para enviar una señal en el sistema. Esta métrica se diseña para cuantificar la capacidad de controlar la generación de señales; normalmente, la calidad de la señal se degrada a medida que aumenta la tasa de perturbación. Esta métrica captura el cambio en la calidad de la señal en función de la velocidad. El término perturbación se usa para ser intencionalmente amplio en las diferentes aplicaciones, y se refiere a la variación en cualquiera de los otros componentes de los estándares IEEE de la familia 1906, para de esa manera producir la transmisión de una señal. Una tasa mayor de perturbación podría permitir más ancho de banda de la comunicación, sin embargo, esto puede producir una pérdida de precisión en el control de la perturbación o causar efectos nocivos como resonancia no intencionada con otros componentes del sistema. El error de perturbación es la diferencia entre la tasa de perturbación prevista y la tasa de perturbación real. Esta métrica es una curva de tasa de cambio versus precisión.

El error en la recepción de la señal también depende de la configuración del receptor definida por su sensibilidad, y especificidad (Sección 2.2.4.5.4 del presente capítulo). Sin embargo, la precisión de la tasa de perturbación se mide asumiendo una sensibilidad y especificidad perfectas para distinguir los problemas de transmisión de los de recepción.

- c) *Degradación del supersistema.* El supersistema es el sistema en el que se establece la nanored de los estándares IEEE de la familia 1906, por ejemplo, un organismo biológico. Esta métrica cuantifica el impacto de la nanored sobre el supersistema con respecto a su funcionamiento normal. Es decir, la métrica determina cuánto reduce la nanored IEEE 1906 el rendimiento del sistema original. La degradación del supersistema es una medida del impacto de establecer la comunicación a nivel nano dentro de un sistema. Esta métrica captura la influencia negativa de la implementación en el sistema más grande, y puede ser simplemente el porcentaje de reducción con base en la función principal del sistema debido a la implementación al nivel del sistema. La Ecuación 2.22 define la métrica.

$$d_s = \frac{S_{pn}}{S_p} \quad (2.22)$$

Donde  $d_s$  es la degradación del supersistema,  $S_{pn}$  es el rendimiento del supersistema con la red de comunicación a nanoescala embebida,  $S_p$  es el rendimiento del supersistema original (sin la red de comunicación a nanoescala embebida).

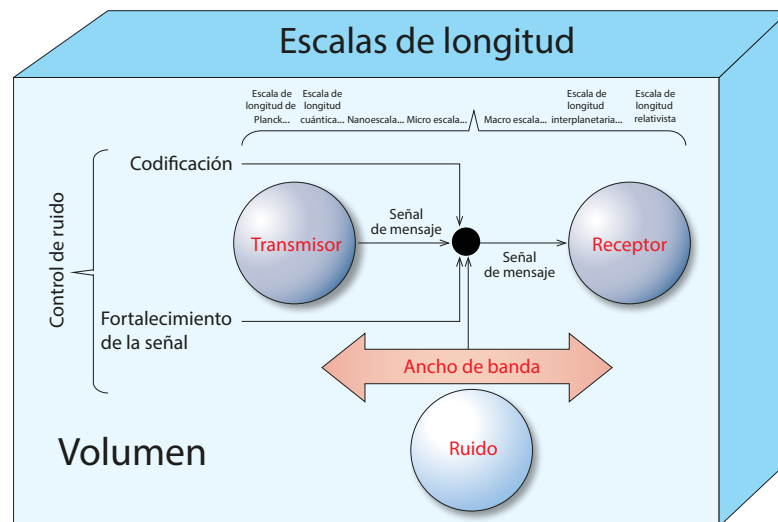
La métrica se ha proyectado de modo que pueda ser establecida como una función del ancho de banda de la red de comunicación a nanoescala embebida,  $S_{pn}(bw)$ , como se expresa en la Ecuación 2.23, misma en la que ya se han especificado previamente las variables.

$$d_s(bw) = \frac{S_{pn}(bw)}{S_p} \quad (2.23)$$

La degradación del supersistema está vinculada a la relación ancho de banda-volumen (que se explica en el siguiente párrafo), en razón de que el ancho de banda es una medida del rendimiento del sistema de comunicación y el volumen de los elementos de comunicación puede afectar el rendimiento del supersistema.

d) *Relación ancho de banda-volumen.* Se fundamenta en dos parámetros esenciales que caracterizan a las CM y aquellas a nivel nano; estos son: tamaño y ancho de banda. La relación ancho de banda-volumen se define como el ancho de banda en *bits por segundo* que suministra el sistema, dividido por el *volumen total* de tal sistema, lo cual incluye al transmisor, al receptor y a la portadora de mensajes. El contexto de estos elementos y parámetros se ilustra en la Figura 2.2 [3,4] en la que se resaltan las escalas de longitud, indicadas por  $L$ , y en la que las propiedades físicas relevantes para el desempeño de la comunicación varían en un orden de magnitud que se conoce como cambio de régimen. Los ejemplos de una comunicación de cambio de régimen son:

1. La escala de longitud en la que el ancho de banda de la oscilación mecánica (perturbación) se acerca a las frecuencias EM comerciales (escalas de frecuencia mecánica por  $L^{-1}$ ).
2. La escala de longitud en la que el movimiento Browniano gobierna el movimiento de la portadora de mensajes (escalas de tiempo de difusión por  $L^2$ ).



**Figura 2.2.** Ilustración de la relación ancho de banda-volumen que muestra un espectro de escalas de longitud compuesto de las escalas de longitud de Planck, cuántica, nano, micro, macro, interplanetaria y relativista con respecto a la señal y el ruido.

El objetivo en las nanocomunicaciones debería ser el de obtener un volumen total pequeño ( $V$ ) y un gran ancho de banda ( $BW$ ), por lo que la relación ( $BW/V$ ) de un sistema ideal debería acercarse al infinito.  $V$  se puede dividir en los términos que se refiere la Ecuación 2.24.

$$V = V_{trans} + V_{rec} + V_{mc} \quad (2.24)$$

Donde  $V_{trans}$  es el volumen del transmisor,  $V_{rec}$  es el volumen del receptor y  $V_{mc}$  es el volumen de la portadora de mensajes ( $mc$ , del inglés *message carrier*).

El ancho de banda ( $BW$ ) se puede dividir en varias ecuaciones de capacidad del canal. Para lograr incrementar esta métrica, el diseño de la nanored puede elegir qué volumen de los elementos de la familia protocolaria IEEE 1906 reducir en lugar de intentar incrementar el ancho de banda, para aumentar el valor de la métrica. Sus unidades son  $bits/sec \times nm^3$ .

La relación ancho de banda-volumen se relaciona con la degradación del supersistema (métrica previamente definida), debido a que es una función del ancho de banda y puede verse afectada por el volumen del sistema de comunicación integrado en él.

## 2.3

### **MODELO DE DATOS PARA SISTEMAS DE COMUNICACIÓN A NANOESCALA SEGÚN LOS ESTÁNDARES IEEE 1906.1 Y 1906.1.1**

Las redes moleculares requieren el desarrollo de un nuevo paradigma protocolario que se adecue apropiadamente a las comunicaciones que ocurren en la naturaleza (es decir en la biología). Los elementos del *networking* tradicional y sus protocolos se deben direccionar hacia la adaptación (como resultado del estudio e inspiración de la observación de eventos de comunicación y procesos de transmisión/recepción de información en la naturaleza) en los componentes de una nanored biológica. Por otra parte, el esquema clásico de los principios de comunicación de las redes de computadoras se tendrá que modificar para lograr la adaptación conveniente de tales principios a los sistemas naturales, sintéticos o híbridos de las nanoredes de comunicación [26].



Como se sugiere en [14, 26–31], las TIC se convierten en el fundamento para la investigación y desarrollo de los “protocolos” que se presentan en las CM, tomando en cuenta este paradigma para las CM (o comunicaciones biológicas), IEEE justamente ha impulsado a nivel mundial los dos protocolos de nanocomunicaciones analizados hasta el momento.

En su primera versión el estándar IEEE 1906.1 incorpora un modelo conceptual y terminología estándar para redes de tipo *ad hoc* y moleculares a nanoescala. Específicamente, las recomendaciones del estándar establecen los siguientes elementos [3]:

1. La definición de componentes que tienen lugar en las comunicaciones a nivel de nanoredes.
2. Un modelo conceptual de *networking* (marco de referencia-*framework*) operando a nanoescala, el cual consta de a) definiciones puntuales para canales de transmisión en entornos nano, b) interfaces abstractas de canales de nanocomunicaciones con sistemas de transferencia de información a nivel molecular, c) métricas de rendimiento comunes a las redes de comunicación enfocadas a redes a nivel nano *ad hoc* y moleculares, d) mapeo entre las redes de comunicación tradicionales y aquellas de tipo nano, incluidos los mecanismos necesarios de alto nivel, como codificación, encapsulación, direccionamiento, enrutamiento, parámetros de confiabilidad y funciones de capas protocolarias.

De acuerdo con [3] un modelo abstracto (marco de referencia-*framework*) común posibilita la operatividad teórica entre disciplinas científicas diferentes (que se encargan de procesos de análisis de comunicación de la información), manteniendo un lenguaje y, por tanto, comprensión comunes entre estas disciplinas. El marco de referencia provisto por IEEE 1906.1 cimienta una práctica recomendada para estándares adicionales de redes de comunicación a nanoescala, en la que la industria se involucra más profundamente en la integración comercial de la tecnología, gracias a lo cual, por ejemplo, la industria biomédica puede utilizar estándares de comunicación a nivel nano para crear métodos innovadores de diagnóstico y tratamiento.

En una nueva versión del estándar precedente, el IEEE 1906.1.1 instrumenta un conjunto adicional de elementos denominado YANG (Yet Another Next Generation) para el modelo informacional del estándar original. YANG se compone de módulos que describen los procesos físicos asociados a las comunicaciones en los sistemas de tipo nano considerados en el estándar IEEE 1906.1 de este modo, las propieda-

des físicas distintivas de las nanocomunicaciones se representan en el nuevo estándar; además la configuración y gestión remotas para la operación y el análisis remotos de los sistemas de comunicación a nanoescala están definidos por el modelo; así, el modelo para el almacenamiento de información y repositorios de datos experimentales de comunicación a nivel nano, especifica una estructura de datos auto descriptiva que permite una comprensión común de la información transferida a través de una amplia variedad de medios y tecnologías de comunicación a nanoescala. El modelo de datos YANG precisa un modelo de información de configuración y gestión de red común para nanosistemas de comunicación, y, consecuentemente, se llevan a cabo los siguientes propósitos [4]:

- 1.** Cumplimiento de los requerimientos señalados en el modelo del estándar IEEE 1906.1.
- 2.** Representación de la física fundamental que impacta los sistemas nano descritos en el estándar IEEE 1906.1.
- 3.** Puntualización en la configuración y administración en la simulación y análisis.
- 4.** Definición de una estructura de datos auto descriptiva que se emplea en repositorios de datos experimentales de comunicación a nanoescala.

Un modelo de datos estándar es pertinente para garantizar que los sistemas y simulaciones se ajusten al estándar IEEE 1906.1. En razón de que los sistemas de nanocomunicación interactúan directamente con la física detrás de elementos en una escala de  $1nm$  a  $100nm$ , se demanda un modelo de datos que represente la física fundamental para tales escenarios. Adicionalmente, un modelo de datos común es oportuno para realizar comparaciones de manera precisa y justa en los sistemas IEEE 1906.1. Los repositorios de datos experimentales de sistemas de comunicación a nivel nano requieren una documentación clara y concreta para que los datos resulten significativos. Consiguientemente, este modelo de datos común proporciona un modelo de información auto descriptiva que aborda este propósito [4].

## 2.4

### **CARACTERÍSTICAS DE NANOCOMUNICACIONES ESTABLECIDAS EN LOS ESTÁNDARES IEEE 1906.1 Y 1906.1.1**

En la documentación proporcionada por los estándares de nanocomunicaciones de IEEE se determina, apropiadamente, el contexto de la transferencia de información a escala molecular, de manera que se produce un posicionamiento conveniente, en relación a sus características comunicacionales únicas (aunque similares a los sistemas de comunicación tradicionales, pero específicas de los sistemas de comunicación a nivel nano) en la tecnología misma. Un aspecto fundamental en la documentación de los estándares IEEE 1906.1 y 1906.1.1 radica en la diferencia explícita entre las propiedades físicas a nanoescala y las propiedades a macro escala. Además, otro aspecto clave en los requerimientos establecidos en las definiciones de las nanocomunicaciones de los estándares de la familia protocolaria IEEE 1906 consiste en el mapeo de los elementos básicos de un sistema de nanocomunicación a un sistema de comunicación convencional, lo cual incluye los elementos [1-4]:

- Transmisor.
- Receptor.
- Medio de transmisión.
- Portadora de mensajes.
- Mensajes.

La mayoría de los elementos citados son intuitivamente obvios; sin embargo, los dos últimos se deben especificar en los sistemas nano. Los “mensajes” esencialmente se refieren a la información a ser transmitida, aunque su significado puntual podría ser definido de manera diferente en diferentes campos. Las portadoras de mensajes describen la instanciación física utilizada para transportar el mensaje [1-4].

El requerimiento final en la documentación de los estándares mencionados señala que al menos uno de los componentes de las redes de comunicación a nanoescala tendría que ser sintético. Esto se incluye para facilitar el desarrollo comercial y no simplemente describir un fenómeno natural [1-4].

Enseguida se analiza el marco de referencia (*framework*) que se detalla en los estándares de la familia protocolaria IEEE 1906.

#### **2.4.1 Marco de referencia: Descomposición de tareas**

Los estándares IEEE de nanocomunicaciones describen un marco referencial en lugar de un protocolo en particular, este hecho ocurre de esa forma pues se prevé que los protocolos se pueden definir en el futuro. En consecuencia, el marco de referencia debe ser lo suficientemente amplio para abarcar los posibles casos generales de los diversos tipos de transporte de mensajes moleculares, cuyas propiedades, lógicamente, se exhiben al nivel nano. Este sentido de amplitud es necesario para permitir que la academia y la industria desarrollen componentes individuales a nanoescala que logren la interoperación entre sí. Los módulos de simulación del tipo nano también deben ser formalizados en esa misma línea, posibilitando que el código sea reutilizado fácilmente [1-4].

Los componentes del marco de referencia operan e incluyen los elementos comunicacionales [1-4]:

- 1.** Componente de portadora de mensajes.
- 2.** Componente de movimiento.
- 3.** Componente de campo.
- 4.** Componente de especificidad.
- 5.** Componente de perturbación.

La portadora de mensajes (que se menciona en el acápite de definiciones de los estándares) representa la entidad física que “porta”

o transporta el mensaje informativo, de manera similar a cómo en la mecánica cuántica se realiza por parte de una partícula o forma de onda (es decir una señal) [1-4].

El componente de movimiento se instaura mediante el servicio que proporciona la fuerza para que la portadora de mensajes cuente con movimiento para el transporte de la información. El componente de movimiento suministra el potencial necesario para el transporte de la información a través del canal de comunicaciones [2-5,32].

El componente de campo provee el servicio pertinente para “guiar” a la portadora de mensajes; por ejemplo, el movimiento puede ser aleatorio mientras el componente de campo organiza la direccionalidad; adicionalmente, el componente de campo se puede aplicar interna o externamente. Por ejemplo, una implementación interna incluye comportamiento grupal de movimiento, mientras implementaciones externas pueden incluir flujo de fluido no turbulento, campo EM, un gradiente químico liberado para guiar el movimiento de bacterias o motores moleculares guiados por microtúbulos [5,32].

El componente de perturbación facilita el control en los cambios que se realizan para la creación de una señal, lo cual es análogo a los procesos de modulación en las señales tradicionales de telecomunicaciones, de modo que este último componente puede tomar muchas formas incluyendo cambios en la estructura molecular o variaciones en la concentración de las portadoras moleculares, tipos de moléculas a transmitirse, o la frecuencia de transferencia de moléculas [2-5,32].

Finalmente, el componente de especificidad controla la afinidad de los receptores de las portadoras de mensajes en el extremo destino de la nanocomunicación. Es equivalente al direccionamiento en los sistemas de comunicación clásicos. La especificidad se puede ver en la forma de una molécula o su afinidad por una diana, como el ADN complementario para la hibridación [2-5,32].

La Tabla 2.2. muestra un ejemplo de los cinco componentes definidos en los estándares de tipo nano de IEEE [32].

**Tabla 2.2.** Ejemplo de los cinco componentes de los estándares IEEE 1906.1 y 1906.1.1 [32]

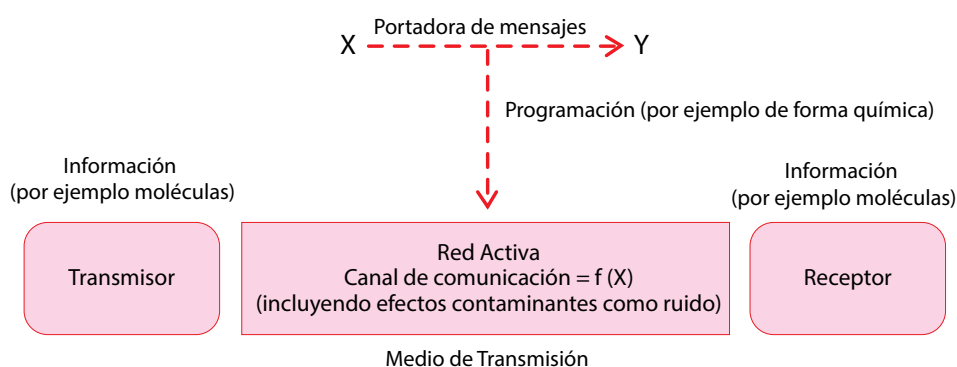
Nombre del Componente	Explicación	Ejemplo
<b>Especificidad</b>	Detectar correctamente mensajes verdaderos versus falsos	Forma o afinidad de la molécula con su ADN complementario, objetivo particular para la hibridación, etcétera.
<b>Perturbación</b>	Variación de la concentración o el movimiento según sea necesario para la señal	Concentraciones de moléculas densas versus escasas, motores moleculares, cambios conformacionales en moléculas, etcétera.
<b>Campo</b>	Dirección de flujo organizada	Campo EM aplicado mediante líquidos (fluidos), motores moleculares unidos a microtúbulos, gradiente de concentración de moléculas químicas, movimiento de enjambre, etcétera.
<b>Movimiento</b>	Canal de comunicación potencial en la naturaleza	Campo EM aplicado mediante líquidos (fluidos), motores moleculares unidos a microtúbulos, gradiente de concentración de moléculas químicas, movimiento de enjambre, etcétera.
Portadora de Mensajes	Masa y energía	Cadena de moléculas, etcétera.

Los cinco componentes precedentes y su interrelación se conocen como “Modelo estándar”, y operan a través de interfaces explícitamente definidas (Sección 2.2.4.4 de este capítulo), situación que permite una división del trabajo (o descomposición de tareas) de cada uno

de tales componentes; de manera que, por ejemplo, una organización puede desarrollar portadoras de mensajes mientras que otra puede desarrollar componentes de campo, y todos estos componentes pueden cooperar exitosamente [2-5].

El componente pertinente a la portadora de mensajes transfiere (transporta) la información (mensaje), el componente de especificidad produce el direccionamiento (a destinos adyacentes) y, por tanto, esta tarea se puede asociar con las tareas de capa 2, en razón de que se debe asegurar que la portadora de mensajes establezca un “enlace” específicamente solo a un cierto destino. El componente de movimiento representa la operación física de la aplicación de una fuerza sobre el componente de portadora de mensajes, esto asegura que dicha portadora se pueda desplazar de un nodo a otro a través del direccionamiento adyacente o propio de capa 2. El componente de campo proporciona el nivel de direccionalidad al movimiento de la portadora de mensajes y, así posibilita que se lleve a cabo el direccionamiento de capa 2 y, además, que se complete una ruta en una nanored no solo a distancias adyacentes; es decir, también existe otro tipo de direccionamiento, aquel que permite arribar a destinos no cercanos y que corresponde consecuentemente a un direccionamiento de capa 3. Por último, el componente de perturbación produce variaciones de un subconjunto de componentes con el objetivo de generar una señal que sea comprendida por el receptor [2-5].

Los componentes de los estándares de tipo nano de IEEE se consideran más generales que los del modelo ISO/OSI, y se aplican, igualmente, a redes activas (Sección 2.2.4.2 del presente capítulo) como se indica en la Figura 2.3 [1-4].



**Figura 2.3.** Relación de los componentes de los estándares de la familia protocolaria IEEE 1906 en una red activa, si se considera que se realizan cambios programados en la red. Esta optimización cambia la probabilidad de Y; es decir, la salida del canal de transmisión para que se reciba correctamente cuando se transmite X.

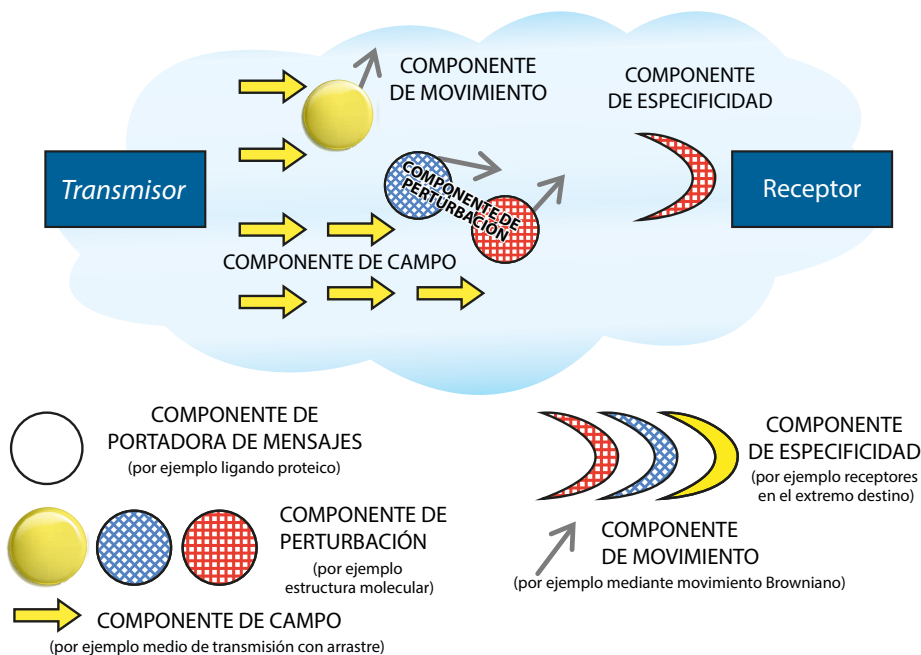
La portadora de mensajes puede ser “activa” en el sentido que se generan cambios programados en la red subyacente conforme la información viaja por dicha red. En ese caso, la portadora de mensajes se “programa” para realizar cambios permanentes en el canal de la red subyacente, de modo que ejerza una influencia que afecte a futuras portadoras de mensajes que viajen por el canal. Por lo que, si  $X$  y  $Y$  son variables aleatorias que representan las señales entrantes y salientes del canal de comunicaciones, respectivamente, entonces el funcionamiento del canal se modifica de modo que cualquier función  $f(X)$  que impacta la probabilidad condicional de  $Y$ , siga siendo reconocida correctamente cuando  $X$  es transmitida. Aunque una red activa es un concepto poderoso también produce una clara violación a la estricta separación de las capas que el modelo ISO/OSI establece [4–5].

#### **2.4.2 Mapeo del marco referencial y definiciones: Aplicaciones**

Como ya se mencionó, los estándares de la familia protocolaria IEEE 1906 no especifican un protocolo o aplicación en particular. En su lugar se emplean mapeos del marco referencial y las definiciones pertinentes para ilustrar cómo se pueden utilizar los estándares para varios protocolos, así como proveer lineamientos para el desarrollo de futuros protocolos y aplicaciones [3,4].

Los ejemplos de tecnologías incluyen, por supuesto, CM que comprenden casos de transporte activo y pasivo, por lo que en la Figura 2.4 [1–4] se puede observar un ejemplo de nanocomunicación en la que se tiene un sistema de ligandos-receptores. Este sistema cumple con la definición de comunicación a nanoescala porque el ligando es un elemento esencial del sistema y sus dimensiones se encuentran en el orden de decenas de *nanómetros*. El pequeño tamaño de los ligandos causa que sobre ellos se ejerzan fuerzas (incluyendo las del movimiento Browniano) que difieren de aquellas a una escala macro. Adicionalmente, el mapeo se proyecta a elementos fundamentales de una comunicación como son transmisor, receptor, medio de comunicación, mensaje, y portadora de mensajes al sistema de comunicación de ligandos-receptores que se encuentran consecuentemente, incorporados en un enlace al nivel nano [1–4].





**Figura 2.4.** Ejemplo de una comunicación molecular en la que la portadora de mensajes es un ligando de proteína, que en este diagrama siempre se encuentra bajo la influencia de los diferentes componentes de los estándares IEEE 1906.1 y 1906.1.1.

Otras aplicaciones en las que se pueden usar las características de los sistemas nano de los estándares IEEE se encuentra en la práctica de las nanoterapias. El objetivo es administrar medicamentos directamente al tejido maligno mientras se minimiza la toxicidad en todo el cuerpo. Otra aplicación biomédica de las comunicaciones a nanoescala se implementa en lo que se denomina “*lab-on-chip*”. Para estudiar el microambiente del tumor y los efectos de gradientes químicos particulares en diferentes tipos de células, los ensayos se realizan típicamente con un quimioatrayente para crear un gradiente [1–4].

### 2.4.3 Código de referencia: Modelo de funcionamiento

Una plataforma modular de simulación es proporcionada por los estándares IEEE 1906.1 y 1906.1.1 con el objetivo de posibilitar la investigación. Aunque están disponibles algunas plataformas preliminares (e incluso posteriores), estas generan una brecha (a tal punto que la gran mayoría de herramientas de simulación no son compatibles entre sí), y realmente ninguna de ellas cuenta con todas las características de comunicación que las que establece el marco de referencia de IEEE. Para cerrar esta brecha IEEE emplea la potencialidad y disponibilidad en línea

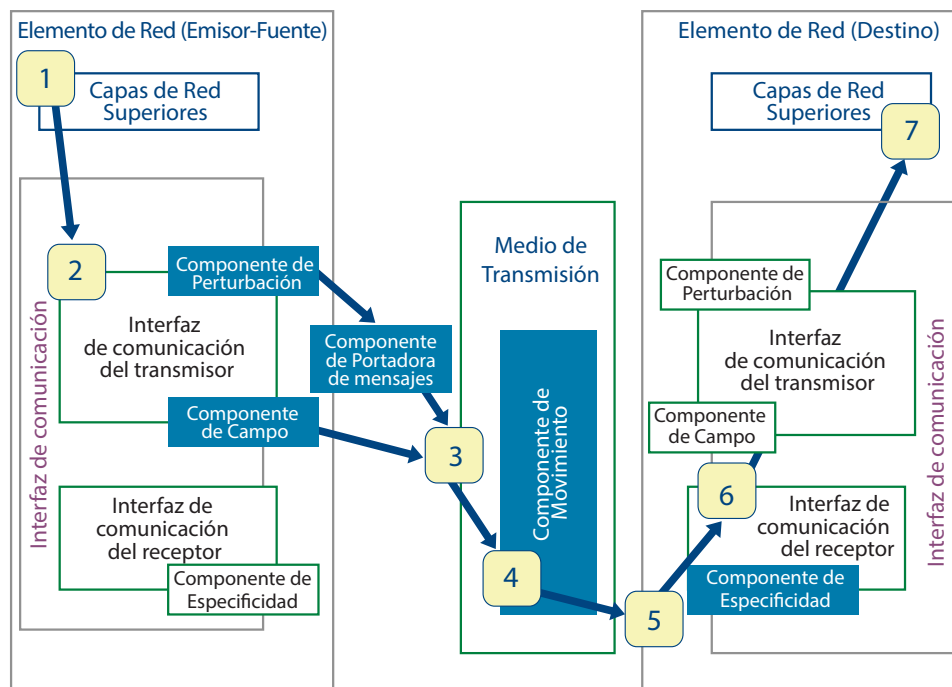
de la plataforma de simulación en código abierto NS-3, el núcleo (*core*) del simulador modela los componentes descritos en el marco de referencia de los estándares de la familia protocolaria IEEE 1906, y provee parámetros básicos y funcionalidad común para todos los esquemas de comunicación al nivel nano, y así ofrece soporte a la interacción de tales componentes durante el intercambio de mensajes [1-4].

Un mensaje que puede ser generado e intercambiado entre dispositivos (nodos) se implementa en los elementos de carga en la simulación mediante la clase *P1906MessageCarrier*. Por defecto este componente solo posee un puntero (dato miembro) al objeto *ns3:Packet* y representa una cadena de bits (es decir el tipo de PDU son paquetes) que se almacena en el mensaje. Parámetros adicionales se deben añadir para especificar la definición de la portadora de mensajes para el caso de estudio en particular que se emplee [1-4].

La clase *P1906NetDevice* modela los recursos de red que participan en el proceso de comunicación, y almacena la interfaz (que se modela por la clase *P1906CommunicationInterface*) de comunicación en el dato miembro *m\_interface*, la cual se compone de las clases *P1906TransmitterCommunicationInterface* y *P1906ReceiverCommunicationInterface* que gestionan la transmisión y recepción de procedimientos, respectivamente. El elemento clave de los procesos de comunicación en el medio de transmisión se modela a través de la clase *P1906Medium*, la cual administra la transferencia de los mensajes por medio de los mensajes adjuntos a la misma, además adopta la clase *P1906Motion* para la implementación de los modelos de propagación y retardo. Los componentes perturbación, especificidad y campo se modelan a través de las clases *P1906Motion*, *P1906Perturbation*, *P1906Specificity*, y *P1906Field* [1-4].

La operación de una comunicación al nivel nano se ilustra en la Figura 2.5 [1-4], en la cual, un elemento de red emisor-fuente (con numeración de 1 en la Figura 2.5 [1-4]) recibe un mensaje desde las capas superiores. El mensaje se transfiere a la interfaz de comunicación (con numeración de 2 en la Figura 2.5 [1-4]), el componente de perturbación se usa para crear la portadora de mensajes (con numeración de 3 en la Figura 2.5 [1-4]).

La interfaz de comunicación del transmisor genera la propagación en el medio al accionar los componentes pertinentes a portadora de mensajes, perturbación y campo (con numeración de 4 en la Figura 2.5 [1-4]); se debe tener en cuenta que el componente de movimiento modifica las propiedades de la portadora de mensajes. En el sistema también existen elementos de pérdidas de propagación y retardo (con numeración de 5 en la Figura 2.5 [1-4]). Posteriormente, la portadora de mensajes se entrega al receptor y el componente de especificidad verifica la compatibilidad (con numeración de 6 en la Figura 2.5 [1-4]) y cuando la mencionada compatibilidad ocurre, el mensaje se entrega a las capas superiores (con numeración de 7 en la Figura 2.5) y el mensaje es recibido por las capas superiores [1-4].



**Figura 2.5.** Pasos en la transmisión de información en un sistema de comunicación nano que se organiza de acuerdo al modelo de simulación establecido en NS-3, en los estándares de la familia protocolaria IEEE 1906.

## 2.5

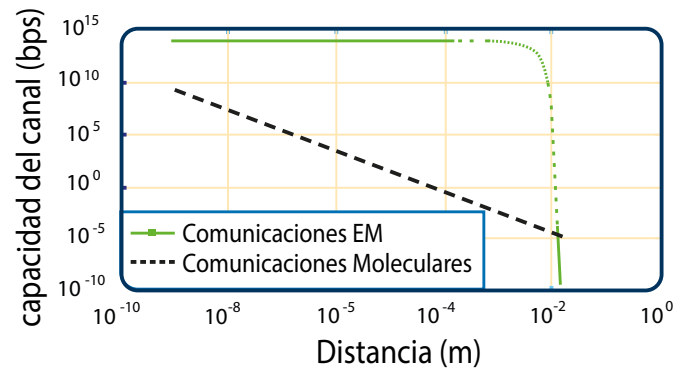
### EJEMPLO DE SIMULACIÓN GENÉRICA PROPORCIONADO POR LOS ESTÁNDARES IEEE 1906.1 Y 1906.1.1

Los ejemplos que provee el marco de referencia de los estándares protocolarios IEEE 1906.1 y 1906.1.1, son genéricos en el sentido de que no se particularizan valores para los elementos que constituyen el sistema de comunicación a nanoescala, que ejecutan los cinco componentes que el *framework* proporciona. La documentación de los estándares IEEE de nanocomunicaciones considera ejemplos de simulación en escenarios que se componen de pares transmisor-receptor que mantienen un enlace de comunicación empleando modulación de tipo OOK (On-Off Keying), se asume un modelo en el que gobierna el movimiento Browniano en un entorno de difusión caracterizado por las leyes de Fick y se define una concentración de moléculas como una función de:

- La distancia del enlace (transmisor-receptor).
- El intervalo de tiempo desde el instante en el cual las moléculas se han transmitido.
- El número de moléculas ( $Q$ ) que han sido enviadas.
- El valor del coeficiente de difusión  $D$ .

La ley de Fick se puede utilizar para evaluar el retardo de propagación y la distancia mínima entre dos pulsos consecutivos. Los modelos matemáticos que se desprenden del fenómeno físico de difusión, así como los datos miembro que almacenan el valor del coeficiente de difusión, se han implementado en los componentes de movimiento y especificidad. En el primer caso se puede evaluar el retardo de propagación mediante la ley de Fick, y en el segundo caso se usa para verificar que la tasa de transmisión no exceda el valor permitido. La información pertinente al número de moléculas que se han transmitido en cada pulso y el intervalo de tiempo entre dos pulsos consecutivos se almacenan en el componente de perturbación y en el de la portadora de mensajes [1–4].

Para demostrar la efectividad de la herramienta de simulación (es decir NS-3) y el diseño del marco de referencia se realiza un análisis de esquemas de comunicación representado en términos de máxima capacidad del canal, por lo que para este efecto el ejemplo de CM que proporcionan los estándares de tipo nano de IEEE establecen el número de moléculas que se liberan en cada pulso y el coeficiente de difusión, correspondiendo estos valores a 50.000 y  $1,0 \text{ nm}^2/\text{s}$ , respectivamente. En la Figura 2.6 [1-4] se observa la capacidad del canal como una función de la distancia entre los puntos de transmisión y recepción, la cual ha sido calculada con base en los modelos de comunicación de los estándares de la familia protocolaria IEEE 1906 [1-4].



**Figura 2.6.** Capacidad del canal versus la distancia para comunicaciones EM y CM implementadas en NS-3 de acuerdo a los estándares de la familia protocolaria IEEE 1906.

## Referencias bibliográficas

- [1] CEVALLOS, Yesenia, et al. Comunicaciones Moleculares Un análisis desde el paradigma protocolario de IEEE. 2023.
- [2] S. F. Bush, J. L. Paluh, G. Piro, V. Rao, R. V. Prasad, and A. Eckford, "Defining communication at the bottom," *IEEE Trans. Mol. Biol. Multi-Scale Commun.*, vol. 1, no. 1, pp. 90–96, 2015.
- [3] S. F. Bush, "Interoperable nanoscale communication [future directions]," *IEEE Consum. Electron. Mag.*, vol. 6, no. 2, pp. 39–47, 2017.
- [4] "IEEE Recommended Practice for Nanoscale and Molecular Communication Framework," *IEEE Std 1906.1-2015*, pp. 1–64, 2016.
- [5] "IEEE Standard Data Model for Nanoscale Communication Systems," *IEEE Std 1906.1.1-2020*, pp. 1–142, 2020.
- [6] K. R. Pilkiewicz, P. Rana, M. L. Mayo, and P. Ghosh, "Molecular Communication and Cellular Signaling from an Information-Theory Perspective," *Nanoscale Networking and Communications Handbook*, p. 235, 2019.
- [7] D. B. Menendez, V. R. Senthivel, and M. Isalan, "Sender-receiver systems and applying information theory for quantitative synthetic biology," *Current opinion in biotechnology*, vol. 31, pp. 101–107, 2015.
- [8] A. Gohari, M. Mirmohseni, and M. Nasiri-Kenari, "Information theory of molecular communication: Directions and challenges," *IEEE Transactions on Molecular, Biological and Multi-Scale Communications*, vol. 2, no. 2, pp. 120–142, 2016.
- [9] Y. Cevallos et al., "Theoretical Basis for Gene Expression Modeling Based on the IEEE 1906.1 Standard," in *International Conference on Bio-inspired Information and Communication Technologies*, pp. 145–162, 2021.

- [10] Y. Cevallos, L. Tello-Oquendo, D. Inca, D. Ghose, A. Z. Shirazi, and G. A. Gomez, "Health Applications Based on Molecular Communications: A Brief Review," in *2019 IEEE International Conference on E-health Networking, Application & Services (HealthCom)*, pp. 1–6, 2019.
- [11] C. Koca, M. Civas, S. M. Sahin, O. Ergonul, and O. B. Akan, "Molecular Communication Theoretical Modeling and Analysis of SARS-CoV2 Transmission in Human Respiratory System," *IEEE Transactions on Molecular, Biological and Multi-Scale Communications*, pp. 1–6, 2020.
- [12] M. T. Barros *et al.*, "Molecular Communications in Viral Infections Research: Modelling, Experimental Data and Future Directions," *arXiv Prepr. arXiv2011.00002*, 2020.
- [13] M. Schurwanz, P. A. Hoeher, S. Bhattacharjee, M. Damrath, L. Stratmann, and F. Dressler, "Infectious Disease Transmission via Aerosol Propagation from a Molecular Communication Perspective: Shannon Meets Coronavirus," *arXiv Prepr. arXiv2011.00290*, 2020.
- [14] M. Dong, W. Li, and X. Xu, "Evaluation and modeling of HIV based on communication theory in biological systems," *Infect. Genet. Evol.*, vol. 46, pp. 241–247, 2016.
- [15] N. A. Ali and M. Abu-Elkheir, "Internet of nano-things healthcare applications: Requirements, opportunities, and challenges," in *2015 IEEE 11th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob)*, pp. 9–14, 2015.
- [16] T. Nakano, M. Moore, A. Enomoto, and T. Suda, "Molecular communication technology as a biological ICT," in *Biological functions for information and communication technologies*, Springer, pp. 49–86, 2011.

- [17] U. Chude-Okonkwo, R. Malekian, and B. T. Maharaj, "Internet of things for advanced targeted nanomedical applications," in *Advanced Targeted Nanomedicine*, Springer, pp. 113–124, 2019.
- [18] Y. Cevallos, L. Molina, A. Santillán, F. De Rango, A. Rushdi, and J. B. Alonso, "A digital communication analysis of gene expression of proteins in biological systems: A layered network model view," *Cognit. Comput.*, vol. 9, no. 1, pp. 43–67, 2017.
- [19] Y. Cevallos *et al.*, "Modeling Gene Expression and Protein Delivery as an End-to-End Digital Communication System," *Open Bioinforma. J.*, vol. 14, no. 1, 2021.
- [20] Y. Cevallos, L. Tello-Oquendo, D. Inca, C. Palacios, and L. Rentería, "Genetic Expression in Biological Systems: A Digital Communication Perspective," *Open Bioinforma. J.*, vol. 12, no. 1, 2019.
- [21] I. F. Akyildiz, M. Pierobon, and S. Balasubramaniam, "Molecular Communications and Networking [Scanning the Issue]," *Proc. IEEE*, vol. 107, no. 7, pp. 1227–1229, 2019.
- [22] S. Canovas-Carrasco, A.-J. Garcia-Sanchez, and J. Garcia-Haro, "The IEEE 1906.1 standard: Nanocommunications as a new source of data," *2017 ITU Kaleidosc. Challenges a Data-Driven Soc. (ITU K)*, pp. 1–7, 2017.
- [23] P. D. Grünwald, P. M. B. Vitányi, and others, "Algorithmic information theory," *Handb. Philos. Inf.*, pp. 281–320, 2008.
- [24] T. Nakano, A. W. Eckford, and T. Haraguchi, *Molecular communication*. Cambridge University Press, 2013.



- [25] Y. Liu and C.-C. L. Huang, "Introduction to Lévy Processes," *Wiley Encycl. Oper. Res. Manag. Sci.*, pp. 1–7, 2011.
- [26] I. F. Akyildiz, J. M. Jornet, and M. Pierobon, "Nanonetworks: A new frontier in communications," *Commun. ACM*, vol. 54, no. 11, pp. 84–89, 2011.
- [27] A. El-taweel, S. M. Abd El-atty, and S. El-Rabaie, "Efficient Molecular Communication Protocol based on Mobile Ad-hoc Nanonetwork," *Menoufia J. Electron. Eng. Res.*, vol. 26, no. 2, pp. 427–443, 2017.
- [28] Y. Cevallos *et al.*, "A brief review on DNA storage, compression, and digitalization," *Nano Commun. Netw.*, p. 100391, 2021.
- [29] Y. Cevallos *et al.*, "On the efficient digital code representation in DNA-based data storage," in *Proceedings of the 7th ACM International Conference on Nanoscale Computing and Communication*, pp. 1–7, 2020.
- [30] A. Zadeh Shirazi *et al.*, "The Application of Deep Convolutional Neural Networks to Brain Cancer Images: A Survey," *J. Pers. Med.*, vol. 10, no. 4, p. 224, 2020.
- [31] Y. Cevallos *et al.*, "Modelamiento comunicacional de la expresión genética y el transporte de proteínas mediante un sistema de transmisión digital extremo a extremo," 2022.
- [32] K. Yang *et al.*, "A comprehensive survey on hybrid communication in context of molecular communication and terahertz communication for body-centric nanonetworks," *IEEE Trans. Mol. Biol. Multi-Scale Commun.*, vol. 6, no. 2, pp. 107–133, 2020.

**Caracterización de elementos  
de Nanocomunicaciones  
Biológicas en NS-3**

03

El marco normativo que IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) establece para los estándares de nanocomunicaciones de la familia 1906, sustenta el simulador de código abierto NS-3 (Network Simulator-3) como entorno de software para aplicaciones en investigación, academia e industria. NS-3 se ha diseñado para analizar el comportamiento de los sistemas de comunicación a nanoescala. Específicamente, permite desarrollar casos de simulación con características particulares, propias de los sistemas de Comunicaciones Moleculares (CM) o sistemas de comunicación biológicos. Así, se pueden representar diversos tipos de codificación/modulación para las moléculas de información (también conocidas como mensajeros moleculares o moléculas portadoras de información) en el extremo de transmisión. Adicionalmente, es posible definir condiciones físicas o formas de transporte en el canal de comunicación; y además se pueden puntualizar varias clases de receptores biológicos en el extremo destino. En este capítulo, por consiguiente, se consideran tres escenarios de simulación en NS-3 basados en los componentes fundamentales que denotan los estándares de nanocomunicaciones IEEE 1906.1 y 1906.1.1 [1-3].

Los estándares de la familia protocolaria IEEE 1906 establecen los lineamientos generales para las simulaciones en NS-3. Para particularizar escenarios de simulaciones en esta sección se tomarán en cuenta varias condiciones de transmisión/recepción y propagación de señales de información propias de los sistemas de CM que se fundamentan en [1-3]. Se asume que en los extremos comunicacionales las nanomáquinas transmisora y receptora se encuentran en posiciones fijas [1] de acuerdo con los requerimientos pertinentes de la Tabla 3.1.

**Tabla 3.1.** Parámetros de comunicación para los escenarios simulados [1].

Esce- nario	Condiciones de modulación en el extremo origen	Condiciones en el canal de comunicación	Condiciones para la captación de información en el extremo destino
1	OOK (On-Off Keying) [4-5]	Movimiento aleatorio libre [12-14]	Detección de concentración molecular [1]
2	BCSK (Binary Concentration Keying) [6-8]	Movimiento aleatorio libre [12-14]	Detección por receptor absorbente [18-20]
3	BMoSK (Binary Molecular Shift Keying) [9-11]	Movimiento aleatorio con arrastre [15-17]	Detección por complejo ligando-receptor[21-25]

## 3.1

### MODELO DE FUNCIONAMIENTO PARA LAS SIMULACIONES

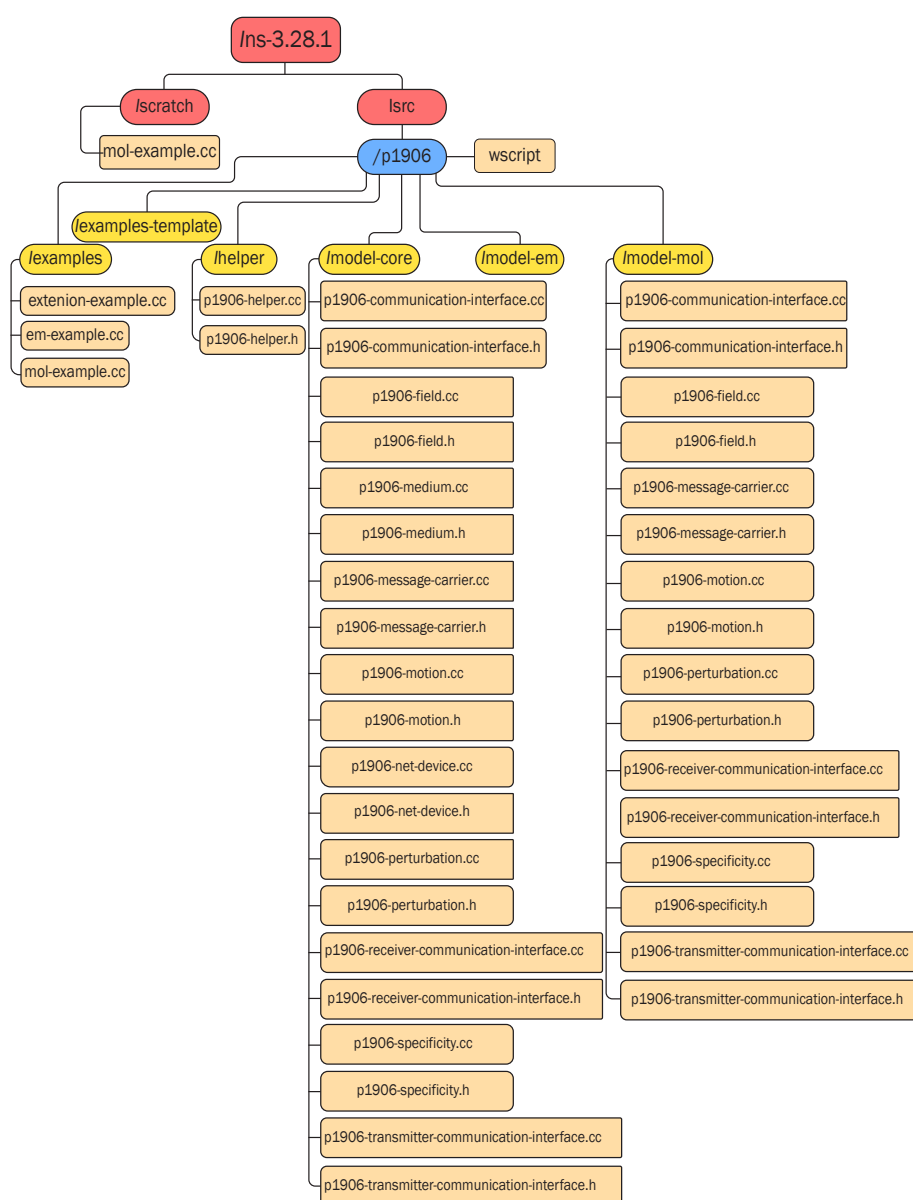
Los archivos principales que constituyen la base del módulo IEEE P1906 se centran en los *archivos.cc* y *archivos.h*. Los *archivos.cc* contienen una implementación detallada del código, definiendo las funciones y métodos de cada componente, mientras que los *archivos.h* contienen declaraciones de clases, estructuras, variables y funciones que son comunes en el código fuente para garantizar la comunicación entre los componentes. Ambos archivos están escritos en C++ [1-3].

Este módulo está organizado en una estructura de directorios, como se muestra en la Figura 3.1 [1], y se construyen como una biblioteca. Esta biblioteca se emplea dinámicamente en el archivo principal, *mol-example.cc*, que se encarga de ejecutar la simulación en NS-3 y define la topología y la configuración de diversos escenarios. Además, en *mol-example.cc* se realizan ajustes en función de parámetros esenciales como la distancia entre nodos de comunicación, el número de moléculas y el intervalo de pulsos, entre otros. También se incluyen las funciones comunes que se requieren en todos los esquemas de comunicación, como la creación de ayudantes, nodos, componentes de movimiento, conexión de componentes, paquetes, etcétera [1-3].

El proceso de comunicación UML (Unified Modeling Language) se observa en la Figura 3.2 [1], y se precisa por los pasos principales que se indican a continuación y que se ampliarán a partir de la Sección 3.1.1 de acuerdo con los requisitos del modelo funcional [1-3]:

1. El elemento de red (*NetDevice*) recibe un mensaje de las capas superiores, el cual luego se envía a la interfaz de comunicación.
2. La portadora de mensajes (*Message Carrier*) se crea utilizando el componente de perturbación (*Perturbation*).
3. La interfaz de comunicación del dispositivo transmisor activa la propagación en el medio de transmisión, a través de los componentes relevantes relacionados con la portadora de mensajes, la perturbación y el campo (*Field*).
4. El componente de movimiento (*Motion*) modifica las características de la portadora de mensajes, como la pérdida de propagación y el retardo.

5. La portadora de mensajes, se envía al receptor, y el componente de especificidad (*Specificity*) verifica su compatibilidad.
6. Cuando existe compatibilidad, el mensaje se entrega a las capas superiores.
7. El mensaje es recibido por las capas superiores.



**Figura 3.1.** Esquema de los archivos principales necesarios para la configuración de los estándares protocolarios IEEE 1906 destinados a la implementación de una comunicación molecular [1].

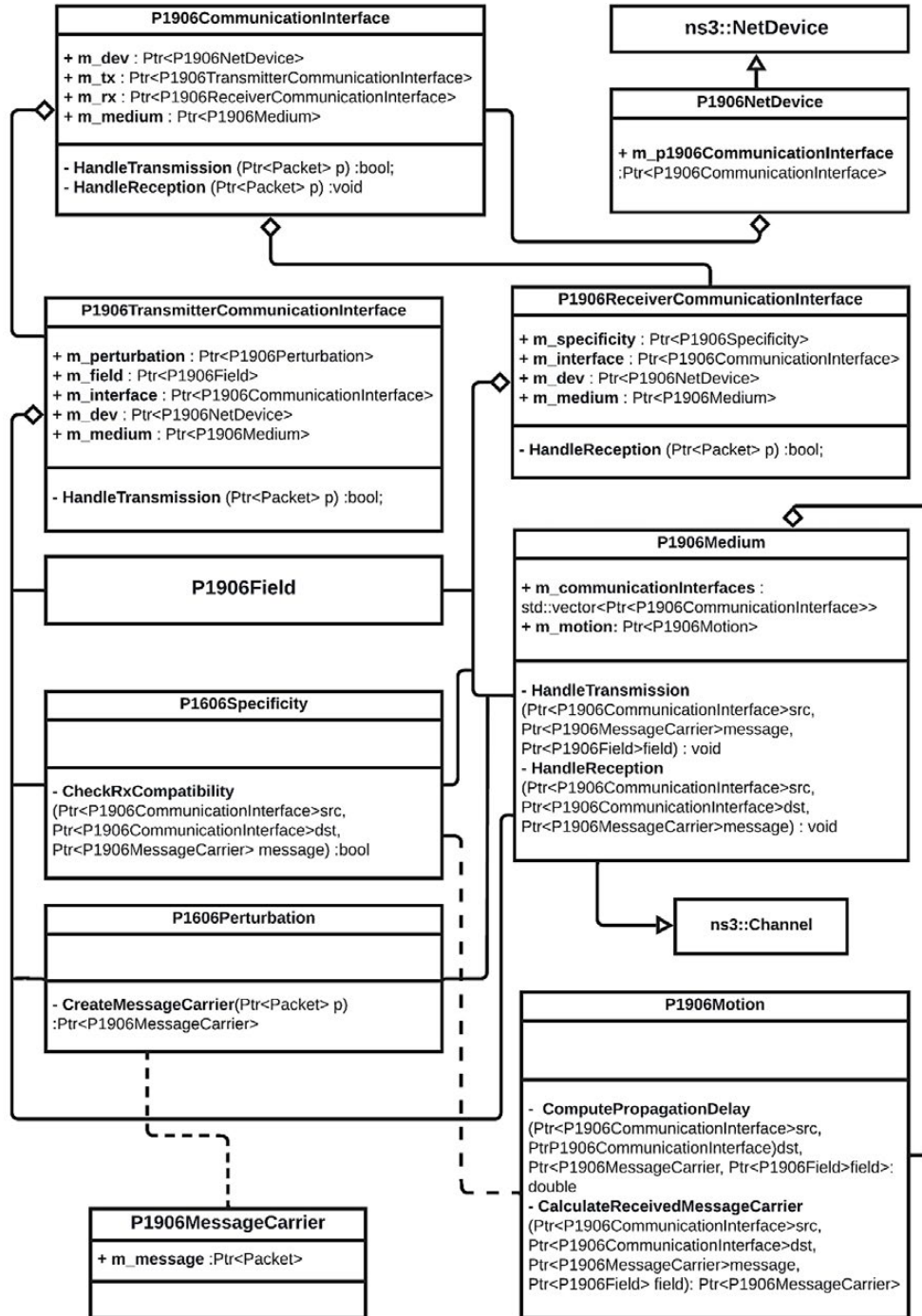


Figura 3.2. Diagrama UML del marco de comunicación de la familia protocolaria IEEE 1906 [1].

### 3.1.1 Implementación de Comunicaciones Moleculares propiamente

#### 3.1.1.1 Conexión de nodos y dispositivos

La clase *helper* proporciona los métodos pertinentes para establecer los parámetros específicos del módulo que implementa, así como funciones para crear instancias, habilitar registros para componentes del módulo P1906 y conectar todo el sistema. Esta clase incluye el macro *NS\_LOG\_COMPONENT\_DEFINE*, esto permite habilitar o deshabilitar el registro (*logging*) para este componente en tiempo de ejecución. Se define un método llamado *Connect* que se utiliza para conectar varios componentes relacionados con la simulación del escenario. Este método toma varios punteros *Ptr* como argumentos, que representan dispositivos, medio de transmisión, interfaces de comunicación, etcétera [1-3].

En lo que respecta a la creación de nodos en NS-3, se emplea la clase *nodeContainer*, que proporciona una herramienta fundamental para gestionar conjuntos de nodos. A través del uso de *Ptr<Node>*, se habilita el acceso a los métodos y atributos de cada objeto *Node* individual. El puntero *Ptr<Node>* proporciona un método práctico para controlar nodos individuales dentro de la simulación, facilitando la particularización y configuración de cada nodo para satisfacer las necesidades únicas del entorno de simulación [1-3].

La clase *P1906NetDevice* se conoce como “contenedor” y simula un dispositivo de red que participa en el proceso de comunicación. El objetivo principal para el diseño del contenedor es desactivar la interfaz física y los protocolos asociados. Uno de los componentes clave de esta clase es *m\_interface*, que modela la interfaz física del dispositivo y controla tanto la transmisión como la recepción, y está modelada por la clase *P1906CommunicationInterface*. Ésta contiene un puntero a las clases *P1906TransmitterCommunicationInterface*, que administra los procedimientos de transmisión, y *P1906ReceiverCommunicationInterface*, que maneja los procedimientos de recepción. A través de métodos como *SetNode* y *GetChannel*, la clase *P1906NetDevice* permite enlazar los dispositivos de red con nodos y canales de transmisión específicos en el escenario de simulación, lo que amplía la capacidad de NS-3 para modelar el marco de CM con la recomendación de los estándares IEEE 1906.1 y 1906.1.1 [1-3].

#### 3.1.1.2 Clase portadora de mensaje (*Message Carrier*)

La clase *P1906MessageCarrier* se encarga de la implementación de la portadora de mensajes, que es la responsable de la generación y el intercambio de información entre dispositivos en el enlace de comuni-



cación molecular. De forma predefinida, esta clase incorpora un puntero hacia el objeto *ns3::Packet*, y precisa la secuencia de bits que constituye el mensaje, lo cual se consigue con esta clase [1-3].

La clase *P1906MOLMessageCarrier*, es una extensión de la clase *P1906MessageCarrier*. Esta clase ampliada proporciona funciones que facilitan la obtención del identificador de tipo (*TypeID*) específico para esta clase. Además, puntualiza funciones adicionales que permiten acceder a las variables asociadas al mensaje, en esta clase se ejecuta la inicialización y eliminación pertinente de sus objetos, asegurando que el mensaje se configure correctamente en ambos casos, es decir, en el momento de la creación o de la eliminación del objeto [1].

La clase *P1906MessageCarrier* proporciona los siguientes métodos para la configuración de propiedades de la portadora de mensajes [1-3]:

- Duración del mensaje. Se configuran los métodos *SetDuration* y *GetDuration*, para especificar y obtener el tiempo de duración del mensaje.
- Intervalo de pulso. Los métodos *SetPulseInterval* y *GetPulseInterval* marcan el intervalo entre pulsos del mensaje.
- Tiempo de inicio. A través de *SetStartTime* y *GetStartTime*, se obtiene el tiempo de inicio del mensaje, determinando cuándo comienza la transmisión.
- Cantidad de moléculas. *SetMolecules* y *GetMolecules* delimitan y obtienen la cantidad de moléculas asociadas al mensaje.
- Configuración de la modulación. La información de modulación se gestiona mediante los métodos *SetModulation* y *GetModulation*.

### 3.1.1.3 Clase perturbación (*Perturbation*)

La clase *ns3::P1906MOLPerturbation* es la responsable de la modulación de paquetes (*Ptr<Packet> p*). Su función es similar a la modulación convencional, produciendo una variación en la concentración o emisión de la señal de información. A través de este componente, se puede almacenar la información, como la cantidad de moléculas transmitidas en cada pulso y el lapso entre pulsos consecutivos [1-3].

El método principal es *CreateMessageCarrier*, se emplea para codificar la información que se va a transmitir y asociarla con la portadora correspondiente. Este proceso inicia con la creación de un objeto de porta-

dora de mensajes, *P1906MOLMessageCarrier*, a partir del objeto *Packet*. La función crea una variable llamada “carrier” de tipo *Ptr<P1906MOLMessageCarrier>*, que actúa como un contenedor para almacenar y transportar información relacionada con la modulación. Durante este proceso, se realiza iteraciones sobre el tamaño del paquete, se verifica cada bit y se agrega la cadena correspondiente según la modulación requerida. Una vez calculados y configurados los valores pertinentes, se ajustan las propiedades del objeto de la portadora de mensajes y se devuelve para su posterior uso en la simulación [1-3].

Antes de realizar el proceso de modulación se determina el tamaño del paquete *p->GetSize()*, además, de la definición de la duración de la señal en base al intervalo de pulso *m\_pulseInterval*. A partir de esta información se crea un vector bidimensional para la modulación de bits donde el tamaño está dado por paquetes de extensión de un byte, efectuando iteraciones en cada bit para examinar cada escenario y realizar la modulación pertinente. Para verificar si cada bit es 1 o 0 se usa una operación de máscara de bits, si el bit es 1, se establece una concentración de moléculas asociada a ese bit, de lo contrario se dispone una concentración de moléculas nula. Finalmente, se registran los datos sobre la transmisión, incluyendo el valor de cada bit y la concentración de moléculas correspondiente [1-3].

En el primer caso de la simulación en este capítulo, se configura la técnica de modulación OOK. Aquí, se envía un número específico de moléculas para representar el *bit-1*, mientras que no se envía ninguna para el *bit-0*. En el segundo caso de simulación, se implementa la técnica de modulación BSCK, y se transmite un número total de moléculas para definir el *bit-1* y la mitad para puntualizar el *bit-0*. En el tercer caso de simulación, se utiliza la técnica de modulación BMoSK, que implica la activación de un tipo específico de molécula durante un período de símbolo para transmitir múltiples bits [1].

#### 3.1.1.4 Clase movimiento (*Motion*)

El componente de movimiento dentro del módulo P1906, particularmente denominado *ns3::P1906MOLMotion*, es responsable de administrar el movimiento de las moléculas, lo que constituye un factor clave para generar el potencial necesario que permitirá la propagación eficaz de información a través del canal de comunicación [1-3].

El proceso de comunicación se inicia cuando el transmisor debe enviar información. En este punto, se emite un pulso de moléculas definido por el modelo de movimiento Browniano libre o el movimiento Browniano con arrastre (Sección 1.4.1 del Capítulo 1), según se haya establecido de

forma independiente en los casos requeridos. Esta emisión de moléculas produce un aumento en la concentración molecular en la posición longitudinal del transmisor, lo que, a su vez, permite la transmisión efectiva de información a través del espacio [1].

Dentro de esta clase, se implementa la función *ComputePropagationDelay()*, cuyo propósito es calcular el retardo de propagación molecular. Este cálculo se basa en la distancia entre las dos interfaces de comunicación, tomando en cuenta los argumentos del transmisor y el receptor, así como el mensaje transportado y el componente de campo asociado. Además, la clase incluye la declaración de la función *CalculateReceivedMessageCarrier()*, que se emplea para detectar la portadora de mensajes recibida en base a la posición vinculada a la movilidad en el origen (*src*) y destino (*dst*), lo que implica el cálculo del tiempo total de simulación, el tiempo de inicio y finalización de cada bit para obtener el promedio de la interferencia de tipo ISI (Inter Symbol Interference) a través del análisis del tamaño del vector de tiempo en el sistema de registro [1-3].

#### 3.1.1.5 Clase campo (*Field*)

El rol de la clase *ns3::P1906MOLField* es actuar como una guía de onda, lo que otorga la facultad de direccionar con precisión una portadora de mensajes (*message carrier*) hacia su destino [1-3]. Este componente se puede implementar de dos formas distintas: internamente o externamente, en relación con el medio de comunicación. En el contexto de esta obra académica, se ha optado por una implementación externa. Esto ocurre en razón de que tal implementación se encarga de enviar los parámetros esenciales al medio de transmisión, el cual actúa como intermediario para transportar tales parámetros al componente de movimiento. Una vez que los parámetros son remitidos al componente de movimiento, son utilizados en la función *BM Deriva* [1-3].

#### 3.1.1.6 Especificidad (*Specificity*)

La clase *ns3::MOLReceiverCommunicationInterface* en el extremo destino, activa el procedimiento de recepción de la información a través de la función *HandleReception*. Este proceso inicia revisando si la interfaz está en condiciones de recibir e interpretar adecuadamente el mensaje transmitido [1]. Para llevar a cabo esta verificación, se invoca el método *CheckRxCompatibility* de la función *P1906Specificity*. Puntualmente, la finalidad de este proceso es determinar si la interfaz está en condiciones de recibir el mensaje o no [1-3].

El componente *ns3::MOLSpecificity* se implementa con el propósito concreto de permitir la detección o recepción de una portadora de mensajes. Este componente evalúa si la capacidad del canal de comunicación supera la tasa de transmisión. Si la capacidad del canal de transmisión es mayor que la tasa de transmisión se procede con la recepción y, posteriormente, con la demodulación del mensaje. En el contexto de los estándares IEEE de nanocomunicaciones, el modelo molecular proporciona un valor booleano “verdadero” si se cumple el límite de Fick (las leyes de Fick se analizan brevemente en la Sección 1.4.1 del Capítulo I), lo que indica que la conexión puede continuar. Sin embargo, si la capacidad molecular es insuficiente y no se respeta dicho límite, se obtiene un valor booleano “falso”, lo que lleva al fallo en la conexión [1-3].

### **3.1.2 Implementación de los estándares protocolarios IEEE 1906 en NS-3**

El entorno NS-3 se organiza en distintos módulos siguiendo una estructura de biblioteca, y estos módulos se emplean según las necesidades específicas de la simulación. Es importante mencionar que el módulo IEEE 1906 no forma parte de la versión actualizada del software NS-3 con la que se está trabajando. Como resultado, se tendrá que incorporar este módulo adicional mediante la modificación del archivo de configuración *wscript*, el cual es leído por la herramienta *waf* (Sección 3.1.2.2) para compilar el código y ejecutar las funciones de la aplicación *mol-example.cc* [1].

#### **3.1.2.1 Archivo *mol-example.cc***

En la Figura 3.3 se establece el archivo de la aplicación *mol-example.cc*, en el que constan los componentes e interfaces de comunicación que conforman la estructura del archivo ejecutable del módulo P1906 en NS-3, así como los parámetros para la simulación [1].

- Al inicio del código del archivo se incluyen los archivos de encabezados (*headers*) de biblioteca accesibles por el usuario, que proporcionan declaraciones de las funciones y clases necesarias para el funcionamiento del módulo. Cada línea de inclusión corresponde a un archivo de encabezado específico que se requiere para el módulo p1906 en el entorno NS-3 [1].

```
#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 3.3.** Declaración de archivos de encabezados (headers) importados para NS-3 [1].

- En la Figura 3.4 se visualiza el fragmento de código donde comienza la ejecución, inicialización y declaración de variables, también se indica dónde se crea el objeto *cmd* para analizar y procesar los argumentos de la línea de comandos, la operación de ajuste del valor *diffusionCoefficient* y el establecimiento de la resolución temporal de la clase *Time* [1].

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

**Figura 3.4.** Declaración de las funciones y configuración de parámetros iniciales [1].

- En la Figura 3.5 se observa la creación y configuración de los componentes y objetos indispensables para simular el escenario de CM, como la activación de registros de componentes para el módulo *p1906*, creación de nodos, almacenamiento de dispositivos de red, creación del objeto *P1906Medium*, establecimiento del método *motion* y creación de objetos y diseños de métodos que representen las características del primer y segundo dispositivo en la comunicación [1].

```
// Crear ayudante P1906
P1906Helper helper;
helper.EnableLogComponents ();
// Crear nodos
NodeContainer n;
NetDeviceContainer d;
n.Create (2);
// Crear un soporte y el componente Movimiento
Ptr<P1906Medium> medium = CreateObject<P1906Medium> ();
Ptr<P1906MOLMotion> motion = CreateObject<P1906MOLMotion> ();
motion->SetDiffusionCoefficient (diffusionCoefficient);
medium->SetP1906Motion (motion);
// Crear Dispositivo 1 y componentes/entidades relacionados
Ptr<P1906NetDevice> dev1 = CreateObject<P1906NetDevice> ();
Ptr<P1906MOLCommunicationInterface> c1 =
CreateObject<P1906MOLCommunicationInterface> ();
Ptr<P1906MOLSpecificity> s1 =
CreateObject<P1906MOLSpecificity> ();
Ptr<P1906MOLField> fi1 = CreateObject<P1906MOLField> ();
Ptr<P1906MOLPerturbation> p1 =
CreateObject<P1906MOLPerturbation> ();
p1->SetPulseInterval (Milliseconds(pulseInterval));
p1->SetMolecules (nbOfMolecules);
s1->SetDiffusionCoefficient (diffusionCoefficient);
// Crear Dispositivo 2 y componentes/entidades relacionados
Ptr<P1906NetDevice> dev2 = CreateObject<P1906NetDevice> ();
Ptr<P1906MOLCommunicationInterface> c2 =
CreateObject<P1906MOLCommunicationInterface> ();
Ptr<P1906MOLSpecificity> s2 =
CreateObject<P1906MOLSpecificity> ();
Ptr<P1906MOLField> fi2 = CreateObject<P1906MOLField> ();
Ptr<P1906MOLPerturbation> p2 =
CreateObject<P1906MOLPerturbation> ();
p2->SetPulseInterval (Milliseconds(pulseInterval));
p2->SetMolecules (nbOfMolecules);
s2->SetDiffusionCoefficient (diffusionCoefficient);
```

**Figura 3.5.** Declaración de componentes, métodos y dispositivos [1].

- La Figura 3.6 denota la sección del código para la configuración de las posiciones de los dispositivos y establecimiento de las conexiones entre nodos, dispositivos, medio de comunicación y componentes relacionados con el módulo *p1906*, se tiene el objeto *positionAlloc* del tipo *ListPositionAllocator* para la asignación de posiciones a los nodos en la simulación, se configura los nodos con posiciones fijas, se añade los dispositivos a sus contenedores y se establece la conexión por medio del objeto *helper* para conectar el primer y segundo nodo con sus dispositivos y sus respectivos componentes relacionados [1].

```
// Fijar posiciones de los dispositivos
Ptr<ListPositionAllocator> positionAlloc =
    CreateObject<ListPositionAllocator> ();
positionAlloc->Add (Vector(0, 0, 0));
positionAlloc->Add (Vector(nodeDistance, 0, 0));
MobilityHelper mobility;
mobility.SetMobilityModel("ns3::ConstantPositionMobilityModel");
mobility.SetPositionAllocator(positionAlloc);
mobility.Install(n);
// Conectar dispositivos, nodos, medio, componentes y entidades
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);
```

**Figura 3.6. Declaración de posiciones de los dispositivos y conexiones de componentes [1].**

- La Figura 3.7 muestra la creación de mensaje para ser enviado por la red, se configura el tamaño, el arreglo de bytes llamado *buffer*. Luego, se asigna el valor a cada byte del *buffer*, en este caso el paquete es de 1 byte, se crea el objeto *message* del tipo *Packet*, se llama al método *HandleTransmission()* para manejar la transmisión del mensaje. Después, en *Simulator::Run()* se inicia la ejecución de la simulación, cuando la simulación ha concluido, en *Simulator::Destroy()* se finaliza y se limpian los recursos de simulación y, finalmente, en *return 0* se retorna el valor para indicar que el programa ha finalizado correctamente [1].

```
// Crear un mensaje para enviar a través de la red
size_t pktSize = 1; //bytes
uint8_t *buffer = new uint8_t[pktSize];
for (size_t i = 0; i < pktSize; i++)
{
    buffer[i] = 0b00000001;
}
Ptr<Packet> message = Create<Packet>(buffer, pktSize);
c1->HandleTransmission (message);
Simulator::Run ();
Simulator::Destroy ();
return 0;
```

**Figura 3.7.** Declaración de la creación y transmisión de mensajes en la red, ejecución del simulador y limpieza de recursos [1].

### 3.1.2.2 Instalación del módulo P1906

Para trabajar con NS-3, se requiere contar con la versión 3.28.1 del software y disponer de Ubuntu 20.04.6 (<https://releases.ubuntu.com/focal/>) como sistema operativo. Ubuntu 20.04.6 es una distribución de código abierto que es compatible con Linux y proporciona las herramientas de desarrollo apropiadas para ejecutar NS-3. Se puede descargar el software NS-3 en el sitio oficial de nsnam.org, directamente del siguiente enlace: <https://www.nsnam.org/releases/ns-3-28/download/> [1].

Se puede encontrar la documentación inicial de NS-3 en la siguiente página web: <https://www.nsnam.org/docs/release/3.28/tutorial/singlehtml/index.html>, donde se obtienen las instrucciones para configurar NS-3, cómo se ejecuta, plataformas soportadas y prerequisites pertinentes [1].

En [1] se presentan varios repositorios que contienen los escenarios a ser simulados en NS-3<sup>xii</sup>, cada uno de los cuales cuenta con su configuración correspondiente. Estos repositorios incluyen un archivo *README* que proporciona una breve guía sobre cómo ejecutar el escenario en particular. Además, el archivo *p1906.zip* contiene nueve clases y veintiún archivos configurados específicamente para su uso en la simulación en NS-3 [1].

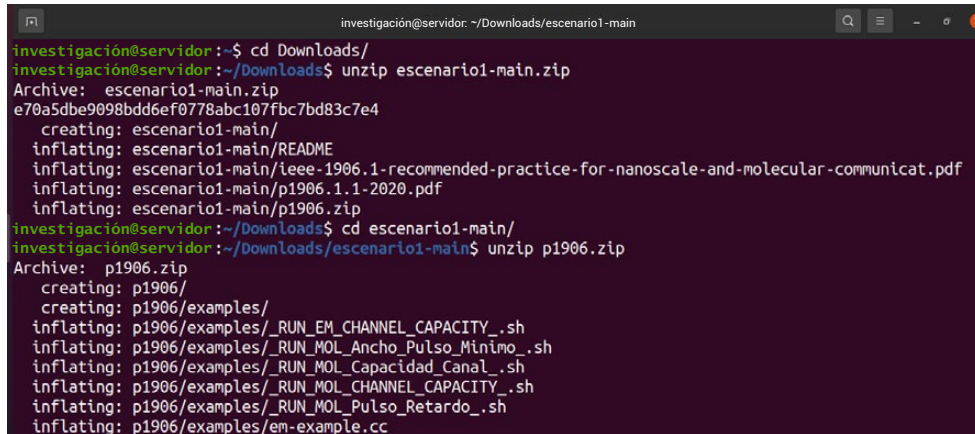
Después de descargar los archivos desde GitHub, se obtiene el archivo *escenario-main.zip* de cada uno de los escenarios, el siguiente paso

---

xii. <https://github.com/ArmasSantiago?tab=repositories>



consiste en generar una terminal de consola. En la carpeta de *Descargas* dentro del directorio del usuario se debe descomprimir los archivos *escenario1-main.zip* y *p1906.zip*, como se muestra en la Figura 3.8 [1].



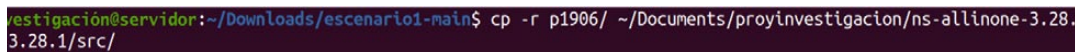
```

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

```

**Figura 3.8.** Vista de los archivos descomprimidos [1].

Posteriormente se accede a la carpeta */escenario1-main*, se tendrá que copiar la carpeta */p1906* y se la direcciona a la carpeta */src* de NS-3 utilizando el comando (Figura 3.9) [1]:



```

investigación@servidor:~/Downloads/escenario1-main$ cp -r p1906/ ~/Documents/proyinvestigacion/ns-allinone-3.28.1/src/

```

**Figura 3.9.** Comando para la copia y direccionamiento de la carpeta *p1906* [1].

Se debe direccionar a la carpeta que contiene el software, específicamente */ns-3.28.1*, para configurar el simulador empleando el comando (Figura 3.10) [1]:



```

servidor:~/Documents/proyinvestigacion/ns-allinone-3.28.1/ns-3.28.1$ ./waf con

```

**Figura 3.10.** Comando para la configuración del entorno NS-3 [1].

Finalmente, para construir el proyecto sin errores y prepararlo para su inclusión en los módulos de NS-3, se ejecuta el comando (Figura 3.11) [1]:



```

servidor:~/Documents/proyinvestigacion/ns-allinone-3.28.1/ns-3.28.1$ ./waf con

```

**Figura 3.11.** Comando para la construcción del proyecto con la herramienta *waf* [1].

La forma de verificar si este módulo ha sido incluido y está listo para su uso, es a través de la respuesta proporcionada en la consola (Figura 3.12 [1]).

```

investigación@servidor: ~/Documents/proyinvestigacion/ns-allinone-3.28.1/ns-3.28.1

Modules built:
antenna          aodv             applications
bridge           buildings        config-store
core             csma             csma-layout
dsdv             dsr              energy
fd-net-device    flow-monitor     internet
internet-apps    lr-wpan          lte
mesh            mobility         mpi
netanim (no Python) network          nix-vector-routing
olsr            p1906           point-to-point
point-to-point-layout propagation
spectrum        stats           sixlowpan
test (no Python) topology-read    tap-bridge
uan             virtual-net-device traffic-control
wifi           winax           wave

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

```

**Figura 3.12.** Construcción del módulo p1906 en el software NS-3 [1].

Luego de la construcción satisfactoria del módulo p1906 en el entorno de NS-3, se ha de copiar el programa *mol-example.cc* ubicándolo en la carpeta */examples* del módulo y se tiene que direccionar a la carpeta */scratch* de NS-3 para su ejecución (Figura 3.13) [1].

```

vidor:~/Downloads/escenario1-main/p1906$ cp examples/mol-example.cc ~/Documents/
.1/ns-3.28.1/scratch/

```

**Figura 3.13.** Comando para la copia y direccionamiento del programa *mol-example.cc* [1].

Mediante el comando que se encuentra a continuación se ejecuta el programa con sus parámetros establecidos para cada escenario, los cuales se detallan en la Sección 3.1.2.1 de este capítulo y el resultado por consola (Figura 3.14) se despliega en la Sección 3.1.2.3 [1].

```

@servidor:~/Documents/proyinvestigacion/ns-allinone-3.28.1/ns-3.28.1$ ./waf --run scratch

```

**Figura 3.14.** Comando para la ejecución del programa *mol-example.cc* en el entorno de NS-3 [1].

### 3.1.2.3 Ejecución del simulador

En esta sección se presenta el resultado obtenido en la consola durante la ejecución del simulador del escenario 1. Se detalla la creación de los componentes que conforman los módulos configurados, la creación de objetos y la invocación de métodos en NS-3. A lo largo de la ejecución del simulador, las líneas de la consola especifican ejemplos como la creación de un objeto llamado *P1906Medium* con una dirección de memoria *0x55a3db4433f0* y un mensaje de texto asociado (Figura 3.15 hasta Figura 3.21). Estos objetos usan los métodos correspondientes a los componentes integrados para llevar a cabo las funciones del programa [1].

```
investigación@servidor: ~/Documents/proyinvestigacion/ns-allinone-3.28.1/ns-3.28.1
P1906Medium: P1906Medium(0x55a3db4433f0, "===Sección-Creación componente Medio/Medium===")
P1906Motion: P1906Motion(0x55a3db443100)
P1906MOLMotion: P1906MOLMotion(0x55a3db443100, "===Sección-Creación del componente Movimiento/Motion===")
P1906MOLMotion: SetDiffusionCoefficient(0x55a3db443100, 1e-12)
P1906Medium: SetP1906Motion(0x55a3db4433f0)
P1906NetDevice: P1906NetDevice(0x55a3db446da0)
P1906CommunicationInterface: P1906CommunicationInterface(0x55a3db442df0)
P1906TransmitterCommunicationInterface: P1906TransmitterCommunicationInterface(0x55a3db442e80)
P1906TransmitterCommunicationInterface: SetP1906NetDevice(0x55a3db442e80)
P1906ReceiverCommunicationInterface: P1906ReceiverCommunicationInterface(0x55a3db443240)
P1906ReceiverCommunicationInterface: SetP1906NetDevice(0x55a3db443240)
P1906TransmitterCommunicationInterface: SetP1906CommunicationInterface(0x55a3db442e80)
P1906ReceiverCommunicationInterface: SetP1906CommunicationInterface(0x55a3db443240)
P1906MOLTransmitterCommunicationInterface: P1906MOLTransmitterCommunicationInterface(0x55a3db442df0, "===Sección-Creación de Dispositivo de Red===")
P1906CommunicationInterface: SetP1906NetDevice(0x55a3db442df0)
P1906CommunicationInterface: SetP1906Medium(0x55a3db442df0)
P1906TransmitterCommunicationInterface: SetP1906Medium(0x55a3db442e80)
P1906ReceiverCommunicationInterface: SetP1906Medium(0x55a3db443240)
P1906TransmitterCommunicationInterface: P1906TransmitterCommunicationInterface(0x55a3db445d30)
P1906TransmitterCommunicationInterface: SetP1906NetDevice(0x55a3db445d30)
P1906MOLTransmitterCommunicationInterface: P1906MOLTransmitterCommunicationInterface(0x55a3db445d30)
P1906ReceiverCommunicationInterface: P1906ReceiverCommunicationInterface(0x55a3db445df0)
P1906ReceiverCommunicationInterface: SetP1906NetDevice(0x55a3db445df0)
P1906MOLReceiverCommunicationInterface: P1906MOLReceiverCommunicationInterface(0x55a3db445df0)
P1906MOLReceiverCommunicationInterface: SetP1906TransmitterCommunicationInterface(0x55a3db442df0)
P1906TransmitterCommunicationInterface: SetP1906TransmitterCommunicationInterface(0x55a3db442e80)
P1906TransmitterCommunicationInterface: SetP1906NetDevice(0x55a3db442e80)
P1906CommunicationInterface: SetP1906ReceiverCommunicationInterface(0x55a3db442df0)
P1906ReceiverCommunicationInterface: P1906ReceiverCommunicationInterface(0x55a3db443240)
```

Figura 3.15. Vista de consola de la ejecución de los estándares IEEE 1906 determinada a partir del archivo *mol-example.cc*, representando la creación de componente del movimiento primer dispositivo de red [1].

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

Figura 3.16. Vista de consola de la ejecución de los estándares IEEE 1906 a través del archivo *mol-example.cc*, en la creación de los componentes especificidad, campo y perturbación [1].

```

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

```

Figura 3.17. Vista de consola de la ejecución de los estándares IEEE 1906 por medio del archivo *mol-example.cc*, en la creación del segundo dispositivo de red, y creación de los componentes especificidad, campo y perturbación [1].

```

investigación@servidor: ~/Documents/proyinvestigacion/ns-allinone-3.28.1/ns-3.28.1
P1906TransmitterCommunicationInterface: SetP1906Medium(0x55a3db445d30)
P1906ReceiverCommunicationInterface: SetP1906Medium(0x55a3db445d30)
P1906TransmitterCommunicationInterface: GetP1906TransmitterCommunicationInterface(0x55a3db442df0)
P1906TransmitterCommunicationInterface: SetP1906Perturbation(0x55a3db445d30)
P1906CommunicationInterface: GetP1906TransmitterCommunicationInterface(0x55a3db442df0)
P1906TransmitterCommunicationInterface: SetP1906Field(0x55a3db445d30)
P1906CommunicationInterface: GetP1906ReceiverCommunicationInterface(0x55a3db442df0)
P1906ReceiverCommunicationInterface: SetP1906Specificity(0x55a3db445d30)
P1906Specificity: SetP1906CommunicationInterface(0x55a3db442df0)
P1906Medium: AddP1906CommunicationInterface(0x55a3db4433f0)
P1906NetDevice: SetNode(0x55a3db44f680)
P1906NetDevice: SetNode(0x55a3db44f680)
P1906NetDevice: SetIfIndex(0)
P1906NetDevice: SetReceiveCallback(0x7fff1a8085a0)
P1906CommunicationInterface: SetP1906NetDevice(0x55a3db446140)
P1906CommunicationInterface: SetP1906Medium(0x55a3db446140)
P1906TransmitterCommunicationInterface: SetP1906Medium(0x55a3db446290)
P1906ReceiverCommunicationInterface: SetP1906Medium(0x55a3db446300)
P1906CommunicationInterface: GetP1906TransmitterCommunicationInterface(0x55a3db446140)
P1906TransmitterCommunicationInterface: SetP1906Perturbation(0x55a3db446290)
P1906CommunicationInterface: GetP1906TransmitterCommunicationInterface(0x55a3db446140)
P1906TransmitterCommunicationInterface: SetP1906Field(0x55a3db446290)
P1906CommunicationInterface: GetP1906ReceiverCommunicationInterface(0x55a3db446140)
P1906ReceiverCommunicationInterface: SetP1906Specificity(0x55a3db446140)

```

Figura 3.18. Vista de consola de la ejecución de los estándares IEEE 1906 a través del archivo *mol-example.cc*, demostrando la configuración y conexión de componentes e interfaces [1].

```

investigación@servidor: ~/Documents/proyinvestigacion/ns-allinone-3.28.1/ns-3.28.1
P1906CommunicationInterface: HandleTransmission(0x55a3db442df0, "Transmisión del paquete [id,size]", 0, 1)
P1906TransmitterCommunicationInterface: HandleTransmission(0x55a3db445d30)
P1906MOLPerturbation: CreateMessageCarrier(0x55a3db43b800, "===Sección-Creación de la Portadora===")
P1906MessageCarrier: P1906MessageCarrier(0x55a3db4469f0)
P1906MOLMessageCarrier: P1906MOLMessageCarrier(0x55a3db4469f0)
P1906MessageCarrier: SetMessage(0x55a3db4469f0)
P1906MOLPerturbation: CreateMessageCarrier(0x55a3db43b800, "[t,bits,pulsoIntervalo,duración]", 0, 8, +2000000000.0ns, 16)
P1906MOLPerturbation: CreateMessageCarrier("Bit a Transmtr:", "0", "Concentración", 0)
P1906MOLPerturbation: CreateMessageCarrier("Bit a Transmtr:", "0", "Concentración", 0)
P1906MOLPerturbation: CreateMessageCarrier("Bit a Transmtr:", "0", "Concentración", 0)
P1906MOLPerturbation: CreateMessageCarrier("Bit a Transmtr:", "0", "Concentración", 0)
P1906MOLPerturbation: CreateMessageCarrier("Bit a Transmtr:", "0", "Concentración", 0)
P1906MOLPerturbation: CreateMessageCarrier("Bit a Transmtr:", "0", "Concentración", 0)
P1906MOLPerturbation: CreateMessageCarrier("Bit a Transmtr:", "0", "Concentración", 0)
P1906MOLPerturbation: CreateMessageCarrier("Bit a Transmtr:", "1", "Concentración", 10000)
P1906MOLPerturbation: CreateMessageCarrier("Paquete [1 Byte] en TX con id:", 0, "Secuencia:", "00000001")
P1906MOLMessageCarrier: SetPulseInterval(0x55a3db4469f0, +2000000000.0ns)
P1906MOLMessageCarrier: SetDuration(0x55a3db4469f0, +16000000000.0ns)
P1906MOLMessageCarrier: SetStartTime(0x55a3db4469f0, +0.0ns)
P1906MOLPerturbation: GetMolecules(0x55a3db43b800)

```

Figura 3.19. Vista de consola de la ejecución de los estándares IEEE 1906 del archivo *mol-example.cc*, para la transmisión del paquete, transmisión en la interfaz de comunicación, establecimiento de mensaje en la portadora, generación y configuración de la técnica de modulación describiendo la lógica del programa [1].



```

investigación@servidor: ~/Documents/proyinvestigacion/ns-allinone-3.28.1/ns-3.28.1
P1906NetDevice: GetNode(0x55a3db445a30)
P1906MOLMotion: GetDiffusionCoefficient(0x55a3db443100)
P1906MOLMotion: GetDiffusionCoefficient(0x55a3db443100)
P1906MOLMotion: ComputePropagationDelay(0x55a3db443100, "[distancia,difusión,retardo]", 2.1e-06, 1e-12, 0.735)
P1906MOLMotion: CalculateReceivedMessageCarrier(0x55a3db443100)
P1906CommunicationInterface: GetP1906NetDevice(0x55a3db442df0)
P1906NetDevice: GetNode(0x55a3db466da0)
P1906CommunicationInterface: GetP1906NetDevice(0x55a3db446140)
P1906NetDevice: GetNode(0x55a3db445a30)
P1906MOLMotion: GetDiffusionCoefficient(0x55a3db443100)
P1906MOLMotion: CalculateReceivedMessageCarrier("[Tiempos de inicio de cada bit:]", "0.000000||1.152738||2.305476||3.458213||4.610951||5.763689||6.916427||8.069164||")
P1906MOLMotion: CalculateReceivedMessageCarrier("[Tiempos de finalización de cada bit:]", "1.152738||2.305476||3.458213||4.610951||5.763689||6.916427||8.069164||9.221902||")
P1906MOLMotion: CalculateReceivedMessageCarrier("[Interferencia Inter-Símbolos:]", 0.133646)
P1906Medium: HandleTransmission("==Se ha configurado el componente de Movimiento/Motion==")
P1906Medium: HandleReception(0x55a3db4431f0)
P1906CommunicationInterface: GetP1906ReceiverCommunicationInterface(0x55a3db446140)
P1906MOLReceiverCommunicationInterface: HandleReception(0x55a3db446300, "==Sección-Proceso de Recepción==")
P1906ReceiverCommunicationInterface: GetP1906Specificity(0x55a3db446300)
P1906MOLSpecificity: CheckRxCompatibility(0x55a3db445a70)
P1906MOLMessageCarrier: GetPulseInterval(0x55a3db4469f0)
P1906CommunicationInterface: GetP1906NetDevice(0x55a3db442df0)
P1906NetDevice: GetNode(0x55a3db466da0)
P1906CommunicationInterface: GetP1906NetDevice(0x55a3db446140)
P1906NetDevice: GetNode(0x55a3db445a30)
P1906MOLMotion: CheckRxCompatibility(0x55a3db445a70, "[distancia,txRate]", 2.1e-06, 0.5)
P1906MOLSpecificity: GetDiffusionCoefficient(0x55a3db445a70)
P1906MOLSpecificity: CheckRxCompatibility(0x55a3db445a70, "testCapacidad: [distancia, txRate, Capacidadcanal, AnchoPulsoMin]", 2.1e-06, 0.5, 0.503793, 1.98494)

```

Figura 3.20. Vista de consola de la ejecución de los estándares IEEE 1906 mediante el archivo *mol-example.cc*, referente al cálculo del retardo de pulso, cálculos con el mensaje recibido en el nodo asociado, análisis del cálculo relacionado con la interferencia entre símbolos [1].

```

investigación@servidor: ~/Documents/proyinvestigacion/ns-allinone-3.28.1/ns-3.28.1
P1906MOLSpecificity: CheckRxCompatibility(0x55a3db445a70, "testCapacidad: [distancia, txRate, Capacidadcanal, AnchoPulsoMin]", 2.1e-06, 0.5, 0.503793, 1.98494)
P1906MOLMessageCarrier: GetMolecules(0x55a3db4469f0)
P1906MOLSpecificity: CheckRxCompatibility(0x55a3db445a70, "Limite de Flick respetado")
P1906MOLReceiverCommunicationInterface: HandleReception(0x55a3db446300, "Mensaje recibido correctamente")
P1906MessageCarrier: GetMessage(0x55a3db4469f0)
P1906MOLReceiverCommunicationInterface: HandleReception(0x55a3db446300, "Recibiendo el paquete [id,size]", 0, 1)
P1906MOLMessageCarrier: GetModulation(0x55a3db4469f0)
P1906MOLReceiverCommunicationInterface: HandleReception("[Concentración Máxima por Bit:]", 0)
P1906MOLReceiverCommunicationInterface: HandleReception("[Concentración Máxima por Bit:]", 0)
P1906MOLReceiverCommunicationInterface: HandleReception("[Concentración Máxima por Bit:]", 0)
P1906MOLReceiverCommunicationInterface: HandleReception("[Concentración Máxima por Bit:]", 0)
P1906MOLReceiverCommunicationInterface: HandleReception("[Concentración Máxima por Bit:]", 0)
P1906MOLReceiverCommunicationInterface: HandleReception("[Concentración Máxima por Bit:]", 0)
P1906MOLReceiverCommunicationInterface: HandleReception("[Concentración Máxima por Bit:]", 10000)
P1906MOLReceiverCommunicationInterface: HandleReception("[Secuencia Recibida:]", "00000001")
P1906MOLReceiverCommunicationInterface: HandleReception("[Número de Error Bits:]", 0)
P1906MOLReceiverCommunicationInterface: HandleReception("[Umbral en RX:]", 5000)
P1906MOLReceiverCommunicationInterface: HandleReception("[BIT_ERROR_RATE (BER):]", 0)
P1906MOLMessageCarrier: ~P1906MOLMessageCarrier(0x55a3db4469f0)
P1906MessageCarrier: SetMessage(0x55a3db4469f0)
P1906MessageCarrier: ~P1906MessageCarrier(0x55a3db4469f0)
P1906NetDevice: DoDispose(0x55a3db466da0)
P1906NetDevice: DoDispose(0x55a3db445a30)
P1906Medium: DoDispose(0x55a3db4431f0)
P1906MOLMotion: ~P1906MOLMotion(0x55a3db443100)
P1906Motion: ~P1906Motion(0x55a3db443100)
santiago@unach: ~/Documents/proyinvestigacion/ns-allinone-3.28.1/ns-3.28.1$

```

Figura 3.21. Vista de consola de la ejecución de los estándares IEEE 1906 definida por el archivo *mol-example.cc*, para la recepción y procesamiento de la compatibilidad en el receptor, se obtiene la modulación asociada a la portadora y se inicia el proceso de demodulación y el manejo de la información [1].

## 3.2

### EVALUACIÓN DE LAS MÉTRICAS DE COMUNICACIÓN

Se usaron las características del canal molecular basado en métricas de comunicación para examinar resultados como el pulso de retardo en el medio de transmisión, la amplitud máxima de pulso, el ancho de pulso mínimo y la capacidad del canal molecular con el fin de validar los resultados de las simulaciones de los tres escenarios establecidos [1].

A continuación, se llevarán a cabo simulaciones de los tres escenarios predefinidos (Tabla 3.1), y se realiza el análisis de los resultados. Estos parámetros generales de simulación se presentan en la Tabla 3.2.

**Tabla 3.2. Parámetros generales de simulación [1].**

Nombre de la modulación	Abreviación	Distancia de transmisión	Número de moléculas	Intervalo de pulso	Coeficiente de difusión	Tipo de movimiento
On-Off Keying	OOK	2,1 $\mu m$	10.000 <i>mol</i>	2.000 <i>ms</i>	1 $nm^2/ns$	Browniano Libre
Concentration Shift Keying	CSK	2,1 $\mu m$	10.000 <i>mol</i>	2.000 <i>ms</i>	1 $nm^2/ns$	Browniano Libre
Molecular Shift Keying	MoSK	2,1 $\mu m$	10.000 <i>mol</i>	2.000 <i>ms</i>	1 $nm^2/ns$	Browniano con arrastre

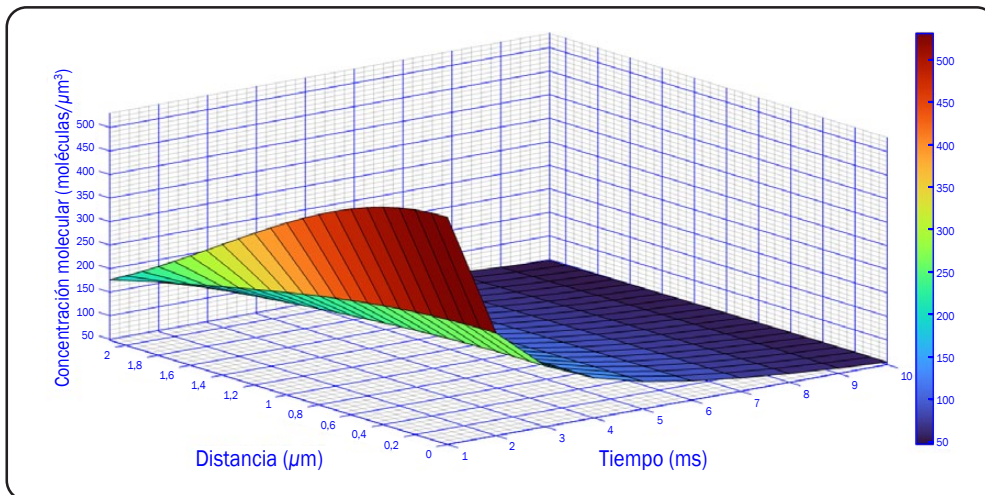
### 3.2.1 Resultados escenario 1

El esquema de simulación de este caso de CM con modulación OOK se realiza en una conexión punto a punto, en el cual los nanodispositivos están conectados sin obstáculos ni interferencias externas que puedan afectar la comunicación. En este escenario, las señales moleculares se desplazan de manera omnidireccional según el componente de campo, siguiendo los parámetros generales de simulación establecidos en la Tabla 3.2. A continuación, se indican los resultados obtenidos a través de la implementación de los estándares de la familia IEEE 1906 [1].

#### 3.2.1.1 Concentración Molecular

El resultado principal derivado de la implementación de los estándares protocolarios IEEE de nanocomunicaciones con NS-3 radica en la posibilidad de medir la concentración molecular en función del tiempo, un parámetro fundamental evaluado por el receptor en el sistema de CM. En este escenario, se configura una nanomáquina transmisora en una posición fija, desde la cual se liberan moléculas al medio de comunicación después de codificarlas. Estas moléculas, una vez en el medio de transmisión, son influenciadas por el movimiento Browniano. Por otro lado, el receptor se modela como una nanomáquina que pueda contar el número de moléculas en su proximidad, lo que habilita la estimación de la concentración molecular. Es importante tener en cuenta que las leyes de Fick establecen limitaciones en la distancia máxima entre los nodos transmisor y receptor para evitar errores en la detección de señales moleculares. La calidad de la comunicación entre estos nodos está intrínsecamente vinculada a la concentración molecular. Si la distancia entre los nodos es excesivamente grande, la concentración no alcanzará el umbral necesario para una detección fiable, lo que, en última instancia, resultaría en la pérdida de la señal que se está transmitiendo [1].

En la Figura 3.22, se esquematiza que la concentración medida por el receptor alcanza su punto más alto en el primer instante de tiempo cuando la distancia entre los nodos se incrementa más allá de los 0  $\mu\text{m}$ . En este instante se registra el pico de concentración, que se denomina “pulso de retardo”. A partir de este punto, la concentración comienza a disminuir gradualmente debido al proceso de difusión molecular [1].



**Figura 3.22.** Concentración molecular en función de la distancia y el tiempo, obtenida de la simulación del escenario 1 [1].

Es fundamental destacar que el pulso de retardo no solo señala el momento de máxima concentración, sino que también brinda información valiosa acerca de la velocidad con la que se propaga la señal molecular. Un pulso de retardo más prolongado indica una difusión más lenta de las moléculas en el entorno, mientras que un pulso de retardo más corto sugiere una difusión más rápida y, por lo tanto, una propagación más eficiente de la señal molecular [1].

A partir de la Figura 3.23, se pueden extraer dos condiciones clave en la respuesta del simulador. En la Figura 3.23 a), se destaca la confirmación de la recepción de información a través de un mensaje en la consola del simulador. Este resultado se debe a que la señal portadora, encapsulada por el componente de perturbación, ha sido demodulada con éxito, respetando el umbral requerido. Además, se considera que la comunicación se ha llevado a cabo de manera satisfactoria, ya que se cumplen los límites de Fick establecidos por el componente de especificidad. Por otro lado, en la Figura 3.23 b), el simulador muestra la notificación “mensaje NO recibido correctamente”, enfatizando una situación diferente. En este caso, la cantidad de moléculas capturadas por el receptor no alcanza el umbral necesario para una recepción exitosa. Esto refleja un fallo en la transmisión, y que la información previamente enviada no ha sido recibida de manera efectiva [1].



```

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

```

a)

```

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

```

b)

Figura 3.23. Resultado obtenido por consola del escenario 1 en la recepción del mensaje molecular a distancias diferentes: a)  $2,1\mu\text{m}$  y b)  $2,2\mu\text{m}$  [1].

### 3.2.1.2 Pulso de retardo

Para determinar el pulso de retardo, se calcula el instante de tiempo en el que la ecuación de pulso alcanza su valor máximo en el receptor. La ecuación de pulso puede ser modelada analíticamente resolviendo las leyes de difusión de Fick. Si en el instante  $t = 0$ , el transmisor libera  $Q$  moléculas, entonces la concentración molecular en cualquier punto se puede determinar por la Ecuación 3.1 [26, 27].

$$c(r, t) = \frac{Q}{(4\pi Dt)^{3/2}} e^{-r^2/4Dt} \quad (3.1)$$

Donde  $D$  es el coeficiente de difusión en el medio de comunicación,  $t$  es el tiempo, la distancia desde la ubicación del transmisor es  $r$  y  $Q$  es el número de moléculas liberadas en el medio de transmisión. Por lo tanto, la posición de este máximo se lleva a cabo mediante la derivación temporal de la función y la identificación del instante de tiempo en el que es igual a 0, se obtiene la Ecuación 3.2 [26, 27].

$$\frac{dc(r, t)}{dt} = \frac{d}{dt} \frac{Q e^{-r^2/4Dt}}{(4\pi Dt)^{3/2}} = 0 \quad (3.2)$$

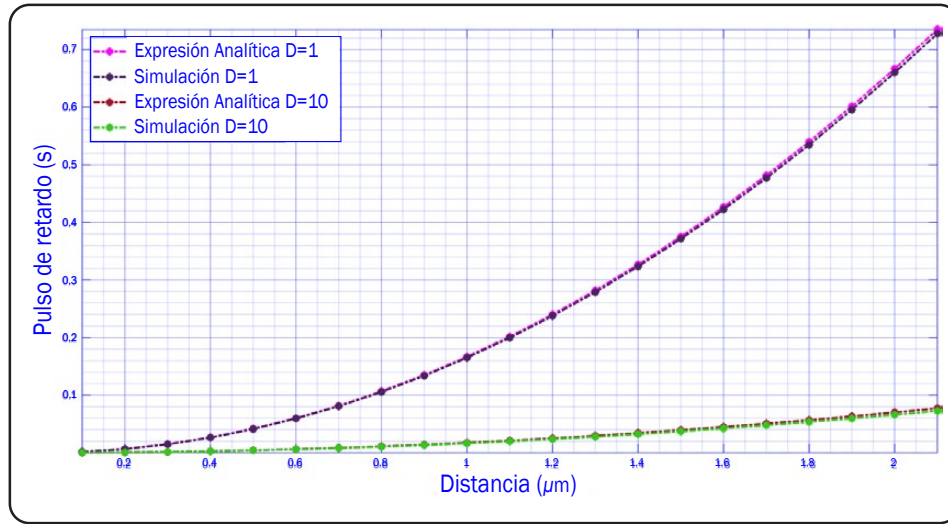
A partir de esta ecuación, al aislar la variable  $t$ , se obtiene el instante de tiempo en el cual el pulso alcanza su máximo, denominado  $t_d$ . Este instante puede ser interpretado como el pulso de retardo. Como resultado se obtiene la Ecuación 3.3 [26, 27].

$$t_d = \frac{r^2}{6D} \quad (3.3)$$

Donde  $r$  es la distancia entre el transmisor/receptor y  $D$  es el coeficiente de difusión en el medio de comunicación.

La medición del pulso de retardo, que se produce entre el transmisor y el receptor, se concreta en múltiples ubicaciones a lo largo de cada una de las distancias donde se coloca el receptor. Se procede a realizar simulaciones en las cuales se varía la distancia entre el transmisor y el receptor en un rango que va desde  $0,1 \mu m$  hasta  $2,1 \mu m$ , en incrementos de  $0,1 \mu m$ . Este enfoque sistemático permite evaluar de manera completa cómo la distancia impacta en el pulso de retardo y, así, en la eficacia de la comunicación molecular en esta configuración específica [1].

La Figura 3.24 ilustra los resultados del pulso de retardo a partir de la simulación con los parámetros generales previamente establecidos. Se transmite un pulso de 10.000 moléculas, utilizando dos coeficientes de difusión diferentes:  $1 \text{ nm}^2/\text{ns}$  y  $10 \text{ nm}^2/\text{ns}$ . El rango de comunicación varía desde  $0,1 \text{ }\mu\text{m}$  hasta  $2,1 \text{ }\mu\text{m}$ . Las curvas correspondientes al coeficiente de difusión de  $D=1 \text{ nm}^2/\text{ns}$  muestran cómo el pulso de retardo aumenta de manera proporcional con el incremento de la distancia entre el transmisor y el receptor. Esto indica que el pulso molecular requiere más tiempo para propagarse a distancias mayores debido a la difusión más lenta. En contraste, las curvas asociadas al coeficiente de difusión  $D=10 \text{ nm}^2/\text{ns}$  muestran que el pulso de retardo es considerablemente más corto, lo que sugiere que el pulso molecular se propaga con mayor rapidez en el medio de transmisión [1].



**Figura 3.24.** Pulso de retardo en función de la distancia, a partir de la simulación del escenario 1 [1].

La Tabla 3.3 resalta resultados relevantes del pulso de retardo ocasionados por la modificación de la distancia y del coeficiente de difusión en la simulación. En la distancia máxima de  $2,1 \text{ }\mu\text{m}$  y con un coeficiente de difusión igual a  $1 \text{ nm}^2/\text{ns}$ , el tiempo medido del retardo es de  $0,72772 \text{ s}$ , mientras que para la distancia de  $2,1 \text{ }\mu\text{m}$  con un coeficiente de difusión igual a  $10 \text{ nm}^2/\text{ns}$  es de  $0,07277 \text{ s}$ . Se determina que el retardo obtenido es inversamente proporcional al coeficiente de difusión, como se puede notar en la Ecuación 3.3, es decir, se puede lograr una transmisión más rápida del pulso molecular simplemente ajustando el valor de dicho coeficiente, y en consecuencia se logra una detección precisa de la información sin que se vea afectada [1].

**Tabla 3.3.** Resultados del pulso de retardo del escenario 1, conseguidos a través de diferentes distancias y dos valores de coeficientes de difusión [1].

Distancia entre nodos ( $\mu m$ )	Coefficiente de difusión ( $nm^2/ns$ )	Pulso de retardo (s) (Simulación)	Pulso de retardo (s) (Expresión Analítica)
0,4	1	0,02640	0,02666
0,8	1	0,10561	0,10666
1,2	1	0,23762	0,24000
1,6	1	0,42244	0,42666
2,1	1	0,72772	0,73500
0,4	10	0,00264	0,00266
0,8	10	0,01056	0,01066
1,2	10	0,02376	0,02400
1,6	10	0,04224	0,04266
2,1	10	0,07277	0,07350

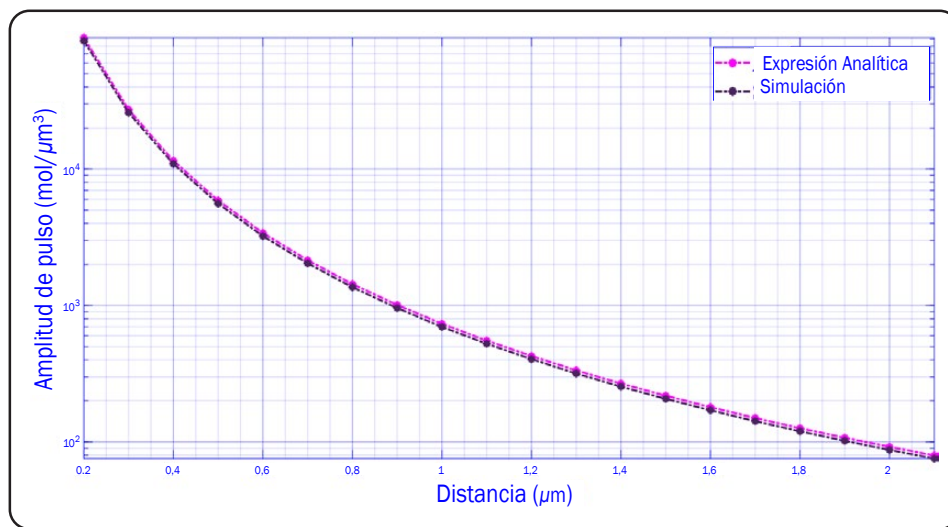
### 3.2.1.3 Amplitud máxima de pulso

Al evaluar el rendimiento de la comunicación molecular, resulta esencial considerar una métrica de gran relevancia: la amplitud máxima del pulso, que se refiere a la concentración máxima que alcanza la señal cuando llega al receptor [1]. Se calcula esta amplitud evaluando la ecuación de pulso en el instante de tiempo en el cual el pulso alcanza su máximo (Ecuación 3.3), reemplazando en la Ecuación 3.1, dando lugar a la Ecuación 3.4 [26, 27].

$$C_{max} = \left( \frac{3}{2\pi e} \right)^{3/2} \frac{Q}{r^3} \quad (3.4)$$

Donde  $Q$  es el número de moléculas liberadas en el medio de transmisión y  $r$  es la distancia entre el transmisor y el receptor.

En la Figura 3.25, se puntualizan los resultados de la amplitud máxima del pulso en relación a la distancia entre el transmisor y el receptor. Estos resultados revelan que a medida que la distancia entre los nodos se incrementa, la amplitud máxima del pulso tiende a disminuir. Este comportamiento sugiere que el canal de comunicación molecular comienza a experimentar atenuación a distancias mayores. Para una distancia de  $0,2 \mu\text{m}$ , la amplitud del pulso alcanza un valor de  $9.127 \text{ moléculas}$ , mientras que a la distancia más lejana de  $2,1 \mu\text{m}$ , la amplitud se reduce a  $75 \text{ moléculas}$ , como se nota en la Tabla 3.4. Es interesante tomar en cuenta que la amplitud del pulso no depende del coeficiente de difusión, lo que implica que este parámetro no ejerce influencia sobre la atenuación de los pulsos moleculares a medida que atraviesan el medio de comunicación, como se establece en la Ecuación 3.4, sino que dicha concentración máxima decrecerá dependiendo del factor distancia [1].



**Figura 3.25.** Amplitud máxima de pulso en función de la distancia, resultante de la simulación del escenario 1 [1].

**Tabla 3.4. Resultados de la amplitud máxima de pulso del escenario 1, obtenidos mediante distancias diferentes y contrastados con los resultados de la expresión analítica [1].**

Distancia entre nodos (μm)	Coefficiente de difusión (nm <sup>2</sup> /ns)	Amplitud máxima de pulso (mol/μm <sup>3</sup> ) (Simulación)	Amplitud máxima de pulso (mol/μm <sup>3</sup> ) (Expresión Analítica)
0,2	1	9.127,50	9.201,72
0,4	1	7.412,84	7.502,34
0,6	1	3.397,32	3.408,13
0,8	1	1.425,10	1.437,80
1	1	728,221	736,156
1,2	1	422,164	426,016
1,4	1	259,567	268,278
1,6	1	173,887	179,725
1,8	1	122,129	126,227
2	1	89,0304	92,0196
2,1	1	75,9179	79,4900

### 3.2.1.4 Ancho de pulso

Otra métrica a evaluar es el ancho de pulso mínimo, el cual precisa la velocidad de transmisión alcanzable en la comunicación molecular. La velocidad de transmisión está directamente relacionada con la duración de los símbolos transmitidos, es decir, el tiempo requerido para transmitir cada símbolo de información [1].

El ancho de pulso se calcula teniendo en cuenta valores de concentración mayores al 50% del valor máximo. Esto se refiere al intervalo de tiempo en el cual el pulso mantiene una amplitud superior a la mitad de su valor máximo. Por lo tanto, la Ecuación 3.1 se iguala a la mitad de la Ecuación 3.4 y se obtiene la Ecuación 3.5 [26, 27].

$$c(r, t) = \frac{Q}{(4\pi Dt)^{3/2}} e^{-r^2/4Dt} = \frac{C_{max}}{2} = \frac{1}{2} \left( \frac{3}{2\pi e} \right)^{3/2} \frac{Q}{r^3} \quad (3.5)$$



Se consigue la Ecuación 3.6 al aislar la variable tiempo:

$$t = -\frac{r^2}{6DW\left(-\frac{1}{2^{2/3}e}\right)} \quad (3.6)$$

Donde  $W$  es la función  $W$  de Lambert [28]. Esta ecuación cuenta con dos soluciones, que corresponden a los dos instantes de tiempo en los que la amplitud del pulso es igual a la mitad de su valor máximo [26, 27]. Estos instantes vienen dados por la Ecuación 3.7:

$$t_1 = \frac{0.0728}{D}r^2 \quad t_2 = \frac{0.5229}{D}r^2 \quad (3.7)$$

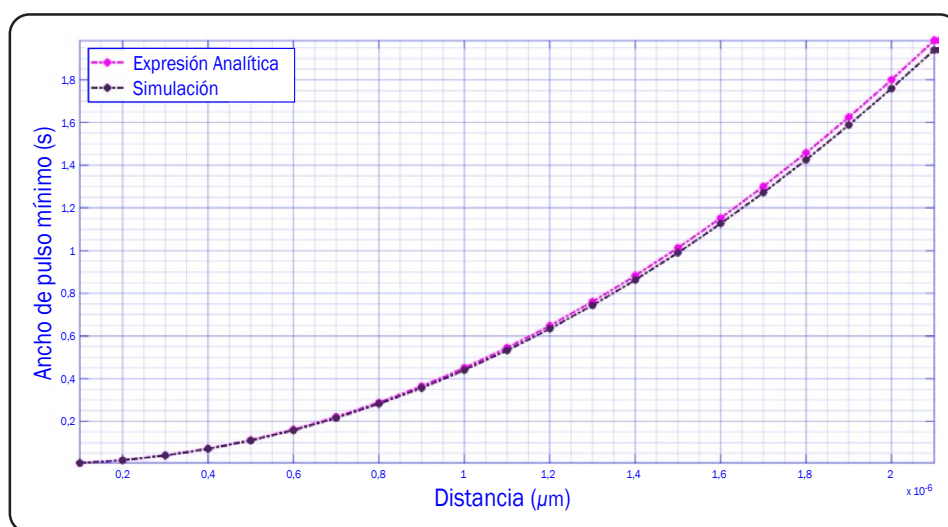
Por último, se determina la expresión de ancho de pulso con la diferencia entre estos dos instantes dando lugar a la Ecuación 3.8 [26, 27]:

$$t_w = t_2 - t_1 = \frac{0.4501}{D}r^2 \quad (3.8)$$

Donde  $D$  es el coeficiente de difusión en el medio de transmisión y  $r$  es la distancia entre el transmisor y el receptor. El ancho del pulso, entonces, desempeña un papel fundamental en la evaluación de la capacidad del canal molecular, tal como se refleja en el componente de especificidad [1].

La Figura 3.26 proporciona la variación del ancho de pulso mínimo en función de la distancia entre el transmisor y el receptor. A una distancia de  $0,2 \mu m$ , el ancho del pulso se establece en  $17,68 ms$ , mientras que para la distancia más extensa de  $2,1 \mu m$ , el ancho del pulso es de  $1.941,07 ms$ , como se refleja en la Tabla 3.5 [1].

Según la Ecuación 3.8 el ancho del pulso es inversamente proporcional al coeficiente de difusión y directamente proporcional al cuadrado de la distancia, este particular indica que a medida que la distancia entre los nodos aumenta, el ancho del pulso también experimenta un incremento notorio. Es decir, el pulso que transporta la señal se ensancha a medida que se incrementa la separación entre el transmisor y el receptor [1].



**Figura 3.26.** Ancho de pulso mínimo en función de la distancia, obtenido de la simulación del escenario 1 [1].

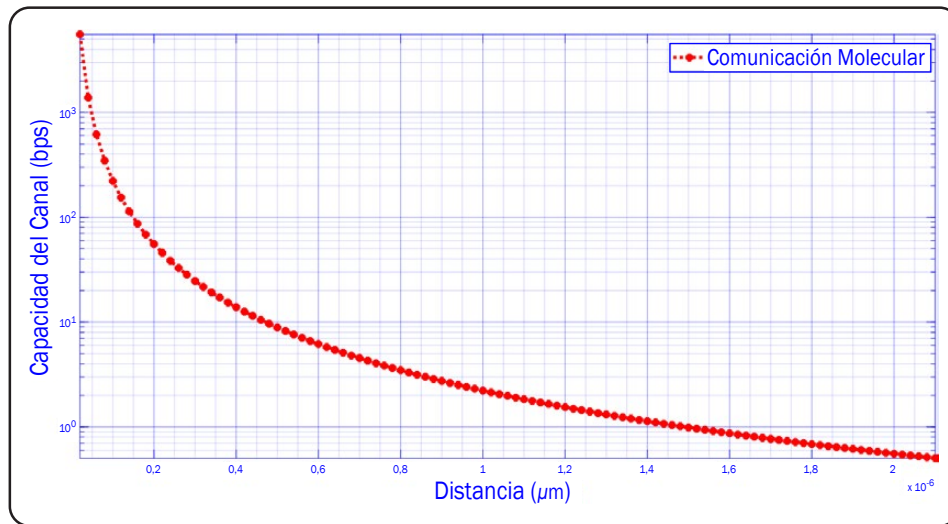
**Tabla 3.5.** Resultados del ancho de pulso del escenario 1 con distancias diferentes y contrastados con los resultados de la expresión analítica [1].

Distancia entre nodos (μm)	Coefficiente de difusión (nm²/ns)	Ancho de pulso (ms) (Simulación)	Ancho de pulso (ms) (Expresión Analítica)
0,2	1	0,01768	0,01800
0,4	1	0,07042	0,07201
0,6	1	0,15842	0,16203
0,8	1	0,28160	0,28806
1	1	0,44700	0,45010
1,2	1	0,63360	0,64814
1,4	1	0,86242	0,88219
1,6	1	1,12642	1,15225
1,8	1	1,42568	1,45832
2	1	1,76000	1,80040
2,1	1	1,94107	1,98494



### 3.2.1.5 Capacidad del canal de comunicación

La Figura 3.27 define un patrón de disminución en la capacidad del canal molecular a medida que se incrementa la distancia entre el transmisor y el receptor. Este fenómeno indica que, a medida que se expande el rango de comunicación, el canal de transmisión no es óptimo para una comunicación confiable. Esto se debe al hecho de que, en distancias mayores, se requiere un ancho de pulso más extenso para garantizar que las moléculas lleguen al receptor de manera efectiva. Como se hace referencia en la Sección 3.2.1.1, la comunicación no experimenta fallos incluso cuando la concentración de moléculas es menor en estas distancias máximas. Este hallazgo denota que la eficacia y la robustez del sistema de CM en la simulación, permite una transmisión confiable de información a distancias considerables [1].



**Figura 3.27.** Capacidad del canal de comunicación, obtenida de la simulación del escenario 1 [1].

### 3.2.2 Resultados escenario 2

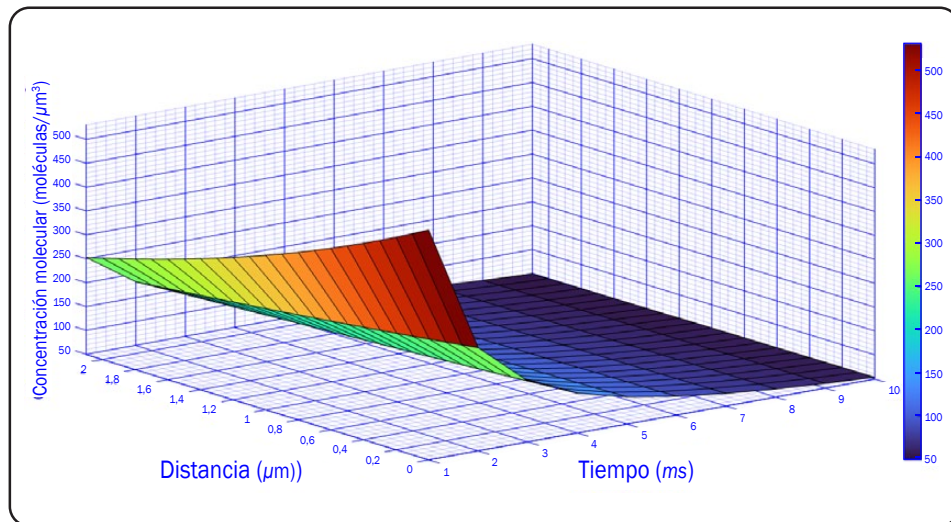
El esquema de simulación para este escenario se basa en la modulación BCSK. Consecuentemente, el transmisor emite un número específico de moléculas para representar cada valor del símbolo de señal: para el bit-1, se liberan  $n_1=10.000$  moléculas, mientras que para representar el bit-0, se emite el 50 % del pulso del bit-1. Este escenario se configura con un movimiento Browniano libre y además la nanomáquina en el destino desempeña la función de un receptor absorbente de radio  $1,6 \mu m$ . A continuación, se exponen los resultados de la simulación empleando los parámetros generales especificados en la Tabla 3.2, seguidos de un análisis detallado de las métricas de comunicación [1].

Para obtener los valores de las métricas de comunicaciones se ha de realizar un análisis al igual que en el primer caso de simulación. Este enfoque permite comprobar que las métricas solo son influenciadas por la distancia entre los nodos de comunicación y el coeficiente de difusión [1].

### 3.2.2.1 Concentración Molecular

Los valores mínimos a partir de los cuales los nodos se pueden separar se rigen por las leyes de Fick. De modo que, el nodo receptor está equipado con un sistema de detección de concentración molecular que, en función de los parámetros establecidos previamente, puede considerarse satisfactorio. Así, se establece la modulación BCSK como método para transmitir información a través de variaciones en la concentración de estas moléculas en el transcurso del tiempo [1].

En la Figura 3.28, se visualiza que el receptor registra la concentración más alta justo en el momento en que la distancia entre el transmisor y el receptor supera los  $0 \mu m$ . Una vez que se alcanza este punto máximo, la concentración comienza a disminuir de manera periódica debido a los efectos de la difusión. Es importante destacar que el receptor absorbente es capaz de capturar directamente las moléculas mensajeras que entran en contacto con él, incluso teniendo en cuenta la distribución no uniforme del pulso molecular [1]. Este comportamiento de concentración en función de la distancia tiene implicaciones en la comunicación molecular. En particular se ilustra cómo la distancia entre el transmisor y el receptor afecta la concentración de moléculas detectadas por el receptor [1].



**Figura 3.28.** Concentración molecular en función de la distancia y el tiempo, determinada mediante la simulación del escenario 2 [1].

En la Figura 3.29 a) se muestra el resultado de la simulación, donde se puede notar la respuesta de la interfaz de recepción que indica “mensaje recibido correctamente”. Esto se debe al proceso de demodulación de la señal portadora, la cual está encapsulada por el componente de perturbación según los estándares IEEE 1906. La efectividad de esta comunicación se fundamenta en el respeto de los límites de Fick sustentada por el componente de especificidad. Estos límites aseguran que la propagación de las moléculas no se disperse por difusión a través del espacio circundante, permitiendo por tanto una comunicación exitosa. En contraste, en la Figura 3.29 b), el simulador muestra “mensaje NO recibido correctamente”. Hecho que ocurre porque en la distancia indicada, la concentración molecular no alcanza la superficie del receptor absorbente, lo que resulta en una transmisión fallida [1].

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

a)

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

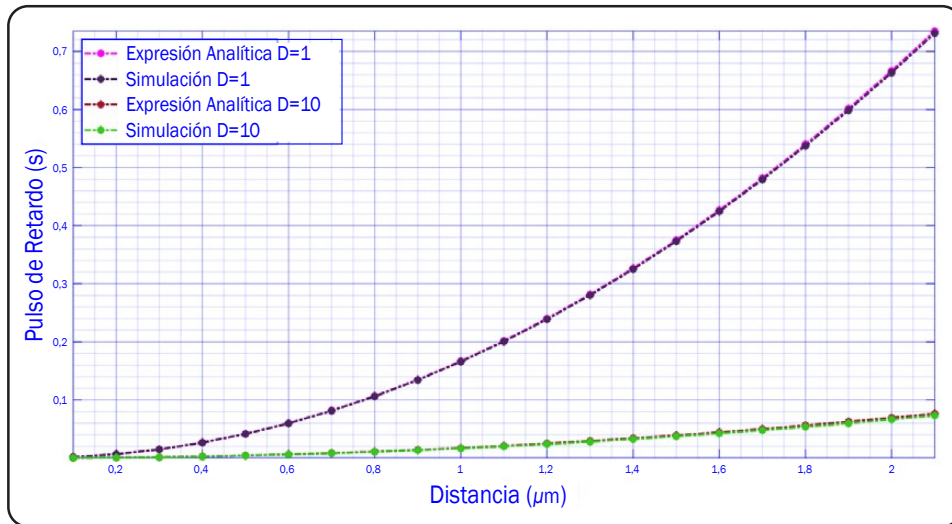
b)

**Figura 3.29.** Resultado obtenido por consola del escenario 2 en la recepción del mensaje molecular a distancias diferentes: a)  $2,1\mu\text{m}$  y b)  $2,2\mu\text{m}$  [1].

### 3.2.2.2 Pulso de retardo

Con el objetivo de analizar esta métrica, se modifica la distancia entre el transmisor y el receptor en un rango que va desde  $0,1 \mu\text{m}$  hasta  $2,1 \mu\text{m}$ , con incrementos de  $0,1 \mu\text{m}$ . La información extraída de las simulaciones pertinentes se refleja en la Figura 3.30 [1].

En la Figura 3.30 se exhibe el resultado del pulso de retardo a medida que se incrementa la variable distancia. Las curvas correspondientes a  $D = 1 \text{ nm}^2/\text{ns}$  indican claramente cómo el retardo se incrementa a medida que la distancia entre el transmisor y el receptor crece. Este fenómeno manifiesta que se requiere tiempo adicional para que un cierto número de moléculas alcance su concentración máxima a mayores distancias. Sin embargo, las curvas relacionadas con  $D = 10 \text{ nm}^2/\text{ns}$  denotan un patrón diferente, ya que muestran que, para valores más altos del coeficiente de difusión, el pulso de retardo es menor. Esto sugiere una difusión más rápida del pulso molecular a través del medio de transmisión [1].



**Figura 3.30.** Pulso de retardo en función de la distancia, determinado a través de la simulación del escenario 2 [1].

La Tabla 3.6 pone de manifiesto los resultados correspondientes del pulso de retardo, que se consiguen al modificar las variables de distancia y coeficiente de difusión. En la distancia máxima de  $2,1 \mu\text{m}$  y con un coeficiente de difusión igual a  $1 \text{ nm}^2/\text{ns}$ , el tiempo de retardo es de  $0,73134 \text{ s}$ , mientras que para la distancia de  $2,1 \mu\text{m}$  con un coeficiente de difusión igual a  $10 \text{ nm}^2/\text{ns}$  es de  $0,07313 \text{ s}$ . En razón de que la Ecuación 3.3  $\left(t_d = \frac{r^2}{6D}\right)$  especifica que el tiempo de



retardo medido en el receptor es inversamente proporcional al coeficiente de difusión, es posible conseguir una transmisión más rápida del pulso molecular ajustando el valor de este coeficiente sin afectar la información transmitida [1].

**Tabla 3.6. Resultados del pulso de retardo del escenario 2 con distancias diferentes y dos valores de coeficientes de difusión [1].**

Distancia entre nodos ( $\mu m$ )	Coeficiente de difusión ( $nm^2/ns$ )	Pulso de retardo (s) (Simulación)	Pulso de retardo (s) (Expresión Analítica)
0,4	1	0,02653	0,02666
0,8	1	0,10613	0,10666
1,2	1	0,23880	0,24000
1,6	1	0,42454	0,42666
2,1	1	0,73134	0,73500
0,4	10	0,00265	0,00266
0,8	10	0,01061	0,01066
1,2	10	0,02388	0,02400
1,6	10	0,04245	0,04266
2,1	10	0,07313	0,07350

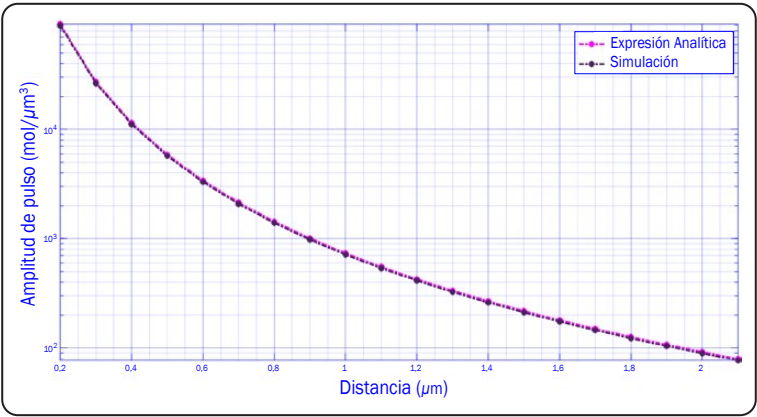
### 3.2.2.3 Amplitud máxima de pulso

En este apartado se han realizado múltiples simulaciones con modificaciones en la distancia entre el transmisor y el receptor, abarcando un rango desde  $0,1 \mu m$  hasta  $2,1 \mu m$ , con incrementos de  $0,1 \mu m$ . A continuación, se presenta la curva resultante que resalta estos cambios [1].

En la Figura 3.31, se muestra la amplitud del pulso que llega al receptor, y es importante destacar que, a diferencia del pulso de retardo, esta amplitud no está influenciada por el coeficiente de difusión del medio de comunicación. Esto significa que el coeficiente de difusión no ejerce

ningún efecto sobre la atenuación de los pulsos moleculares en el espacio como detalla la Ecuación 3.4  $\left(C_{max} = \left(\frac{3}{2\pi e}\right)^{3/2} \frac{Q}{r^3}\right)$ .

Para una distancia de 0,2  $\mu m$ , la amplitud es de 9.189 moléculas, mientras que para la distancia más lejana de 2,1  $\mu m$ , la amplitud se reduce a 75 moléculas (Tabla 3.7). Esta tasa de absorción de moléculas en el receptor refleja cuántas moléculas se puede captar en promedio por unidad de tiempo en relación a la distancia entre los nodos. Estos resultados se logran por aplicación del principio de la técnica de modulación BCSK, que permite controlar la concentración de moléculas en el pulso para transmitir información. Este hecho aventaja la factibilidad de difusión en el medio de transmisión para propagar la información de manera efectiva [1].



**Figura 3.31.** Amplitud máxima de pulso en función de la distancia en la simulación del escenario 2 [1].

**Tabla 3.7.** Resultados de la amplitud máxima de pulso del escenario 2, determinados mediante diferentes distancias y contrastados con sus contrapartes de la expresión analítica [1].

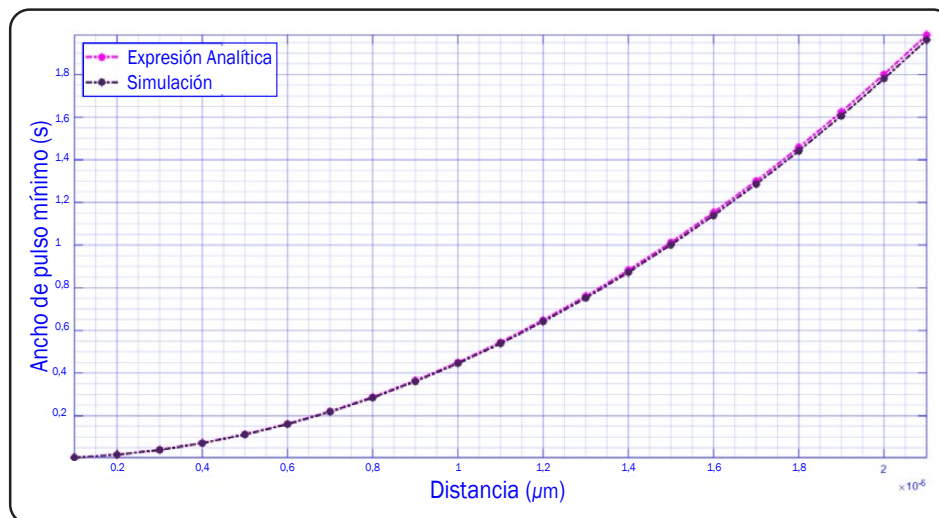
Distancia entre nodos (μm)	Coficiente de difusión (nm²/ns)	Amplitud máxima de pulso (mol/μm³) (Simulación)	Amplitud máxima de pulso (mol/μm³) (Expresión Analítica)
0,2	1	9.189,74	9.201,72
0,4	1	7.491,76	7.502,34
0,6	1	3.384,83	3.408,13
0,8	1	1.464,69	1.437,80
1	1	728,723	736,156
1,2	1	424,354	426,016
1,4	1	254,637	268,278
1,6	1	170,587	179,725

Distancia entre nodos ( $\mu m$ )	Coefficiente de difusión ( $nm^2/ns$ )	Amplitud máxima de pulso ( $mol/\mu m^3$ ) (Simulación)	Amplitud máxima de pulso ( $mol/\mu m^3$ ) (Expresión Analítica)
1,8	1	119,809	126,227
2	1	87,3414	92,0196
2,1	1	75,4479	79,4900

### 3.2.2.4 Ancho de pulso

Se llevan a cabo una serie de simulaciones para este análisis, así en tales simulaciones se modificó la distancia entre el transmisor y el receptor en un rango de  $0,1 \mu m$  hasta  $2,1 \mu m$ , con incrementos de  $0,1 \mu m$  [1].

La Figura 3.32 indica que el ancho del pulso experimenta un crecimiento notable a medida que se incrementa la distancia entre el transmisor y el receptor. Es importante notar que, dado que el coeficiente de difusión permanece constante, la variación en el ancho del pulso está principalmente relacionada con la distancia entre los nodos, como se define en la Ecuación 3.8 ( $t_w = \frac{0.4501}{D} r^2$ ). Por ejemplo, para una distancia de  $0,2 \mu m$ , el ancho del pulso es de  $17,80 ms$ , mientras que para una distancia de  $2,1 \mu m$ , este ancho se incrementa a  $1.962,45 ms$  (Tabla 3.8.) Este fenómeno refleja cómo la distancia influye en el tiempo necesario para transmitir un símbolo y, por ende, en la velocidad de la comunicación molecular [1].



**Figura 3.32.** Ancho de pulso mínimo en función de la distancia, establecido de la simulación del escenario 2 [1].

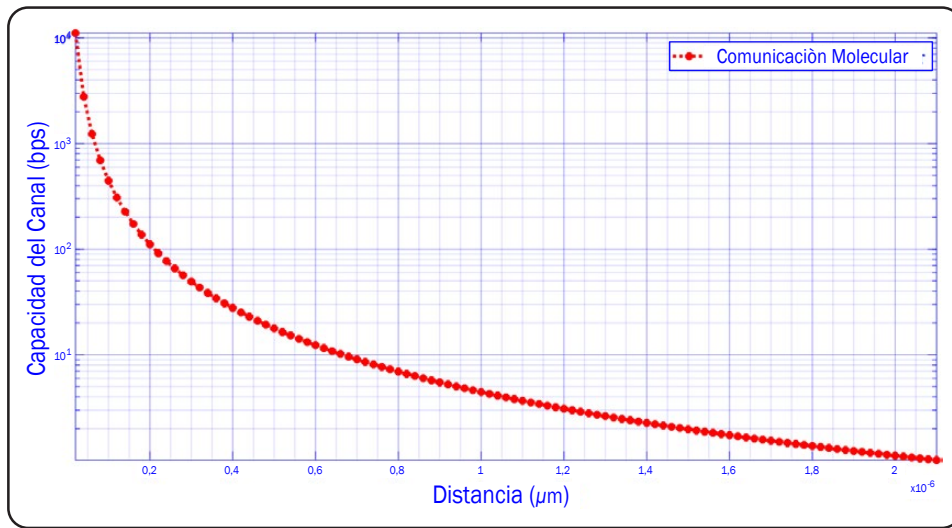
**Tabla 3.8. Resultados del ancho de pulso del escenario 2 con diferentes distancias y contrastados con los resultados de la expresión analítica [1].**

Distancia entre nodos ( $\mu m$ )	Coefficiente de difusión ( $nm^2/ns$ )	Ancho de pulso (ms) (Simulación)	Ancho de pulso (ms) (Expresión Analítica)
0,2	1	0,01780	0,01800
0,4	1	0,07120	0,07201
0,6	1	0,16020	0,16203
0,8	1	0,28480	0,28806
1	1	0,44500	0,45010
1,2	1	0,64080	0,64814
1,4	1	0,87220	0,88219
1,6	1	1,13920	1,15225
1,8	1	1,44180	1,45832
2	1	1,78000	1,80040
2,1	1	1,96245	1,98494

### 3.2.2.5 Capacidad del canal de transmisión

La capacidad máxima de transmisión de información en el canal de comunicación molecular se alcanza cuando la distancia entre el transmisor y el receptor es mínima, lo cual se especifica en la Figura 3.33. Este nivel de capacidad manifiesta que la cantidad máxima de información puede ser efectivamente transferida a través del canal de comunicación molecular. A medida que la distancia entre los dispositivos aumenta, se observa una disminución en la capacidad del canal de transmisión, lo que normalmente revelaría una reducción en la calidad de la comunicación. Sin embargo, la capacidad de captación de información del receptor para detectar señales incluso cuando son débiles por causa de la atenuación durante la transmisión, contribuye a mantener un nivel razonable de confiabilidad en la comunicación a pesar del aumento de la distancia. Esto implica la importancia de la sensibilidad del receptor en la eficacia del sistema de comunicación molecular [1].





**Figura 3.33.** Capacidad del canal de transmisión, obtenida de la simulación del escenario 2 [1].

### 3.2.3 Resultados escenario 3

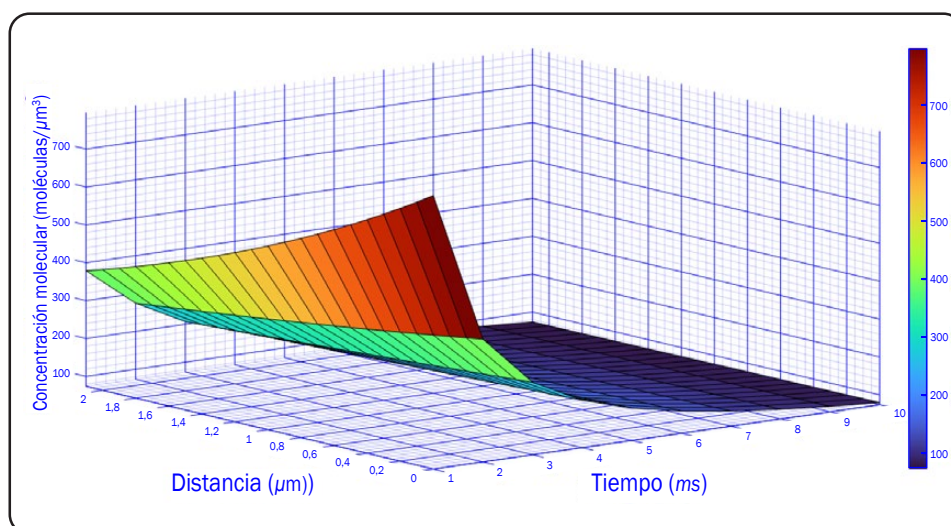
El esquema de simulación del escenario 3 define una modulación BMoSK, donde se emplean dos tipos diferentes de moléculas mensajeras para representar diversos símbolos. El transmisor libera un número constante de moléculas de tipo A o B para los valores de símbolo actuales de bit-1 y bit-0 respectivamente. Estos tipos de moléculas se diferencian por sus tamaños y coeficientes de difusión. Además, se considera un número umbral distinto de moléculas para cada tipo en la recepción. El escenario de simulación involucra un movimiento Browniano con arrastre constante de  $5 \times 10^{-4} \text{ m/s}$  y la configuración de que la nanomáquina receptora toma la información mediante el complejo ligando-receptor. A continuación, se indican los resultados obtenidos usando los parámetros generales de simulación mostrados en la Tabla 3.2, y se procede a realizar el análisis de las métricas de comunicación al igual que en el caso 1. Este enfoque proporciona la confirmación de que las métricas únicamente se ven afectadas por la distancia que existe entre los nodos de comunicación y el coeficiente de difusión [1].

#### 3.2.3.1 Concentración Molecular

Cada molécula sigue una trayectoria en el medio de transmisión conforme al modelo de difusión aleatoria con arrastre según el componente de movimiento. Si una molécula colisiona con el receptor, se registra que “la molécula ha interactuado con el receptor” y, en consecuencia, la molécula es eliminada del sistema en razón de la formación de un enlace químico entre la molécula mensajera y el receptor, lo que resulta en la absorción de la molécula por parte del receptor [1].

Los resultados de la simulación demuestran que cuando las moléculas del Tipo A son liberadas por el transmisor y llegan al receptor, son capturadas por este último a través de la unión química una vez que entran en contacto con su superficie. Estos hallazgos se reflejan en la gráfica de concentración molecular en el receptor [1].

La Figura 3.34 ilustra la concentración molecular en función del tiempo y la distancia, variando la posición del receptor según los valores definidos en la variable distancia del archivo *mol-example.cc*, abarcando distancias desde  $0,1\ \mu\text{m}$  hasta  $2,1\ \mu\text{m}$ . Es notable que el pico de concentración decrece a medida que se amplía la distancia de transmisión. Esta disminución se explica por el hecho de que, al principio, cuando la distancia es corta, las moléculas tienen un espacio limitado para moverse y la mayoría llega al receptor. No obstante, a medida que la distancia se incrementa, la cobertura de la transmisión se convierte en el factor principal que influye en el nivel de concentración molecular registrado en el receptor [1].



**Figura 3.34.** Concentración molecular en función de la distancia y el tiempo, resultante de la simulación del escenario 3 [1].

La Figura 3.35 a) muestra la salida de la simulación del escenario 3 en la distancia máxima definida por los parámetros generales de simulación de la Tabla 3.2. A esta distancia, el proceso de recepción es exitoso lo cual se notifica por la confirmación adecuada del mensaje. Este éxito se basa en el cumplimiento de los límites de Fick establecidos por el componente de especificidad, asegurando que las moléculas se propagan durante la difusión en el medio de comunicación y que llegan al receptor, donde se forma el complejo ligando-receptor. En contraste,

en la Figura 3.35 b), el simulador muestra “mensaje NO recibido correctamente” cuando la distancia supera el valor máximo predefinido de  $2,1 \mu\text{m}$  a  $2,2 \mu\text{m}$ . En esta situación, la concentración molecular no alcanza el umbral necesario para el proceso de unión, lo que reduce la probabilidad de impacto y hace que el componente de especificidad sea incapaz de transmitir la información a las capas superiores para la demodulación de la señal portadora [1].

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

a)

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

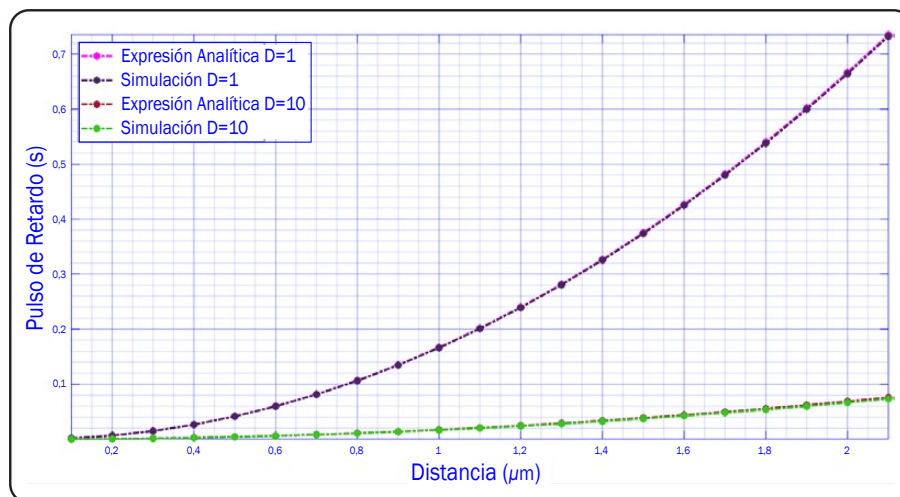
b)

**Figura 3.35.** Resultado de consola del escenario 3 en la recepción del mensaje molecular a diferentes distancias: a)  $2,1 \mu\text{m}$  y b)  $2,2 \mu\text{m}$  [1].

### 3.2.3.2 Pulso de retardo

Se produjeron simulaciones con variaciones en la distancia entre el transmisor y el receptor, en un rango de  $0,1\ \mu\text{m}$  a  $2,1\ \mu\text{m}$ , con incrementos de  $0,1\ \mu\text{m}$ . Seguidamente, se presentan las curvas que denotan los resultados obtenidos [1].

La Figura 3.36 muestra curvas que detallan los resultados del retardo del pulso en relación con la distancia, considerando dos conjuntos de coeficientes de difusión diferentes:  $D = 1\ \text{nm}^2/\text{ns}$  para el escenario de baja difusión y  $D = 10\ \text{nm}^2/\text{ns}$  para el escenario de alta difusión. En las curvas con  $D = 1\ \text{nm}^2/\text{ns}$ , se visualiza que esta métrica no se ve afectada por la velocidad del arrastre y que el retardo crece a medida que la distancia entre el transmisor y el receptor se incrementa. Este patrón es esperado en los sistemas de CM bajo difusión debido a la relación proporcional entre el receptor y la dinámica de difusión, que es cuadrática en función de la distancia, y se expresa por la Ecuación 3.3 ( $t_d = \frac{r^2}{6D}$ ). En resumen, el parámetro distancia influye en la eficacia de la comunicación. Por otro lado, las curvas correspondientes a  $D = 10\ \text{nm}^2/\text{ns}$ , indican que el tiempo necesario para que las moléculas de información atraviesen el canal de comunicación se reduce a medida que aumenta el coeficiente de difusión. Por lo tanto, en un intervalo de tiempo, más moléculas de información son captadas por el receptor. Esto ocurre porque la difusión en el medio de transmisión facilita la propagación de las moléculas desde el transmisor hacia el receptor, lo que resulta en una disminución del pulso de retardo [1].



**Figura 3.36.** Pulso de retardo en función de la distancia, determinado mediante la simulación del escenario 3 [1].



Los resultados correspondientes al pulso de retardo, considerando dos coeficientes de difusión diferentes se cuantifican en la Tabla 3.9. Cuando se fija el coeficiente de difusión en un valor de  $1 \text{ nm}^2/\text{ns}$  y con la distancia más lejana de  $2,1 \text{ }\mu\text{m}$ , el retardo previsto es de  $0,73207 \text{ s}$ . Si se establece el coeficiente de difusión en un valor de  $10 \text{ nm}^2/\text{ns}$  al mismo valor de distancia, el retardo se reduce a  $0,07320 \text{ s}$ . Teniendo en cuenta los dos valores, se afirma que el tiempo de retardo es significativamente menor cuando el coeficiente es mayor [1].

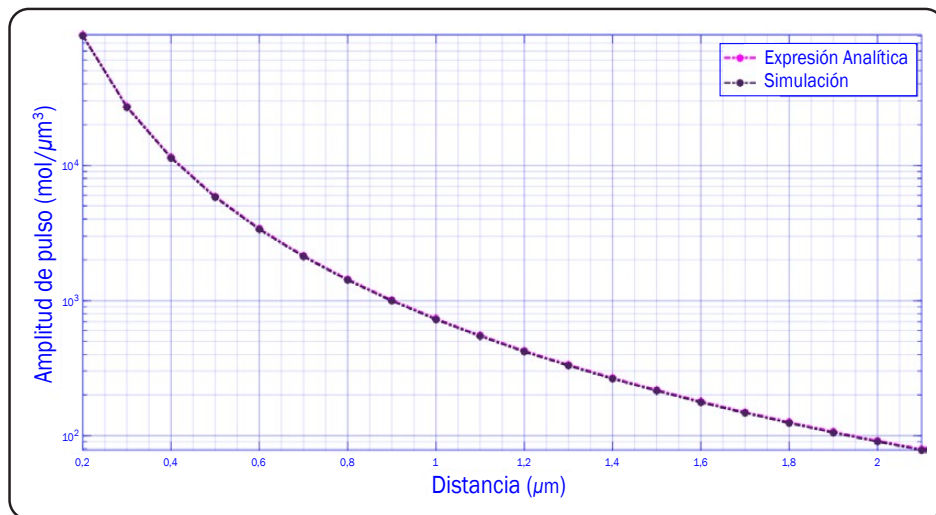
**Tabla 3.9. Resultados del pulso de retardo del escenario 3, a partir de distancias diferentes y dos valores de coeficientes de difusión [1].**

Distancia entre nodos ( $\mu\text{m}$ )	Coefficiente de difusión ( $\text{nm}^2/\text{ns}$ )	Pulso de retardo (s) (Simulación)	Pulso de retardo (s) (Expresión Analítica)
0,4	1	0,02656	0,02666
0,8	1	0,10624	0,10666
1,2	1	0,23904	0,24000
1,6	1	0,42496	0,42666
2,1	1	0,73207	0,73500
0,4	10	0,00265	0,00266
0,8	10	0,01062	0,01066
1,2	10	0,02390	0,02400
1,6	10	0,04249	0,04266
2,1	10	0,07320	0,07350

### 3.2.3.3 Amplitud máxima de pulso

La amplitud máxima del pulso se concreta a través de múltiples simulaciones en las que se varía la distancia entre el transmisor y el receptor en incrementos de  $0,1 \text{ }\mu\text{m}$ , abarcando un rango de  $0,1 \text{ }\mu\text{m}$  a  $2,1 \text{ }\mu\text{m}$  [1].

Los resultados de la amplitud máxima del pulso se esquematizan en la Figura 3.37 en función de diversas distancias definidas en el escenario. En este escenario con una distancia corta de  $0,2\ \mu m$ , la amplitud alcanza su punto máximo, con un valor de 9.193 moléculas en la curva resultante. Sin embargo, a medida que aumenta la distancia hasta llegar a los  $2,1\ \mu m$ , esta amplitud disminuye a 78 moléculas, lo cual se ilustra en la Tabla 3.10. Esto especifica que a medida que se incrementa la distancia de transmisión, manteniendo todas las demás condiciones constantes, la amplitud del pulso disminuye. Esto implica que el coeficiente de difusión no tiene ningún impacto en la atenuación de los pulsos moleculares en el espacio, como es notable en la Ecuación 3.4  $\left(C_{max} = \left(\frac{3}{2\pi e}\right)^{3/2} \frac{Q}{r^3}\right)$ . En consecuencia, se sugiere que la distancia entre el transmisor y el receptor no debería superar el valor establecido de  $2,1\ \mu m$  para garantizar un rendimiento óptimo en la comunicación [1].



**Figura 3.37.** Amplitud máxima de pulso en función de la distancia, definida mediante la simulación del escenario 3 [1].

**Tabla 3.10. Resultados de la amplitud máxima de pulso del escenario 3, obtenidos en base a diferentes distancias y contrastados con los resultados de la expresión analítica [1].**

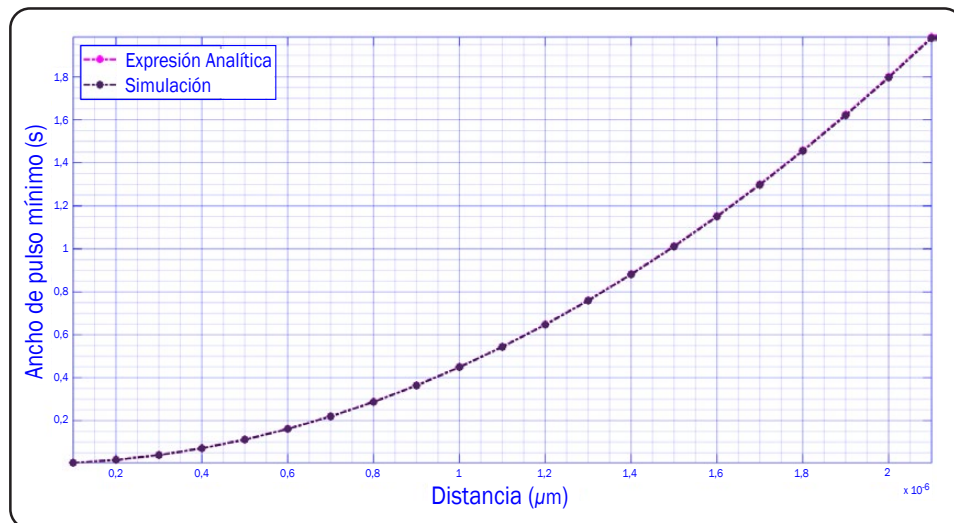
Distancia entre nodos ( $\mu m$ )	Coefficiente de difusión ( $nm^2/ns$ )	Amplitud máxima de pulso ( $mol/\mu m^3$ ) (Simulación)	Amplitud máxima de pulso ( $mol/\mu m^3$ ) (Expresión Analítica)
0,2	1	9.193,58	9.201,72
0,4	1	7.501,23	7.502,34
0,6	1	3.389,34	3.408,13
0,8	1	1.423,92	1.437,80
1	1	723,457	736,156
1,2	1	418,667	426,016
1,4	1	263,636	268,278
1,6	1	176,625	179,725
1,8	1	124,049	126,227
2	1	90,4321	92,0196
2,1	1	78,1186	79,4900

### 3.2.3.4 Ancho de pulso

Se realiza el análisis en base a simulaciones en las que se varía la distancia entre el transmisor y el receptor en un intervalo que abarca desde  $0,1 \mu m$  hasta  $2,1 \mu m$ , con aumentos de  $0,1 \mu m$  en cada iteración [1].

La Figura 3.38 revela que el ancho de pulso está sujeto a variaciones que depende de la distancia, y esto sucede por la duración de la señal de la molécula (o ligando) que se propaga en el medio de comunicación. Para una distancia de  $0,2 \mu m$ , el ancho de pulso es de  $17,96 ms$ , mientras que para la distancia más extensa de  $2,1 \mu m$ , este se incrementa a  $1.980,10 ms$ , lo que se establece en la Tabla 3.11. De acuerdo con la

Ecuación 3.8  $\left(t_w = \frac{0.4501}{D} r^2\right)$ , el ancho de pulso varía inversamente con el coeficiente de difusión y directamente con el cuadrado de la distancia, esta observación pone de manifiesto que a medida que la distancia entre los nodos crece, el ancho del pulso también experimenta un aumento significativo. Esta relación puntualiza cómo la distancia entre el transmisor y el receptor afecta la duración de los pulsos moleculares en el sistema de comunicación [1].



**Figura 3.38.** Ancho de pulso mínimo en función de la distancia, a partir de la simulación del escenario 3 [1].



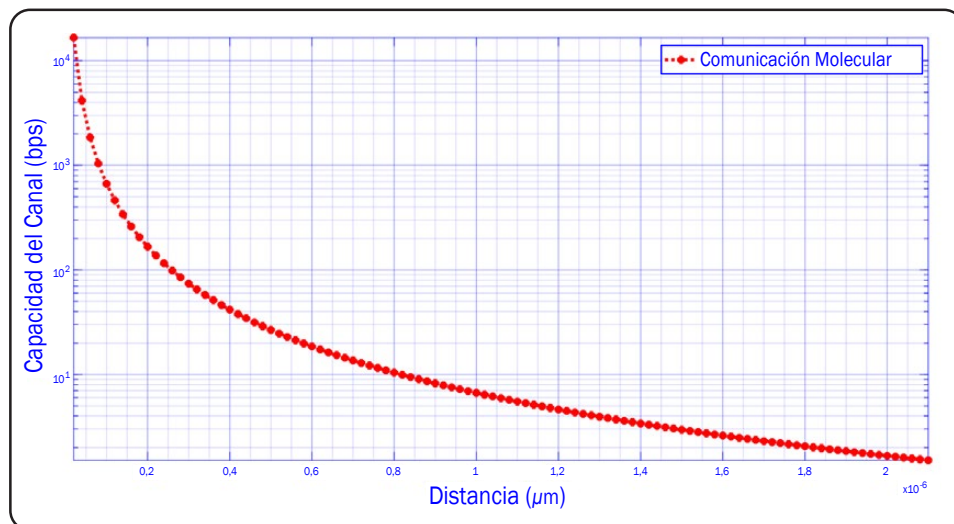
**Tabla 3.11. Resultados del ancho de pulso del escenario 3 con diferentes distancias y contrastados con los resultados de la expresión analítica [1].**

Distancia entre nodos ( $\mu m$ )	Coefficiente de difusión ( $nm^2/ns$ )	Ancho de pulso ( $ms$ ) (Expulsión)	Ancho de pulso ( $ms$ ) (Expresión Analítica)
0,2	1	0,01796	0,01800
0,4	1	0,07184	0,07201
0,6	1	0,16164	0,16203
0,8	1	0,28736	0,28806
1	1	0,44900	0,45010
1,2	1	0,64656	0,64814
1,4	1	0,88004	0,88219
1,6	1	1,14944	1,15225
1,8	1	1,45476	1,45832
2	1	1,79600	1,80040
2,1	1	1,98010	1,98494

### 3.2.3.5 Capacidad del canal de transmisión

Empleando varias simulaciones en las que se modificó la distancia entre el transmisor y el receptor en un intervalo entre  $0,1 \mu m$  hasta  $2,1 \mu m$ , incrementándose en pasos de  $0,1 \mu m$ , se podrá realizar un análisis completo. Después de evaluar las métricas mencionadas previamente, en la Figura 3.39 se representa la capacidad del canal de transmisión [1].

Tanto el coeficiente de difusión como la cantidad de moléculas transmitidas son factores fundamentales que inciden en la capacidad del canal de comunicación. Esto se refleja en la Figura 3.39, que ilustra cómo la capacidad del canal de transmisión varía en función de la distancia. Se puede notar que la capacidad del canal de comunicación alcanza su punto máximo en las distancias iniciales. La razón detrás de esto radica en la rápida velocidad de arrastre, que permite que las moléculas de información arriben rápidamente al receptor. Es notable destacar que un incremento en el número de moléculas captadas por el receptor a lo largo del tiempo resulta en un aumento de la capacidad del canal de transmisión. En este contexto, se ha eliminado la influencia de la velocidad de reacción y degradación, asumiendo que la reacción química es unidireccional y que las moléculas mensajeras no se degradan mientras se propagan. Bajo estas condiciones, las moléculas mensajeras reaccionan con el receptor al alcanzar su superficie, lo que se refleja en la misma figura [1].



**Figura 3.39.** Capacidad del canal de comunicación de la simulación del escenario 3 [1].



## Referencias bibliográficas

- [1] S. D. Armas Benavides, “*Análisis de parámetros de transmisión en sistemas de comunicaciones moleculares mediante diferentes condiciones comunicacionales en la transmisión y recepción.*”, Riobamba: Universidad Nacional de Chimborazo, 2023.
- [2] “*IEEE Recommended Practice for Nanoscale and Molecular Communication Framework*”, IEEE Std 1906.1-2015, pp. 1–64, 2016.
- [3] “*IEEE Standard Data Model for Nanoscale Communication Systems*”, IEEE Std 1906.1.1-2020, pp. 1–142, 2020.
- [4] J. Crank, “*The mathematics of diffusion*”, Clarendon Press, Oxford, vol. 2nd Edition, 1975.
- [5] R. M. Corless, G. H. Gonnet, D. E. G. Hare, D. J. Jeffrey y D. E. Knuth, “*On the Lambert W function*”, *Advances in Computational Mathematics*, vol. 5, no. 1, pp. 329–359, 1996.
- [6] I. Llatser, E. Alarcón y M. Pierobony, “*Diffusion-based channel characterization in molecular nanonetworks*”, Shanghai, China: IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS), pp. 467–472, 2011.
- [7] M. C. Gursoy, E. Basar, A. E. Pusane, and T. Tugcu, “Index modulation for molecular communication via diffusion systems,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 67, no. 5, pp. 3337–3350, 2019.
- [8] G. M. Karthiik and S. Joshi, “A novel hybrid modulation scheme for molecular communication: Performance analysis,” *IEEE Wirel. Commun. Lett.*, vol. 11, no. 6, pp. 1234–1238, 2022.

- [9] L. Shi and L.-L. Yang, "Equalisation and performance of diffusive molecular communication systems with binary molecular-shift keying modulation," *IET Commun.*, vol. 14, no. 4, pp. 549–555, 2020.
- [10] K. Anwar and M. Hasan, "Magnetic hyperthermia using g-protein coating in molecular communications," in *2021 IEEE Symposium On Future Telecommunication Technologies (SOFTT)*, 2021, pp. 57–62.
- [11] L. Shi, "Molecular transceiver design and performance study in diffusive molecular communications," University of Southampton, 2020.
- [12] D. Bi, A. Almpanis, A. Noel, Y. Deng, and R. Schober, "A survey of molecular communication in cell biology: Establishing a new hierarchy for interdisciplinary applications," *IEEE Commun. Surv. & Tutorials*, 2021.
- [13] S. Huang, L. Lin, J. Xu, W. Guo, and H. Yan, "Molecular communication via subdiffusion with a spherical absorbing receiver," *IEEE Wirel. Commun. Lett.*, vol. 9, no. 10, pp. 1682–1686, 2020.
- [14] A. Katkar and V. Dongre, "Investigating the Impact of Distance on the Reception in Molecular Communication," in *International Conference on Intelligent Computing and Networking*, 2023, pp. 143–155.
- [15] L. Chouhan and P. K. Upadhyay, "Effect of time-dependent drift and diffusion in molecular communication systems," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 26, no. 4, pp. 778–782, 2022.
- [16] J. Zhu, C. Bai, Y. Zhu, X. Lu, and K. Wang, "Evolutionary generative adversarial network based end-to-end learning for MIMO molecular communication with drift system," *Nano Commun. Netw.*, vol. 37, p. 100456, 2023.

- [17] Z. Cheng, J. Yan, J. Sun, Y. Tu, and K. Chi, "Joint optimizations of relays locations and decision threshold for multi-hop diffusive mobile molecular communication with drift," *IEEE Trans. Nanobioscience*, vol. 21, no. 3, pp. 454–465, 2022.
- [18] J. T. Gómez, K. Pitke, L. Stratmann, and F. Dressler, "Age of information in molecular communication channels," *Digit. Signal Process.*, vol. 124, p. 103108, 2022.
- [19] A. K. Shrivastava, D. Das, and R. Mahapatra, "Particle-based simulation of the differential detectors for mobile molecular communication," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 25, no. 9, pp. 3008–3012, 2021.
- [20] H. U. Ozdemir, H. I. Orhan, M. Turan, B. Büyüktaş, and H. B. Yilmaz, "Estimating Capture Probabilities for Complex Topologies in 2D Molecular Communication via Diffusion Channel using Artificial Neural Networks," in *2021 IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking (BlackSeaCom)*, 2021, pp. 1–6.
- [21] M. Kuscü and O. B. Akan, "Detection in molecular communications with ligand receptors under molecular interference," *Digit. Signal Process.*, vol. 124, p. 103186, 2022.
- [22] A. R. Emirdagi, M. S. Kopuzlu, M. O. Araz, and M. Kuscü, "Affinity-Division Multiplexing for Molecular Communications with Promiscuous Ligand Receptors," *arXiv Prepr. arXiv2305.01546*, 2023.
- [23] M. Kuscü, "Adaptive Molecular Communication Receivers with Tunable Ligand-Receptor Interactions," *arXiv Prepr. arXiv2305.06481*, 2023.

- [24] Y. Cevallos *et al.*, "A brief review on dna storage, compression, and digitalization," *Nano Commun. Netw.*, vol. 31, p. 100391, 2022.
- [25] Y. Cevallos *et al.*, "On the efficient digital code representation in DNA-based data storage," in *Proceedings of the 7th ACM International Conference on Nanoscale Computing and Communication*, 2020, pp. 1–7.
- [26] J. Crank, "The mathematics of diffusion", Clarendon Press, Oxford, vol. 2nd Edition, 1975.
- [27] R. M. Corless, G. H. Gonnet, D. E. G. Hare, D. J. Jeffrey y D. E. Knuth, "On the Lambert W function", *Advances in Computational Mathematics*, vol. 5, no. 1, pp. 329–359, 1996.
- [28] I. Llatser, E. Alarcón y M. Pierobony, "Diffusion-based channel characterization in molecular nanonetworks", *Shanghai, China: IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS)*, pp. 467–472, 2011, doi: 10.1109/INFCOMW.2011.5928858.
- [29] R. M. Corless, G. H. Gonnet, D. E. G. Hare, D. J. Jeffrey y D. E. Knuth, "On the Lambert W function", *Advances in Computational Mathematics*, vol. 5, no. 1, pp. 329–359, 1996.
- [30] I. Llatser, E. Alarcón y M. Pierobony, "Diffusion-based channel characterization in molecular nanonetworks", *Shanghai, China: IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS)*, pp. 467–472, 2011.







El sello editorial de la Corporación Ecuatoriana para el Desarrollo de la Investigación y la Academia - CEDIA, nace con la finalidad de apoyar a la creación y la publicación de resultados, investigaciones y procesos académicos, que fomenten el desarrollo de la ciencia y la innovación a nivel nacional e internacional.

El marco normativo de los estándares de la familia IEEE 1906 puede ser comparado con las reglas de comunicación en redes de computadoras proporcionadas por el modelo ISO/OSI (International Standard Organization/Open System Interconnection). En razón del tamaño de los elementos que intervienen en una comunicación a nanoescala, estos son más simples y menos fáciles de ser programados (en el sentido, que no obedecerían exactamente la compilación de una sintaxis de programación) que sus contrapartes a macroescala debido a que el marco normativo de estos estándares representa elementos de la naturaleza, propios de los sistemas biológicos.



ISBN: 978-9942-7178-8-7



9 789942 717887