



Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

---

Facultad de Ciencias Físico Matemáticas

---

ESTUDIO DEL PASO DE IONES EN LOS CANALES DE  
SODIO Y POTASIO DEBIDO AL EFECTO TÚNEL

Tesis presentada al

**Colegio de Física**

como requisito parcial para la obtención del grado de

**LICENCIADO EN FÍSICA**

por

Luis Enrique Muñoz Juárez

Asesorado por

Dr. Zepeda Fernández Cristian Heber

Puebla Pue.  
30 de abril de 2025





Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

---

Facultad de Ciencias Físico Matemáticas

---

ESTUDIO DEL PASO DE IONES EN LOS CANALES DE  
SODIO Y POTASIO DEBIDO AL EFECTO TÚNEL

Tesis presentada al

**Colegio de Física**

como requisito parcial para la obtención del grado de

**LICENCIADO EN FÍSICA**

por

Luis Enrique Muñoz Juárez

Asesorado por

Dr. Zepeda Fernández Cristian Heber

Puebla Pue.  
30 de abril de 2025



**Título:** ESTUDIO DEL PASO DE IONES EN LOS CANALES DE SODIO Y POTASIO DEBIDO AL EFECTO TÚNEL

**Estudiante:** LUIS ENRIQUE MUÑOZ JUÁREZ

COMITÉ

---

Dr. Novales Sánchez Héctor  
Presidente

---

Dr. Rivas Silva Juan Francisco  
Secretario

---

Dr. Hernández López Javier Miguel  
Vocal

---

Dr. Rodríguez Cahuantzi Mario  
Vocal

---

Dr. Zepeda Fernández Cristian Heber  
Asesor



# Índice general

<b>Resumen</b>	<b>IX</b>
<b>Introducción</b>	<b>XI</b>
<b>1. Fundamentos de la Membrana Celular</b>	<b>1</b>
1.1. Modelo de Mosaico Fluido . . . . .	1
1.2. Proceso de Difusión Simple . . . . .	2
1.3. Canales Iónicos . . . . .	3
1.3.1. Canal de Potasio . . . . .	5
1.3.2. Canal de Sodio . . . . .	5
1.3.3. Importancia de las Propiedades Biofísicas de los Canales Dependientes de Voltaje . . . . .	6
1.4. Estructura de los Canales Iónicos . . . . .	6
1.4.1. Los Canales de Potasio en Cristalografía de Rayos X . . . . .	8
1.4.2. Compuerta Extracelular . . . . .	8
1.4.3. Compuerta Intracelular . . . . .	9
<b>2. Fundamentos del Efecto Túnel</b>	<b>11</b>
2.1. La Ecuación de Schrödinger y el Origen del Efecto Túnel . . . . .	12
2.1.1. Consideraciones en la Ecuación de Schrödinger . . . . .	12
2.1.2. Aproximación WKB y Ecuación de Transferencia para un Potencial Triangular . . . . .	13
<b>3. Análisis del Paso de Iones en Canales de Sodio y Potasio Mediante el Efecto Túnel</b>	<b>15</b>
3.1. Efectos de las disfunciones de los canales iónicos de Potasio y Sodio . . . . .	16
3.2. Evaluación de la Energía Cinética de los Iones . . . . .	16
3.3. Modelado de la Barrera Energética . . . . .	17
3.3.1. Cálculo de la Región $E < V(x)$ . . . . .	19
3.4. Análisis de la Variación de la Longitud de Onda . . . . .	20
<b>4. Resultados</b>	<b>23</b>
<b>5. Conclusión</b>	<b>27</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>29</b>



# Agradecimientos

**Haz sólo lo que amas y serás feliz, y el que hace lo que ama, está benditamente  
condenado al éxito.**

*– Facundo Cabral*

Quisiera comenzar esta tesis agradeciendo a mi familia, a mi mamá Norma por enseñarme a usar el corazón en todo lo que hago, gracias por llenarme de amor y ser mi mejor compañía, a Enrique, mi papá, gracias por heredarme tu nobleza y enseñarme que siempre se puede hacer lo correcto. También me gustaría agradecer a Carlos y Diego por ser los mejores hermanos conmigo y apoyarme en los momentos difíciles, mis verdaderos leales. Debo agradecer a mi hermanita Isis por ser mi motivación para seguir superándome y ser un buen ejemplo para ella, y claro, debo agradecer a Dios por darme la oportunidad de compartir mi vida con ellos.

También quiero agradecer a mis tíos y primos por apoyarme y alentarme en mis estudios, en especial a mis padrinos Beto y Magda por estar siempre atentos de mí, a mis tía Yanhin e Iliana por recibirme siempre en su casa, a mi tío Oscar por compartirme su visión del mundo, a mi tío Javier por enseñarme el valor de la familia y a mi tío Ángel por compartirme su carisma y por darme un camino de bien; a Felipe y Gisela, mis abuelos, les agradezco por enseñarme a trabajar duro y honradamente.

Me gustaría agradecer a mi novia y amigos por acompañarme en estos años de carrera y ayudarme a sobrellevar mis días con buen humor. Para terminar, quiero agradecer a todos aquellos profesores que me alentaron a estudiar y alcanzar mi sueño de estudiar esta maravillosa carrera, en especial a mi tutor Cristian Heber por el apoyo en la recta final de mi licenciatura.

Dedicado a Layla, que me da paz



# Resumen

En este trabajo se aplica el fenómeno cuántico conocido como efecto túnel al campo de la biología celular, enfocándose en el transporte de iones entre los medios extracelular e intracelular a través de los canales iónicos. En el primer capítulo se realiza un estudio sobre la estructura general de las células para comprender su comportamiento físico, su composición y los elementos que facilitan el transporte de iones, además se detallan las características principales de los canales iónicos de potasio y sodio.

El segundo capítulo introduce los conceptos físicos necesarios para comprender el efecto túnel, proporcionando las bases teóricas y matemáticas para desarrollar el cálculo de la probabilidad de transmitancia y reflectancia de los iones a través de la membrana celular.

Finalmente, en el último capítulo se presenta un modelo que describe los potenciales de las barreras que impiden el paso de los iones y se evalúa la energía cinética de estos en la sangre. A partir de estos elementos, se realiza el cálculo de la transmitancia y reflectancia de los iones a través de un canal.

Si bien los resultados indican que la probabilidad de transmitancia llega a ser casi nula en algunos casos, en dichos casos la probabilidad de reflectancia no lo es. Esto sugiere que los efectos cuánticos no son despreciables para este proceso biológico.

**Palabras clave:** *Efecto tunel, iones, Membrana celular, Potencial de membrana, Física cuántica, Patologías.*



# Introducción

En 1926, Erwin Schrödinger publicó una serie de artículos sobre la mecánica ondulatoria, inspirándose en la hipótesis de De Broglie sobre el comportamiento dual de la materia. Esta hipótesis afirma que toda materia presenta características tanto ondulatorias como corpusculares. En estos artículos, Schrödinger postuló una ecuación que rige la propagación de la materia como onda. La mecánica ondulatoria es una formulación de la mecánica cuántica que explica el comportamiento de la materia y la radiación en escalas atómicas y subatómicas. En estas escalas, la materia exhibe comportamientos peculiares, y la mecánica cuántica presenta consecuencias no intuitivas, entre las cuales se encuentra el efecto túnel.

En 1927, Friedrich Hund describió por primera vez este efecto, explicando cómo las partículas pueden atravesar barreras de potencial sin tener la energía clásica suficiente para superarlas. El fenómeno del efecto túnel es aprovechado en diversas ramas, como la electrónica para crear diodos y transistores, así como en informática, química, medicina y biología. Aunque el efecto túnel es más comúnmente asociado con partículas subatómicas como los electrones, no existe una restricción para la escala en la que la mecánica cuántica deja de ser válida. Por lo tanto, el efecto túnel podría aplicarse a una escala mayor, como en el caso de los iones.

Tradicionalmente, el transporte de iones en la membrana celular se ha entendido mediante modelos que implican la difusión pasiva a través de canales iónicos específicos o la acción de bombas de iones que utilizan energía para transportar selectivamente iones a través de la membrana. Estos modelos son eficientes basados en la mecánica clásica, sin embargo, se puede usar la mecánica cuántica para estos modelos bajo la siguiente hipótesis.

Considerando un ion viajando en la sangre impactando con una célula como un análogo a un electrón entrando a una barrera de potencial podemos estudiar el transporte de iones a través de la membrana celular, planteando preguntas sobre la probabilidad de ocurrencia en los iones vitales para el funcionamiento celular y las posibles consecuencias en las células.

**Objetivo general** El propósito de esta tesis es estudiar y describir el efecto túnel de los iones de sodio y potasio en la membrana celular a través de los canales iónicos.

## Objetivos Específicos

1. Analizar estudios clave que abordan los fundamentos teóricos y las implicaciones biológicas sobre el efecto túnel de los iones de sodio y potasio.
2. Calcular la energía cinética de los iones de sodio y potasio en la sangre.
3. Calcular la transmisión de los iones a través de la membrana celular considerando la energía cinética de la sangre.
4. Generar una guía para estudios posteriores en los canales iónicos.



# Capítulo 1

## Fundamentos de la Membrana Celular

Para explicar el efecto cuántico primero es necesario que se comprenda el transporte de iones de manera clásica, por lo que en este capítulo se explorará en detalle los fundamentos de la membrana celular y el transporte de iones. Primero se examina el modelo de mosaico fluido y las estructuras principales que conforman la membrana para así adentrarse en el estudio del transporte de iones discutiendo el mecanismo tradicional de difusión pasiva. Por último, se hablará en detalle sobre la topología de los canales iónicos.

La membrana celular o membrana citoplasmática actúa como una barrera que delimita la célula para controlar el intercambio de sustancias entre su medio interior y exterior. Para que la célula responda de manera adecuada a estímulos y lleve a cabo un intercambio preciso de sustancias, la membrana debe estar compuesta por lípidos, proteínas y carbohidratos [1]. Para describir su comportamiento es necesario introducir el modelo de mosaico fluido.

### 1.1. Modelo de Mosaico Fluido

Este es el modelo predominante para describir la estructura de la membrana, el cual fue propuesto por primera vez en 1972 por Singer y Nicholson [2]. Según este modelo, la membrana plasmática se considera un mosaico de componentes, principalmente fosfolípidos, colesterol y proteínas, los cuales tienen la capacidad de moverse fluida y libremente en el plano de la membrana. Esta fluidez permite que la membrana celular sea dinámica y se adapte a cambios en el entorno celular.

**Fosfolípidos:** Los Fosfolípidos son lípidos anfipáticos [3], lo que significa que tienen una cabeza hidrofílica y una cola hidrofóbica. Los fosfolípidos se organizan de manera que las cabezas hidrofílicas estén en contacto con el medio acuoso dentro y fuera de la célula, mientras que las colas hidrofóbicas se orientan hacia el interior de la membrana formando una bicapa lipídica, esta disposición permite que los fosfolípidos formen una barrera impermeable (membrana celular) que separa los compartimentos intra y extracelular.

**Colesterol:** El colesterol es otro componente importante de la membrana celular que influye en su fluidez y estabilidad. Se encuentra anclado estratégicamente en las membranas de cada célula donde modula la fluidez, permeabilidad y en consecuencia su función [4], las estructuras de colesterol se encuentran intercaladas entre los fosfolípidos de esta manera mantienen la membrana en un estado intermedio entre la rigidez y la fluidez excesiva. En condiciones de temperatura ambiente, el colesterol evita que los fosfolípidos se apilen demasiado cerca uno del otro, lo que

podría hacer que la membrana sea demasiado rígida. Por otro lado, en temperaturas más bajas, el colesterol impide que los fosfolípidos se agrupen, lo que evita la cristalización y mantiene la membrana en un estado fluido.

**Proteínas de la Membrana:** Las proteínas son el segundo componente principal de las membranas plasmáticas, y se clasifican en dos categorías importantes: proteínas integrales y proteínas periféricas [2].

Las proteínas periféricas se asocian temporalmente con la superficie externa o interna de la membrana sin penetrar en la bicapa lipídica. Estas proteínas cumplen con las funciones de comunicación celular y transducción de señales, participando en la respuesta a estímulos externos y en la transmisión de mensajes hacia el interior de la célula.

En el caso de las proteínas integrales, estas se insertan en la bicapa lipídica y algunas de ellas atraviesan completamente la membrana, estando expuestas tanto al medio extracelular como al intracelular, por lo que también se conocen como proteínas transmembrana y cumplen una amplia variedad de funciones como la formación de canales iónicos, la transducción de señales y el reconocimiento celular.

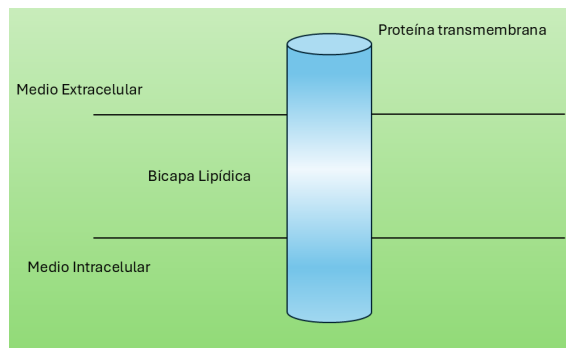


Figura 1.1: Representación esquemática de una proteína transmembrana

Como se mencionó, las proteínas transmembrana atraviesan la bicapa lipídica, para construir un canal iónico estas proteínas se agrupan en subunidades proteicas formando una estructura circular cilíndrica alrededor de un poro central, más adelante se detallará esta estructura y el proceso de intercambio de iones a través de estos canales.

## 1.2. Proceso de Difusión Simple

El transporte de iones a través de la membrana celular se lleva a cabo principalmente mediante dos mecanismos tradicionales: difusión simple y transporte activo. Estos mecanismos son esenciales para mantener la homeostasis celular y permitir que las células respondan adecuadamente a los cambios en su entorno.

El transporte activo es un proceso que requiere el gasto de energía para transportar los iones en contra de su gradiente de concentración, es decir, desde una región de baja concentración a una de alta concentración. Este proceso es llevado a cabo por proteínas transportadoras llamadas bombas iónicas, que utilizan la energía derivada de la hidrólisis de ATP (trifosfato de adenosina) para impulsar el movimiento de los iones a través de la membrana celular [5].

La difusión simple por otro lado es un proceso pasivo por lo que no requiere energía adicional, en este caso los iones se mueven a favor de su gradiente de concentración [6], mejor dicho, desde una región de alta concentración a una de baja concentración, hasta que se alcanza el equilibrio.

Es razonable pensar que en algunos casos los iones podrían atravesar la bicapa lipídica de la membrana sin la necesidad de los canales iónicos o de las bombas iónicas, como se mencionó

anteriormente, los fosfolípidos de las membranas plasmáticas son anfipáticos, lo que significa que tienen una parte hidrofóbica y otra hidrofílica. Al organizarse en la bicapa, las partes hidrofóbicas se agrupan en el centro, formando un núcleo que facilita el paso de ciertas sustancias mientras bloquea a otras, por esta razón las moléculas polares y cargadas enfrentan mayores dificultades para cruzar la membrana [7]. Las moléculas polares pueden interactuar fácilmente con los grupos de cabezas cargadas en la parte externa de la membrana, pero tienen problemas para atravesar el núcleo hidrofóbico. Por ejemplo, aunque el agua es una molécula pequeña y no tiene una carga completa, solo puede atravesar la membrana de manera limitada y a baja velocidad.

En cuanto a los iones, aunque su tamaño es adecuado para atravesar la membrana estos se ven acompañados de una capa de agua que los rodea (capa de hidratación), lo que impide su paso por difusión simple [7]. Esto significa que iones como el sodio, potasio, calcio y cloruro no pueden cruzar la membrana de manera significativa sin la ayuda de los canales iónicos o de las bombas iónicas. Ahora, aunque el paso de los iones es efectivo a través de estas estructuras, la dinámica es diferente en cada una de ellas, en el caso de las bombas iónicas el proceso de intercambio de iones no es selectivo por lo que no es conveniente un estudio del efecto túnel para este proceso, por eso los canales iónicos representan la estructura principal en el intercambio de iones de manera eficiente por medio de difusión simple por lo que se tomarán como principal estudio en este trabajo.

### 1.3. Canales Iónicos

En esta sección se examinarán los canales iónicos de manera general enfatizando su papel en el transporte de iones a través de las membranas celulares. Estas estructuras especializadas permiten el paso selectivo de iones, facilitando funciones vitales como la transmisión de señales eléctricas, la regulación de la concentración de iones y el mantenimiento del potencial de membrana [8]. Estos canales también pueden considerarse una estructura excitable, ya que responden a estímulos como cambios en el potencial de membrana, la presencia de neurotransmisores, estímulos químicos o deformaciones mecánicas, esta respuesta se trata sobre la apertura o cierre del canal. Cuando el poro se abre, presenta la importante propiedad de la permeabilidad selectiva, permitiendo la translocación selectiva de iones como sodio ( $Na^+$ ), potasio ( $K^+$ ), calcio ( $Ca^{2+}$ ) y cloruro ( $Cl^-$ ), este flujo ocurre a una tasa extremadamente alta cercana al límite de difusión ( $10^6$  iones por segundo) [9], de esta manera se mantiene el equilibrio electroquímico además de apoyar procesos como la transmisión de impulsos nerviosos.

Aunque en esta parte nos enfocaremos en los aspectos generales de su función, más adelante se profundizará en su estructura molecular, examinando cómo las diferentes subunidades y dominios conforman los poros selectivos por donde pasan los iones.

En primer lugar, los canales iónicos están diseñados para reconocer y seleccionar iones específicos, lo que se logra mediante interacciones electrostáticas precisas entre los iones y los grupos cargados que se encuentran en las paredes internas del canal [8]. Estos grupos cargados, como ciertos aminoácidos, pueden atraer iones con cargas opuestas. Por ejemplo, si el canal contiene residuos con carga negativa, atraerá iones positivos como el sodio ( $Na^+$ ) o el potasio ( $K^+$ ).

Además, los canales iónicos modifican el ambiente interno de tal manera que se vuelve energéticamente favorable para el paso de los iones. Esto ocurre porque los canales reducen la barrera energética que enfrentan los iones al remover las moléculas de agua que rodean al ion (capa de hidratación) cuando el ion se aproxima al canal, este genera un camino donde las interacciones entre el ion y los residuos presentes en el canal son favorables.

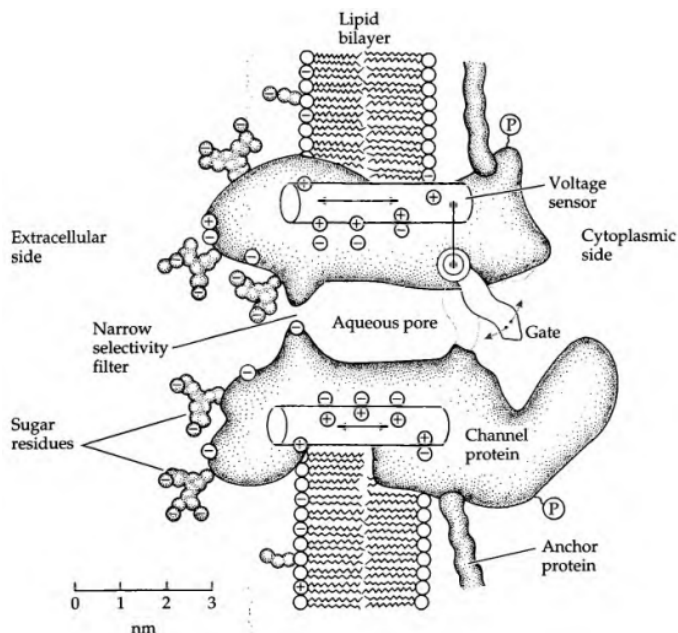


Figura 1.2: Ejemplo de un canal iónico. Tomado de [8]

La estructura básica de un canal iónico incluye un poro central, una región de la puerta, sensores de voltaje (en algunos casos), y regiones de la pasarela o vestíbulos. El paso de los iones se logra a través del poro central que forma un conducto que atraviesa la membrana celular. La selectividad iónica del canal se debe al filtro de selectividad, se trata de una región estrecha del poro que discrimina entre diferentes iones en función de su tamaño y carga, además este filtro es el encargado de remover la capa de hidratación de los iones. Los procesos de apertura y cierre de los canales iónicos están dirigidos por mecanismos conocidos como "puertas", estas puertas pueden responder a diversos estímulos, como cambios en el voltaje de la membrana (canales dependientes de voltaje), la unión de moléculas señalizadoras (canales dependientes de ligando), o fuerzas mecánicas (canales mecanosensibles), en el caso de los canales dependientes de voltaje cuentan con segmentos helicoidales con residuos de aminoácidos cargados positivamente que detectan los cambios en el potencial de membrana y desencadenan la apertura o el cierre del canal, además los canales iónicos poseen vestíbulos tanto en el lado intracelular como en el extracelular del poro que actúan como zonas de entrada y salida para los iones, además, muchos canales poseen un vestíbulo interno que permite la acumulación de iones antes de que pasen por alguna de las compuertas del canal.

El funcionamiento de los canales iónicos implica varios pasos interrelacionados. En primer lugar, cuando se detecta el estímulo adecuado, como un cambio en el voltaje o la unión de un ligando, el canal experimenta un cambio conformacional que abre su poro, permitiendo el paso de iones. Este proceso depende de la selectividad del canal, que asegura que solo ciertos iones puedan atravesarlo. Por ejemplo, los canales de potasio permiten el paso de  $K^+$ , pero excluyen otros iones como  $Na^+$ , debido a diferencias en tamaño y carga. Además, los iones deben perder parcialmente su capa de hidratación para atravesar el filtro de selectividad. El diseño del canal facilita esta deshidratación, contribuyendo a su alta especificidad. Una vez que el estímulo desaparece o se alcanza un estado de equilibrio, el canal regresa a su conformación cerrada, deteniendo el flujo de iones.

Los canales iónicos pueden encontrarse en diversos estados funcionales que determinan su capacidad para permitir el paso de iones. En el estado cerrado, el poro del canal no es accesible y los iones no pueden pasar, esto ocurre cuando el estímulo activador no está presente. En el estado abierto, el canal permite el flujo de iones a favor de su gradiente electroquímico. Además existe el estado inactivo, en el cual el canal está cerrado a pesar de la presencia del estímulo. Esto sucede

porque una compuerta bloquea el poro, funcionando como un mecanismo que previene la sobreexcitación celular. En ciertos canales, especialmente los activados por ligandos, puede ocurrir un estado de desensibilización cuando el canal deja de responder a la presencia del ligando después de una exposición prolongada, incluso si el estímulo continúa.

Las transiciones entre estos estados responden a varios estímulos. La activación es el cambio del estado cerrado al abierto, en respuesta a un estímulo como un cambio en el potencial de membrana o la unión de un ligando. La inactivación es una transición que cierra el canal, aunque el estímulo esté presente, como parte de un mecanismo de retroalimentación que previene la sobreexcitación. La recuperación de la inactivación devuelve al canal a un estado cerrado, permitiendo que pueda abrirse nuevamente ante futuros estímulos. De manera similar, la desensibilización se produce después de una exposición prolongada a un ligando, y la recuperación de este estado hace que el canal vuelva a ser sensible y capaz de responder nuevamente a la presencia del ligando.

Si bien los canales iónicos comparten un funcionamiento general, cada tipo tiene características únicas según el ion que dejan pasar. Entre los más importantes están los canales de sodio y potasio debido a sus roles en distintas funciones celulares por lo que es importante explicar con más detalle su importancia y función.

### 1.3.1. Canal de Potasio

En las células cardiacas, los canales de  $K^+$  juegan un papel importante en el mantenimiento del potencial de reposo celular, determinan la forma y duración del potencial de acción, la frecuencia de disparo de las células automáticas, la liberación de neurotransmisores y la morfología y constituyen el lugar de acción sobre el que actúan diversos neurotransmisores, hormonas, fármacos y toxinas que modulan la función cardiaca [10].

Funcionalmente, los canales de potasio se pueden organizar como canales de potasio dependientes de voltaje ( $Kv$ ), canales de potasio activados por cationes de calcio ( $KCa$ ), canales de potasio rectificadores internos ( $Kir$ ), incluyendo canales de potasio sensibles al adenosín trifosfato (ATP) con siglas ( $KATP$ ), y canales de potasio de dos poros. De todos estos tipos, los canales  $Kv$  son particularmente interesantes debido a su papel en la regulación del potencial de membrana y la transmisión de señales eléctricas en las células, además presentan una estructura básica similar a la estructura de los canales de sodio y calcio dependientes de voltaje, por lo que se hablará en específico sobre la estructura de estos canales más adelante.

### 1.3.2. Canal de Sodio

Los canales de sodio intervienen en la excitabilidad celular, ya que su apertura y cierre regulan la entrada de  $Na^+$ , lo que provoca la despolarización de la membrana celular y genera una señal eléctrica. Este mecanismo produce la comunicación neuronal, la contracción muscular y es esencial en diversas funciones fisiológicas, como el ritmo cardíaco y la transmisión de señales en el sistema nervioso central [11].

Existen varios tipos de canales de sodio que pueden agruparse en dos categorías principales. Los canales de sodio no voltaje-dependientes ( $Na_x$ ) y los canales de sodio voltaje-dependientes ( $Nav$ ). Los canales  $Na_x$  son menos estudiados y no requieren directamente del voltaje para activarse, están presentes en algunas neuronas y otros tipos de células, aunque su función exacta aún no se comprende del todo, existe la hipótesis en que están involucrados en procesos como la homeostasis del sodio. Por otro lado, los canales de sodio voltaje-dependientes son los más conocidos, estos se activan en respuesta a cambios en el potencial de membrana y resultan vitales para la propagación de los potenciales de acción en las neuronas, permitiendo la rápida transmisión de impulsos eléctricos.

Dado que la permeabilidad de la membrana en reposo de la mayoría de las células está impulsada por los gradientes de potasio, el potencial de membrana en reposo es negativo. Cuando un canal selectivamente permeable se abre, el potencial de membrana se verá impulsado hacia el potencial

de equilibrio los iones permeables. Dado que el sodio está en concentraciones más altas fuera de la célula, el potencial de equilibrio del sodio (ENa) es aproximadamente  $+60mV$  [12]. Así se puede pensar en los canales de sodio cerrados como un interruptor acoplado a una vasta reserva de energía potencial. La apertura de los canales de sodio en la membrana desviará rápidamente el potencial de membrana hacia el ENa y el cambio en el potencial de membrana está solo limitado por el acercamiento al equilibrio, el gating del canal y la contribución de otros canales iónicos y conductancias en la membrana plasmática. Fisiológicamente los canales de sodio activados por voltaje son responsables de iniciar eventos excitatorios como el disparo neuronal en la mayoría de las neuronas del sistema nervioso central y periférico, la excitación del músculo cardíaco y esquelético, así como la excitabilidad de las células endocrinas [13].

### 1.3.3. Importancia de las Propiedades Biofísicas de los Canales Dependientes de Voltaje

Las funciones de los canales iónicos están ligadas a sus propiedades biofísicas. Como se mencionó previamente, estos canales se activan en respuesta a cambios en el potencial de membrana. Las células que expresan canales de sodio y potasio funcionales activados por voltaje típicamente descansan a potenciales de membrana negativos, de modo que la inactivación en estado estacionario del canal es mínima y una fracción significativa de los canales están disponibles para abrirse. La activación ocurre rápidamente después de una despolarización, pero a voltajes más positivos que los necesarios para inducir la inactivación.

El resultado de estas propiedades es la apertura del lumen durante unos pocos milisegundos, seguida del cierre y la inactivación del canal durante algunos milisegundos adicionales [14]. El proceso de recuperación de la inactivación también es fuertemente dependiente del voltaje y puede influir significativamente en la excitabilidad de la célula.

Una razón por la que las propiedades dependientes de voltaje son de interés es que la modulación farmacológica de la función de los canales de sodio ha llevado a tratamientos exitosos en varias aplicaciones terapéuticas [8]. Se han desarrollado antiarrítmicos, anticonvulsivos y anestésicos locales que tienen como mecanismo de acción principal los canales dependientes de voltaje, los índices terapéuticos de estos compuestos a menudo se han logrado aprovechando el bloqueo dependiente del estado y/o dependiente del voltaje del canal. El aumento de la excitabilidad, como ocurre durante la arritmia o en las convulsiones epilépticas, puede asociarse con un aumento en la frecuencia de disparo de potenciales de acción impulsados por la actividad del canal de sodio. Un bloqueo mucho mayor del canal resulta de mantener el potencial de membrana a  $-60 mV$  que a  $-100 mV$  [13], para comprender mejor cómo estas funciones están estructuralmente respaldadas, es necesario adentrarse en la organización detallada de los canales iónicos.

## 1.4. Estructura de los Canales Iónicos

En las secciones anteriores se describió la estructura celular y se exploraron los diferentes tipos de transporte iónico resaltando la importancia de los canales iónicos en estos mecanismos. También se ofreció una visión general de la estructura de los canales, sin profundizar en detalles. En esta sección, se analizará en mayor profundidad la estructura de los canales iónicos de sodio y potasio dependientes de voltaje, primero se examinará la cristalografía de los canales de potasio, lo que permitirá entender de manera más precisa su configuración, posteriormente se estudiará la estructura de las compuertas de estos canales con el fin de modelar una barrera energética y aplicar la teoría del efecto túnel en el paso de los iones a través de estas compuertas.

La estructura de los canales iónicos es importante para el modelado de la barrera de potencial en la membrana celular, como se mencionó, la membrana está compuesta de varias subestructuras, siendo las proteínas transmembrana la base de la estructura. Aunque cada tipo de canal iónico tiene una estructura y función específicas es posible realizar un análisis general de su organización.

En términos estructurales, muchos canales iónicos, como los canales de sodio y potasio, están formados por cuatro subunidades o dominios que se ensamblan para formar el canal funcional [14]. Cada subunidad está compuesta por varias hélices alfa que atraviesan la membrana, y estas hélices están organizadas en un conjunto de dominios que cumplen funciones específicas, como la detección de voltaje o la formación del poro por el cual pasan los iones.

**Dominios Transmembrana (TM)** Cada subunidad del canal iónico contiene varios segmentos transmembrana que atraviesan la membrana celular. La cantidad de estos segmentos varía según el tipo de canal. Por ejemplo, los canales de potasio activados por voltaje (Kv) están compuestos por seis segmentos transmembrana denominados S1 a S6 [8]. Estos segmentos son hélices alfa, cada una de las cuales suele tener una longitud de aproximadamente 20 a 30 residuos de aminoácidos, lo que equivale a una longitud de alrededor de 3.6 angstroms por residuo [15]. Esto implica que cada segmento helicoidal tiene una longitud aproximada de entre 7 y 11 nanómetros. Por otro lado, los canales de sodio y calcio activados por voltaje están formados por 24 segmentos transmembrana distribuidos en cuatro dominios homólogos (I-IV). Al igual que en los canales Kv, las regiones transmembrana de los canales de sodio y calcio consisten en segmentos helicoidales (hélices alfa) de entre 20 y 30 residuos de aminoácidos, lo que sugiere que cada uno de estos segmentos también podría tener una longitud de aproximadamente 7 a 11 nanómetros.

**Dominios de Poro (P-loop)** El segmento que forma el poro del canal iónico se encuentra entre los segmentos transmembrana (S5-S6), denominado bucle de poro (P-loop) [8]. Este bucle forma la región selectiva donde los iones son filtrados y seleccionados según su tamaño y carga. En los canales de potasio, el bucle de poro contiene el motivo de selectividad GYG, que permite el paso selectivo de  $K^+$  mientras excluye otros iones como  $Na^+$  [16]. De manera similar, en los canales de sodio, la región del poro está localizada en un bucle P entre los dominios transmembrana S5 y S6, codificando los residuos que definen las propiedades de permeación del canal, comúnmente conocidos como el filtro de selectividad.

**Dominios Sensor de Voltaje (S1-S4)** En los canales activados por voltaje, los segmentos S1 a S4 forman el dominio sensor de voltaje. El segmento S4 es particularmente importante porque contiene residuos de aminoácidos cargados positivamente (principalmente argininas), que se mueven en respuesta a los cambios en el potencial de membrana, este movimiento desencadena la apertura o cierre del canal [17], permitiendo o impidiendo el paso de iones. En los canales de sodio, el sensor de voltaje ubicado en la cuarta región transmembrana de cada dominio (S4) juega un papel clave en la activación del canal, donde los aminoácidos cargados detectan cambios en el campo transmembrana, iniciando así el proceso de apertura del canal [8].

**Dominios de Activación e Inactivación** Además de los dominios estructurales que permiten la apertura del canal, algunos canales iónicos poseen dominios que regulan su inactivación. Por ejemplo, en los canales de sodio activados por voltaje, hay una compuerta de inactivación formada por un motivo IFM (Isoleucina-Fenilalanina-Metionina) en la región citoplasmática entre los dominios III y IV [18]. Este motivo bloquea el poro poco después de que el canal se abre, lo que interrumpe el flujo de iones hasta que el canal es reactivado. Este mecanismo es esencial para el cierre rápido de los canales de sodio tras la despolarización sostenida.

**Dominios Reguladores y de Modulación** En la porción citoplasmática de los canales iónicos, existen dominios que interactúan con otras proteínas o con señales intracelulares, modulando la actividad del canal. Por ejemplo, algunos canales iónicos tienen sitios de fosforilación que pueden ser modificados por quinasas, alterando la probabilidad de que el canal se abra o cierre. Los canales de calcio activados por calcio (como los canales BK) tienen dominios regulatorios que se unen al

calcio y modulan la apertura del canal en respuesta a cambios en las concentraciones intracelulares de este ion.

### 1.4.1. Los Canales de Potasio en Cristalografía de Rayos X

La cristalografía de rayos X ha sido clave para desentrañar la compleja arquitectura de los canales de potasio ( $K^+$ ), proporcionando una visión detallada a nivel atómico que ha transformado nuestra comprensión de su funcionamiento. Estudios estructurales de canales como KcsA, MthK, KirBac y KvAP han revelado una organización común en la que cada subunidad incluye dos hélices transmembrana [16], estas hélices son denominadas TM1 y TM2. Los iones son formados por el enamble de cuatro subunidades idénticas para formar un tetrámero con simetría cuádruple, creando un poro central por el que se conduce selectivamente el ion  $K^+$ .

Las hélices TM1 que se sitúan en la parte externa del canal interactúan con los lípidos de la membrana y forman el borde externo del canal. Por otra parte, las hélices TM2 se proyectan hacia el interior, cruzándose y formando una estructura cónica cercana a la superficie citoplasmática [19]. Esta estructura cónica es importante para la compuerta y la selectividad iónica del canal.

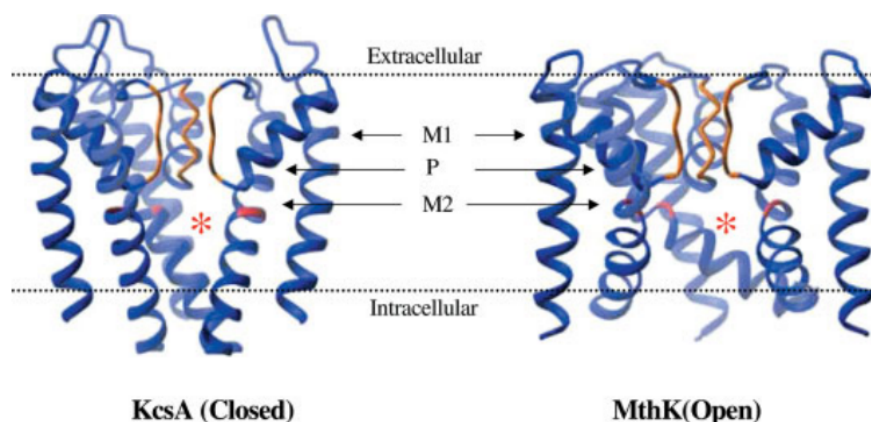


Figura 1.3: Estructura de rayos X de los poros de conducción iónica de los canales de  $K^+$  KcsA y MthK.

Las hélices TM1 y TM2 están conectadas por una hélice reentrante y el filtro de selectividad de  $K^+$ , que mide aproximadamente 12 Å de largo y se ubica cerca del lado citoplasmático [16]. Entre el cruce de las hélices TM2 y el filtro de selectividad se encuentra la cavidad central, un túnel de 18 Å de longitud que se ensancha a 10 Å cerca del centro de la membrana [19]. En esta cavidad, un ion  $K^+$  se encuentra suspendido y rodeado por moléculas de agua, estabilizado por las fuerzas dipolares generadas por las hélices del poro orientadas hacia el centro de la cavidad.

### 1.4.2. Compuerta Extracelular

Como se mencionó antes, el filtro de selectividad ubicado en el extremo extracelular del canal de potasio es responsable de la discriminación entre los iones  $K^+$  y otros cationes como  $Na^+$ . Este filtro está formado por una secuencia característica de aminoácidos que crean un entorno específico para la coordinación de iones. Los átomos de oxígeno carbonílico presentes en el filtro forman sitios de unión que permiten que los iones  $K^+$  pasen a través del canal sin necesidad de deshidratarse completamente, a diferencia de los iones  $Na^+$  que son más pequeños y no pueden interactuar de la misma manera [16]. El filtro de selectividad de los canales de potasio tiene una longitud de aproximadamente 12 Å y un diámetro de unos 3 Å [19]. Esta estructura está altamente

especializada para permitir el paso de iones  $K^+$  mientras excluye a otros iones, como el  $Na^+$ , debido a diferencias en el tamaño y las propiedades de deshidratación de estos iones.

En los canales de sodio, el filtro de selectividad es más corto, con una longitud aproximada de 5 Å y su diámetro es más amplio [20], lo que permite el paso de iones  $Na^+$  pero excluye otros iones como el  $K^+$ . Este filtro también está compuesto por aminoácidos que interactúan selectivamente con los iones  $Na^+$ , facilitando su paso a través del canal.

Una característica clave del filtro de selectividad de los canales de potasio es que no impone una restricción energética significativa en el paso de iones  $K^+$  [21]. Esto significa que, una vez que un ion  $K^+$  está en el filtro, puede moverse libremente hacia la cavidad central del canal sin enfrentar barreras energéticas importantes. La ausencia de estas barreras energéticas facilita el flujo eficiente de iones  $K^+$  a través del canal, de esta manera el filtro de selectividad proporciona una alta selectividad sin restringir el movimiento iónico. La verdadera barrera de potencial y el control del flujo iónico son gestionados principalmente por la compuerta intracelular, que regula el acceso al poro del canal y asegura que los iones  $K^+$  solo puedan pasar cuando el canal está abierto.

En cuanto a la compuerta extracelular de los canales de sodio, su función es menos restrictiva que la del filtro de potasio. Aunque también participa en la selectividad iónica, permite que los iones  $Na^+$  pasen a través del canal más fácilmente, esta compuerta se puede considerar el mecanismo principal en la propagación del potencial de acción en las neuronas.

En resumen, el filtro de selectividad de los canales de sodio potasio asegura la selectividad iónica y no representa una restricción energética en el flujo de los iones, mientras que la compuerta intracelular es responsable de regular la apertura y cierre del canal, creando una barrera de potencial que controla el flujo iónico en función de las condiciones celulares.

### 1.4.3. Compuerta Intracelular

La compuerta intracelular de los canales de potasio  $K^+$  se encuentra en el extremo citoplasmático del canal y es fundamental para establecer la barrera de potencial que controla el paso de iones desde el citoplasma hacia el poro del canal.

En el estado cerrado del canal, la compuerta intracelular se forma mediante la disposición de las hélices transmembrana internas TM2 que convergen hacia el citoplasma creando un estrechamiento en el extremo intracelular del poro. La longitud de esta compuerta es aproximadamente de 10 Å a 15 Å, con un ancho de alrededor de 10 Å [22]. Las hélices TM2 se inclinan a un ángulo de aproximadamente  $21^\circ$  [22], lo que contribuye a la formación de una barrera efectiva que impide el paso de iones  $K^+$  cuando el canal está cerrado. La flexibilidad de las hélices TM2 que están unidas por un residuo de glicina altamente conservado permite que el canal se abra en respuesta a estímulos específicos, como cambios en el potencial de membrana o la unión de ligandos.

Cuando se produce la apertura de la compuerta intracelular las hélices TM2 se separan, eliminando la barrera física en el extremo citoplasmático y permitiendo el flujo de iones  $K^+$  desde la cavidad central del canal hacia el citoplasma. Esta apertura controla el momento en que los iones pueden atravesar el canal, manteniendo el equilibrio iónico y el potencial de membrana.

En los canales de sodio la compuerta intracelular también se encuentra en el extremo citoplasmático del canal. La longitud de esta compuerta es de aproximadamente 12 Å a 18 Å, con un ancho de alrededor de 12 Å [18]. El ángulo de inclinación de las hélices que forman la compuerta intracelular en los canales de sodio puede ser de aproximadamente  $22^\circ$  [18]. Al igual que en los canales de potasio, la compuerta intracelular de sodio actúa como una barrera que regula el acceso de iones al poro del canal, y su apertura y cierre son críticos para la función del canal.



## Capítulo 2

# Fundamentos del Efecto Túnel

**A la realidad le gustan las simetrías y los leves anacronismos.**

—*Jorge Luis Borges*

Ahora que se comprende la forma en la que ocurre el transporte de iones a través de la membrana se puede comenzar a teorizar sobre el efecto túnel en este proceso, para eso se requieren explicar los fundamentos de la teoría cuántica, es por eso que este capítulo se dedica a explorar los conceptos básicos del efecto túnel y su relevancia en el contexto de la biología celular. Primero se examinarán los principios fundamentales de la mecánica cuántica, incluida la dualidad onda-partícula y el principio de incertidumbre de Heisenberg, que sientan las bases para comprender la naturaleza cuántica de la materia.

Posteriormente, se hablará sobre el efecto túnel, explorando cómo las partículas, incluidos los iones, pueden atravesar barreras de energía potencial mediante un proceso que desafía nuestras intuiciones clásicas sobre el movimiento de partículas. Discutiendo los factores que influyen en la probabilidad de transmisión de las partículas, como el grosor y la forma de la barrera, así como la energía cinética de las partículas.

La Dualidad Onda-Partícula, propuesta por Louis de Broglie en 1924, postula que todas las partículas pueden exhibir tanto propiedades de ondas como de partículas. De Broglie desarrolló la idea de que el movimiento de una partícula está gobernado por la propagación de ondas piloto asociadas a ella. En esta descripción, la posición de la partícula queda determinada por la onda, ya que la probabilidad de encontrar la partícula en un lugar específico está vinculada con la amplitud de la onda en dicho punto. Este comportamiento ondulatorio implica que, incluso cuando la partícula no posee suficiente energía cinética para atravesar una barrera de manera clásica, la amplitud de su onda puede extenderse al otro lado de la barrera. Como resultado, existe una probabilidad no nula de que la partícula se atraviese la barrera, apareciendo al otro lado, desafiando las expectativas de la mecánica clásica.

De esta manera, cuando un ion se aproxima a una barrera de potencial, su función de onda no se detiene en la barrera como lo haría una partícula clásica. En cambio, la función de onda se extiende a través y más allá de la barrera.

La descripción del movimiento en términos de la onda piloto trae como consecuencia inevitable que no existe ningún estado de una partícula en el cual se puedan conocer con exactitud y simultáneamente su posición y su cantidad de movimiento. Esta inexactitud es conocida como el Principio de Incertidumbre de Heisenberg y es en realidad una consecuencia de las propiedades generales de las ondas de cualquier naturaleza (y por lo tanto también de las ondas piloto), y del hecho que, de acuerdo con la interpretación de de Broglie, la partícula está localizada donde la onda piloto tiene una amplitud no nula.

El principio de incertidumbre surge como una consecuencia matemática de la hipótesis de de Broglie [23], aunque en realidad Heisenberg no se basó en la hipótesis de de Broglie, sino en las

propiedades corpusculares de la radiación electromagnética. De esta forma, Heisenberg puso de manifiesto que existe un límite natural insuperable a la precisión con la que se pueden medir simultáneamente la posición y el impulso de una partícula, debido a que la medición de una de estas cantidades inevitablemente perturba a la partícula de modo tal que deja incierto el valor de la otra cantidad. En el contexto del efecto túnel, esto significa que hay una incertidumbre inherente en la energía de la partícula al aproximarse a la barrera. Esta incertidumbre en la energía permite que exista una probabilidad de que la partícula supere la barrera, a pesar de no tener clásicamente la energía necesaria para hacerlo.

## 2.1. La Ecuación de Schrödinger y el Origen del Efecto Túnel

Aunque el postulado de de Broglie sobre la naturaleza ondulatoria de las partículas fue un avance importante, la teoría completa sobre su comportamiento fue desarrollada por Schrödinger en 1926. En este trabajo, Schrödinger introdujo el concepto de la función de onda  $\Psi(\vec{r}, t)$ , reemplazando el término “onda piloto” propuesto anteriormente. Además, formuló la ecuación que describe la evolución de la función de onda, conocida hoy como la ecuación de Schrödinger. Esta ecuación es esencial para describir cómo una función de onda cambia con el tiempo y el espacio bajo la influencia de un potencial  $V(\vec{r}, t)$  que depende tanto de la posición como del tiempo.

En el contexto de un ion que se enfrenta a una barrera energética, la ecuación de Schrödinger permite determinar el comportamiento de la función de onda asociada al ion, tanto dentro como fuera de la barrera. La ecuación tiene la siguiente forma:

$$i\hbar \frac{\partial \Psi(\vec{r}, t)}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \Psi(\vec{r}, t) + V(\vec{r}, t) \Psi(\vec{r}, t) \quad (2.1)$$

donde:

- $\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1,054573 \times 10^{-34} Js$  es la constante de Planck reducida.
- $m$  es la masa de la partícula.

En 1927, Friedrich Hund publicó un estudio pionero donde mostró que, en ciertos sistemas moleculares, las partículas podían atravesar barreras energéticas incluso cuando, según las leyes clásicas, no poseían la energía suficiente para hacerlo. Hund fue uno de los primeros en sugerir que las partículas tenían una probabilidad de cruzar dichas barreras, lo que hoy conocemos como efecto túnel cuántico.

La formulación rigurosa del efecto túnel se desarrolló poco después con la aproximación WKB (Wentzel-Kramers-Brillouin), que permitía calcular la probabilidad de que una partícula atravesara una barrera de potencial. Esta técnica, desarrollada entre 1926 y 1927 por Gregory Wentzel, Hendrik Kramers y Leon Brillouin, se convirtió en una herramienta clave para comprender el efecto túnel.

### 2.1.1. Consideraciones en la Ecuación de Schrödinger

Como se discutió en esta sección, la ecuación de Schrödinger proporciona una descripción de la evolución de la función de onda en el espacio y el tiempo. En el caso específico del paso de los iones a través de un canal iónico se aprovecha que el potencial de la membrana celular depende únicamente de la posición. Esta simplificación permite que la ecuación de Schrödinger admita soluciones separables de la forma  $\Psi(\vec{r}, t) = \psi(\vec{r})T(t)$ .

Además, solo es necesario considerar una dimensión, por lo que se puede simplificar la posición a  $\vec{r} = x$ . Al sustituir esta simplificación en la ecuación (2.1), obtenemos la forma unidimensional de la ecuación de Schrödinger independiente del tiempo.

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \psi(x)}{\partial x^2} + V(x)\psi(x) = i\hbar \frac{1}{T(t)} \frac{dT(t)}{dt} \psi(x) \quad (2.2)$$

Definiendo  $E \equiv i\hbar \frac{1}{T(t)} \frac{dT(t)}{dt}$  como la energía del estado representado por la función  $\psi(x)$ , dando como resultado la siguiente ecuación:

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \psi(x)}{\partial x^2} + V(x)\psi(x) = E\psi(x) \quad (2.3)$$

En general, las soluciones de esta ecuación se dividen en estados ligados y en estados de dispersión. El efecto túnel ocurre en el primer tipo de estados, y la posición  $x$  se divide en varias regiones al interactuar con la barrera fuera y dentro de la barrera. Fuera de la barrera, donde  $E > V$ , la función de onda  $\psi(x)$  tiene una solución de la siguiente forma:

$$\psi(x) = Ae^{ikx} + Be^{-ikx} \quad (2.4)$$

donde  $k \equiv \sqrt{\frac{2m(E-V(x))}{\hbar^2}}$

Dentro de la barrera con un potencial constante donde  $E < V$ , la función de onda toma la forma:

$$\psi(x) = Ce^{\kappa x} + De^{-\kappa x} \quad (2.5)$$

donde  $\kappa \equiv \sqrt{\frac{2m(V(x)-E)}{\hbar^2}}$

En estas expresiones,  $A$ ,  $B$ ,  $C$  y  $D$  son constantes de integración que se determinan a partir de las condiciones de frontera y normalización de la función de onda.

### 2.1.2. Aproximación WKB y Ecuación de Transferencia para un Potencial Triangular

Después de postular la formulación básica de la ecuación de Schrödinger, se puede introducir una técnica que permite abordar casos más complejos de barreras de potencial. En particular, la aproximación WKB (Wentzel-Kramers-Brillouin) ofrece una herramienta poderosa para tratar el problema del túnel a través de barreras que varían de manera continua y no uniforme.

La aproximación WKB se convierte en una técnica útil cuando se trata de analizar el efecto túnel en sistemas donde la forma del potencial no se ajusta a configuraciones simplificadas y se basa en lo siguiente. Si  $V(x)$  no es constante, pero varía lentamente en comparación con  $1/\kappa$ , la solución sigue siendo prácticamente exponencial, excepto que las constantes de integración y  $\kappa$  ahora son funciones de  $x$  que varían lentamente [24]. En este contexto, las soluciones de la función de onda se pueden expresar de la siguiente manera:

Para  $E > V$ :

$$\psi(x) \approx A(x)e^{i\phi(x)} + B(x)e^{-i\phi(x)} \quad (2.6)$$

$$\phi(x) = \frac{1}{\hbar} \int p(x') dx' \quad (2.7)$$

$$p(x) \equiv \sqrt{2m[E - V(x)]} \quad (2.8)$$

Mientras que para  $E < V$ , la función de onda toma la forma:

$$\psi(x) \approx C(x)e^{\gamma(x)} + D(x)e^{-\gamma(x)} \quad (2.9)$$

$$\gamma(x) = \frac{1}{\hbar} \int |p(x')| dx' \quad (2.10)$$

En el caso de un potencial triangular, como se ilustra en la figuras 3.1 y 3.2, la función de onda se descompone en cuatro regiones distintas.

---

El cálculo de la transmisión  $T$  de la función de onda en este caso particular se puede formular como un sistema de 8 ecuaciones, que describen las condiciones de continuidad y las relaciones entre las amplitudes de la función de onda en cada región. Sin embargo, utilizando la aproximación WKB, se obtiene una expresión aproximada para la transmisión:

$$T \approx e^{-2\gamma} \tag{2.11}$$

Esta aproximación es válida bajo dos condiciones. La primera es que el potencial varíe de manera relativamente lenta en comparación con la longitud de onda característica. Además,  $V(x)$  debe ser una función suave y continua para que la aproximación WKB no se vea comprometida.

Ahora establecidas las bases matemáticas necesarias para abordar el estudio de la probabilidad de transmisión de partículas a través de un potencial de barrera triangular. Se puede comenzar con la aplicación de estos conceptos al modelado de la probabilidad de transmisión de iones a través de los canales iónicos.

## Capítulo 3

# Análisis del Paso de Iones en Canales de Sodio y Potasio Mediante el Efecto Túnel

Aunque la mecánica cuántica nació a principios del siglo XX sus aplicaciones iniciales se concentraron en la física y la química, solo en tiempos recientes se ha comenzado a explorar su impacto en la biología. Durante mucho tiempo, cualquier conexión entre la física cuántica y los sistemas biológicos fue considerada especulativa. Sin embargo, el progreso tecnológico y los avances en experimentación han permitido la observación directa de fenómenos cuánticos en estos sistemas, desafiando nuestras ideas previas sobre los límites de la biología clásica. Las reacciones biológicas, al estar gobernadas por la química y la biología clásica, parecían demasiado grandes y desordenadas para verse afectadas por las sutiles interacciones cuánticas. Sin embargo, este paradigma ha comenzado a cambiar. La introducción de técnicas experimentales más avanzadas, como la espectroscopía de precisión y la simulación cuántica, ha permitido estudiar los efectos cuánticos a nivel molecular.

Uno de los enfoques más intrigantes en este campo ha sido la hipótesis del físico Roger Penrose, en su libro "sombras de la mente" propuso que los procesos cuánticos podrían estar involucrados en la conciencia humana. Penrose sugiere que estructuras subcelulares, como los microtúbulos presentes en las neuronas, podrían estar influenciadas por efectos cuánticos. Aunque esta teoría, conocida como la hipótesis de la conciencia cuántica, sigue siendo ampliamente debatida en la comunidad científica, ha inspirado a muchos a investigar si los principios cuánticos tienen un papel en funciones biológicas complejas.

Más allá de la conciencia, se ha descubierto que fenómenos cuánticos, como la coherencia y el entrelazamiento, podrían estar involucrados en procesos biológicos fundamentales, como la fotosíntesis y la navegación de ciertas especies animales.

En los capítulos anteriores, se discutió cómo la estructura y el comportamiento de los canales iónicos son fundamentales para el control del paso de iones a través de la membrana celular. En particular, se identificó que la compuerta intracelular actúa como una barrera energética, restringiendo el flujo iónico, mientras que el filtro de selectividad no presenta un impedimento significativo.

En este capítulo, se desarrollará la evaluación de la transmitancia y reflectancia de los iones, el objetivo principal es modelar y calcular dichas probabilidades a través de la compuerta intracelular de los canales iónicos. Se examinarán los factores que influyen en este proceso, tales como la altura y el grosor de la barrera energética, así como la energía cinética de los iones. Estos cálculos nos permitirán comprender mejor cómo los iones podrían atravesar las barreras energéticas impuestas por los canales iónicos, proporcionando una visión más detallada del transporte iónico a nivel molecular.

### 3.1. Efectos de las disfunciones de los canales iónicos de Potasio y Sodio

El mal funcionamiento de los canales iónicos, especialmente aquellos responsables del transporte de sodio y potasio, puede tener graves repercusiones en diversas funciones fisiológicas. Patologías como las arritmias cardíacas, la epilepsia y la parálisis muscular están vinculadas a alteraciones en el flujo de iones. Un flujo descontrolado de iones de sodio puede interrumpir la repolarización cardíaca, lo que provoca contracciones irregulares del corazón, mientras que, en el caso de la epilepsia, el exceso de sodio en las neuronas puede desencadenar episodios epilépticos. En los músculos, la incapacidad de los canales de potasio para regular el flujo de iones puede llevar a contracciones prolongadas, causando parálisis temporal o crónica.

Se ha comenzado a considerar que los efectos cuánticos podrían dar una explicación para algunos de estos desequilibrios. Un estudio reciente sugiere que el paso de iones como el sodio, potasio y calcio a través de canales cerrados podría despolarizar el potencial de membrana de las células ciliadas internas y de las neuronas de la vía auditiva [25], lo que generaría estados de hiperexcitabilidad que el cerebro interpretaría como tinnitus.

Otro estudio, centrado en el dolor del miembro fantasma (PLP, por sus siglas en inglés), explora cómo los modelos cuánticos de iones de potasio pueden proporcionar una hipótesis teórica para desvelar parte del misterio detrás del PLP [26], argumentando que los iones de potasio podrían atravesar canales de membrana cerrados mediante el efecto túnel, provocando la activación de potenciales de acción en las neuronas del muñón del miembro amputado. Este proceso podría ser responsable de la hiperexcitabilidad nerviosa en los pacientes con PLP, contribuyendo a la sensación de dolor y malestar.

Estos estudios destacan la posibilidad de que el efecto túnel esté relacionado con diversas patologías, subrayando la importancia de analizar este fenómeno desde una perspectiva más detallada que aborde los aspectos físicos involucrados. Aunque los trabajos actuales ofrecen enfoques teóricos interesantes, no profundizan en los mecanismos físicos que gobiernan el paso de iones a través de los canales iónicos. Esta falta de profundidad impide generar una base teórica sólida para futuros análisis desde la ciencia física. Por lo tanto a continuación se presenta un análisis más exhaustivo, con el objetivo de modelar el efecto túnel en estos canales y entender mejor cómo este fenómeno puede influir en el comportamiento celular.

### 3.2. Evaluación de la Energía Cinética de los Iones

La energía cinética de los iones en el torrente sanguíneo es un grán factor en la comprensión de su dinámica y su capacidad para interactuar con estructuras celulares, como los canales iónicos. La energía cinética influye en la probabilidad de que un ion supere las barreras energéticas intracelulares. Por lo tanto, es necesario calcular esta energía para cada tipo de ion en la sangre, considerando las condiciones fisiológicas típicas.

Esta sección se enfocará en la evaluación de la energía cinética de los iones presentes en la sangre. Utilizando la definición clásica de energía cinética dada por la mecánica de Newton, podemos calcular la energía cinética de los iones en movimiento dentro del torrente sanguíneo. La ecuación de energía cinética es:

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \tag{3.1}$$

Donde  $m$  representa la masa del ion en  $(\frac{MeV}{c^2})$  y  $v$  es la velocidad del flujo sanguíneo comparada con la velocidad de la luz. En condiciones fisiológicas normales, la velocidad del flujo sanguíneo se asume cercana a  $v = 1 \times 10^{-9} c$ .

Para el sodio ( $Na^+$ ) con una masa de  $2,144 \times 10^4 \frac{MeV}{c^2}$ :

$$E_{Na} = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}(2,144 \times 10^4 \frac{MeV}{c^2})(1 \times 10^{-9} c)^2 \approx 107,2 \mu eV = 1,717 \times 10^{-24} J \quad (3.2)$$

Para el potasio ( $K^+$ ) con una masa de  $3,647 \times 10^4 \frac{MeV}{c^2}$ :

$$E_K = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}(3,647 \times 10^4 \frac{MeV}{c^2})(1 \times 10^{-9} c)^2 \approx 182,3 \mu eV = 2,921 \times 10^{-24} J \quad (3.3)$$

La ecuación (3.1) representaría la energía promedio de un ion. Sin embargo, es importante considerar la interacción eléctrica entre el ion y la célula. Los iones próximos a una célula se ven acelerados por el potencial de membrana  $V$ . Este potencial surge de la diferencia en la concentración de iones y la permeabilidad selectiva de la membrana a estos iones. En condiciones de reposo, el potencial de membrana es generalmente negativo en el interior de la célula en comparación con el exterior, con un valor típico de alrededor de  $-90$  mV [27]. Este valor de reposo refleja un equilibrio dinámico en el que las fuerzas eléctricas y químicas están en balance.

Para calcular la energía de un ion al acercarse a la célula, se debe añadir la energía debida al potencial eléctrico. La ecuación (3.1) se expresa como:

$$E = \frac{1}{2}mv^2 + qV_E \quad (3.4)$$

Donde  $q$  es la carga del ion.

En nuestro caso, para el sodio ( $Na^+$ ) y el potasio ( $K^+$ ), se tiene que:

$$E = \frac{1}{2}mv^2 + (1,602 \times 10^{-19} C)(90 \times 10^{-3} V) \quad (3.5)$$

$$E \approx \frac{1}{2}mv^2 + 1,4418 \times 10^{-20} J \quad (3.6)$$

Calculando la energía cinética para cada ion:

$$E_{Na} \approx 1,717 \times 10^{-24} J + 1,4418 \times 10^{-20} J \approx 1,4419 \times 10^{-20} J \quad (3.7)$$

$$E_K \approx 2,921 \times 10^{-24} J + 1,4418 \times 10^{-20} J \approx 1,4419 \times 10^{-20} J \quad (3.8)$$

Dado que el término cinético es significativamente pequeño comparado con el término eléctrico, el valor total de la energía es prácticamente el mismo para ambos iones, aproximadamente  $1,4419 \times 10^{-20} J$ .

Tabla 3.1: Energías de entrada y salida para los iones de sodio y potasio

Ion	Energía de Entrada (J)	Energía de Salida (J)
Sodio	$1,4419 \times 10^{-20}$	$1,717 \times 10^{-24}$
Potasio	$1,4419 \times 10^{-20}$	$2,921 \times 10^{-24}$

### 3.3. Modelado de la Barrera Energética

En esta sección se desarrollará un modelo de la barrera energética que enfrentan los iones al aproximarse y atravesar la compuerta intracelular considerando la estructura física y química de los canales iónicos. El objetivo es proporcionar una representación aproximada de la barrera

energética, lo que permitirá calcular de manera efectiva la probabilidad de transmitancia de los iones.

En la sección 1.4 se describió la topología de la compuerta intracelular, esta es en sí una barrera física construida por la cercanía de los residuos de aminoácidos. En los canales de Sodio y Potasio la barrera energética tiene una longitud promedio  $L_0 = 15 \text{ \AA}$ , sin embargo las hélices S6 se encuentran inclinadas en el estado cerrado del canal con un ángulo aproximado de  $22^\circ$ , por lo que  $L$  está dada por la siguiente ecuación:

$$L = L_0 \times \sin(\theta) \quad (3.9)$$

$$L = 15 \times 10^{-10} \times \sin(22^\circ) \quad (3.10)$$

$$L \approx 5,619 \times 10^{-10} \text{ m} \quad (3.11)$$

La energía requerida para que un canal iónico se abra varía según varios factores, incluyendo la conformación específica del canal, el entorno lipídico circundante y las condiciones experimentales o de simulación empleadas. Para los canales de potasio tipo Shaker, esta energía es de aproximadamente  $14.6 \text{ kcal/mol}$  [28]. En el caso de los canales de sodio activados por voltaje, la energía necesaria es de alrededor de  $16.1 \text{ kcal/mol}$  [28]. Esta diferencia en los valores de energía se debe a las estructuras particulares de estos canales, que influyen en cómo los iones de sodio y potasio interactúan con las partes internas del canal. En resumen, la estructura molecular única de cada tipo de canal modula la energía requerida para su apertura, reflejando las diferencias en las interacciones iónicas dentro de los canales. Como se vio en la sección 1.4.2 el filtro de selectividad no constituye una restricción energética significativa, por lo que es razonable atribuir esta energía a la barrera intracelular, lo que permite calcular la energía necesaria para que un solo ion logre abrir la barrera.

$$V_K = \frac{61086 \text{ J/mol}}{6,022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}} \approx 1,0144 \times 10^{-19} \text{ J} \quad (3.12)$$

$$V_{Na} = \frac{67362,4 \text{ J/mol}}{6,022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}} \approx 1,1186 \times 10^{-19} \text{ J} \quad (3.13)$$

Ahora es posible modelar la barrera, en este trabajo se toma una barrera en forma de triángulo rectángulo con base  $L$  y altura  $V_0$  como se muestra en las figuras 3.1 y 3.2. Barrera de potencial para los iones de entrada:

$$V(x) = \begin{cases} 0, & \text{si } x < -L, \\ \frac{V_0}{L}(x + L), & \text{si } -L \leq x \leq 0, \\ 0, & \text{si } 0 < x \end{cases} \quad (3.14)$$

Potencial para los iones de salida:

$$V(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x < 0, \\ \frac{V_0}{L}(L - x) & \text{si } 0 \leq x \leq L \\ 0 & \text{si } L < x \end{cases} \quad (3.15)$$

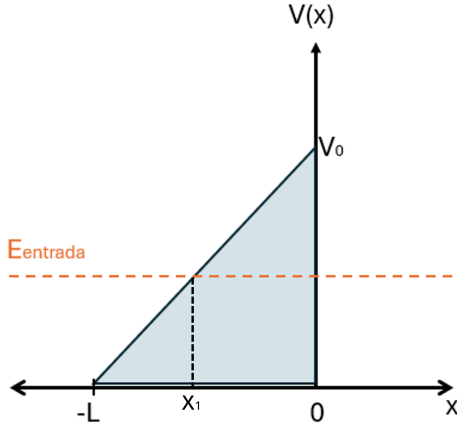


Figura 3.1: Potencial de entrada

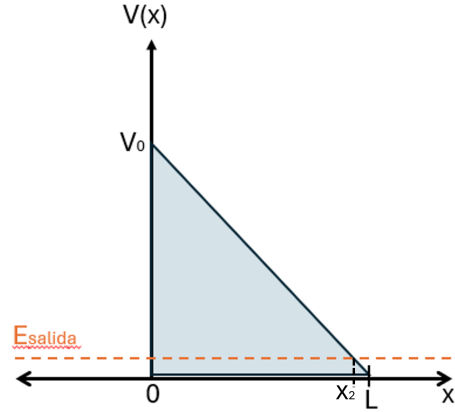


Figura 3.2: Potencial de salida

### 3.3.1. Cálculo de la Región $E < V(x)$

Para ocupar la aproximación WKB se requiere calcular la región donde la energía  $E$  es menor que el potencial  $V(x)$ . Así se procede a determinar los puntos donde la energía se iguala al potencial.

**Para los iones de entrada:**  $[x_1, 0]$

$$E = V(x_1) = \frac{V_0}{L} (L + x_1) \quad (3.16)$$

$$x_1 = L \left( \frac{E}{V_0} - 1 \right) \quad (3.17)$$

Para el ion de potasio se obtiene:

$$a_1 = (5,619 \times 10^{-10} \text{ m}) \left( \frac{1,4419 \times 10^{-20} \text{ J}}{1,0144 \times 10^{-19} \text{ J}} - 1 \right) \approx -4,82 \times 10^{-10} \text{ m} \quad (3.18)$$

Para el ion de sodio:

$$b_1 = (5,619 \times 10^{-10} \text{ m}) \left( \frac{1,4419 \times 10^{-20} \text{ J}}{1,1186 \times 10^{-19} \text{ J}} - 1 \right) \approx -4,89 \times 10^{-10} \text{ m} \quad (3.19)$$

**Para los iones de salida:**  $[x_2, 0]$

$$E = V(x_2) = \frac{V_0}{L} (L - x_2) \quad (3.20)$$

$$x_2 = L \left( 1 - \frac{E}{V_0} \right) \quad (3.21)$$

Para el ion de potasio ( $K^+$ ), se obtiene:

$$a_2 = (5,619 \times 10^{-10} \text{ m}) \left( 1 - \frac{2,921 \times 10^{-24} \text{ J}}{1,0144 \times 10^{-19} \text{ J}} \right) \approx 5,6188 \times 10^{-10} \text{ m} \quad (3.22)$$

Para el ion de sodio ( $Na^+$ ):

$$b_2 = (5,619 \times 10^{-10} \text{ m}) \left( 1 - \frac{1,7717 \times 10^{-24} \text{ J}}{1,1186 \times 10^{-19} \text{ J}} \right) \approx 5,6189 \times 10^{-10} \text{ m} \quad (3.23)$$

### 3.4. Análisis de la Variación de la Longitud de Onda

Como se mencionó en la subsección 2.1.2, para utilizar la aproximación WKB es necesario verificar que el potencial varía relativamente lento a comparación de la función de onda, para ambos iones en los procesos de entrada y salida.

**Para los iones de entrada:**

$$V(x) = \frac{V_0}{L}(x + L) \quad (3.24)$$

Por lo tanto, la derivada del potencial con respecto a  $x$  es:

$$\frac{d}{dx}V(x) = \frac{V_0}{L} \equiv n \quad (3.25)$$

Calculando  $n_1$  para los iones de potasio ( $K^+$ ) y sodio ( $Na^+$ ) se obtiene:

$$n_K = \frac{1,0144 \times 10^{-19} \text{ J}}{5,619 \times 10^{-10} \text{ m}} \approx 1,805 \times 10^{-10} \frac{\text{J}}{\text{m}} \quad (3.26)$$

$$n_{Na} = \frac{1,1186 \times 10^{-19} \text{ J}}{5,619 \times 10^{-10} \text{ m}} \approx 1,99 \times 10^{-10} \frac{\text{J}}{\text{m}} \quad (3.27)$$

Analizando la variación de la longitud de onda, se obtiene lo siguiente:

$$\frac{d\lambda(x)}{dx} = \frac{d}{dx} \left( \frac{\hbar}{|p(x)|} \right) \quad (3.28)$$

$$= \frac{d}{dx} \left( \frac{\hbar}{\sqrt{2m(V(x) - E)}} \right) \quad (3.29)$$

$$= -\frac{\hbar}{\sqrt{2m}} \cdot \frac{n}{(n(x + L) - E)^{3/2}} \quad (3.30)$$

Para el ion de potasio, la variación de la longitud de onda se calcula como:

$$\frac{d\lambda_K(x)}{dx} = -\frac{\hbar}{\sqrt{2m_k}} \cdot \frac{n_k}{(n_k(x + L) - E)^{3/2}} \quad (3.31)$$

Para el ion de sodio la variación de la longitud de onda se calcula mediante

$$\frac{d\lambda_{Na}(x)}{dx} = -\frac{\hbar}{\sqrt{2m_{Na}}} \cdot \frac{n_{Na}}{(n_{Na}(x + L) - E)^{3/2}} \quad (3.32)$$

**Para los iones de salida:**

$$V(x) = \frac{V_0}{L}(L - x) \quad (3.33)$$

Por lo tanto, la derivada del potencial con respecto a  $x$  es:

$$\frac{d}{dx}V(x) = \frac{-V_0}{L} \equiv -n \quad (3.34)$$

Analizando la variación de la longitud de onda, se obtiene lo siguiente:

$$\frac{d\lambda(x)}{dx} = \frac{d}{dx} \left( \frac{\hbar}{p(x)} \right) \quad (3.35)$$

$$= \frac{d}{dx} \left( \frac{\hbar}{\sqrt{2m(V(x) - E)}} \right) \quad (3.36)$$

$$= -\frac{\hbar}{\sqrt{2m}} \cdot \frac{-n}{(n(L - x) - E)^{3/2}} \quad (3.37)$$

**Análisis del Paso de Iones en Canales de Sodio y Potasio Mediante el Efecto Túnel**  
3.4 Análisis de la Variación de la Longitud de Onda

---

Para el ion de potasio, la variación de la longitud de onda se calcula como:

$$\frac{d\lambda_K(x)}{dx} = -\frac{\hbar}{\sqrt{2m_k}} \cdot \frac{-n_K}{(n_K(x+L) - E)^{3/2}} \quad (3.38)$$

Para el ion de sodio:

$$\frac{d\lambda_{Na}(x)}{dx} = -\frac{\hbar}{\sqrt{2m_{Na}}} \cdot \frac{n_{Na}}{(n_{Na}(L-x) - E)^{3/2}} \quad (3.39)$$



# Capítulo 4

## Resultados

Haciendo uso de las ecuaciones desarrolladas en la subsección 3.4 se puede generar la comparativa entre la variación de la función de onda y la variación del potencial para cada caso, dando como resultado las siguientes gráficas:

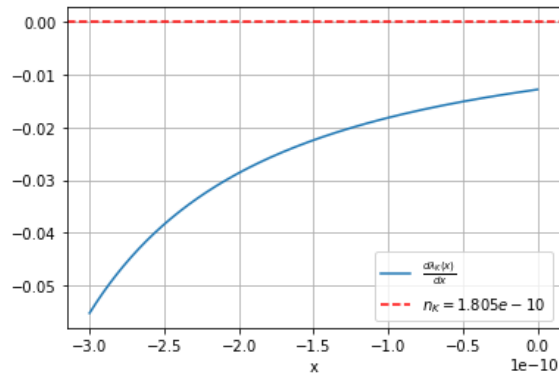


Figura 4.1: Comparativa de  $\lambda_K(x)$  y  $V_{K+}(x)$  en el proceso de entrada

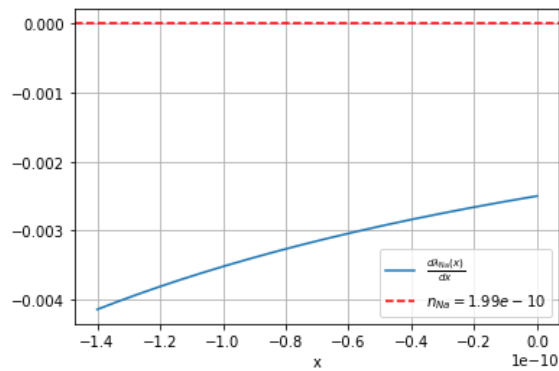


Figura 4.2: Comparativa de  $\lambda_{Na}(x)$  y  $V_{Na+}(x)$  en el proceso de entrada

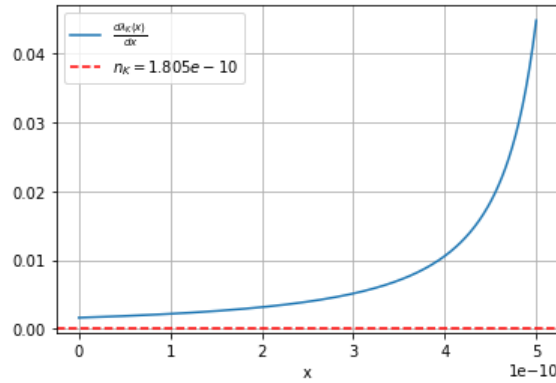


Figura 4.3: Comparativa de  $\lambda_K(x)$  y  $V_K(x)$  en el proceso de salida

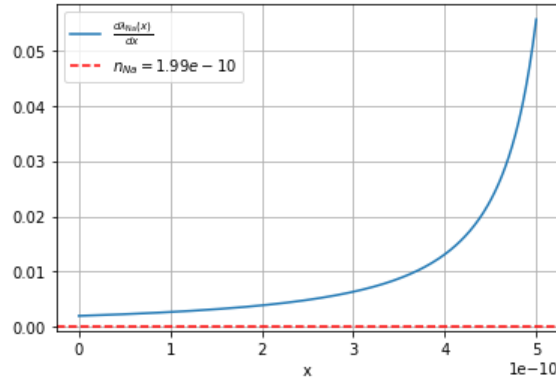


Figura 4.4: Comparativa de  $\lambda_{Na}(x)$  y  $V_{Na}(x)$  en el proceso de salida

Las gráficas en las imágenes 4.1, 4.2, 4.3 y 4.4 muestran que la longitud de onda varía más que el potencial para los casos de salida y entrada en ambos iones, es decir:

$$\left| \frac{dV(x)}{dx} \right| \ll \left| \frac{d\lambda(x)}{dx} \right|$$

Por lo que la aproximación WKB es válida para todos los casos.

Una vez verificado que el problema cumple con las condiciones para usar la aproximación WKB se puede comenzar con el cálculo de la transmisión usando la ecuación (2.11). Además, para comprender el paso de los iones es de ayuda calcular la reflexión ( $R$ ) de los iones al interactuar con la barrera, este coeficiente representa la probabilidad que tiene una partícula de reflectarse con la misma energía y se debe cumplir que  $T$  y  $R$  son cantidades inversas aditivas, esto es  $T + R = 1$ .

**El caso de entrada:**

$$\begin{aligned} T &= e^{-2\gamma} \\ &= \exp\left[-\frac{2}{\hbar} \int_{x_1}^0 |p(x)| dx\right] \\ &= \exp\left[-\frac{2\sqrt{2m}}{\hbar} \int_{x_1}^0 |\sqrt{E - V(x)}| dx\right] \end{aligned}$$

Por lo tanto, para los iones de potasio:

$$T_K = \exp\left[-\frac{2\sqrt{2m_K}}{\hbar} \int_{a_1}^0 |\sqrt{E_K - V_K(x)}| dx\right] \quad (4.1)$$

$$T_K \approx 5,98 \times 10^{-282} \quad (4.2)$$

$$R_K \approx 1,0 \quad (4.3)$$

Para los iones de Sodio:

$$T_{Na} = \exp\left[-\frac{2\sqrt{2m_{Na}}}{\hbar} \int_{b_1}^0 |\sqrt{E_{Na} - V_{Na}(x)}| dx\right] \quad (4.4)$$

$$T_{Na} \approx 2,47396 \times 10^{-151} \quad (4.5)$$

$$R_{Na} \approx 1,0 \quad (4.6)$$

**El caso de salida:**

$$\begin{aligned} T &= e^{-2\gamma} \\ &= \exp\left[\frac{-2}{\hbar} \int_0^{x_2} |p(x)| dx\right] \\ &= \exp\left[-\frac{2\sqrt{2m}}{\hbar} \int_0^{x_2} |\sqrt{E - V(x)}| dx\right] \end{aligned}$$

Para el Potasio:

$$T_K = \exp\left[-\frac{2\sqrt{2m_K}}{\hbar} \int_0^{a_2} |\sqrt{E_K - V_K(x)}| dx\right] \quad (4.7)$$

$$T_K \approx 1,12051 \times 10^{-354} \quad (4.8)$$

$$R_K \approx 1 \quad (4.9)$$

Para el Sodio:

$$T_{Na} = \exp\left[-\frac{2\sqrt{2m_{Na}}}{\hbar} \int_0^{b_2} |\sqrt{E_{Na} - V_{Na}(x)}| dx\right] \quad (4.10)$$

$$T_{Na} \approx 0,131591 \quad (4.11)$$

$$R_{Na} \approx 0,868409 \quad (4.12)$$

Los resultados del análisis matemático se pueden resumir en la siguientes tablas:

Tabla 4.1: Transmitancia

Ion	Caso de entrada	Caso de salida
Sodio	$2,47396 \times 10^{-151}$	0,131591
Potasio	$5,98331 \times 10^{-282}$	$1,12051 \times 10^{-354}$

Tabla 4.2: Reflectancia

Ion	Caso de entrada	Caso de salida
Sodio	1,0	0,868409
Potasio	1,0	1,0

Los resultados muestran una probabilidad de transmitancia baja en el caso de entrada de los iones, aunque no sucede lo mismo para el sodio, en el caso de salida el sodio tiene menos energía que en el caso de entrada, a pesar de eso la transmitancia es mucho mayor y se enfrenta a la misma barrera, esto podría sugerir que el canal de potasio no es eficiente para mantener el equilibrio iónico, pero es necesario remarcar que existen varios factores que tomar en cuenta, por ejemplo, al cerrarse un canal, los iones se concentran en los vestíbulos, lo que genera un campo eléctrico no favorable para los iones en el lado extracelular.

En la mayoría de los casos la reflectancia es aproximadamente 1, esto indica que al considerar los iones como ondas, su trayectoria natural sería regresar a través del canal. Sin embargo, los iones residuales que se encontraban en el canal antes de cerrarse, podrían obstruir el camino de los iones reflejados, esta interacción explicaría el acumulamiento de los iones en los vestíbulos.

La baja probabilidad en la transmitancia y la alta probabilidad de reflectancia en la mayoría de casos se pueden comparar con la nula probabilidad dada al estudiar este proceso clásicamente y es necesario mencionar que este es un estudio considerando un caso estático, debido a que los canales y las células cambian de estado en cuestión de nanosegundos y toda su estructura se mantiene oscilando, además, las interacciones entre los iones y diferentes elementos cercanos a ellos se consideraron despreciados.

## Capítulo 5

# Conclusión

La correcta función de los canales de sodio y potasio es esencial para el mantenimiento del equilibrio iónico, particularmente en aquellas que generan y transmiten señales eléctricas. Cuando este equilibrio se altera pueden surgir diversas patologías. Al incorporar la mecánica cuántica en la comprensión del comportamiento de los canales de sodio y potasio pueden surgir explicaciones sobre las causas de patologías así como nuevas preguntas sobre las implicaciones médicas. Los resultados obtenidos en el capítulo anterior sugieren que el efecto túnel podría alterar la regulación del paso de iones a través de los canales, aunque esta perturbación puede parecer insignificante a nivel celular individual, un conjunto de tales perturbaciones podría tener un impacto considerable en el funcionamiento general del organismo.

Además, es importante considerar la posibilidad en que este fenómeno cuántico podría no generar un desequilibrio químico en los canales iónicos, sino más bien garantizar su correcto funcionamiento. Cuando los iones son reflejados en el canal, actúan como una barrera física temporal que impediría el paso de otros iones, contribuyendo al cierre del canal. Este proceso proporcionaría un mecanismo adicional para mantener el equilibrio iónico, complementando el sistema natural de apertura y cierre de los canales.

Por otro lado, la transmisión de los iones de sodio al entrar podría inicialmente crear un desequilibrio. Sin embargo, este cambio en el potencial desencadenaría una respuesta celular en la que los canales iónicos se abrirían, permitiendo la liberación de iones al medio extracelular. Este flujo de iones provocaría una cascada de reacciones en las células circundantes, que buscan restablecer el equilibrio electroquímico, de esta manera se generaría un potencial de acción. Así, lo que inicialmente parece un desequilibrio local en realidad podría formar parte de un ciclo regulador más amplio para la homeostasis celular y la transmisión de señales eléctricas.

Los resultados de este trabajo proporcionan una base teórica más detallada sobre el efecto túnel aplicado a los canales iónicos, lo que permite expandir y mejorar el entendimiento de los efectos cuánticos en la biología celular. En el futuro, se planea continuar con este estudio, ampliando el análisis a una mayor variedad de canales iónicos, investigando la estructura específica de cada uno y proponiendo modelos que se ajusten mejor a la forma de la barrera energética.



# Bibliografía

- [1] M. Megías, P. Molist, and M.A. Pombal. Atlas de histología vegetal y animal. Consultado: 27 de Junio de 2024. Disponible en: <http://mmegias.webs.uvigo.es/inicio.html>.
- [2] Khan Academy. Estructura de la membrana plasmática (artículo). Consultado: 27 de junio de 2024. Disponible en: <https://es.khanacademy.org/science/ap-biology/cell-structure-and-function/membrane-permeability/v/cell-membrane-introduction>.
- [3] Jairo Torres García and Samuel Durán Agüero. Fosfolípidos: propiedades y efectos sobre la salud. *Nutr. Hosp.*, 31(1):77, enero 2015. Consultado: 27 de junio de 2024.
- [4] Octavio Maldonado Saavedra, Israel Ramírez Sánchez, José Rubén García Sánchez, Guillermo Manuel Ceballos Reyes, and Enrique Méndez Bolaina. Colesterol: Función biológica e implicaciones médicas. *Rev. mex. cienc. farm*, 43(2), abril-junio 2012. Consultado: 27 de junio de 2024.
- [5] Khan Academy. Revisión sobre transporte activo. Website, 2023. Consultado el 20 de enero de 2025.
- [6] Alicia Cessa Mendoza, Anahí Rojas Estrada, Eder Reyes Cruz, Lucero Ivonne Lozano Coavichi, Jesús Sebastián Rodríguez Girón, and Susana Bautista Hernández. Transporte a través de la membrana. Blog post, 2017. Consultado el 20 de enero de 2025.
- [7] Lumen Learning. Transporte pasivo. Consultado el 1 de enero de 2025.
- [8] Bertil Hille. *Ion Channels of Excitable Membranes*. Sinauer Associates, 3<sup>a</sup> ed. edition, 2001. Pág: 4, 5, 22, 86, 162, 356, 370.
- [9] Yize Wang, Hongguang Rey, Wen Ding, Xiaofei Zhao, Yongdong Li, and Chun Liang Liu. Regulación de la permeación iónica del canal kcsa mediante la aplicación de un campo infrarrojo medio. *Revista Internacional de Ciencias Moleculares*, 24(1):556, 2023. Presentación recibida: 14 de noviembre de 2022 / Revisado: 20 de diciembre de 2022 / Aceptado: 28 de diciembre de 2022 / Publicado: 29 de diciembre de 2022. Este artículo pertenece al Número Especial Propiedades Biofísicas de las Proteínas de Membrana.
- [10] J. Tamargo, R. Caballero, R. Gómez, et al. Pharmacology of cardiac potassium channels. *Cardiovasc Res*, 62:9–33, 2004.
- [11] National Library of Medicine (NLM). Canales de sodio. MeSH Database, 1989. Consultado el 8 de Octubre de 2024.
- [12] Casey Henley. Potencial de membrana. Licensed under CC BY-NC-SA 4.0.
- [13] David J. Triggle, Murali Gopalakrishnan, David Rampe, and Wei Zheng, editors. *Voltage-Gated Ion Channels as Drug Targets*, volume 29. Wiley-VCH, 2006. Pág:152.

- [14] Marcell Guzmán and Cinthia Serrano. Canales iónicos regulados por voltaje, 08 2024. Consultado el 12 de diciembre de 2024.
- [15] Bruce Alberts, Dennis Bray, Julian Lewis, Martin Raff, Keith Roberts, and James D. Watson. *Molecular Biology of the Cell*. Garland Science, 3<sup>a</sup> ed. edition, 1994.
- [16] D.A. Doyle et al. The structure of the potassium channel: molecular basis of k<sup>+</sup> conduction and selectivity. *Science*, 280:69–77, 1998.
- [17] William A. Catterall. From voltage-gated calcium channels to the therapeutic horizon. *Nature*, 407(6802):483–487, 2000.
- [18] S. Cestele and W.A. Catterall. Molecular mechanisms of neurotoxin action on voltage-gated sodium channels. *Biochimie*, 82(9–10):883–892, 2000.
- [19] Y. Jiang et al. Crystal structure and mechanism of a calcium-gated potassium channel. *Nature*, 417:515–522, 2002.
- [20] A. Kuo et al. Crystal structure of the potassium channel kirbac1.1 in the closed state. *Science*, 300:1922–1926, 2003.
- [21] M. Zhou et al. Potassium channel receptor site for the inactivation gate and quaternary amine inhibitors. *Nature*, 411:657–661, 2001.
- [22] A. B. Qaswal. Quantum tunneling of ions through the closed voltage-gated channels of the biological membrane: A mathematical model and implications. *Quantum Rep.*, 1(2):219–225, 2019.
- [23] Julio Gratton. *Introducción a la Mecánica Cuántica*. Ediciones Universidad de Buenos Aires, 1998. Pág:62.
- [24] David J. Griffiths and Darrell F. Schroeter. *Introduction to Quantum Mechanics*. Cambridge University Press, 3<sup>a</sup> ed. edition, 2018. Pág:354.
- [25] M. B. Al-Rawashdeh, A. B. Qaswal, A. Suleiman, F. M. Zayed, S. M. Al-Rawashdeh, M. Tawalbeh, L. Khreasha, A. Alzubaidi, E. Al-Zubidi, Z. Ghala, A. Almasri, M. Yasein, K. Ojjoh, A. Alraiqib, M. Iswaid, M. Emar, S. Haimour, A. Saifan, and Z. Mahameed. The quantum tunneling of ions model can explain the pathophysiology of tinnitus. *Brain Sci.*, 12(4):20–21, 2022.
- [26] Mustafa Alrabayah, Abdallah Barjas Qaswal, Aiman Suleiman, and Lubna Khreasha. Role of potassium ions quantum tunneling in the pathophysiology of phantom limb pain. *Brain Sciences*, 10(4):241, 2020.
- [27] J. E. Hall and M. E. Hall. *Guyton y Hall: Libro de texto de fisiología médica*. Elsevier, 14<sup>a</sup> ed. edition, 2020. Pág:60.
- [28] Sandipan Chowdhury and Baron Chanda. Estimating the voltage-dependent free energy change of ion channels using the median voltage for activation. *J Gen Physiol*, 139(1):3–17, 2012.