

UNIVERSIDAD DE MÁLAGA
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE
INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIÓN

TRABAJO FIN DE GRADO

CARACTERIZACIÓN DEL CANAL
ÓPTICO NO GUIADO EN EL MEDIO
SUBMARINO

GRADO EN INGENIERÍA
TELEMÁTICA

FRANCISCO ZAFRA DEL MORAL
MÁLAGA, 2021

CARACTERIZACIÓN DEL CANAL ÓPTICO NO GUIADO EN EL MEDIO SUBMARINO

Autor: Francisco Zafra del Moral

Tutor: Antonio García Zambrana

Cotutor: Rubén Boluda Ruiz

Departamento: Ingeniería de Comunicaciones

Titulación: Grado en Ingeniería Telemática

Palabras clave: Underwater Wireless Optical Communications (Comunicaciones ópticas no guiadas subacuáticas) (UOWC), comunicaciones ópticas subacuáticas, Monte Carlo, simulación, medio turbulento.

Resumen

Las comunicaciones ópticas se presentan como una tecnología necesaria para establecer enlaces de comunicaciones no guiados en el medio subacuático, siendo por tanto de especial interés el estudio detallado de este campo en aras de fomentar el futuro desarrollo en este ámbito de las comunicaciones.

El presente trabajo pretende precisamente llevar a cabo un estudio sobre la caracterización de este tipo de enlaces centrándose en medios con presencia de turbulencias, dadas las condiciones críticas que estos suponen, mediante la extensión de un simulador previamente desarrollado para medios altamente dispersivos escrito en el lenguaje C.

Se pretenden modelar planos de transiciones con diferentes coeficientes de refracción que interactúen con los fotones enviados alterando así su trayectoria de una forma aleatoria, intentando modelar fielmente el comportamiento real.

En definitiva, el presente trabajo aspira a poner de manifiesto el necesario estudio de ciertos escenarios no ideales para el futuro desarrollo de las comunicaciones ópticas subacuáticas.

CHARACTERIZATION OF UNDERWATER WIRELESS OPTICAL CHANNEL

Author: Francisco Zafra del Moral

Supervisor: Antonio García Zambrana

Co-supervisor: Rubén Boluda Ruiz

Department: Communications Engineering

Degree: Grado en Ingeniería Telemática

Keywords: UOWC, underwater optical communications, Monte Carlo, simulation, turbulent medium.

Abstract

Optical communications are presented as a technology required for establish non-guided communications links in the underwater environment, It is therefore of particular interest to study this field in detail with a view to encouraging future developments in this field of communications.

The purpose of this paper is to carry out a study on the characterisation of this type of link, focusing on turbulent environments, given the critical conditions they entail, by extending a simulator previously developed for high-band dispersive media written in the C language.

The aim is to model transition planes with different refractive coefficients that interact with the sent photons thus altering their trajectory in a random way, trying to model the real behavior faithfully.

In short, the aim of this paper is to highlight the need for a study of certain scenarios not ideal for the future development of optical communications underwater.

A mi madre,
por apoyarme siempre
y creer en mí como nadie lo hace

El autor

Agradecimientos

Me gustaría dedicar este apartado a agradecer a mis tutores, Antonio y Rubén por su ayuda desde el primer día, pero en especial a Antonio por soportarme durante estos años y animarme a disfrutar de este proyecto.

También agradecerle a mi familia por su apoyo constante e incondicional.

Acrónimos

ETSIT	Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Telecomunicación
PFC	Proyecto Fin de Carrera
TFG	Trabajo Fin de Grado
TFM	Trabajo Fin de Máster
UMA	Universidad de Málaga
UOWC	Underwater Wireless Optical Communications (Comunicaciones ópticas no guiadas subacuáticas)
ISI	Interferencia entre símbolos
LED	light-emitting diode
FOV	Field of view (Campo de visión)
PDF	Probability Density Function (función de densidad de probabilidad)

Índice

Agradecimientos	IX
Acrónimos	XI
I Introducción	1
1 Introducción y visión general	3
1.1 Objetivo	3
1.2 Estado del arte	4
1.3 Estructura del documento	6
II Desarrollo teórico del proyecto	11
2 Descripción teórica del simulador original	13
2.1 Visión general	13
2.2 Modelo geométrico	14
2.2.1 Fuente	16
2.2.2 Receptor	17
2.3 Fases de la simulación	17
3 Descripción teórica del medio simulado	19
3.1 Modelo a simular	19
3.1.1 Canal turbulento	20

3.2	Interacción de la luz con las transiciones	22
3.2.1	Ley de Snell en 3 dimensiones	22
3.2.2	Ecuaciones de Fresnell	24
III	Desarrollo software del proyecto	27
4	Desarrollo software	29
4.1	Modelo General	29
4.2	Proceso de la simulación	32
4.2.1	Sistema de referencia	32
4.2.2	Movimiento del fotón	33
4.2.3	Creación de transiciones y coeficientes de refracción	34
4.2.4	Transiciones	36
4.3	Tratamiento de los datos	39
4.4	Consideraciones de diseño	39
IV	Resultados de las simulaciones	41
5	Resultados de las simulaciones	43
5.1	Consideraciones previas	43
5.1.1	Incremento del coeficiente de refracción	44
5.1.2	Número de transiciones	45
5.1.3	Incremento en el eje z de las transiciones	49
5.1.4	Máximo ángulo polar de la normal de una transición	49
V	Final	53
	Conclusiones y líneas futuras	55

VI	Apéndices	57
A	Código mas importante	59
A.1	Procesado de fotones en transmisión	59
A.2	Generación de transiciones y coeficientes de refracción	62
A.3	Ejemplo fichero JSON	62
	Bibliografía	70

Índice de figuras

1.1	Coeficiente de absorción respecto a la longitud de onda	7
2.1	Esquema emisor - receptor	15
2.2	Esquema del receptor	18
3.1	Esquema de un canal turbulento	20
3.2	Detalles de una transición	21
3.3	Ley de Snell	23
4.1	Esquema de aplicación del algoritmo de las transiciones	39
5.1	Intensidad recibida para una distancia de 100 m y un incremento de n de $1e^{-3}$ (Varianza 0.01134)	46
5.2	Intensidad recibida para una distancia de 100 m y un incremento de n de $3e^{-3}$ (Varianza 0.03152)	46
5.3	Intensidad recibida para una distancia de 100 m y un incremento de n de $6e^{-3}$ (Varianza 0.05762)	47
5.4	Intensidad recibida para una distancia de 100 m y 50 transiciones(Varianza 0.05912)	48
5.5	Intensidad recibida para una distancia de 100 m y 200 transiciones(Varianza 0.04095)	48
5.6	Intensidad recibida en 100 m con incremento de z de 0.2 metros (Varianza 0.04210)	50
5.7	Intensidad recibida en 100 m con un incremento de z de 0.4 metros (Varianza 0.04020)	50

5.8	Intensidad recibida en 100 m con un ángulo polar máximo en las transiciones de $0,2\frac{\pi}{2}$ (Varianza 0.01238)	51
5.9	Intensidad recibida en 100 m con un ángulo polar máximo en las transiciones de $0,8\frac{\pi}{2}$ (Varianza 0.08418)	52
5.10	Esquema del comportamiento del límite del ángulo polar de los vectores normales a las transiciones	52

Índice de Tablas

1.1	Comparación de las diferentes tecnologías de comunicaciones ópticas subacuáticas [1]	9
3.1	Tabla con la descripción de los distintos parámetros de la turbulencia	22
4.1	Tabla de parametros de entrada	32

Parte I

Introducción

Capítulo 1

Introducción y visión general

Contenido

1.1	Objetivo	3
1.2	Estado del arte	4
1.3	Estructura del documento	6

Sinopsis

Durante este capítulo de introducción se explica cuál será el objetivo de este documento, seguido de una contextualización sobre las tecnologías que este Trabajo Fin de Grado (TFG) estudia, las UOWC, porque son importantes y cuáles son sus ventajas e inconvenientes. Por último, el apartado final explica de forma resumida el contenido/objetivo de cada uno de los siguientes capítulos.

1.1. Objetivo

La turbulencia oceánica tiene un fuerte impacto en las UOWC. Aunque existen numerosos simuladores físicos que simulan escenarios con dispersión y absorción, hay pocos modelos que simulen un medio con turbulencia oceánica.

El objetivo de este proyecto es claro, crear un sistema completamente funcional que permita simular de manera eficaz las UOWC en un medio subacuático en presencia de dispersión, absorción y turbulencia. Para ello, se va a continuar el excelente trabajo desarrollado por un antiguo compañero, Pedro Rico Pinazo,

que desarrolló un sistema capaz de realizar simulaciones muy eficientes aprovechando el gran potencial que puede llegar a aportar el lenguaje de programación C. Además de C, el simulador sigue el método de Montecarlo para realizar la simulación. Este método es muy costoso computacionalmente, pero gracias al uso de este lenguaje y decisiones de diseño como el paralelismo, se pueden conseguir tiempos aceptables para simulaciones de un tamaño considerable. Sin embargo, y aquí aparece el claro objetivo de este TFG, el simulador de Pedro no es capaz de simular medios turbulentos, solo están implementadas la absorción y la dispersión.

Como he dicho antes, el simulador de Pedro no soporta la turbulencia por lo que, para cumplir el objetivo, el simulador se modificará para añadir la posibilidad de realizar simulaciones más completas de las UOWC incluyendo además este fenómeno. Este será el objetivo principal del desarrollo por lo que se explicará todo el proceso de implementación con alto grado de detalle durante el desarrollo de este documento.

Cuando finalmente se haya conseguido una implementación funcional, se estudiará como afectan los distintos parámetros relacionados con la turbulencia (número de fotones, incremento de la variación de la posición en el eje z de las transiciones, incremento de los coeficientes de refracción, ángulo máximo polar del vector normal de las transiciones y el número de transiciones que se estudiarán y explicarán detalladamente más adelante) a una simulación. Estos parámetros también se definirán en detalle.

1.2. Estado del arte

Durante los últimos años, el interés por las comunicaciones ópticas inalámbricas ha visto un gran auge en todas las áreas: comunicaciones terrestres, espaciales y subacuáticas. Para el ámbito terrestre y espacial, ya existen numerosos estudios válidos que modelan fielmente su funcionamiento. Sin embargo, las comunicaciones inalámbricas subacuáticas requieren aún de mucho trabajo adicional de investigación debido a la complejidad extra que presentan este tipo de medios con respecto a los medios atmosféricos.

Al principio de este documento, se ha hablado de las UOWC pero, ¿por qué utilizarlas por encima del resto de tecnologías ya existentes para medios subacuáticos? En la actualidad, existen varias tecnologías que permiten una comunicación no guiada submarina. A continuación analizaremos brevemente las ventajas e inconvenientes de las cada una de ellas para así demostrar porque las UOWC son tan interesantes y presentan un auge tan grande en la actualidad.

Hoy en día, estas son las tecnologías más importantes, resumidas en la tabla 1.1:

1. **Ondas acústicas:** De entre los tres tipos de comunicaciones más populares, las ondas acústicas son en la actualidad la tecnología más utilizada en comunicaciones subacuáticas no guiadas debido a su baja absorción y a las largas distancias de cobertura que presenta, ya que pueden llegar a alcanzar kilómetros de distancia. Aunque en sus inicios este tipo de comunicaciones presentaba una relación señal-ruido bastante baja, debido a su tan extendido uso, a lo largo de los años se han desarrollado algoritmos y tecnologías que han permitido mejorar en gran medida su efectividad. Sin embargo, a pesar de todos estos avances, las ondas acústicas siguen teniendo grandes limitaciones. Su tasa de datos aproximada se calcula que ronda alrededor de los kbps, presenta una alta latencia y tiene un coste energético muy alto. [1]
2. **Radiofrecuencia:** El uso de ondas de radiofrecuencia en comunicaciones subacuáticas no guiadas es una alternativa investigada para mejorar la tasa de datos que pueden soportar las comunicaciones por ondas acústicas. Una de las ventajas que presenta este tipo de comunicación es la facilidad de una comunicación aire agua debido a la naturaleza de este tipo de ondas [1]. Esta tecnología mejora la latencia y la tasa de datos que podían alcanzar las ondas acústicas. Sin embargo, debido a las altas frecuencias que se utilizan para conseguir estas tasas, se reduce en gran medida la distancia, siendo útiles hasta un máximo de 10 m, y aumenta mucho el consumo, hasta cientos de vatios, en función de la distancia a la que se quiera transmitir.
3. **Canal óptico:** Por último las UOWC. Son capaces de superar tasas de datos de Gbps a distancias por encima de la radiofrecuencia (≈ 100 m como máximo). Por tanto, debido a las ventajas que supone el uso de estas altas frecuencias a pesar de los numerosos fenómenos que las afectan negativamente, como son la dispersión, la absorción y la turbulencia, esta tecnología presenta un gran futuro para su uso en comunicaciones en tiempo real con altos anchos de banda.

Muchos vehículos subacuáticos o sensores, requieren de un ancho de banda con una capacidad de transferencia del orden de Mbps. En el caso de grandes estaciones submarinas, necesitan altas tasas de datos por lo que recurren a la instalación de cables o fibra óptica que, aunque por supuesto cumple con los requisitos de velocidad de transferencia, requieren de un esfuerzo importante

para su instalación, además de un mantenimiento constante. Para plataformas móviles, se utilizan ondas de radiofrecuencia que ya se ha visto como puede ser una opción viable pero solo para distancias cortas, ya que cuando mayor sea su frecuencia, mayores serán las pérdidas. A esto, hay que sumarle su alto coste energético.

Las UOWC resuelven estos problemas. Aportan un ancho de banda más que suficiente para cualquier tipo de sensor o vehículo, muchas estaciones y plataformas móviles. Reducen considerablemente el consumo, proporcionando una solución eficiente a dispositivos con baterías. Todas estas posibilidades abren las puertas a la investigación, tanto científica como comercial de las UOWC ya que pueden aportar una comunicación en tiempo real entre sistemas submarinos de manera inalámbrica.

Sin embargo, las UOWC no son una tecnología sencilla de utilizar debido a los numerosos impedimentos que presenta el medio subacuático. En este tipo de medios, la absorción, la dispersión y la turbulencia son factores muy importantes a tener en cuenta. Estos provocan pérdidas de energía y dispersión en el tiempo que hay que estudiar y considerar. Por suerte, ya hay numerosos estudios sobre estos fenómenos. Por ejemplo, Duntley propuso en 1963 que el agua presenta un menor coeficiente de atenuación para longitudes de onda entre 450 y 550 nm que casualmente corresponden a las longitudes de onda de los colores azul y verde respectivamente (Figura 1.1). Estos valores se han convertido en una de las bases para el futuro de las UOWC.

Es cierto que la propagación láser ya ha sido ampliamente estudiada en aire con presencia de turbulencia atmosférica, tanto teóricamente como experimentalmente. Sin embargo, la propagación de la luz a través de una turbulencia compleja como puede ser la turbulencia oceánica aún requiere de mucha más investigación.

1.3. Estructura del documento

La estructura de este documento es muy sencilla.

En primer lugar, se presenta el desarrollo teórico, contiene todo lo necesario para comprender el desarrollo del TFG y poder seguir las explicaciones de las siguientes secciones correctamente.

Procede la sección correspondiente al desarrollo software. Desarrolla de manera detallada el proceso de funcionamiento de la sección del simulador enfocada en la turbulencia. Explica con detalle cuáles son los procedimientos y funcio-

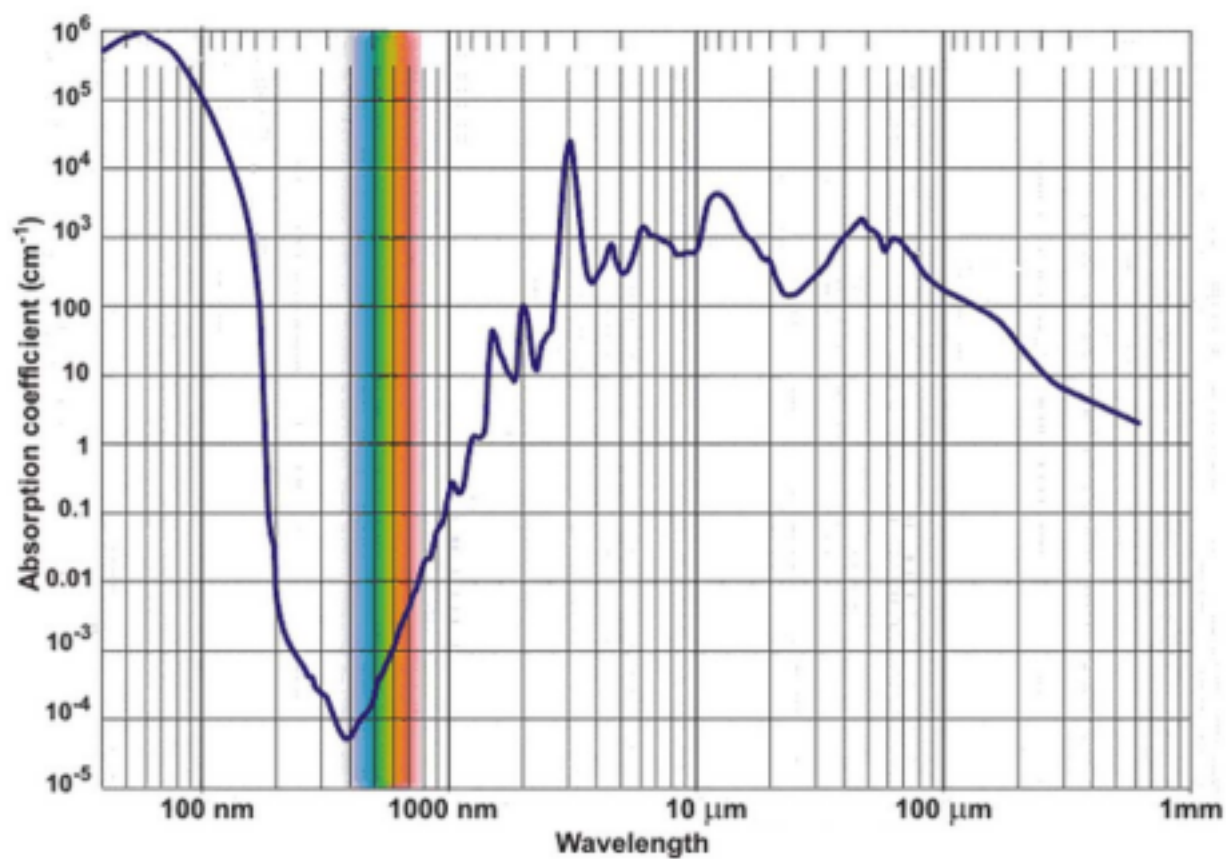


Figura 1.1: Coeficiente de absorción respecto a la longitud de onda

nes necesarias.

La siguiente sección corresponde al análisis de los resultados. Mediante los datos obtenidos en las simulaciones, se analizarán algunas gráficas para comprobar el efecto de los distintos parámetros correspondientes a la turbulencia así como la coherencia de los mismos.

Para terminar con el documento, se desarrolla la sección de conclusiones y posibles líneas futuras. Resumirá de forma clara y concisa los puntos más relevantes del TFG y presentará algunas posibles líneas futuras de estudio y mejora del simulador.

Parámetros	Acústica	Radiofrecuencia	Ópticas
Atenuación	Dependiente de la frecuencia y la distancia (0.1 - 4 dB/km)	Dependiente de la conductividad y la frecuencia (3.5 - 5 dB/m)	0.39 dB/m (oceano) - 11 dB/m (agua turbia)
Velocidad(m/s)	1500 m/s	$\approx 2,255 \times 10^8$	$\approx 2,255 \times 10^8$
Velocidad de transmisión	~ kbps	~ Mbps	~ Gbps
Latencia	Alta	Media	Baja
Distancia	hasta km	hasta ≈ 10 metros	$\approx 10 - 100$ metros
Ancho de banda	Dependiente de la distancia: 1000 km <1kHz 1 - 10 km ≈ 10 kHz <100 m ≈ 100 kHz	\approx MHz	10 - 150 MHz
Banda de frecuencia	10 - 15 kHz	30 - 300 Hz ó MHz	$10^{12} - 10^{13}$ Hz
Potencia para transmisión	decenas de Vatios	desde mVatios a cientos de Vatios (dependiente de la distancia)	pocos Vatios
Tamaño de antena	0.1 m	0.5 m	0.1 m
Eficiencia	≈ 100 bits/Julio		≈ 30.000 bits/Julio
Parámetros de rendimiento	Temperatura, salinidad y presión	Conductividad y permeabilidad	Absorción, dispersión, turbulencia, materia orgánica.

Tabla 1.1: Comparación de las diferentes tecnologías de comunicaciones ópticas subacuáticas [1]

Parte II

Desarrollo teórico del proyecto

Capítulo 2

Descripción teórica del simulador original

Sinopsis

Es importante conocer el funcionamiento básico del simulador original para poder comprender las futuras explicaciones del documento. Esta sección se encarga, de manera resumida, teórica y clara, de explicar el funcionamiento de las secciones más importantes y necesarias para entender correctamente como se desarrollará el TFG. Cabe destacar que muchos de los temas explicados en esta sección forman parte del TFG de Pedro Rico Picazo, pero son necesarios de explicar aquí para contextualizar al lector.

2.1. Visión general

Como ya se ha mencionado, el simulador está basado en el modelo de Montecarlo. Es un modelo muy sencillo que se basa en la repetición de un evento aleatorio de modelado simple un número elevado de veces. Aplicado para este caso, el objetivo será realizar, para un gran número de fotones, un conjunto de operaciones que nos ayuden a simular los cambios que sufriría este al viajar por el medio subacuático. Por supuesto, aunque este método es bastante sencillo, tiene un coste computacional muy alto por lo que crear un software eficiente que permita simulaciones de un número significativo de fotones supone un gran reto.

En resumen, la idea de simulación actual es muy sencilla. La simulación generará en el emisor fotones que transmitirá hasta un receptor.

Originalmente, el simulador, era capaz de realizar este tipo de simulaciones en canales con dispersión y absorción. Más adelante se verá como añadir la turbulencia sin modificar el comportamiento original.

2.2. Modelo geométrico

El simulador está estructurado en tres sistemas de referencia diferentes. Un sistema de referencia universal $\{U\}$, definido por los ejes x , y y z y otros dos sistemas generados a partir de este, uno para la fuente, $\{T\}$, y otro para el receptor, $\{R\}$. Estos tienen sus orígenes en los puntos de aplicación n_{tx} y n_{ty} , vectores que además marcan la dirección de los ejes z' de $\{T\}$ y $\{R\}$. A partir de estos sistemas de referencia se definirán los planos del emisor y del receptor, explicados posteriormente y utilizados en la fase de emisión y recepción de fotones respectivamente. Estos planos contienen el punto de origen de ambos dispositivos y tienen como vector normal los vectores n_{tx} y n_{ty} para cada caso. Todo esto se puede apreciar en la figura 2.1.

Por último, en la figura se puede observar también el punto (x_{rx}, y_{rx}, z_{rx}) , que viene dado por la posición del emisor, marca el origen del sistema de referencia del receptor. Por lo tanto, el sistema de referencia del emisor siempre estará en el punto $(0,0,0)$. Por lo tanto, la distancia entre ellos viene dada por:

$$d = \sqrt{x_{rx}^2 + y_{rx}^2 + z_{rx}^2} \quad (2.1)$$

A pesar de la existencia de estos tres sistemas de referencia, solo se trabajará con el plano universal, ya que las fases de emisión y recepción no requieren de modificación al no afectar directamente a la turbulencia.

Aunque no sea necesario comprender el funcionamiento completo de las fases de emisión y recepción, es conveniente explicar de forma resumida las características básicas de estos para mejorar el entendimiento del lector sobre el sistema completo.

Como se explicó anteriormente, tanto la fuente como el receptor trabajan en su propio plano. Existe un sistema global, el utilizado durante la mayor parte del TFG y que se corresponde con el que rige el movimiento de los fotones durante la fase de transmisión, un sistema concreto para la fuente y otro para el receptor. Las coordenadas utilizadas a partir de este momento en esta sección, corresponden a coordenadas dentro de sus respectivos planos, si se habla del receptor, se trabaja con el sistema $\{R\}$; si se habla de la fuente, se trabaja con el sistema $\{T\}$. La conversión entre sistemas de referencia se realiza antes y después del proceso de transmisión mediante matrices de rotación.

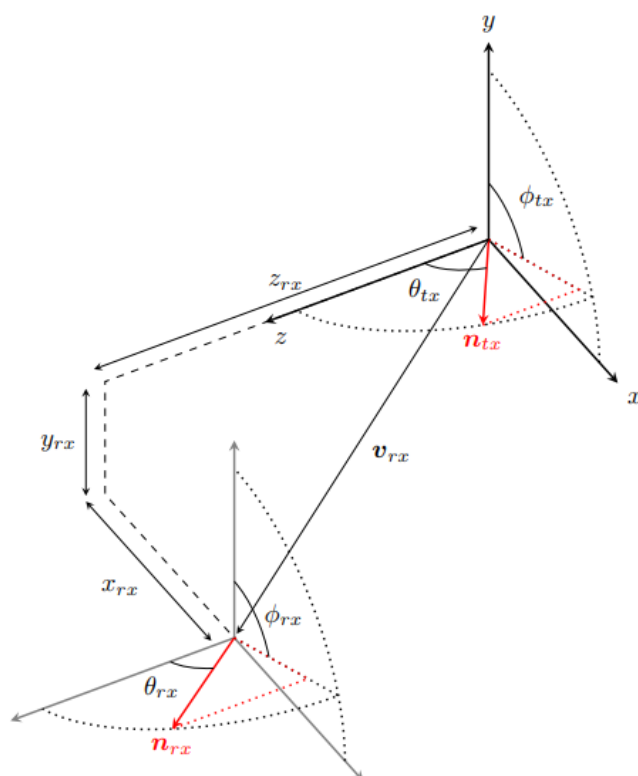


Figura 2.1: Esquema emisor - receptor

2.2.1. Fuente

La fuente en sí es algo muy sencillo, exceptuando a la fuente gaussiana, todos los demás tipos de fuentes son representados como un único punto en el plano emisor.

La fuente es la encargada de, durante la fase de emisión de un fotón, proveer a este de una posición inicial, de una dirección y de la potencia inicial que tendrá un valor de 1, al emitir un fotón este no pierde potencia. Existen varios tipos de fuentes y en función de este, obtendremos valores distintos para cada una de las características mencionadas anteriormente:

- **Fuente ideal y fuente isotrópica:** Estos dos tipos de fuentes son muy similares aunque no van a ser muy útiles para simulaciones reales.

Por un lado, la fuente ideal es exactamente eso. Es una fuente, cuyo origen para el envío de fotones es la posición $(0, 0, 0)$ y la dirección del fotón es idéntica a la dirección en el eje z , ambos con respecto al plano emisor.

Por otro lado, la fuente isotrópica tiene un comportamiento muy similar. El origen es el mismo. Sin embargo, la dirección de salida de los fotones es equiprobable en todas las direcciones posibles.

- **Fuente Lambertiana:** Su comportamiento es equivalente a un light-emitting diode (LED). Aunque el origen de los fotones seguirá siendo $(0, 0, 0)$, el cálculo de la dirección viene dado por [11] [2] [3]:

$$\phi_s = 2\pi q_1$$

$$\cos\theta = q_2^{\frac{1}{n+1}}, \quad n = -\frac{\ln 2}{\ln(\cos\Phi_{\frac{1}{2}})},$$

donde q_1 y q_2 son dos números aleatorios según una distribución lambertiana.

- **Fuente Gaussiana:** Este tipo de fuente, será capítulo 5 para realizar las simulaciones que se analizarán. Es el equivalente a un diodo láser. Es el más complejo de todos. A diferencia de los anteriores, el origen de los fotones no se encuentra en $(0, 0, 0)$ sino que viene dado por [8]:

$$\bar{r}_0 = \sqrt{-\ln(1 - q_1)}$$

$$r_0 = w_0 \bar{r}_0$$

donde r_0 es la coordenada $(0, 0, 0)$ y $q1$ y $q2$ son dos números aleatorios según una distribución gaussiana. El ángulo polar y azimutal vienen dados por [11]:

$$\theta = -\frac{r_0}{f_t} = \overline{r_0}\Theta$$

donde f_t es la distancia focal,

$$\phi = 2\pi q$$

2.2.2. Receptor

Como se puede observar en la figura 2.2 el receptor es un sistema relativamente sencillo. Se define en función del sistema de referencia $\{R\}$, del que se representan los ejes x' y y' y el Field of view (Campo de visión) (FOV), que viene dado por $2r_{max}$. La apertura del receptor indica, dentro del plano $\{R\}$, que fotones de este son considerados recibidos por el receptor y si lo son, comprobar si son detectados. También podemos observar como no es necesario que el centro del receptor coincida con el origen del plano. Para ello, se usan los valores x'_{rx} y y'_{rx} que desplazan el centro con respecto al origen de $\{R\}$.

En esta etapa final del fotón, hay que decidir si los fotones son detectados o no. Para ello lo primero que debe hacer un fotón es impactar en el plano de recepción dentro de la apertura del receptor. Luego se calcula el ángulo de entrada en la lente, si es superior al ángulo crítico es descartado. Por último, si cumple los requisitos impuestos por la absorción y aún posee suficiente potencia, el fotón es detectado y, por tanto, recibido.

2.3. Fases de la simulación

El simulador se divide en tres fases claramente diferenciadas:

- Emisión de fotones: La fuente establece el estado inicial de los fotones.
- Transmisión de los fotones: Se simula el movimiento de los fotones hasta que llegan al receptor o son extinguidos
- Recepción de los fotones: Se comprueba si los fotones entran o no en la apertura del receptor.

Aunque todas estas fases son importantes, debido a la naturaleza de la turbulencia, las fases de emisión y recepción no requieren de modificación.

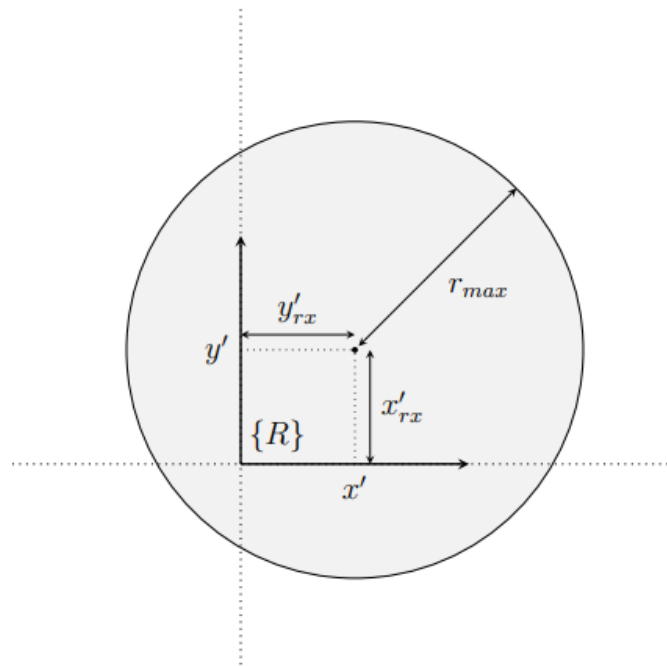


Figura 2.2: Esquema del receptor

Por lo tanto, en los siguientes capítulos, la explicación y el desarrollo se centrará en modificar la fase de transmisión para adaptarla a la turbulencia.

Capítulo 3

Descripción teórica del medio simulado

Sinopsis

Durante este capítulo se explicarán las bases teóricas sobre las que se basa el proyecto. Concretamente, se van a tratar ciertas consideraciones que se han llevado a cabo durante el proyecto. Se explica el comportamiento de la luz al interactuar con las transiciones que modelan la turbulencia oceánica.

3.1. Modelo a simular

La turbulencia es el resultado de inevitables perturbaciones de la corriente marina que generan remolinos [13]. Estos interactúan entre sí, dispersan su energía, y forman otros remolinos más pequeños [7][9]. Debido a la naturaleza caótica de estos eventos, la turbulencia que generan es homogénea, isotrópica y estable; de tamaño variable, cada uno con un coeficiente de refracción diferente [12]. Por lo tanto, para este proyecto, hemos asumido un medio estratificado en dirección vertical donde cada sección representa una celda homogénea e isotrópica [4]. Se puede ver representado en la figura 3.1.

Esto, en esencia, divide el canal en diferentes medios con coeficientes de refracción distintos. Esto implica que la luz, a lo largo del canal, atravesará medios con coeficiente de refracción diferente por lo que verá modificada su dirección tal y como explica y demuestra la ley de Snell.

Como se ha mencionado anteriormente, el objetivo es modificar un simulador

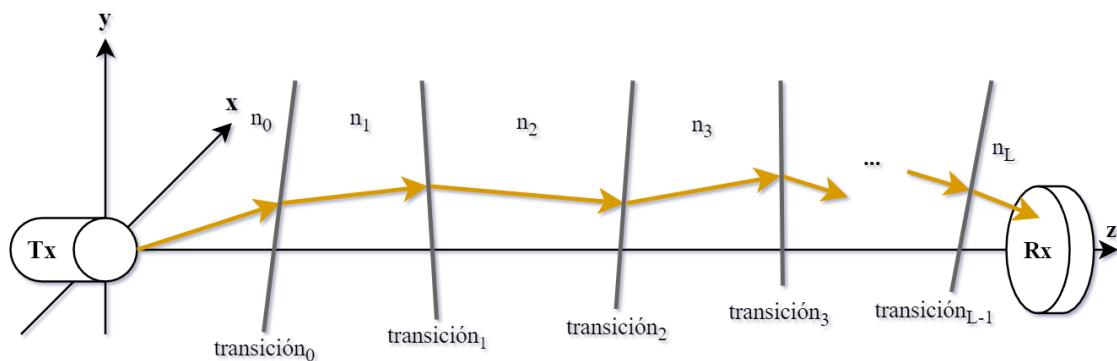


Figura 3.1: Esquema de un canal turbulento

ya implementado para agregarle una nueva funcionalidad, la turbulencia. Para ello, se va a empezar modelando teóricamente el canal turbulento. Explicaremos cuál es su estructura y los diferentes parámetros que lo alteran.

3.1.1. Canal turbulento

Para simular la turbulencia se supone un medio estratificado verticalmente. Esto implica que, a lo largo del canal, tendremos una serie de celdas con diferentes coeficientes de refracción. En el punto de contacto de estas celdas, definiremos las transiciones. Por lo tanto, una transición no es más que un plano de separación entre distintas celdas, o medios, con coeficiente de refracción distinto.

La figura 3.1 muestra un esquema de un canal turbulento. Como se puede observar, el medio está dividido por una serie de transiciones hasta un máximo de L transiciones (L es uno de los parámetros que se explicarán más adelante con más detalle que nos permite definir el número de transiciones). Estas transiciones separan las celdas del medio que tienen coeficientes de refracción diferentes, los distintos n_i . Cada vez que un fotón entre en contacto con una transición, esta provocará cambios en la dirección de este debido a la ley de Snell, que se explicará en detalle más adelante.

También es muy interesante e importante analizar el punto de contacto entre una transición y un fotón. Para ello, se va a analizar en detalle la figura 3.2. Esta figura es bastante compleja, pero su comprensión es vital para el lector.

De nuevo, vemos como una transición separa el canal en dos medios diferentes cada uno con su coeficiente de refracción particular (n_i y n_{i+1}). Estos valores se calculan aleatoriamente aunque se explicará con más detalle en futuras secciones.

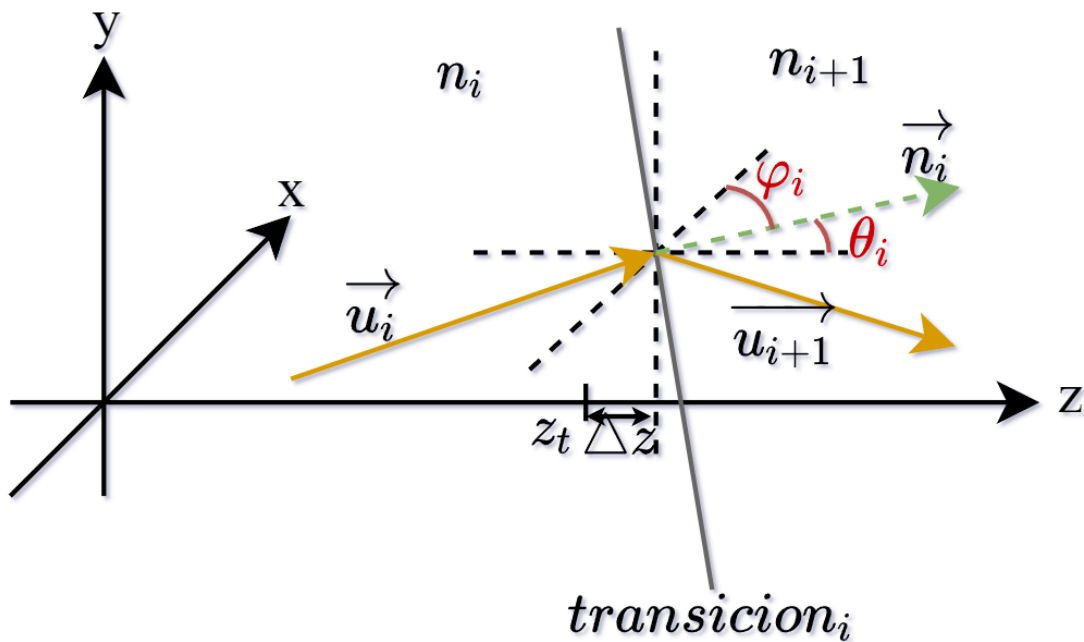


Figura 3.2: Detalles de una transición

Se pueden observar un par de parámetros z_t y Δz . Estos están directamente relacionados con la posición de la transición respecto al eje z del sistema. z_t indica la posición base de una transición y Δz , el incremento con respecto a esta. La necesidad de separar estos dos valores es simple. Partiendo de una posición inicial, cada transición sufrirá un incremento Δz aleatorio lo que aporta a la simulación un comportamiento más con más aleatoriedad buscando un comportamiento tan fiel como sea posible.

Cada transición vendrá dada por un vector normal al plano que representa, \vec{n}_i . Este vector será generado mediante coordenadas esféricas. Estas vienen representadas por los parámetros φ_i y θ_i , ángulo azimutal y polar respectivamente. Por lo tanto, utilizando estos valores, podemos definir vector normal a la transición en coordenadas cartesianas como:

$$\vec{n}_i = (\sin\theta\cos\varphi, \sin\theta\sin\varphi, \cos\theta) \quad (3.1)$$

Por último, en la figura 3.2 podemos observar la dirección del fotón que, cuando entra en contacto con la superficie de transición, ve modificada su dirección. La dirección del fotón antes de entrar en contacto con la transición viene dada por el vector \vec{u}_i y la nueva dirección tras ver modificada su trayectoria se representa como \vec{u}_{i+1} .

Parámetro	Descripción
n	Coefficiente de refracción del medio
z_t	Posición base en el eje z de una transición
Δz	Incremento de la posición en z de una transición
\vec{n}	Vector normal al plano de transición
φ	Ángulo azimutal del vector \vec{n}
θ	Ángulo polar del vector \vec{n}
\vec{u}_i	Dirección del fotón

Tabla 3.1: Tabla con la descripción de los distintos parámetros de la turbulencia

Debido a la importancia de esta sección, la tabla 3.1 muestra un resumen de todo lo explicado.

3.2. Interacción de la luz con las transiciones

Durante las simulaciones, los fotones transmitidos viajan a través de una serie de celdas atravesando una transición o plano de transición entre cada par. Las transiciones separan dos medios con distinto coeficiente de refracción y, por tanto, en el momento en el que un fotón las atraviesa, cambiando así de un medio a otro, sufre un cambio en su dirección. La ley de Snell y las ecuaciones de Fresnell definen el comportamiento de los fotones durante estos eventos. Las ecuaciones de Snell describen el cambio que sufre la luz al cambiar de un medio a otro con distinto coeficiente de refracción y, por tanto, se usará para calcular los cambios de dirección que sufren los fotones. Por otro lado, las ecuaciones de Fresnell, permiten predecir la pérdida de potencia que sufrirán los fotones al interactuar con una transición.

3.2.1. Ley de Snell en 3 dimensiones

La ley de Snell determina el ángulo de refracción de la luz al atravesar la superficie de separación entre dos medios con diferente índice de refracción. Para el caso de este documento, se usará la ley de Snell para describir el cambio de trayectoria que sufrirá cada uno de los fotones que atraviese una transición. Comúnmente, se conoce la ley de Snell según:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (3.2)$$

Donde n_1 y n_2 representan los coeficientes de refracción de cada uno de los medios y θ_1 y θ_2 el ángulo de incidencia y de refracción respectivamente. La

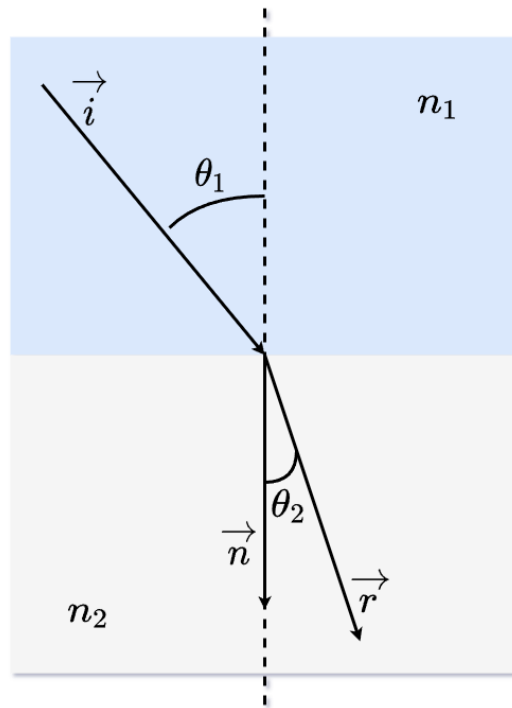


Figura 3.3: Ley de Snell

figura 3.3 muestra de forma gráfica el planteamiento de la ecuación 3.2. En esta, figura también se pueden observar el rayo incidente, \vec{i} y el rayo refractado, \vec{r} , además del vector normal a la transición entre ambos medios, \vec{n} .

Sin embargo, la ecuación 3,2 solo es válida para escenarios en dos dimensiones por lo que a pesar de su sencillez, no es suficiente para este estudio. Para solucionarlo, se recurre a la forma vectorial de la misma:

$$n_1(\vec{n} \times \vec{i}) = n_2(\vec{n} \times \vec{r}) \quad (3.3)$$

Donde, siguiendo con la nomenclatura anterior, n_1 y n_2 son los distintos coeficientes de refracción de los distintos medios y \vec{i} , \vec{r} y \vec{n} el vector unitario del rayo incidente, el vector unitario de rayo refractado y el vector unitario normal a la transición respectivamente.

Además de esta ecuación, se ha utilizado otro recurso más para resolver el problema. Aunque directamente la ley de Snell no lo indique, es muy importante aclarar que el rayo incidente \vec{i} , el rayo refractado \vec{r} y la normal a la interfaz \vec{n} están contenidos en el mismo plano. En otras palabras, el rayo refractado se encuentra en $\langle \{\vec{i}, \vec{n}\} \rangle$ de \vec{i} y \vec{n} de tal manera que existen constantes α y β tal que:

$$\vec{r} = \alpha \vec{i} + \beta \vec{n} \quad (3.4)$$

De esta afirmación, también se puede deducir que el vector $\vec{n} \times \vec{i}$ es el vector normal al plano que los contiene, igual que $\vec{n} \times \vec{r}$ y, por lo tanto, podemos asegurar que $\vec{n} \times \vec{r} \propto \vec{n} \times \vec{i}$. Este razonamiento permite expresar el vector $\vec{n} \times \vec{r}$ como un vector proporcional a $\vec{n} \times \vec{i}$ tal que:

$$\vec{n} \times \vec{r} = \alpha \vec{n} \times \vec{i} \quad (3.5)$$

Una vez que se obtiene la ecuación 3.5 solo queda compararla con la ecuación 3.3. De aquí, se deduce la siguiente expresión:

$$\alpha = \mu \quad (3.6)$$

Donde μ es:

$$\mu = \frac{n_1}{n_2} \quad (3.7)$$

Finalmente, para obtener la ecuación final de segundo grado que dará la dirección del vector refractado, se aplica el producto escalar a la ecuación 3.4 consigo mismo obteniendo:

$$0 = \mu^2 - 1 + \beta^2 + 2\mu\beta\langle\vec{i}, \vec{n}\rangle \quad (3.8)$$

De esta ecuación, se calcula el valor de β . Como es una ecuación de segundo grado, el resultado serán dos valores distintos. Obtendremos, por tanto, después de sustituir en 3.4 dos vectores unitarios diferentes. Para decidir cuál es el correcto, se comprueba que la dirección del rayo incidente sea coherente con la dirección del rayo refractado. Una solución tendrá el mismo sentido y será la que se considere correcta.

3.2.2. Ecuaciones de Fresnell

Las ecuaciones de Fresnell van a permitir durante la simulación calcular la pérdida de potencia de los fotones al interactuar con las transiciones. De hecho, las ecuaciones de Fresnell permiten predecir la potencia de la onda reflejada y de la onda transmitida.

La potencia de la onda reflejada vendrá dada por [8]:

$$\rho_{\perp}(\theta_i, \theta_t) = \left(\frac{n_t \cos \theta_i - n_i \cos \theta_t}{n_t \cos \theta_i + n_i \cos \theta_t} \right)^2 \quad (3.9)$$

$$\rho_{\parallel}(\theta_i, \theta_t) = \left(\frac{n_i \cos \theta_i - n_t \cos \theta_t}{n_i \cos \theta_i + n_t \cos \theta_t} \right)^2 \quad (3.10)$$

Además, debido a la naturaleza dispersiva del medio, la luz se despolariza completamente por lo que podemos asumir que la potencia de la onda reflejada vendrá dada por la media de ambas expresiones[5][6][10]:

$$\rho(\theta_i, \theta_t) = \frac{\rho_{\perp}(\theta_i, \theta_t) + \rho_{\parallel}(\theta_i, \theta_t)}{2} \quad (3.11)$$

La potencia de la onda transmitida viene dada por:

$$T_{\perp}(\theta_i, \theta_t) = 1 - \rho_{\perp}(\theta_i, \theta_t) \quad (3.12)$$

$$T_{\parallel}(\theta_i, \theta_t) = 1 - \rho_{\parallel}(\theta_i, \theta_t) \quad (3.13)$$

$$T(\theta_i, \theta_t) = 1 - \rho(\theta_i, \theta_t) = \frac{T_{\perp}(\theta_i, \theta_t) + T_{\parallel}(\theta_i, \theta_t)}{2} \quad (3.14)$$

Parte III

Desarrollo software del proyecto

Capítulo 4

Desarrollo software

Sinopsis

Durante el desarrollo del capítulo, se explicará de forma clara el desarrollo software del proyecto. Se comienza hablando del sistema de referencia empleado, seguido de las mecánicas de movimiento de los fotones, explica cómo se crean las transiciones y los distintos coeficientes de refracción para terminar detallando el elemento clave de la turbulencia, las transiciones entre medios.

4.1. Modelo General

Como ya se ha comentado, este proyecto toma como base un simulador ya implementado previamente en C, donde ya están implementadas todas las funcionales necesarias para realizar simulaciones completas en presencia de absorción y dispersión aplicando el método de Montecarlo. Estas funcionalidades incluyen:

- Un método de entrada de parámetros por consola para la realización de las distintas simulaciones.
- Fase de emisión con un emisor funcional con capacidad para simular diferentes clases de fuentes.
- Fase de recepción con un emisor funcional
- Canal de transmisión con capacidad de simular un comportamiento de absorción y dispersión.

- Un método de salida de resultados en formato JSON.

Partiendo del original, lo primero es identificar que sección del simulador debemos modificar. El objetivo de este TFG es implementar un simulador de turbulencia oceánica por lo que se modificará el canal para que la soporte. Se puede suponer que tanto el emisor como el receptor no van a influir en la implementación.

El simulador divide el proceso en tres partes muy diferenciadas. Emisión, transmisión y recepción de fotones. Durante la fase de emisión, cada fotón es generado en el plano emisor según el tipo de emisor que se haya configurado. Una vez que el fotón ha sido generado, pasa automáticamente a la fase de transmisión. Esta es la fase más interesante y, por lo tanto, más compleja. Durante este periodo, el fotón ve modificado su peso y dirección en función de las características del medio, absorción, dispersión o, en nuestro caso, turbulencia. Por último, si el fotón no ha sido descartado en la fase de transición, comienza la fase de recepción. En esta, se detecta que fotones de todos los que han alcanzado el plano receptor, están dentro de su rango y que, por lo tanto, se consideran recibidos.

Conociendo la estructura del simulador, tiene sentido pensar que para modelar un canal turbulento, con diferentes medios con coeficientes de refracción distintos separados por transiciones, tal y como se explica en la sección 3.1, se debe modificar la sección software correspondiente al canal. Como ya se ha analizado, el proceso de emisión y recepción de fotones es independiente de las características del canal, la fuente solo depende de su tipo y el receptor de su apertura. Por supuesto, además de las correspondientes modificaciones a la fase de transmisión, el software requerirá de más modificaciones tales como: modificaciones para entrada de parámetros o secciones para la generación de las posiciones de transición y generación de los coeficientes de refracción. Todas ellas explicadas a lo largo de este capítulo.

Una vez que se ha añadido el código necesario a la fase de transmisión, queda obtener los resultados de la simulación. Por suerte, el simulador original presenta un módulo que se encarga de recoger todos los datos generados. De nuevo, este módulo es completamente independiente del comportamiento del canal por lo que sus resultados seguirán siendo correctos a pesar de modificar la fase de transmisión, proporcionando, por tanto, resultados correctos para una simulación con turbulencia.

Finalmente, tal y como se ha visto en la sección 3.1.1, existen una serie de parámetros que es muy interesante poder controlar, ya que modifican el comportamiento de la simulación.

- Número de fotones, N : Cada simulación necesitará saber que cantidad de fotones se va a simular. Por supuesto, el tiempo y la calidad de la simulación dependerá directamente de este valor. Cuanto más alto sea su valor, mayor será el tiempo de simulación aunque sus resultados serán más fieles a la realidad.
- Incremento en el eje z de las transiciones, Δz : Todas las transiciones de la simulación comienzan en posiciones base repartidas entre el emisor y receptor de forma equidistante. Para añadir aleatoriedad a la simulación, a este valor, se le añade un Δz aleatorio. Este parámetro indica los límites, tanto positivos o negativos entre los que varía el incremento en el eje z de la transición. Se explica en más detalle en la sección 4.2.4.
- Incremento del coeficiente de refracción n , Δn : Al igual que Δz , este valor indica los límites, tanto positivos como negativos, de incremento que puede sufrir el coeficiente de refracción base que, aunque se puede modificar, tiene como valor inicial 1.33. Se explicará con más detalle en la sección 4.2.3
- Máximo ángulo θ proporcional a $\frac{\pi}{2}$, θ_{max} : Como se indica, este valor es proporcional a $\frac{\pi}{2}$, por lo tanto, un valor de 1 corresponde con un ángulo máximo de $\frac{\pi}{2}$. Al igual que Δz modifica la posición de las transiciones en el eje z , θ_{max} será el encargado de modificar el ángulo polar de las transiciones. Para agregar aleatoriedad, los vectores normales de los planos de transición serán generados mediante coordenadas polares con un ángulo azimutal φ aleatorio en el intervalo $[0, 2\pi]$ y un ángulo polar aleatorio en el intervalo $[0, \frac{\pi}{2}\theta_{max}]$. Este comportamiento se explica en detalle en la sección 4.2.4.
- Número de transiciones, L : Como su nombre indica, este parámetro se utiliza para especificar el número de transiciones de la simulación. Por lo tanto, si tenemos L transiciones, tendremos $L + 1$ medios y, por tanto, $L + 1$ coeficientes de refracción, ya que cada medio tendrá su coeficiente propio.

En la tabla 4.1 podemos ver resumidos estos parámetros con su correspondiente símbolo, su nombre dentro del simulador y las unidades correspondientes si procede.

Por último, hay que aclarar que actualmente todos los valores obtenidos de forma aleatoria, las variaciones de z para las transiciones, los ángulos azimutal y polares del vector normal en las transiciones y los distintos coeficientes de refracción, se generan según una distribución uniforme.

Parámetro	Símbolo	UWSIM	Unidades
Fotones	N	n	-
incremento en z de las transiciones	Δz	varZ	m
Incremento del coeficiente de refracción, n	Δn	var_n_water	-
Máximo ángulo θ proporcional a $\frac{\pi}{2}$	θ_{max}	boundary_max_theta	rad
Número de transiciones	L	L	-

Tabla 4.1: Tabla de parametros de entrada

4.2. Proceso de la simulación

4.2.1. Sistema de referencia

Como se ha explicado en 2.2 en el simulador hay presentes 3 sistemas de referencia diferentes, uno para la fuente, otro para el canal, considerado el sistema universal, y otro para el emisor. Durante una simulación, en la fase de emisión, los fotones son generados dentro del sistema del emisor y, mediante matrices de rotación, trasladan sus coordenadas al sistema universal(sistema del canal) una vez terminada la fase de emisión y comienza la fase de transmisión. Una vez los fotones terminan esta fase y han llegado al emisor, los fotones trasladan sus coordenadas al sistema receptor de la misma forma, mediante matrices de rotación.

Durante el desarrollo del software, no ha sido necesario trabajar con los sistemas ni del emisor ni del receptor por lo que se excluirán a partir de ahora y la explicación se centrará en el sistema universal.

En la implementación, por temas relativos al diseño, se optó por establecer el receptor en las coordenadas (0,0,0) y establecer la posición de la fuente en función de este en dirección z negativa. Además, como se observa en la figura 2.1 el eje z se define conectando emisor y receptor. Por lo tanto, si se establece el emisor a una distancia x del receptor, en el sistema universal el receptor se encontrará en la coordenada 0 respecto al eje z y la fuente en la coordenada $-x$ en el eje z .

En la práctica esto implica que los fotones siempre tendrán coordenadas z negativas y, en el momento de modificar su posición, su coordenada z irá acercándose a 0 hasta superarlo, momento en el cual finalizan la fase de transmisión y comienzan la fase de recepción donde se comprueba si han sido recibidos o no dependiendo del FOV del receptor.

4.2.2. Movimiento del fotón

El fotón es el elemento base de la simulación. Con él se modela el comportamiento de la luz en el medio submarino, ya que nos permite mediante el uso de leyes y ecuaciones, Ley de Snell y Ecuaciones de Fresnell, predecir su comportamiento. Para ello, se deben comprender los parámetros que lo acompañan.

Aunque un fotón tiene varios parámetros, esta sección se centrará en los que se consideran más interesantes en relación con el movimiento de los mismos. En concreto, nos centraremos en la posición, (x,y,z) , el vector director unitario, (μ_x, μ_y, μ_z) y de la distancia que ha recorrido desde su emisión. μ_x, μ_y, μ_z son simplemente el valor de los cosenos de los ángulos que forma el vector director unitario de un fotón con los ejes x, y y z respectivamente. Por lo tanto, la dirección de la trayectoria de un fotón viene dada por:

$$\vec{u} = [\mu_x, \mu_y, \mu_z] \quad (4.1)$$

Por otro lado, cada fotón también tiene asignado un peso concreto. Podríamos pensar en este como la energía de cada fotón aunque computacionalmente lo que esto presenta es la probabilidad de que un fotón no sea descartado, es decir, cuanto mayor sea su peso, la probabilidad de supervivencia del fotón será mayor.

Los fotones son originados por la fuente durante la fase de emisión. Los valores iniciales de los parámetros de este, por lo tanto, esta muy estrechamente relacionado con el tipo de fuente elegida para la simulación. Como se explica en detalle durante la sección 2.2.1, la fuente puede ser: ideal, isotrópica, lambertiana o gaussiana. El punto de origen dependerá del tipo elegido, al igual que su dirección, es decir, los parámetros mencionados anteriormente, posición y dirección del fotón, se inicializan en este momento. Por supuesto, el resto de parámetros también se asignan en este momento, pero, a diferencia de los anteriores, el peso y la distancia no dependerán del tipo de fuente. El peso siempre comenzará con valor 1, es decir, los fotones partirán con un 100 % de probabilidad de supervivencia que disminuirá a lo largo de la simulación según las ecuaciones de Fresnell. La distancia, como es lógico, comenzará a 0 e irá aumentando a medida que el fotón se desplace hacia el emisor.

Una vez el fotón ha sido generado comienza la fase de transmisión. Durante esta etapa, se simula el desplazamiento que sufre durante su camino por el canal. En este proceso, el fotón experimentará una serie “saltos” de distancias aleatorias siguiendo una distribución de poisson, marcando los distintos eventos. Los eventos no son más que la interacción entre un fotón y una partícula, estos son, por lo tanto, el mecanismo utilizado por el simulador para modelar un ca-

nal con dispersión y absorción. Ya que el objetivo es añadir a esta funcionalidad la turbulencia, la implementación deberá respetar este proceso y agregarle, sin alterar el comportamiento dispersivo y de absorción, la turbulencia.

Este proceso es conceptualmente bastante sencillo. Para respetar el funcionamiento original se realiza del modo descrito a continuación. El funcionamiento sigue siendo el mismo, los fotones van saltando entre eventos hasta llegar a su destino. Sin embargo, el algoritmo se encarga de detectar si, durante el salto, el fotón ha atravesado alguna transición. En caso negativo, simplemente no hace nada. En caso positivo, el algoritmo hace retroceder al fotón hasta el punto de contacto con la transición, modifica su dirección en ese punto aplicando la ley de Snell, reduce su peso según las ecuaciones de Fresnell y, para mantener la consistencia con la absorción y dispersión, el fotón avanza la misma distancia que retrocedió previamente pero en la nueva dirección calculada. Este proceso se explica en detalle más adelante en la sección 4.2.4 y se puede ver un esquema en la figura 4.1.

Por último, los fotones serán descartados o interceptados por el plano receptor. Aquí se calcula si el fotón que ha impactado en el plano se considera como un fotón recibido o no. Para ello, primero, el receptor detecta cuáles de todos los fotones que han sido interceptados por el plano emisor están dentro del FOV de este. Una vez hecho esto, los fotones recibidos son evaluados para establecer, según su peso, si han sido detectados o no. Por lo tanto, solo se contabilizarán aquellos fotones que han entrado en el FOV del receptor y que hayan sido además detectados.

4.2.3. Creación de transiciones y coeficientes de refracción

Como hemos visto durante el desarrollo del documento, las transiciones son la base del comportamiento de la turbulencia, así como los coeficientes de refracción de los medios que separa. Por ello, para poder simular la turbulencia, es necesario establecer valores iniciales para ambos.

Para generar los valores de los coeficientes, se partirá de un valor base de 1.33 (índice de refracción del agua pura) al que se le aplicará un incremento, tanto positivo como negativo, siguiendo una distribución uniforme dentro de los límites establecidos por el parámetro de incremento del coeficiente de refracción, Δn . Por otro lado, de manera similar, las transiciones se repartirán de manera equiespaciada en el eje z , asignando a cada una un valor base. Luego, a este valor se le añadirá un incremento, de nuevo positivo o negativo, según una distribución uniforme que vendrá dado por el parámetro de incremento de las transiciones en el eje z , Δz .

Para empezar, se presentan las distintas formas posibles de establecer la frecuencia de actualización de estos valores durante la simulación:

- Para cada fotón: Una opción es actualizar los valores de las transiciones y los coeficientes para cada fotón simulado. Aunque esto aumentaría el comportamiento caótico, supondría un coste computacional adicional no necesario, ya que esta frecuencia de cambio no se ha considerado realmente representativa del caso real.
- Para cada simulación: El otro extremo es realizar estos cambios para cada simulación completa. Por supuesto, esto reduce al mínimo el impacto computacional del proceso, sin embargo, para simulaciones grandes, no modificar estos valores puede afectar a la precisión de la simulación.
- Cada intervalo x de fotones: La opción intermedia, realizar la actualización de los valores en intervalos de un número x de fotones simulados. No aparece un coste computacional alto y los resultados no difieren en función de la amplitud de la simulación.

Una vez analizadas las opciones, parece que la opción más coherente es la de actualizar los valores de los coeficientes de refracción de los distintos medios, n , y las posiciones con respecto al eje z de las transiciones en intervalos preestablecidos de fotones simulados debido a que los resultados no se verán afectados según el tamaño de la simulación y el coste computacional es manejable. En concreto, el intervalo establecido ha sido de 10^5 .

La elección de este valor no ha sido al azar. El simulador original sigue una metodología de simulación en bloques de fotones, es decir, divide la cantidad total de fotones en bloques de un tamaño predefinido de fotones para aprovechar la posibilidad de realizar simulaciones concurrentes que agilicen el proceso y reduzcan los tiempos de ejecución. Este valor de bloque, está establecido a 10^5 fotones. Por lo tanto, la actualización de los valores se hace para cada bloque de fotones que se va a simular.

Una vez que ya se ha establecido el periodo de asignación de los valores, hay que explicar como se generan estos valores. Cada vez que se actualizan los valores, se crean dos arrays de tamaño L y $L + 1$, para la posición z de las transiciones y los valores para el coeficiente de refracción de cada medio, n , respectivamente.

La generación de estos arrays es muy similar aunque tienen pequeñas diferencias.

El array que representa las transiciones se rellena primero con L valores equiespaciados entre cero y la posición del emisor. Es decir, la posición base

de cada una de las transiciones vendrá dada por la siguiente fórmula:

$$pos_i = -(pos_emisor - \frac{pos_emisor}{L} * (i + 1)) \quad (4.2)$$

donde i tomará valores de 0 a $L - 1$. Una vez que se ha construido el array con los valores base, hay que añadir el Δz . Esto se hace para añadir aleatoriedad a la simulación y que la posición de las transiciones no sea constante buscando así un comportamiento similar al del canal submarino. Por lo tanto, la posición final de las transiciones vendrá dada por:

$$pos_i = -(pos_emisor - \frac{pos_emisor}{L} * (i + 1)) + rnd(-\Delta z, \Delta z) \quad (4.3)$$

donde $rnd(-\Delta z, \Delta z)$ representa un valor aleatorio entre $-\Delta z$ y Δz según una distribución uniforme.

El array que representa los coeficientes es ligeramente más sencillo. Para crear el array de los coeficientes de refracción de los distintos medios se le asigna a cada uno de estos un valor base de 1.33. Este es el valor por defecto que tiene definido el simulador como valor base de los coeficientes de refracción, ya que es el valor en agua pura. Una vez que el array ha sido inicializado con el valor base, simplemente resta hacer el mismo proceso que anteriormente, sumar a cada uno de ellos un incremento aleatorio dentro de unos límites, Δn . Por lo tanto:

$$n_i = n_agua + rnd(-\Delta n, \Delta n) \quad (4.4)$$

donde $rnd(-\Delta n, \Delta n)$ representa un valor aleatorio entre $-\Delta n$ y Δn , según una distribución uniforme, y n_agua el coeficiente de refracción del agua (por defecto agua pura, 1.33).

4.2.4. Transiciones

Las transiciones son el núcleo del correcto funcionamiento de la turbulencia en el simulador. Durante la fase de transmisión, los fotones se ven afectados por los fenómenos de la absorción, dispersión y turbulencia. Originalmente, la fase de transmisión solo aplicaba absorción y turbulencia por lo que es trabajo de este documento explicar y demostrar como añadir la turbulencia al funcionamiento original, permitiendo así simulaciones complejas que incluyan todos los fenómenos.

Para ello, es importante recordar cómo funcionaba originalmente el simulador. Como se explica en 4.2.2 los fotones saltan una cierta distancia según una distribución de poisson. Cada salto se considera como un evento, un choque con

una partícula, donde el fotón modifica su peso y su dirección. Por lo tanto, para cumplir el objetivo de este trabajo, es necesario ser capaces de añadir la turbulencia sin alterar este funcionamiento y, para ello, se va a proceder de la siguiente forma:

- Se comienza calculando la distancia que recorre el fotón hasta encontrar la siguiente partícula, tal y como se hacía anteriormente, y se desplaza el fotón a la nueva posición.
- Una vez hecho esto, se comprueba si el fotón ha atravesado la siguiente transición. Para ello, cada fotón almacena el número de transiciones que ha atravesado. Con este identificador, se puede obtener la coordenada z de la próxima transición que el fotón debe superar. Una vez se ha obtenido la posición de la transición y la posición del vector, averiguar si el fotón la ha superado o no es muy sencillo. Simplemente, se compara la nueva posición z del fotón con la posición z de la transición, es decir:

$$p_z > t_z \quad (4.5)$$

donde p_z es la posición z del fotón y t_z es la posición z de la transición.

- Si no se cumple 4.5, el fotón sigue la simulación como hasta ahora. Si se cumple, se sabe que se ha atravesado una transición y que, por tanto, se debe continuar la ejecución del algoritmo. Para ello, lo primero es devolver el fotón a la posición de la transición. La siguiente ecuación indica el modo de calcular la distancia desde la posición actual del fotón hasta la transición:

$$d = \frac{p_z - t_z}{\mu_z} \quad (4.6)$$

donde d es la distancia del fotón a la transición, y μ_z es la dirección en el eje z del fotón.

- Una vez calculada la distancia es muy sencillo hacer retroceder al fotón. Para ello, simplemente tendremos que restarle a la posición del fotón la distancia que ha recorrido en su dirección actual, quedando así la posición del fotón en la misma posición que la transición, consiguiendo así el punto de interacción entre ambos. Este paso viene dado por la siguiente expresión:

$$\vec{p}_r = \vec{p} - \vec{\mu} * d \quad (4.7)$$

donde \vec{p} representa el vector posición del fotón y $\vec{\mu}$ su vector director.

- Una vez el fotón está en su lugar correspondiente, el punto de interacción entre el fotón la transición, se genera el vector normal del plano. Tal y como plantea la ley de Snell, la dirección del rayo refractado, en este caso la nueva dirección del fotón, vendrá dada, no solo el rayo incidente sino también por el vector normal a la superficie de transición, las transiciones. Hasta ahora, solo era necesario definir en que punto del eje z un fotón interactúa con una transición, no se particularizaba el vector normal de los planos de transición, ya que no eran necesarios. Sin embargo, en este punto, sí son necesarios.

Gracias a la generación de estos vectores, añadimos más aleatoriedad a la simulación, consiguiendo así un mejor acercamiento al comportamiento de la turbulencia real. Lo siguiente será comprender como se generan estos vectores.

Su generación es realmente muy sencilla, tal y como se vio en la sección 3.1.1, el vector normal a una transición es generado a partir de su ángulo polar, θ y azimutal, φ que se obtendrán de forma aleatoria siguiendo una distribución uniforme. Por supuesto, el valor de estos ángulos está contenido dentro de unos intervalos concretos. En concreto, $\varphi \in [0, 2\pi]$ y $\theta \in [0, \theta_{max}\frac{\pi}{2}]$, donde θ_{max} es el parámetro que establece el máximo ángulo polar. Con todo esto, podemos calcular el vector normal a la transición como:

$$\vec{n}_t = (\sin\theta\cos\varphi, \sin\theta\sin\varphi, \cos\theta) \quad (4.8)$$

- Ahora que finalmente se han obtenido todos los datos necesarios para proceder, se puede aplicar la ley de Snell en su forma vectorial, tal y como se explica en la sección 3.2. Utilizando el vector normal y la dirección del fotón, se obtiene la nueva dirección del fotón, a la que llamaremos μ_t y que, por lo tanto, le asignamos a este.
- Por último, y para mantener la consistencia del simulador, es indispensable recorrer la distancia retrocedida. Para ello, usando la nueva dirección del fotón, μ_t , aplicamos la operación contraria a la utilizada para hacer retroceder al fotón (ecuación 4.7) y así hacerlo avanzar de nuevo. Quedaría de la siguiente manera:

$$\vec{p}_t = \vec{p} + \vec{\mu}_t * d \quad (4.9)$$

colocando así el fotón de nuevo a la misma distancia que antes pero en la nueva dirección. No se puede olvidar indicar al fotón que ha superado la transición. Para ello simplemente se suma 1 al valor previo de este campo.

Para una mejor comprensión del proceso, la figura 4.1 muestra un esquema sencillo del proceso.

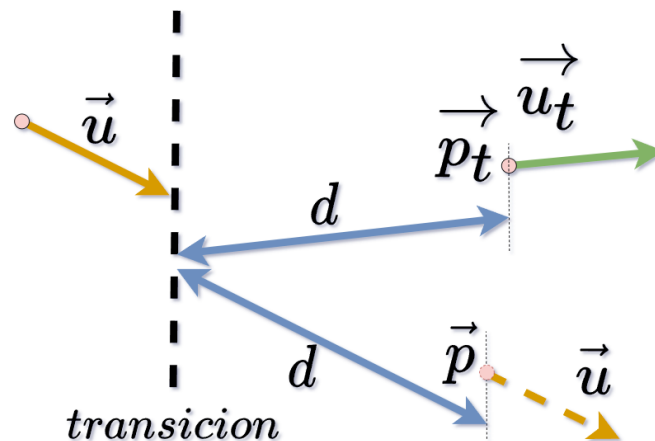


Figura 4.1: Esquema de aplicación del algoritmo de las transiciones

4.3. Tratamiento de los datos

Por último, es necesario un proceso para obtener resultados, se necesita un método que recoja los datos generados durante la simulación y los agrupe de manera adecuada para su posterior uso y análisis.

Para ello se aprovecha la implementación original que es capaz de resumir en un archivo de salida en formato JSON los resultados de las simulaciones. En estos archivos podemos encontrar el valor de todos los parámetros de la simulación además de un conjunto de estadísticos muy útiles que se usarán en un futuro a la hora de mostrar y analizar los resultados.

En el anexo A.3 se puede observar un ejemplo del formato de los archivos de salida. Podemos ver la configuración general, la configuración del receptor y emisor, los fotones simulados y las distancias. . .

4.4. Consideraciones de diseño

Al igual que en la versión original, este software requiere de una alta cantidad de recursos, tanto en memoria como en tiempo. Para ello, como se ha mencionado anteriormente, con la ayuda de una librería de C, OpenMP, se trabaja en bloques de fotones, por defecto en bloques de 10^5 fotones. Esto implica que a la hora de realizar simulaciones grandes, como por ejemplo 10^6 , un orden mas que el tamaño de bloque, podemos separar la tarea en 10 subtareas más pequeñas

de 10^5 fotones, simularlo independientemente, mejorando considerablemente el rendimiento, y finalmente mostrar el resultado conjunto.

Por otro lado, durante el desarrollo de la implementación, se han tomado varias decisiones que se van a resumir y remarcar en este apartado. Por un lado, el proceso de generación de transiciones y coeficientes se ha establecido para cada bloque a simular. Otra decisión que se ha tomado es relativa a la generación de valores aleatorios. A lo largo del documento, se establecen los valores de muchos parámetros de forma aleatoria con distintas distribuciones. Algunos de ellos estaban definidos en el simulador original por lo que no se entrara en más detalle. El resto, son particulares de la turbulencia, en concreto:

- Ángulo polar del vector normal a la transición, θ : Distribución uniforme.
- Ángulo azimutal del vector normal a la transición, φ : Distribución uniforme.
- Incremento del coeficiente de refracción, Δn : Distribución uniforme.
- Incremento de las transiciones en el eje z , Δz : Distribución uniforme.

Como se puede observar, actualmente todos los valores siguen una distribución uniforme. En el momento de desarrollo de este documento, no existe suficiente documentación como para asegurar que haya una distribución aleatoria óptima para estos parámetros. Por ello, se tomó la decisión de usar una distribución uniforme, ya que parecía adaptarse bien el modelo que se quería simular. Otra opción contemplada fue la del uso de una distribución gaussiana. Sin embargo, se ha terminado manteniendo una distribución uniforme por su sencillez y por no suponer grandes cambios en las simulaciones.

Otro detalle importante, esta vez relativo únicamente a Δz , es que está limitado de manera indirecta y el simulador evita que se pueda superar ese límite. Durante una simulación, las distintas transiciones son generadas equiespaciadas entre el receptor y la fuente. A este valor base se le añade Δz modificando así su posición en el eje z . Es muy importante que este valor no sea mayor que la mitad de la distancia que separa dos transiciones en sus posiciones base. Esto podría provocar que dos transiciones se cruzasen causando errores en la fase de transmisión. Como solución, el simulador limita este valor, si al introducir los parámetros se detecta que el valor para Δz es mayor que la mitad de la distancia que separa dos transiciones, no le asigna este valor, sino que calcula la distancia máxima permitida la asigna.

Parte IV

Resultados de las simulaciones

Capítulo 5

Resultados de las simulaciones

Sinopsis

Durante este capítulo se van a analizar varios resultados de las simulaciones realizadas sobre turbulencia oceánica. Se va a estudiar de que manera y como afectan los distintos parámetros atribuidos a la turbulencia oceánica en la potencia normalizada recibida.

5.1. Consideraciones previas

Este capítulo contiene un conjunto de simulaciones y su análisis para observar el comportamiento de la turbulencia al realizar variaciones en cada uno de los distintos parámetros particulares que se han estudiado durante el desarrollo de este TFG.

Como el objetivo es observar como los estos parámetros afectan al comportamiento de la luz en un entorno turbulento, tanto el emisor como el receptor serán idénticos en todas las simulaciones realizadas, así como otras características generales de la simulación. En concreto, la simulación parte de la siguiente configuración:

- Se utilizará un emisor de tipo gaussiano con una cintura de haz $w_0 = 10cm$ y una dispersión $\Theta = 1,5mrad$
- Para aislar la turbulencia y estudiarla sin factores ajenos, las simulaciones se harán sin absorción ni dispersión.

- La apertura del receptor tendrá un radio de 10 cm, $r_{max} = 10\text{cm}$ y un FOV de 180°
- Las simulaciones se realizan a 5 distancias diferentes, 20 m, 40 m, 60 m, 80 m y 100 m. Aunque el análisis se centrará en las gráficas a 100 m por ser las más interesantes debido a ser la máxima distancia.
- Las simulaciones se realizan en ambientes de agua clara.

Para observar resultados, se ha decidido, basándonos en el número de fotones recibidos, calcular la potencia normalizada recibida en el receptor y mostrar su respectivo PDF. Todas las figuras incluyen además la función normal logarítmica superpuesta, ya que se ajusta muy bien a la mayoría de ellas.

Para analizar como afectan los diferentes parámetros a los resultados, existirá una simulación base. Esto quiere decir que para todos los análisis posteriores, todos los parámetros que no estén siendo estudiados, tendrán los valores establecidos a continuación:

- Incremento del coeficiente de refracción, Δn : $1e^{-3}$.
- Número de transiciones, L : 100 transiciones.
- Incremento en el eje z de las transiciones, Δz : 0.1 m.
- Máximo ángulo polar de la normal a la transición (proporcional a $\pi \frac{\theta_{max}}{2}$): 0.5.

El histograma generado por estos valores concretos es el representado en la figura 5.2.

5.1.1. Incremento del coeficiente de refracción

El primer parámetro a estudiar es el coeficiente de refracción, n . Probablemente, este sea uno de los parámetros más importantes de estudio debido al impacto directo que tiene sobre el comportamiento del canal turbulento.

Este parámetro tiene su influencia al aplicar la ley de Snell, ecuación 3.3. Por lo tanto, el cociente de los respectivos n de dos medios colindantes marcará la en que medida un fotón ve modificada su dirección al atravesar una transición.

Por lo tanto, debido a esta dependencia entre la nueva dirección y los coeficientes de refracción, en las simulaciones, a medida que este valor vaya aumentando, se espera obtener una mayor varianza de la intensidad normalizada recibida.

Vamos a comenzar analizando la figura de referencia, figura 5.2. Al no tener otras figuras aun con la que compararla, simplemente podemos decir que tiene una varianza de 0.039 y que se ajusta bastante bien a una distribución de probabilidad normal logarítmica. Se verá como todas las gráficas tienen un muy buen ajuste a esta distribución.

Procedemos con la figura 5.1, esta tiene una varianza más pequeña, de $1e^{-3}$ concretamente y, por lo tanto, según el análisis previo, debería tener una varianza menor. Observándola se puede ver que, en efecto, esto es así. Los valores más extremos de este histograma terminan en 0.7 por la izquierda y en 1.3 por la derecha mientras que la gráfica base disminuye por debajo de 0.6 y aumenta por encima de 1.6. Por lo tanto, vemos que una disminución del coeficiente de refracción supone una disminución de la varianza. Para concretar, el valor de la varianza para un coeficiente de refracción de $1e^{-3}$ es de 0.011, inferior al obtenido en una simulación con varianza $1e^{-3}$ que asciende a 0.039.

Para confirmar completamente el análisis previo, ahora se va a comparar el histograma base, figura 5.2, con otro histograma, esta vez con coeficiente superior. La simulación ha sido realizada para un valor de coeficiente de refracción de $6e^{-3}$, tal y como se ve en la figura 5.3. Como era de esperar, vemos que la cola del gráfico ha aumentado así como lo ha hecho su varianza que nos da un valor de 0.057 para un coeficiente de refracción de $6e^{-3}$.

Por lo tanto, podemos concluir que el aumento de la variación de n conlleva una mayor varianza en recepción. Tal y como se explica en la sección 3.2 el cambio de dirección del fotón al interactuar con una transición, está directamente relacionado con el cociente de ambos medios. Por lo tanto, si introducimos mayor variabilidad entre los coeficientes de estos, provocará mayor variabilidad de la intensidad recibida normalizada.

5.1.2. Número de transiciones

A continuación se observará el impacto que puede tener el número de transiciones con la potencia recibida. Este valor define además el número de medios que atraviesa la luz y por ello, el número de veces que un fotón modificará su trayectoria debido a una transición y la energía que perderá a lo largo de su transmisión. Para analizarlo tomaremos la figura 5.2 como referencia, como se menciona al principio, esta gráfica representa una simulación con 100 transiciones, y compararemos su resultado con otras dos simulaciones, las figuras 5.4 y 5.5.

Al observar la figura 5.5, vemos que con 200 transiciones, se ha conseguido aumentar ligeramente la varianza con respecto al histograma base, figura 5.2,

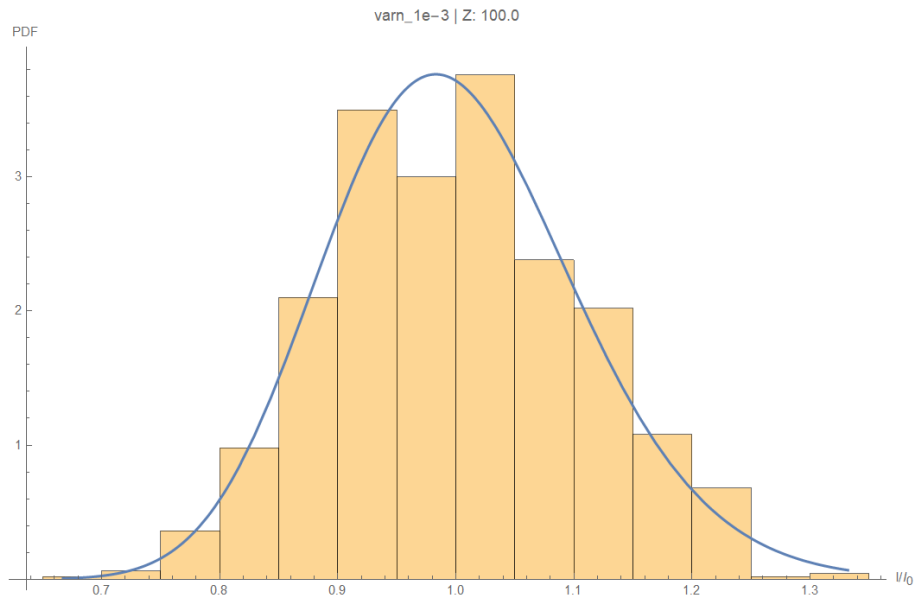


Figura 5.1: Intensidad recibida para una distancia de 100 m y un incremento de n de $1e^{-3}$ (Varianza 0.01134)

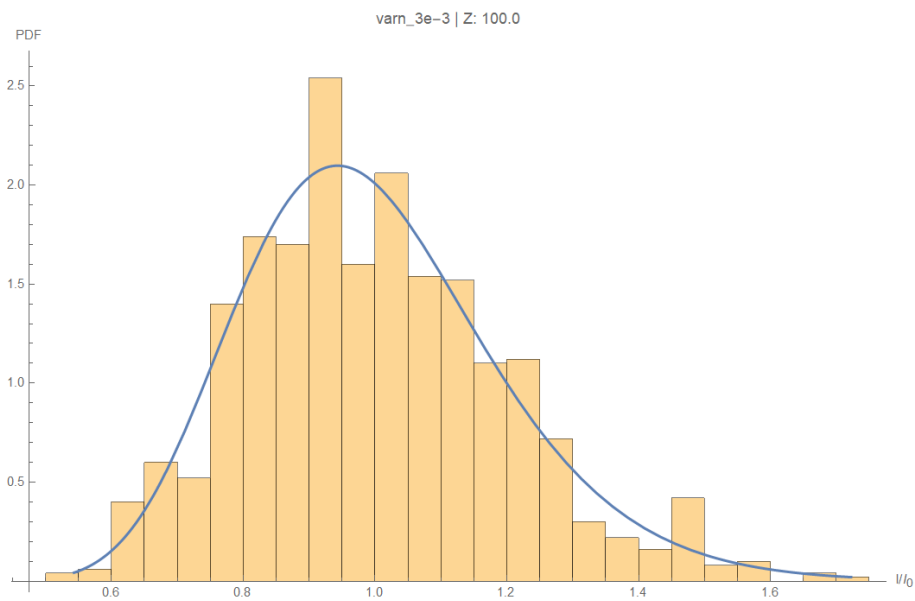


Figura 5.2: Intensidad recibida para una distancia de 100 m y un incremento de n de $3e^{-3}$ (Varianza 0.03152)

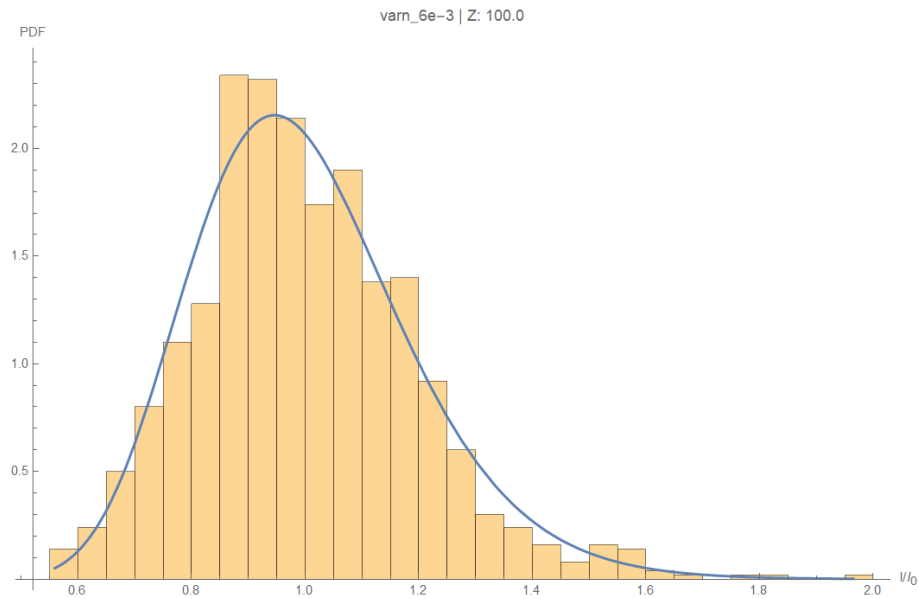


Figura 5.3: Intensidad recibida para una distancia de 100 m y un incremento de n de $6e^{-3}$ (Varianza 0.05762)

lo que nos puede llevar a pensar que, al tener mayor número de transiciones, la varianza va a aumentar. Sin embargo, al observar la figura 5.4 se demuestra que no es así. Este histograma, a pesar de tener menos transiciones, presenta una varianza superior, tiene un valor de 0.59. Esto demuestra que el número de transiciones de una simulación, no tiene por qué ser proporcional a la varianza. No siempre que disminuimos el número de transiciones, disminuirá la varianza.

Una posible explicación de este fenómeno, podría ser la siguiente. Durante la simulación, la interacción de un fotón con una transición provoca un cambio en su dirección. Sin embargo, no es tan importante el número de veces que cambie un fotón de dirección, lo realmente importante es cuanto se desvía de su camino en cada interacción.

En la sección anterior, donde se analizaba el impacto del incremento del coeficiente de refracción, podíamos ver como la varianza sí dependía de este. La explicación era sencilla, es parte de la ecuación de la ley de Snell que es la encargada de definir la dirección de los fotones tras atravesar una transición. Aquí se demuestra porque existe esta dependencia. El número de transiciones solo tendrá un impacto en el peso de los fotones, a más interacciones, más pérdida de peso de un fotón, pero, al no formar parte de la ley de Snell, no tendrá tanto impacto en la varianza. De hecho, más adelante se verá como esta también se verá fuertemente afectada por el valor del vector normal a las transiciones.

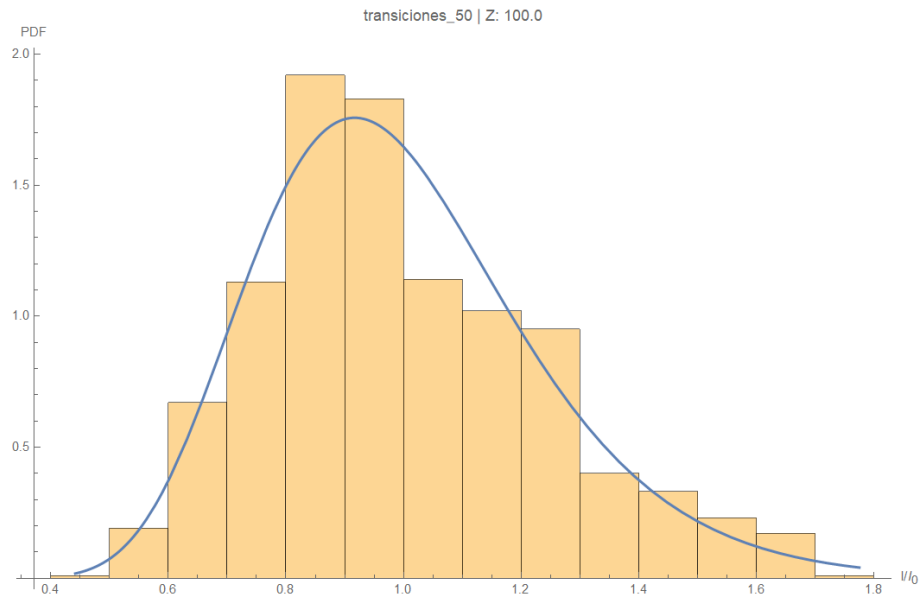


Figura 5.4: Intensidad recibida para una distancia de 100 m y 50 transiciones (Varianza 0.05912)

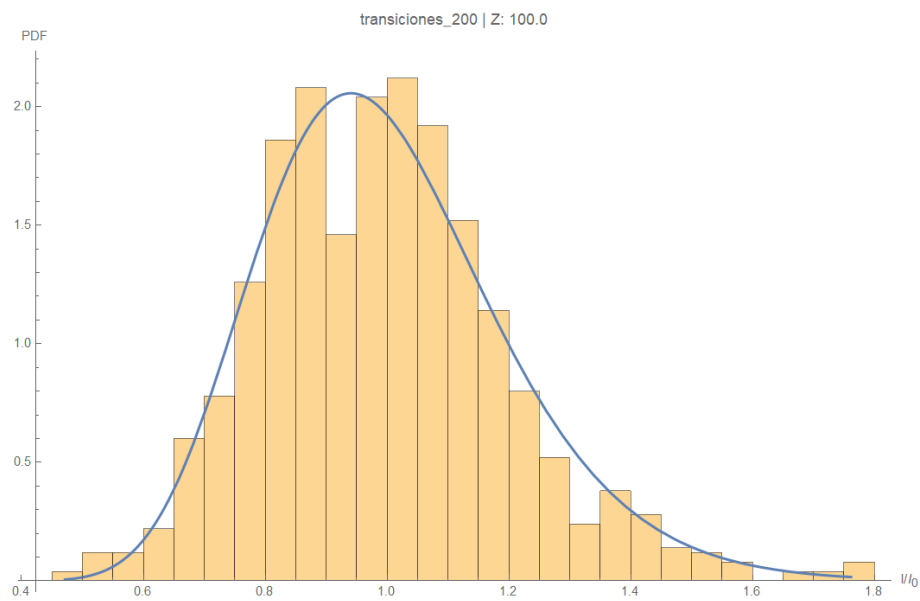


Figura 5.5: Intensidad recibida para una distancia de 100 m y 200 transiciones (Varianza 0.04095)

5.1.3. Incremento en el eje z de las transiciones

El siguiente parámetro corresponde al incremento en el eje z de las transiciones, Δz . Aunque este sea útil y necesario para simular un entorno turbulento debido a que aporta un añadido a la aleatoriedad de la simulación, probablemente sea uno de los parámetros menos significativos.

Antes de proseguir, hay que aclarar que el valor de Δz esta indirectamente limitado por el número de transiciones y la distancia que separa al receptor de la fuente. Como se ha explicado en la sección 4.2.4, las transiciones parten de una posición base que se reparte de forma equidistante entre todas las transiciones del canal entre la fuente y el receptor. Esto provoca que Δz no pueda ser mayor que la distancia que separa una transición de otra. Esto se debe a que podría provocar conflictos en el sistema, ya que dos transiciones podrían cruzarse y romper por completo la simulación. Por ejemplo, en 100 metros, se han simulado 100 transiciones, por lo que las transiciones se encuentran cada metro, equidistantes. En consecuencia, el valor de Δz no podría ser mayor de 0.5

Teniendo esto en cuenta, podemos ver como en las figuras 5.6 y 5.7, donde aparecen los histogramas para una simulación con $\Delta z = 0,2$ metros y $\Delta z = 0,4$ metros respectivamente, no es apreciable ninguna variación importante lo que demuestra que realmente el aporte de este parámetro a la simulación es mínimo.

5.1.4. Máximo ángulo polar de la normal de una transición

Para finalizar se va a estudiar el comportamiento de la turbulencia al alterar el límite del ángulo polar, θ_{max} . Es importante recordar que este valor es proporcional a $\frac{\pi}{2}$ y que define el máximo ángulo polar que podrá tener el vector normal de una transición. Al igual que Δn , este parámetro forma parte de la ley de Snell, ya que define el vector \vec{n} que se usará en esta, el vector normal al plano de transición. Para analizarlo, se va a tomar como base la figura 5.2, que se realizó con un ángulo máximo del 0.5, justo el valor medio.

En la figura 5.8, donde el ángulo máximo es de $0,2\frac{\pi}{2}$, se puede observar que disminuye la varianza, pasa de 0.039 a 0.012. Mientras que en la figura 5.9 donde el ángulo es mayor, $0,8\frac{\pi}{2}$ en este caso, la varianza aumenta, pasa de 0.039 a 0.084. Vamos a explicar por qué.

Si no existiese este parámetro, o su valor fuese 0, todas las transiciones tendrían de vector normal $(0, 0, 1)$ por lo que, al aplicar la ley de Snell, las transiciones no tendrían efecto y la varianza dependería exclusivamente del cociente entre los coeficientes de refracción. Estos resultados tan diferentes entre ambas

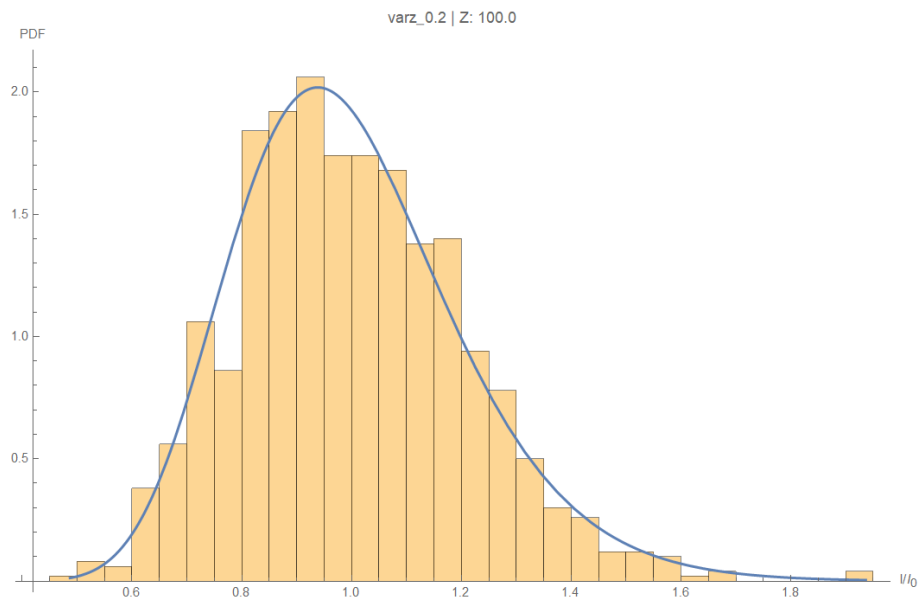


Figura 5.6: Intensidad recibida en 100 m con incremento de Δz de 0.2 metros (Varianza 0.04210)

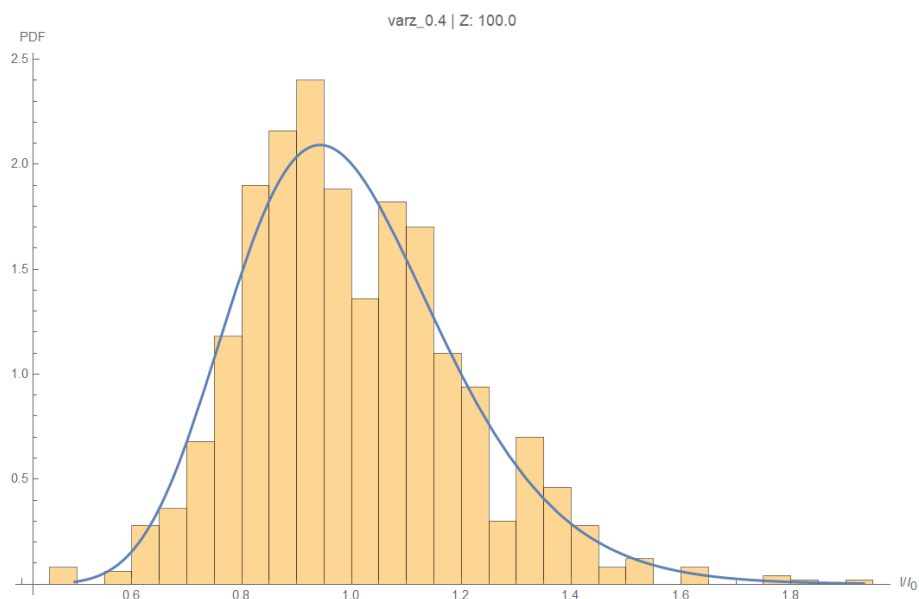


Figura 5.7: Intensidad recibida en 100 m con un incremento de Δz de 0.4 metros (Varianza 0.04020)

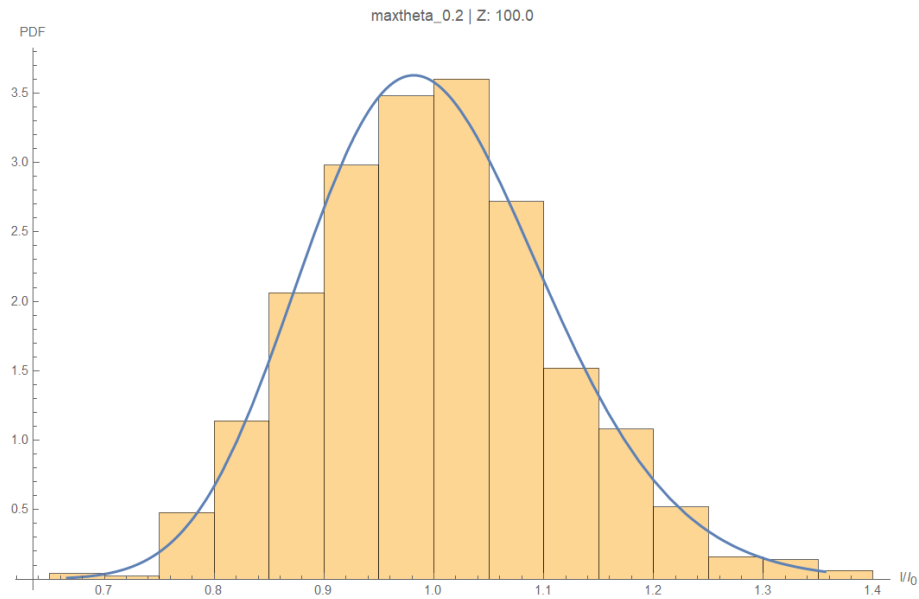


Figura 5.8: Intensidad recibida en 100 m con un ángulo polar máximo en las transiciones de $0,2\frac{\pi}{2}$ (Varianza 0.01238)

varianzas, demuestran la importancia de utilizar un vector normal aleatorio y como distintos valores del ángulo polar máximo pueden variar en gran medida el resultado de una simulación.

Este concepto se puede observar más fácilmente, y simplificado en 2D, en la figura 5.10. Aquí se pueden observar las transiciones, t_1 y t_2 . Sus vectores normales, \vec{n}_1 y \vec{n}_2 y lo más importante, θ_{max_1} y θ_{max_2} . Estos ángulos representan los ángulos máximos alcanzables en las simulaciones con $0,2\frac{\pi}{2}$ y $0,8\frac{\pi}{2}$ respectivamente. Vemos como grandes diferencias entre la inclinación de las transiciones lo que puede ayudar a comprender la importancia de este parámetro

Cuando el ángulo máximo toma un valor de 0.2, el vector normal no presenta mucha desviación y, por lo tanto, no varía con la misma intensidad la dirección de los fotones. Es por esto que la varianza de los resultados obtenidos es tan baja. Al tener un vector normal poca inclinación, la trayectoria de los fotones no varía con tanto peso.

Por otro lado, en la figura 5.9 se puede observar claramente una mayor varianza por lo que los datos son más dispersos.

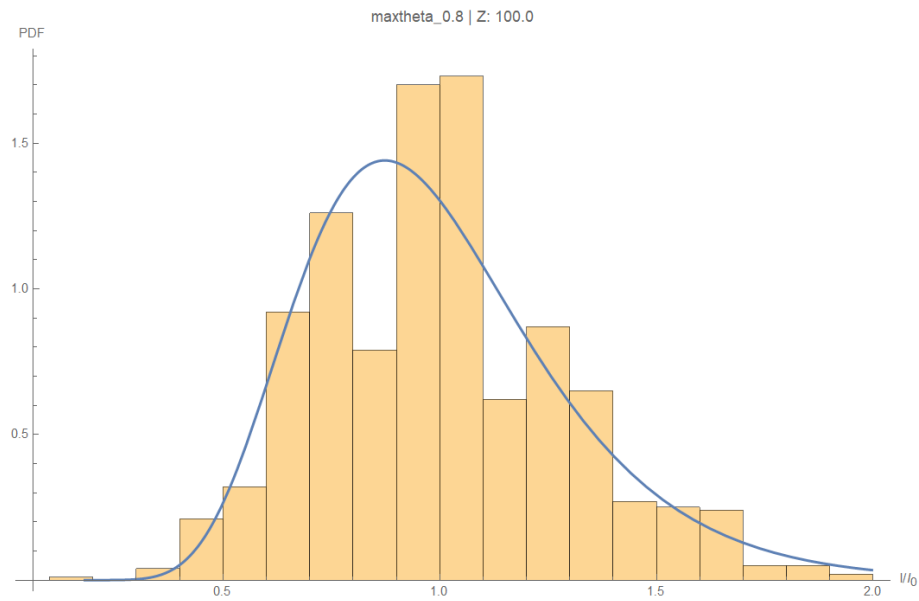


Figura 5.9: Intensidad recibida en 100 m con un ángulo polar máximo en las transiciones de $0,8\frac{\pi}{2}$ (Varianza 0.08418)

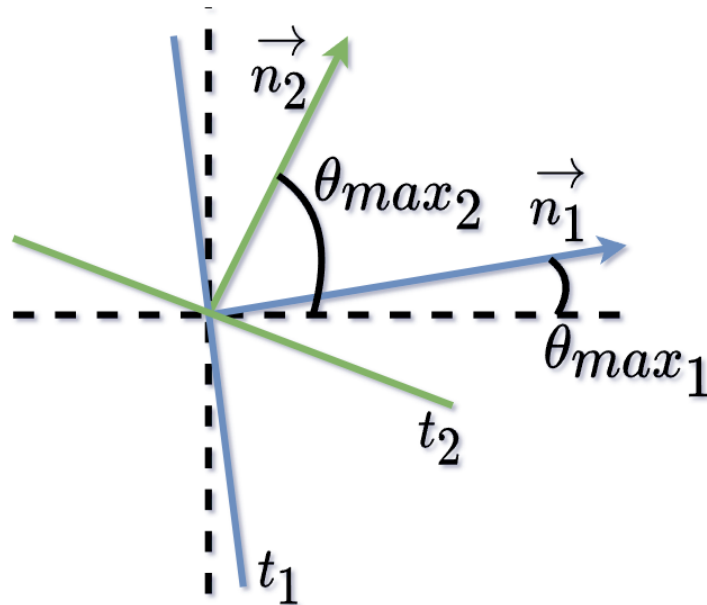


Figura 5.10: Esquema del comportamiento del límite del ángulo polar de los vectores normales a las transiciones

Parte V

Final

Conclusiones y líneas futuras

Durante este documento se ha desarrollado una explicación alrededor de la turbulencia oceánica que influye directamente en las UOWC. Se ha desarrollado el diseño de un software que, adhiriéndose a un software ya creado, ha completado su funcionamiento añadiendo la posibilidad de agregar turbulencia a una simulación.

Para ello, modificando coherentemente una de las fases claves durante la simulación, la transmisión de fotones, se ha estudiado el comportamiento teórico de la turbulencia en el medio subacuático, y se ha traducido lo aprendido a código C para formar el simulador final.

En el análisis, se ha demostrado mediante el resultado de simulaciones como, cada uno de los parámetros relativos a la turbulencia, puede afectar durante las UOWC. En concreto, se ha podido observar como el coeficiente de refracción tiene una influencia directa en la varianza de la intensidad recibida. Como, aunque en este caso la varianza no varíe demasiado, el número de capas va a afectar a la potencia que pierdan los fotones durante su camino. Por último, aunque el incremento de las transiciones en z por sí solo no tiene demasiada influencia, cuando se combina con el vector normal aleatorio generado según el ángulo polar máximo puede producir grandes cambios en la potencia normalizada recibida.

Algunas posibles líneas futuras de trabajo en este área podrían ser:

- Agregar un método alternativo para el cálculo de la turbulencia aplicando pantallas de fase
- Analizar en profundidad el comportamiento del sistema incluyendo absorción y dispersión, en distintos tipos de agua y diferentes fuentes láser.

Parte VI

Apéndices

Apéndice A

Código mas importante

Contenido

A.1	Procesado de fotones en transmisión	59
A.2	Generación de transiciones y coeficientes de refracción . .	62
A.3	Ejemplo fichero JSON	62

A.1. Procesado de fotones en transmisión

```
photon->distance += r;
photon->x += r * photon->ux;
photon->y += r * photon->uy;
photon->z += r * photon->uz;

// Tengo >2 layers? He pasado la proxima layer?
boundary = (photon->layer < sim->med_layers)
            && photon->z > sim->med_boundary_pos[photon->layer - 1];
while (boundary)    //chequeamos cambio de capa
{

    theta = urand() * (sim->med_boundary_max_theta*M_PI/2.0f);
    //phi = get_gaussian(M_PI/2.0f);
    phi = urand() * (2.0f * M_PI);
    boundary_normal_x = cosf(phi)*sinf(theta);
    boundary_normal_y = sinf(phi)*sinf(theta);
```

```

boundary_normal_z = cosf(theta);

//Calcualte n quotient
n_quotient= sim->med_n_water_variables[photon->layer]/
            sim->med_n_water_variables[photon->layer-1];
boundary_cos_critical_angle= sqrtf(1.0f - powf(n_quotient, 2.0f));

if((sim->med_n_water_variables[photon->layer-1]>
    sim->med_n_water_variables[photon->layer])&&
    (photon->uz < boundary_cos_critical_angle))
{
    // si reflexión total en la transición de
    //medios entonces se descarta el fotón
    return;
}

// Bring back photon to boundary position
distance_to_boundary = (photon->z-sim->med_boundary_pos[photon->layer - 1])/
    photon->uz;

photon->x -= distance_to_boundary * photon->ux;
photon->y -= distance_to_boundary * photon->uy;
photon->z -= distance_to_boundary * photon->uz;

//Calculate new photon direction
float b = 2*n_quotient*dot_product(photon->ux,photon->uy,photon->uz,
    boundary_normal_x,boundary_normal_y,boundary_normal_z);
float c = powf(n_quotient, 2.0f) - 1;

beta = (-b + sqrtf(powf(b,2) - 4*c)) / 2;
if(!isnanf(beta)){
    ux_exit = n_quotient * photon->ux + beta * boundary_normal_x;
    uy_exit = n_quotient * photon->uy + beta * boundary_normal_y;
    uz_exit = n_quotient * photon->uz + beta * boundary_normal_z;

    if (dot_product(photon->ux,photon->uy,photon->uz,
        ux_exit,uy_exit,uz_exit) < 0)
    {
        beta = (-b - sqrtf(powf(b,2) - 4*c)) / 2;
        if(isnanf(beta)) return;
        ux_exit = n_quotient * photon->ux + beta * boundary_normal_x;
    }
}

```



```

        uy_exit = n_quotient * photon->uy + beta * boundary_normal_y;
        uz_exit = n_quotient * photon->uz + beta * boundary_normal_z;
    }

    // Apply Fresnel equations
    rp = (sim->med_n_water_variables[photon->layer] * photon->uz -
          sim->med_n_water_variables[photon->layer-1] * uz_exit) /
          (sim->med_n_water_variables[photon->layer] * photon->uz +
          sim->med_n_water_variables[photon->layer-1] * uz_exit);
    rs = (sim->med_n_water_variables[photon->layer-1] * photon->uz -
          sim->med_n_water_variables[photon->layer] * uz_exit) /
          (sim->med_n_water_variables[photon->layer-1] * photon->uz +
          sim->med_n_water_variables[photon->layer] * uz_exit);
    R = (rp * rp + rs * rs) / 2.0f;
    T = 1.0f - R;
    // Calculate final weight
    photon->weight *= T;
    photon->layer += 1;
    //Update photon trayectory
    photon->ux = ux_exit;
    photon->uy = uy_exit;
    photon->uz = uz_exit;
}

// Photon must travel the remain distance to fulfill Beer-Lambert law
photon->x += distance_to_boundary * photon->ux;
photon->y += distance_to_boundary * photon->uy;
photon->z += distance_to_boundary * photon->uz;
//printf("coordenada z del fotón %.2f\n",photon->z);
//printf("capa %d\n",photon->layer);

//Por si me he saltado varias layers
boundary = (photon->layer < sim->med_layers) &&
           photon->z > sim->med_boundary_pos[photon->layer - 1];
}

```

A.2. Generación de transiciones y coeficientes de refracción

```
void init_water_n_and_boundaries(Simulation* sim){
    //Generate water variable
    for(int i = 0; i < sim->med_layers; i++){
        sim->med_n_water_variables[i] = sim->med_n_water;
        sim->med_n_water_variables[i] += ((urand()*2-1) * sim->med_var_n_water);
        //sim->med_n_water_variables[i] += get_gaussian(sim->med_var_n_water);
    }
    //Generate boundaries with some z variation
    for(int i = 0; i < sim->med_layers-1; i++){
        sim->med_boundary_pos[i] = -(sim->rec_z-(i+1)*
                                   (sim->rec_z/sim->med_layers));

        sim->med_boundary_pos[i] += (((urand()*2.0f)-1.0f) *
                                   sim->med_boundary_var_z);
        //boundary_pos[i] += get_gaussian(sim->med_boundary_var_z);
    }
}
```

A.3. Ejemplo fichero JSON

```
{
  "settings" : {
    "time" : null,
    "photons" : 100000.0,
    "block size" : 100000.0,
    "length factor" : 5.0,
    "max events" : 255.0,
    "mode" : "all",
    "rouletting" : 0.0,
    "input file" : null,
    "medium" : {
      "phase function" : "hg",
      "layers" : 100.0,
      "varZ" : 0.10000000000000001,
      "var_n_water" : 0.10000000000000001,
    }
  }
}
```

```
    "boundary_max_theta" : 0.5,
    "g" : 0.92400000000000004,
    "attenuation" : 1.0000000000000001e-05,
    "albedo" : 0.0,
    "index" : 1.3300000000000001
  },
  "surface" : {
    "depth" : null,
    "sigma" : 0.0,
    "index" : 1.0
  },
  "floor" : {
    "depth" : null,
    "index" : 1.5
  },
  "source" : {
    "type" : "gaussian",
    "full angle" : null,
    "divergence" : 1.5,
    "beam waist" : 15.0,
    "theta" : 0.0,
    "sigma" : 0.0,
    "phi" : 0.0
  },
  "receptor" : {
    "x" : 0.0,
    "y" : 0.0,
    "z" : "sweep",
    "x offset" : 0.0,
    "y offset" : 0.0,
    "aperture" : 10.0,
    "fov" : 180.0,
    "index" : 1.0,
    "theta" : 0.0,
    "sigma" : 0.0,
    "phi" : 0.0
  },
  "sweep" : [
    20.0,
    40.0,
    60.0,
```

```

        80.0,
        100.0
    ]
},
"results" : {
    "photons received" : [
        18,
        3,
        2,
        1,
        1
    ],
    "events threshold" : [
        10,
        10,
        10,
        10,
        10
    ],
    "stats" : {
        "weight" : {
            "sum" : [
                15.996557652950287,
                2.6534175276756287,
                1.7460598945617676,
                0.89785140752792358,
                0.89672666788101196
            ],
            "square sum" : [
                14.216105282306671,
                2.3468748927116394,
                1.5243625640869141,
                0.80613714456558228,
                0.80411869287490845
            ]
        },
        "theta" : {
            "sum" : [
                3.8789797089993954,
                0.46347352117300034,
                0.37931807339191437,

```

```
    0.1981617659330368,  
    0.20350645482540131  
  ],  
  "square sum" : [  
    1.2218933119729627,  
    0.088718021288514137,  
    0.083529021590948105,  
    0.043735619634389877,  
    0.046184506267309189  
  ]  
},  
"tof" : {  
  "sum" : [  
    1425.6862487792969,  
    473.38116455078125,  
    466.25,  
    319.56381225585938,  
    400.00875854492188  
  ],  
  "square sum" : [  
    127064.41259765625,  
    84453.3984375,  
    124502.96484375,  
    113739.34375,  
    178434.53125  
  ]  
},  
"distance" : {  
  "sum" : [  
    321.58335304260254,  
    106.77769470214844,  
    105.16916275024414,  
    72.082061767578125,  
    90.227531433105469  
  ],  
  "square sum" : [  
    6464.9195251464844,  
    4296.910400390625,  
    6334.5947265625,  
    5786.95263671875,  
    9078.5830078125
```

```

    ]
  },
  "radius" : {
    "sum" : [
      0.644776307977736,
      0.090888455510139465,
      0.060042217373847961,
      0.029585367068648338,
      0.027617143467068672
    ],
    "square sum" : [
      0.027466769242892042,
      0.0031487144296988845,
      0.0021176249138079584,
      0.00097487616585567594,
      0.0008505452424287796
    ]
  },
  "events" : {
    "sum" : [
      0.0,
      0.0,
      0.0,
      0.0,
      0.0
    ],
    "square sum" : [
      0.0,
      0.0,
      0.0,
      0.0,
      0.0
    ]
  }
},
"processing time" : [
  0.85577690407808404,
  0.8284461048515368,
  0.83065390478805057,
  0.83633930462929129,
  0.86584640379442135

```

```
    ]  
  }  
}
```


Bibliografía

- [1] H. Kaushal and G. Kaddoum, *Underwater Optical Wireless Communication*, in *IEEE Access*, vol. 4, pp. 1518-1547, 2016, doi: 10.1109/ACCESS.2016.2552538.
- [2] H. Yang, J. W. M. Bergmans, T. C. W. Schenk, J.-P. M. G. Linnartz, and R. Rietman, "An analytical model for the illuminance distribution of a power LED," *Optics Express*, vol. 16, no. 26, p. 21641, 2008.
- [3] J. Greenwood, "The correct and incorrect generation of a cosine distribution of scattered particles for Monte-Carlo modelling of vacuum systems," *Vacuum*, vol. 67, no. 2, pp. 217–222, 2002.
- [4] L. Sun, J. Wang, K. Yang, M. Xia, and J. Han, *The research of optical turbulence model in underwater imaging system*, *Sens. Transducers J.* 163, 107–112 (2014).
- [5] N. Anous, M. Abdallah, and K. Qaraqe, "Performance evaluation for vertical inhomogeneous underwater visible light communications," *IEEE Vehicular Technology Conference*, vol. 2017-Septe, pp. 1–5, 2018.
- [6] N. Anous, M. Abdallah, M. Uysal, and K. Qaraqe, "Performance Evaluation of LOS and NLOS Vertical Inhomogeneous Links in Underwater Visible Light Communications," *IEEE Access*, vol. 6, no. c, pp. 22408–22420, 2018. .
- [7] N. Farwell, *Optical Beam Propagation in Oceanic Turbulence* (University of Miami, 2014).
- [8] R. A. Leathers, T. V. Downes, C. O. Davis, and C. D. Mobley, "Monte Carlo Radiative Transfer Simulations for Ocean Optics: A Practical Guide," tech. rep., Naval Research Lab Washington Dc Applied Optics Branch, 2004.
- [9] S. A. Thorpe, *An Introduction to Ocean Turbulence* (Cambridge University, 2007).

-
- [10] S. Arnon and D. Kedar, "Non-line-of-sight underwater optical wireless communication network," *Journal of the Optical Society of America A*, vol. 26, no. 3, p. 530, 2009.
 - [11] W. C. Cox Jr, *Simulation, Modeling, and Design of Underwater Optical Communication Systems*. PhD thesis, North Carolina State University, 2012.
 - [12] Z. Ghassemlooy, W. Popoola, and S. Rajbhandari, *Optical Wireless Communications: System and Channel Modelling with MATLAB* (CRC Press, 2012).
 - [13] V. V. Nikishov and V. I. Nikishov. *Spectrum of turbulent fluctuations of the sea-water refraction index*. *Int. J. Fluid Mech.* 27, 82–98 (2000).

