

SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LA PROPAGACIÓN DE UN HAZ LÁSER EN AIRE
TURBULENTO Y TRAYECTORIA HORIZONTAL A BAJA ALTURA

ERICK DUBAN NÚÑEZ SILVA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS
ESCUELA DE FÍSICA
GRUPO DE ÓPTICA Y TRATAMIENTO DE SEÑALES
BUCARAMANGA

2023

SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LA PROPAGACIÓN DE UN HAZ LÁSER EN AIRE
TURBULENTO Y TRAYECTORIA HORIZONTAL A BAJA ALTURA

ERICK DUBAN NÚÑEZ SILVA

Trabajo de Grado para optar al título de
Físico

Director

YEZID TORRES MORENO

Doctorado en óptica y tratamiento de señales

Codirectora

ZAYDA PAOLA REYES QUIJANO

Física

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS

ESCUELA DE FÍSICA

GRUPO DE ÓPTICA Y TRATAMIENTO DE SEÑALES

BUCARAMANGA

2023

A

Mi madre, mi padre, mi hermano, a mi novia Karen, a mi familia y a todas aquellas personas que directa o indirectamente fueron mi motivación para llevar a cabo este trabajo de grado

AGRADECIMIENTOS

Expreso mis más sinceros agradecimientos a las personas que estuvieron conmigo durante el desarrollo de este trabajo de investigación:

Dr Yezid Torres Moreno

Director del trabajo de investigación quien gracias a su conocimiento y enseñanzas me fue posible realizar el trabajo y entender los fenómenos físicos que se presentan.

Fis. Zayda Paola Reyes Quijano

Codirectora que gracias a su paciencia y colaboración pude avanzar con las inquietudes y conflictos durante la realización del trabajo.

Ing. Karen Shirley Cardozo Rueda

Mi novia quien fue la persona que más necesitaba en el momento adecuado y que sin su apoyo incondicional, no hubiese sido posible para mí culminar este trabajo.

Agradezco a mis compañeros del grupo de óptica y tratamiento de señales quienes me han ayudado con sugerencias, opiniones y compañerismo: Jesús Hernán, Alexander Ballesteros, Omar Tijaro, Angie Solano, Leonardo Solano.

Agradezco a todos mis compañeros de carrera y amigos que brindaron todo su apoyo y amistad a pesar de todo: Esteban Rodríguez, Holguer Santander, Juan Alejandro Pinto, William Gutierrez que en paz descansa, Sebastian Rodríguez y Julian Bautista.

Agradezco a mi familia por todo el apoyo económico y moral que tuvieron para conmigo durante el desarrollo de mi carrera.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	21
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	24
OBJETIVOS	25
1. FUNDAMENTO TEÓRICO/CONCEPTOS FUNDAMENTALES	26
1.1. Propagación de la luz	26
1.2. Propagación SPLIT STEP (SS)	28
1.3. Turbulencia de Kolmogorov	29
1.4. Pantallas de fase (PS)	34
1.5. Split-Step Beam Propagation Method (SSBPM)	36
2. LIBRERIA WAVEPY	38
3. SIMULACIONES	45
3.1. Simulaciones de turbulencia atmosférica a una misma distancia de propagación	45
3.1.1. Simulación en el vacío.	45
3.1.2. Simulación turbulencia atmosférica prácticamente nula a un valor de $C_n^2 = 1 \times 10^{-200} [m^{-\frac{2}{3}}]$	47
3.1.3. Simulación turbulencia atmosférica moderada a un valor de $C_n^2 = 1 \times 10^{-15} [m^{-\frac{2}{3}}]$	54
3.1.4. Simulación turbulencia atmosférica fuerte a un valor de $C_n^2 = 1 \times 10^{-13} [m^{-\frac{2}{3}}]$	62
3.2. Simulaciones de turbulencia atmosférica variando la distancia de propagación	70
3.2.1. Simulación de turbulencia atmosférica muy débil a diferentes distancias para un valor de $C_n^2 = 1 \times 10^{-200} [m^{-\frac{2}{3}}]$	71

3.2.2. Simulación turbulencia atmosférica moderada a diferentes distancias con un valor de $C_n^2 = 1 \times 10^{-15} [m^{-\frac{2}{3}}]$	81
3.2.3. Simulación turbulencia atmosférica fuerte a diferentes distancias con un valor de $C_n^2 = 1 \times 10^{-13} [m^{-\frac{2}{3}}]$	91
4. INFORMES DINÁMICOS	102
4.1. Informe para diferentes valores de turbulencia a una misma distancia	102
4.2. Informe para diferentes valores de turbulencia y diferentes distancias	105
4.3. Resultados del informe	107
5. RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO	108
6. CONCLUSIONES	109
BIBLIOGRAFÍA	110
ANEXOS	116

LISTA DE FIGURAS

	pág.
<p>Figura 1. Ejemplo de propagación de un haz gaussiano colimado que atraviesa un medio turbulento a distancia de 1 km. <i>Referencia:</i> Chensheng Wu, William Nelson y Christopher Davis. “3D Geometric Modeling and Simulation of Laser Propagation through Turbulence with Plenoptic Functions”. En: vol. 9224. Oct. de 2014, 92240O-92240O. DOI: 10.1117/12.2062945</p>	23
<p>Figura 2. Geometría de la difracción. <i>Referencia</i> Joseph W. Goodman. <i>Introduction to Fourier Optics</i>. 3rd ed. Englewood: Roberts & Co., 2005</p>	26
<p>Figura 3. Diagrama de planos en la propagación. <i>Referencia</i> . Joseph W. Goodman. <i>Introduction to Fourier Optics</i>. 3rd ed. Englewood: Roberts & Co., 2005.</p>	29
<p>Figura 4. Múltiples propagaciones divididas en diferentes planos. <i>Referencia</i> Joseph W. Goodman. <i>Introduction to Fourier Optics</i>. 3rd ed. Englewood: Roberts & Co., 2005</p>	29
<p>Figura 5. Energía en cascada por transferencias de energía de remolinos de mayor diámetro a menor diámetro <i>Referencia</i> L.C. Andrews y R.L. Phillips. <i>Laser Beam Propagation Through Random Media</i>. SPIE Press monograph. Society of Photo Optical, 2005. URL: https://books.google.com.co/books?id=4NXHYg70qqIC</p>	31
<p>Figura 6. Aproximación de una pantalla de fase aleatoria producida del muestreo del espacio de kolmogorov. <i>Referencia</i> R G Lane, A Glindemann y J C Dainty. “Simulation of a Kolmogorov phase screen”. En: <i>Waves in Random Media</i> 2.3 (1992), págs. 209-224. DOI: 10.1088/0959-7174/2/3/003. eprint: https://doi.org/10.1088/0959-7174/2/3/003. URL: https://doi.org/10.1088/0959-7174/2/3/003</p>	35

Figura 7.	Esquema del funcionamiento de SSBP. <i>Referencia</i> Monish R Chatterjee y Fathi HA Mohamed. “Split-step approach to electromagnetic propagation through atmospheric turbulence using the modified von Karman spectrum and planar apertures”. En: <i>Optical Engineering</i> 53.12 (2014), págs. 1 -17.	37
Figura 8.	(Izq.) Resultado de la fuente del haz gaussiano en pixeles. (Der.) Resultado de la propagación del haz gaussiano a 500m en el vacío en pixeles.	42
Figura 9.	(Izq.) Pantalla de fase de Kolmogorov generada aleatoriamente en pixeles. (Der.) Resultado de la propagación del haz gaussiano a 500m con turbulencia débil en pixeles.	43
Figura 10.	(Izq.) Resultado de la propagación del haz gaussiano a 500m con turbulencia moderada en pixeles. (Der.) Resultado de la Propagación del haz gaussiano a 500m con turbulencia fuerte en pixeles.	43
Figura 11.	Patrón de intensidad en el plano fuente para el haz gaussiano a propagar a 500[m].	46
Figura 12.	Distribución de intensidad para la Propagación de un haz gaussiano en el espacio libre a distancia de propagación 500 [m].	47
Figura 13.	Distribución de intensidad para la Propagación de un haz gaussiano con baja turbulencia atmosférica a distancia de propagación 500 [m] con una pantalla de fase.	49
Figura 14.	Distribución de intensidad para la Propagación de un haz gaussiano a baja turbulencia a distancia de propagación 500 [m] con 2 pantallas de fase.	50
Figura 15.	Distribución de intensidad para la Propagación de un haz gaussiano a baja turbulencia a distancia de propagación 500 [m] con 3 pantallas de fase.	51
Figura 16.	comportamiento del índice de centelleo contra el aumento del número de pantallas de fase.	53
Figura 17.	Tiempo de ejecución de la simulación vs el número de pantallas de fase.	54

Figura 18.	Distribución de intensidad para la Propagación de un haz gaussiano a turbulencia moderada a distancia de propagación 500 [m] con una pantalla de fase.	55
Figura 19.	Distribución de intensidad para la Propagación de un haz gaussiano a turbulencia moderada a distancia de propagación 500 [m] usando 3 pantallas de fase.	57
Figura 20.	Distribución de intensidad para la Propagación de un haz gaussiano a turbulencia moderada a distancia de propagación 500 [m] usando 5 pantallas de fase.	59
Figura 21.	Comportamiento del centelleo promedio según el número de pantallas de fase a turbulencia moderada con $C_n^2 = 1 \times 10^{-15} [m^{-\frac{2}{3}}]$.	61
Figura 22.	Comportamiento del tiempo promedio según la cantidad de pantallas de fase utilizando turbulencia moderada $C_n^2 = 1 \times 10^{-15} [m^{-\frac{2}{3}}]$.	61
Figura 23.	Distribución de intensidad para la Propagación de un haz gaussiano a turbulencia fuerte a distancia de propagación 500 [m] con una pantalla de fase.	62
Figura 24.	Distribución de intensidad para la Propagación de un haz gaussiano a turbulencia fuerte a distancia de propagación 500 [m] usando tres pantallas de fase.	64
Figura 25.	Distribución de intensidad para la Propagación de un haz gaussiano a turbulencia fuerte a distancia de propagación 500 [m] usando cinco pantallas de fase.	66
Figura 26.	Comportamiento del centelleo promedio según el número de pantallas de fase a turbulencia fuerte con $C_n^2 = 1 \times 10^{-13} [m^{-\frac{2}{3}}]$.	68
Figura 27.	Comportamiento del tiempo promedio según la cantidad de pantallas de fase utilizado turbulencia fuerte $C_n^2 = 1 \times 10^{-13} [m^{-\frac{2}{3}}]$.	68

- Figura 28. (Izq.) Distribución de intensidad para la Propagación de un haz gaussiano a turbulencia débil, a distancia de propagación 50 [m] usando una pantalla de fase (Der.) Distribución de intensidad para la Propagación de un haz gaussiano a turbulencia débil a distancia de propagación 5000 [m] usando una pantalla de fase. 71
- Figura 29. (Izq.) Distribución de intensidad para la Propagación de un haz gaussiano a turbulencia débil a distancia de propagación 50 [m] usando tres pantallas de fase (Der.) Distribución de intensidad para la Propagación de un haz gaussiano a turbulencia débil a distancia de propagación 5000 [m] usando tres pantallas de fase. 72
- Figura 30. (Izq.) Distribución de intensidad para la Propagación de un haz gaussiano a turbulencia débil a distancia de propagación 50 [m] usando cinco pantallas de fase (Der.) Distribución de intensidad para la Propagación de un haz gaussiano a turbulencia débil a distancia de propagación 5000 [m] usando cinco pantallas de fase. 72
- Figura 31. Comportamiento del índice de centelleo para diferentes distancias en presencia de una turbulencia muy débil, $C_n^2 = 1 \times 10^{-200} [m^{-\frac{2}{3}}]$ para una pantalla de fase. 74
- Figura 32. Comportamiento del índice de centelleo para diferentes distancias en presencia de una turbulencia muy débil, $C_n^2 = 1 \times 10^{-200} [m^{-\frac{2}{3}}]$ para tres (azul) y una (morada) pantalla de fase. 76
- Figura 33. Comportamiento del índice de centelleo para diferentes distancias en presencia de una turbulencia muy débil, $C_n^2 = 1 \times 10^{-200} [m^{-\frac{2}{3}}]$ para cinco (rojo), tres (azul) y una (morada) pantalla de fase. 78
- Figura 34. Comportamiento del índice de centelleo para diferentes distancias en presencia de una turbulencia muy débil, $C_n^2 = 1 \times 10^{-200} [m^{-\frac{2}{3}}]$ para múltiples pantallas de fase intermedias. 79

- Figura 35. Comportamiento del tiempo para diferentes distancias a un $C_n^2 = 1 \times 10^{-200} [m^{-\frac{2}{3}}]$ para múltiples pantallas de fase. 80
- Figura 36. (Izq.) Distribución de intensidad para la Propagación de un haz gaussiano a turbulencia moderada a distancia de propagación 50 [m] usando una pantallas de fase (Der.) Distribución de intensidad para la Propagación de un haz gaussiano a turbulencia moderada a distancia de propagación 5000 [m] usando una pantalla de fase. 82
- Figura 37. (Izq.) Distribución de intensidad para la Propagación de un haz gaussiano a turbulencia moderada a distancia de propagación 50 [m] usando tres pantallas de fase (Der.) Distribución de intensidad para la Propagación de un haz gaussiano a turbulencia moderada a una distancia de propagación de 5000 [m] usando tres pantallas de fase. 82
- Figura 38. (Izq.) Distribución de intensidad para la Propagación de un haz gaussiano a turbulencia moderada a distancia de propagación 50 [m] usando cinco pantallas de fase (Der.) Distribución de intensidad para la Propagación de un haz gaussiano a turbulencia moderada a distancia de propagación 5000 [m] usando cinco pantallas de fase. 83
- Figura 39. Comportamiento del índice de centelleo para diferentes distancias en presencia de una turbulencia moderada, $C_n^2 = 1 \times 10^{-15} [m^{-\frac{2}{3}}]$, para una pantalla de fase. 85
- Figura 40. Comportamiento del índice de centelleo para diferentes distancias en presencia de una turbulencia moderada, $C_n^2 = 1 \times 10^{-15} [m^{-\frac{2}{3}}]$ para tres pantallas de fase. 87
- Figura 41. Comportamiento del índice de centelleo para diferentes distancias en presencia de una turbulencia moderada de $C_n^2 = 1 \times 10^{-15} [m^{-\frac{2}{3}}]$ para cinco pantallas de fase. 89

- Figura 42. Comportamiento del índice de centelleo para diferentes distancias en presencia de una turbulencia moderada de $C_n^2 = 1 \times 10^{-15} [m^{-\frac{2}{3}}]$ para múltiples pantallas de fase. 90
- Figura 43. Comportamiento del tiempo de ejecución para diferentes distancias en presencia de una turbulencia moderada de $C_n^2 = 1 \times 10^{-15} [m^{-\frac{2}{3}}]$ para múltiples pantallas de fase. 91
- Figura 44. (Izq.) Distribución de intensidad para la propagación de un haz gaussiano a través de turbulencia fuerte, con una distancia de propagación 50 [m], usando una pantalla de fase (Der.) Distribución de intensidad para la propagación de un haz gaussiano a través de turbulencia fuerte, con una distancia de propagación 5000 [m], usando una pantalla de fase. 92
- Figura 45. (Izq.) Distribución de intensidad para la propagación de un haz gaussiano a través de turbulencia fuerte, a una distancia de propagación 50 [m], usando tres pantallas de fase (Der.) Distribución de intensidad para la propagación de un haz gaussiano a través de turbulencia fuerte, con una distancia de propagación 5000 [m] usando tres pantallas de fase. 92
- Figura 46. (Izq.) Distribución de intensidad para la propagación de un haz gaussiano a través de turbulencia fuerte, con una distancia de propagación de 50 [m] usando cinco pantallas de fase (Der.) Distribución de intensidad para la propagación de un haz gaussiano a través de turbulencia fuerte, con una distancia de propagación de 5000 [m], usando cinco pantallas de fase. 93
- Figura 47. Comportamiento del índice de centelleo para diferentes distancias a un $C_n^2 = 1 \times 10^{-13} [m^{-\frac{2}{3}}]$ para una pantalla de fase. 95
- Figura 48. Comportamiento del índice de centelleo para diferentes distancias a un $C_n^2 = 1 \times 10^{-13} [m^{-\frac{2}{3}}]$ para tres pantallas de fase. 97
- Figura 49. Comportamiento del índice de centelleo para diferentes distancias de propagación con $C_n^2 = 1 \times 10^{-13} [m^{-\frac{2}{3}}]$, para cinco pantallas de fase. 99

Figura 50.	Comportamiento del índice de centelleo para diferentes distancias de propagación con $C_n^2 = 1 \times 10^{-13} [m^{-\frac{2}{3}}]$, para múltiple número de pantallas de fase.	100
Figura 51.	Comportamiento del tiempo de ejecución para diferentes distancias de propagación, con $C_n^2 = 1 \times 10^{-13} [m^{-\frac{2}{3}}]$, para múltiples pantallas de fase.	101
Figura 52.	Elementos del primer reporte para diferentes valores de turbulencia a una misma distancia.	102
Figura 53.	Ejemplo de uso del primer reporte, página 1.	104
Figura 54.	Ejemplo de uso del primer reporte, página 2.	104
Figura 55.	Elementos extras segundo informe.	105
Figura 56.	Segundo informe, página 2.	106
Figura 57.	Segundo informe, página 3.	106

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Tabla de Hardware y Software utilizados en la simulaciones ópticas.	44
Tabla 2. Parámetros para la simulación de un haz gaussiano que se propaga en el vacío.	45
Tabla 3. Parámetros para la simulación de un haz gaussiano que se propaga a través de turbulencia atmosférica.	48
Tabla 4. Resultados del proceso iterativo para el índice de centelleo y tiempo de ejecución de la simulación a diferente numero de pantallas para un valor de $C_n^2 = 1 \times 10^{-200}[m^{-\frac{2}{3}}]$.	52
Tabla 5. Resultados del proceso iterativo para el índice de centelleo y tiempo para una pantalla de fase con múltiples ejecuciones de la simulación para un valor de $C_n^2 = 1 \times 10^{-15}[m^{-\frac{2}{3}}]$.	56
Tabla 6. Resultados del proceso iterativo para el índice de centelleo y tiempo para 3 pantallas de fase con múltiples ejecuciones para un valor de $C_n^2 = 1 \times 10^{-15}[m^{-\frac{2}{3}}]$.	58
Tabla 7. Resultados del proceso iterativo para el índice de centelleo y tiempo para 5 pantallas de fase con múltiples ejecuciones para un valor de $C_n^2 = 1 \times 10^{-15}[m^{-\frac{2}{3}}]$.	59
Tabla 8. Resultados promedio de centelleo y tiempo para diferente numero de pantallas de fase con múltiples ejecuciones para un valor de $C_n^2 = 1 \times 10^{-15}[m^{-\frac{2}{3}}]$.	60
Tabla 9. Resultados del proceso iterativo para el índice de centelleo y tiempo para una pantalla de fase con múltiples ejecuciones para un valor de $C_n^2 = 1 \times 10^{-13}[m^{-\frac{2}{3}}]$.	63

Tabla 10.	Resultados del proceso iterativo para el índice de centelleo y tiempo para tres pantallas de fase con múltiples ejecuciones para un valor de $C_n^2 = 1 \times 10^{-13} [m^{-\frac{2}{3}}]$.	65
Tabla 11.	Resultados del proceso iterativo para el índice de centelleo y tiempo para cinco pantallas de fase con múltiples ejecuciones para un valor de $C_n^2 = 1 \times 10^{-13} [m^{-\frac{2}{3}}]$.	66
Tabla 12.	Resultados promedio de centelleo y tiempo para diferente numero de pantallas de fase con múltiples ejecuciones para un valor de $C_n^2 = 1 \times 10^{-13} [m^{-\frac{2}{3}}]$.	67
Tabla 13.	Parámetros para la simulación de un haz gaussiano que se propaga con turbulencia atmosferica a diferentes distancias.	70
Tabla 14.	Resultados del proceso iterativo para los diferentes valores de distancia de propagación para una pantalla de fase y para un valor de turbulencia muy débil $C_n^2 = 1 \times 10^{-200} [m^{-\frac{2}{3}}]$.	73
Tabla 15.	Resultados del proceso iterativo para la diferentes valores de distancia de propagación para tres pantallas de fase para un valor de turbulencia muy débil, $C_n^2 = 1 \times 10^{-200} [m^{-\frac{2}{3}}]$.	75
Tabla 16.	Resultados del proceso iterativo para diferentes valores de distancia de propagación para cinco pantallas de fase y para un valor de turbulencia muy débil, $C_n^2 = 1 \times 10^{-200} [m^{-\frac{2}{3}}]$.	77
Tabla 17.	Resultados del proceso iterativo para los diferentes valores de distancia de propagación, para una pantalla de fase y un valor de turbulencia moderada, con $C_n^2 = 1 \times 10^{-15} [m^{-\frac{2}{3}}]$.	84
Tabla 18.	Resultados del proceso iterativo para la diferentes valores de distancia de propagación, para tres pantallas de fase con un valor de $C_n^2 = 1 \times 10^{-15} [m^{-\frac{2}{3}}]$.	86
Tabla 19.	Resultados del proceso iterativo para la diferentes valores de distancia de propagación para cinco pantallas de fase para un en presencia de una turbulencia moderada de valor $C_n^2 = 1 \times 10^{-15} [m^{-\frac{2}{3}}]$.	88

Tabla 20.	Resultados del proceso iterativo para la diferentes valores de distancia de propagación, para una pantalla de fase, y un valor de $C_n^2 = 1 \times 10^{-13}[m^{-\frac{2}{3}}]$.	94
Tabla 21.	Resultados del proceso iterativo para la diferentes valores de distancia de propagación, para tres pantallas de fase, con un valor de $C_n^2 = 1 \times 10^{-13}[m^{-\frac{2}{3}}]$.	96
Tabla 22.	Resultados del proceso iterativo para la diferentes valores de distancia de propagación para cinco pantallas de fase para un valor de $C_n^2 = 1 \times 10^{-13}[m^{-\frac{2}{3}}]$.	98

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Simulación para varios números de pantallas de fase para valores bajos de C_n^2	116
Anexo B. Múltiples simulaciones para diferentes números de pantallas de fase a $500m$ de distancia de propagación para varios valores de C_n^2	118
Anexo C. Simulaciones para diferentes números de pantallas de fase cambiando la distancia de propagación para varios valores de C_n^2	120

LISTA DE ACRÓNIMOS

SS Split-Step

SSBP Split-Step Beam Propagation

FFT Fast Fourier Transform

PS Phase Screen

WP WavePy

PSD Power Spectral Density

RESUMEN

TÍTULO: SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LA PROPAGACIÓN DE UN HAZ LÁSER EN AIRE TURBULENTO Y TRAYECTORIA HORIZONTAL A BAJA ALTURA *

AUTOR: ERICK DUBAN NUÑEZ SILVA **

PALABRAS CLAVE: TURBULENCIA ATMOSFÉRICA, SPLIT-STEP BEAM PROPAGATION (SSBP), WAVEPY, PANTALLAS DE FASE.

DESCRIPCIÓN:

Durante la propagación de la luz a través de un medio, surge el problema de la turbulencia, la cual distorsiona en mayor o menor medida al haz que se propaga. En las últimas décadas, gracias al avance de la tecnología, las comunicaciones mediante el uso de la luz se han convertido en la herramienta más común y de mayor eficiencia que su competencia. Por lo tanto, el interés en el modelado de la turbulencia ha sido indispensable para encontrar compensaciones en la pérdida de información que se produce cuando el haz se propaga por un medio turbulento.

Para lograr un modelado eficaz de un medio turbulento se ha recurrido a soluciones computacionales que permiten gran exactitud en la simulación. A pesar de los beneficios que ofrecen las soluciones computacionales, existe el inconveniente de que, para lograr una gran precisión en las simulaciones hay que recurrir a una gran cantidad de tiempo para el cálculo computacional, dichos cálculos pueden llegar a tardar varios días e incluso semanas. Durante el desarrollo de los algoritmos de propagación en medios turbulentos es clave la optimización del funcionamiento y que se ajusten a la realidad.

En el presente trabajo se estudia el algoritmo de propagación de pantallas de fase para un haz gaussiano que describe una trayectoria horizontal usando el software WAVEPY. Para ello se realizaron múltiples simulaciones variando diferentes parámetros, con el objetivo de establecer su relación entre las diferentes variables, en especial, el número de pantallas de fase y el impacto en la turbulencia simulada, lo cual permitirá encontrar un número de pantallas de fase que mejor se adecúe según los parámetros físicos preestablecidos.

* Trabajo de grado, Director: Dr. Yezid Torres Moreno, Coodirectora: Fis. Zayda Paola Reyes Quijano.

** Facultad de Ciencias. Escuela de Física.

ABSTRACT

TITLE: NUMERICAL SIMULATION OF A LASER BEAM PROPAGATION IN TURBULENT AIR AND HORIZONTAL PATH AT LOW HEIGHT*

AUTHOR: ERICK DUBAN NÚÑEZ SILVA **

KEYWORDS: ATMOSPHERIC TURBULENCE, SPLIT-STEP BEAM PROPAGATION (SSBP), WAVEPY, PHASE SCREENS (PS).

DESCRIPTION:

During the propagation of light through a medium, the problem of turbulence arises, which distorts the frontwave beam to a greater or lesser extent. In recent decades, thanks to the advancement of technology, light based communications have become in the most common and efficient respect with their complementary ones. Therefore, the interest in the turbulence modeling has been essential to find compensation for the loss of information that occurs when the beam propagates through a turbulent medium.

In order to achieve an efficient modeling, computational solutions have been used that allow great accuracy in the simulation. Despite the benefits offered by computational solutions, there is the drawback that, in order to achieve high precision in the simulations, a large amount of time must be used for computational calculation, these calculations can take several days and even weeks. During the development of propagation algorithms in turbulent media, it is key to optimize their operation to properly recreate the reality of the process.

Here we studied the phase screen propagation algorithm for a Gaussian beam that describes a horizontal path using the software WAVEPY. For this, multiple simulations will be carried out, varying different parameters with the aim of establishing their relationship between the different variables, especially the number of phase screens and the impact on the simulated turbulence, which will allow finding a number of phase screens that best fit according to the pre-established physical parameters.

* B. Sc. Thesis. Advisor: Dr. Yezid Torres Moreno, Coadvisor: Phys. Zayda Paola Reyes Quijano

** Faculty of Sciences. School of Physics.

INTRODUCCIÓN

En 1864, James Clark Maxwell en su obra "Dynamical Theory of the Electromagnetic Field"¹ enunció que la luz es una onda electromagnética que se propaga en el vacío. A partir de esta definición se construyeron los modelos que permitirían describir la propagación de los haces en el espacio libre. Las ecuaciones lograban con gran exactitud explicar el comportamiento de la luz a medida que se propagaba en el espacio libre. Sin embargo, se trataban de modelos aproximados que no tenían en cuenta los problemas que existen en la realidad, como lo es la turbulencia.² La turbulencia se puede definir como los cambios en el tiempo del índice de refracción que presenta la atmósfera debido a las fluctuaciones en la temperatura y presión.³ Al tratarse de un proceso aleatorio, el modelado de la turbulencia se realiza mediante la estadística, lo que representa un problema al tratar de reproducir resultados. Sin embargo, a partir de las teorías de turbulencia planteadas por Kolmogorov en 1941,⁴ se encontraron soluciones para poder modelar fenómenos que dependían del espacio y el tiempo.⁵ De esta forma se logró describir con mayor exactitud lo que ocurre

¹ D.L. Sengupta y T.K. Sarkar. "Maxwell, Hertz, the Maxwellians, and the early history of electromagnetic waves". En: *IEEE Antennas and Propagation Magazine* 45.2 (2003), págs. 13-19. DOI: 10.1109/MAP.2003.1203114.

² Akira Ishimaru. "Theory Of Optical Propagation In The Atmosphere". En: *Optical Engineering* 20.1 (1981), págs. 63 -70. DOI: 10.1117/12.7972665. URL: <https://doi.org/10.1117/12.7972665>.

³ S. E. Reyes Aparicio, A. F. Vásquez Caicedo, "Caracterización de los efectos de la turbulencia atmosférica sobre el camino de propagación de un haz láser a diferentes distancias horizontales y baja altura", *Biblioteca Universidad Industrial de Santander*, 2019 Tesis de pregrado, págs. 20-28.

⁴ A. N. Kolmogorov. "The local structure of turbulence in incompressible viscous fluid for very large Reynolds numbers". En: *C. R. Acad. Sci. URSS* 30 (1941), págs. 301-305. URL: <https://ci.nii.ac.jp/naid/20000584634/en/>.

⁵ O. J. Tijaro Rojas, "Caracterización experimental de la turbulencia a diferentes distancias horizontales y baja altura mediante la técnica de Telescopía de Fourier para aplicaciones en seguridad", *Biblioteca Universidad Industrial de Santander*, 2019 Tesis Doctoral, págs. 8-12.

en la realidad.

En los años recientes, y gracias al desarrollo de la computación, se ha logrado un gran avance en las ciencias. Mediante esta tecnología, los científicos, entre ellos, los Físicos, han utilizado los equipos informáticos para la solución de ecuaciones complejas, la simulación y visualización de fenómenos físicos descritos en la literatura, lo cual lleva a facilitar el entendimiento de estos mismos. Dentro de la óptica, el software se ha utilizado en gran medida en la propagación de la luz en el espacio libre,^{6,7} el modelado de la turbulencia,^{8,9} y la propagación a través de turbulencia atmosférica,^{10,11} por ejemplo, de haces gaussianos en medios turbulentos.¹²

-
- ⁶ David G. Voelz y Michael C. Roggemann. "Digital simulation of scalar optical diffraction: revisiting chirp function sampling criteria and consequences". En: *Appl. Opt.* 48.32 (nov. de 2009), págs. 6132-6142. DOI: 10.1364/AO.48.006132. URL: <http://www.osapublishing.org/ao/abstract.cfm?URI=ao-48-32-6132>.
- ⁷ D. Voelz. "Computational Fourier Optics: A MATLAB Tutorial". En: SPIE Press, 2011, págs. 29-100. DOI: <https://doi.org/10.1117/3.858456>.
- ⁸ R G Lane, A Glindemann y J C Dainty. "Simulation of a Kolmogorov phase screen". En: *Waves in Random Media* 2.3 (1992), págs. 209-224. DOI: 10.1088/0959-7174/2/3/003. eprint: <https://doi.org/10.1088/0959-7174/2/3/003>. URL: <https://doi.org/10.1088/0959-7174/2/3/003>.
- ⁹ Cressida M Harding, Rachel Johnston y Richard G Lane. "Fast simulation of a Kolmogorov phase screen". En: *Applied optics* 38.11 (1999), págs. 2161-2170. DOI: <https://doi.org/10.1364/AO.38.002161>.
- ¹⁰ J.D. Schmidt. *Numerical simulation of optical wave propagation: With examples in MATLAB*. Ene. de 2010, págs. 1-197. DOI: 10.1117/3.866274. eprint: <https://doi.org/10.1117/3.866274>. URL: <https://doi.org/10.1117/3.866274>.
- ¹¹ Jeffrey Beck, Celina Bekins y Jeremy Bos. "WavePy: A Python package for wave optics". En: mayo de 2016, pág. 984603. DOI: 10.1117/12.2225769.
- ¹² L.C. Andrews, R.L. Phillips y A.R. Weeks. "Propagation of a Gaussian-beam wave through a random phase screen". En: *Waves in Random Media* 7.2 (1997). Provided by the SAO/NASA Astrophysics Data System, págs. 229-244. DOI: 10.1088/0959-7174/7/2/005. URL: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1997WRM....7..229A>.

Los haces gaussianos han sido ampliamente estudiados debido a su simplicidad,^{13,14} por tanto, en este proyecto se usó este tipo de fuente para estudiar la propagación a través de un medio turbulento.

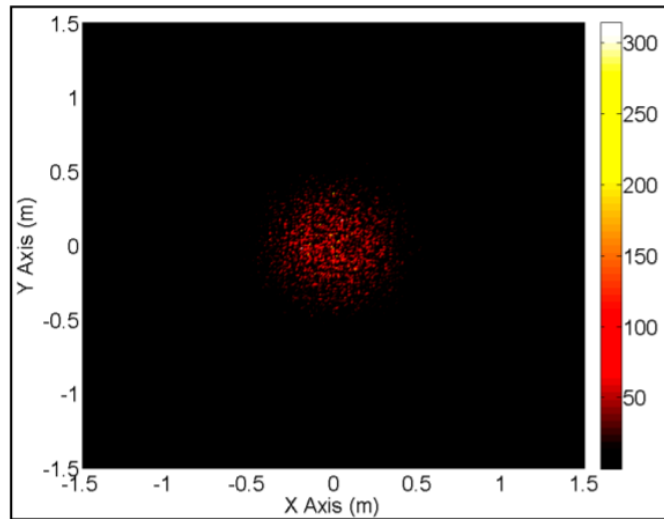


Figura 1. Ejemplo de propagación de un haz gaussiano colimado que atraviesa un medio turbulento a distancia de 1 km. *Referencia:* Chensheng Wu, William Nelson y Christopher Davis. “3D Geometric Modeling and Simulation of Laser Propagation through Turbulence with Plenoptic Functions”. En: vol. 9224. Oct. de 2014, 92240O-92240O. DOI: 10.1117/12.2062945

¹³ Masud Mansuripur. “Gaussian beam optics”. En: *Optics & Photonics News - OPT PHOTONICS NEWS* 12 (ene. de 2001).

¹⁴ Marshall. *G.F. Gaussian Laser Beam Diameters*. In *Laser Beam Scanning; O. Optical Engineering Series*, Marcel Dekker; Vol. 9, 1985, págs. 289–301. DOI: 10.1201/9780203749142-6.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los algoritmos que simulan la propagación de haces ópticos a través de medios turbulentos son utilizados para obtener resultados lo más similar posible a la realidad. Los métodos computacionales tienen parámetros adicionales los cuales es menester estudiar a profundidad para determinar si la aproximación que se realiza en las simulaciones funciona correctamente. En particular, los algoritmos de propagación usan el método de múltiples pantallas de fase, lo cual adiciona una variable a tener en cuenta, **el número de pantallas de fase**. Algunos resultados mostrados en muchos artículos, en los que se realizaron simulaciones computacionales usando el modelo basado en pantallas de fase, han mostrado en mayor o menor medida, una relación entre la turbulencia y el número de pantallas de fase,¹⁵ sin embargo, los estudios no han mostrado con tanto énfasis las relaciones entre los resultados y el número de pantallas de fase. En este proyecto de investigación se propone analizar el efecto que tiene sobre la propagación, el número de pantallas de fase usadas en las simulaciones, a diferentes trayectorias horizontales para distintos niveles de turbulencia, usando como fuente haces gaussianos, con el fin de establecer el número de pantallas de fase adecuado para los parámetros preestablecidos en la simulación y que corresponden con la realidad física.

¹⁵ Maxime Irene Dedo et al. "Retrieving performances of vortex beams with GS algorithm after transmitting in different types of turbulences". En: *Applied Sciences* 9.11 (2019), pág. 2269. DOI: 10 . 3390 / app9112269.

OBJETIVOS

Objetivo general

Estudiar el funcionamiento del algoritmo SSBP para la simulación de la propagación de un haz gaussiano en un medio turbulento a diferentes distancias respecto al número de pantallas de fase interpuestas a lo largo de su trayectoria horizontal a baja altura.

Objetivos específicos

1. Efectuar simulaciones para al menos tres grados de turbulencia atmosférica, débil, intermedia y fuerte.
2. Realizar simulaciones para diferentes distancias de propagación del haz láser en las mismas condiciones de turbulencia atmosférica.
3. Evaluar el impacto que tiene el número de pantallas de fase en la propagación y el frente de onda obtenido luego de la propagación.
4. Evaluar el efecto de la turbulencia atmosférica sobre el frente de onda del haz láser propagado.

1.1. Propagación de la luz

Una fuente de luz monocromática U_1 que se propaga desde un plano 2D con coordenadas ξ y η (ver Figura 2.) hasta un plano de coordenadas (x, y) , en un medio isotrópico y homogéneo, se puede describir mediante la primera solución aproximada de **Rayleigh-Sommerfeld**,¹⁶

$$U_2(x, y) = \frac{z}{j\lambda} \iint_{\Sigma} U_1(\xi, \eta) \frac{\exp(jkr_{12})}{r_{12}^2} d\xi d\eta, \quad (1)$$

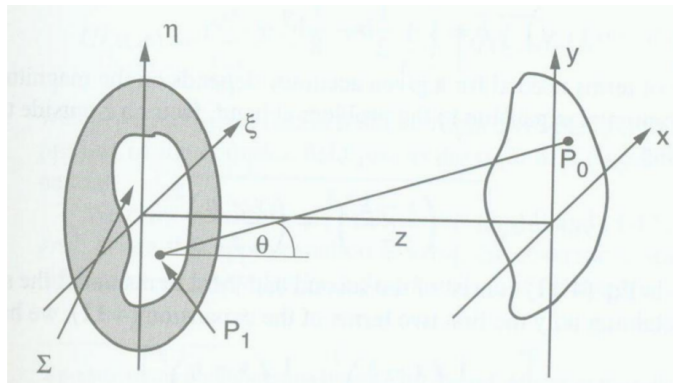


Figura 2. Geometría de la difracción. Referencia Joseph W. Goodman. *Introduction to Fourier Optics*. 3rd ed. Englewood: Roberts & Co., 2005

Siendo λ la longitud de onda, k el número de onda, z la distancia entre los centros y $r_{12} = \sqrt{z^2 + (x - \xi)^2 + (y - \eta)^2}$ la distancia entre la posición del punto fuente y el punto del plano de observación.

La ecuación (1) puede ser reescrita usando el teorema de la convolución. Haciendo uso de

¹⁶ Voelz, ver Referencia n. 7.

la **respuesta impulsional**,^{17,18}

$$h(x, y) = \frac{z \exp(jkr)}{j\lambda r^2},$$

con $r = \sqrt{z^2 + x^2 + y^2}$. Por lo que la ecuación (1) se reescribe como

$$U_2(x, y) = \iint U_1(\xi, \eta) h(x - \xi, y - \eta) d\xi d\eta \quad (2)$$

Usando el teorema de la convolución, la ecuación (2) se convierte en¹⁹

$$U_2(x, y) = \mathcal{F}^{-1} \{ \mathcal{F} \{ U_1(x, y) \} \mathcal{F} \{ h(x, y) \} \}.$$

Se define H como la **función de transferencia** de la forma,

$$\mathcal{F} \{ h(x, y) \} = H(f_X, f_Y) = \exp \left(j k z \sqrt{1 - (\lambda f_X)^2 - (\lambda f_Y)^2} \right),$$

La aproximación de Fresnel dada por,

$$U_2(x, y) = \frac{e^{jkz}}{j\lambda z} \iint U_1(\xi, \eta) \exp \left\{ j \frac{k}{2z} [(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2] \right\} d\xi d\eta. \quad (3)$$

Al igual que con el desarrollo hecho con la expresión de Rayleigh-Sommerfeld la aproximación de Fresnel tiene la forma de convolución, por lo que se puede definir su **respuesta**

¹⁷ "Preface". En: *Contemporary Optical Image Processing With MATLAB*. Ed. por Ting-Chung Poon y Partha P. Banerjee. Oxford: Elsevier, 2001, págs. v-vi. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-008043788-0/50000-7>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780080437880500007>.

¹⁸ Joseph W. Goodman. *Introduction to Fourier Optics*. 3rd ed. Englewood: Roberts & Co., 2005.

¹⁹ Voelz, ver Referencia n. 7.

impulsional y función de transferencia dadas por,^{20,21}

$$h(x, y) = \frac{e^{jkz}}{j\lambda z} \exp \left[\frac{jk}{2z} (x^2 + y^2) \right],$$
$$H(f_X, f_Y) = e^{jkz} \exp [j\pi\lambda z (f_X^2 + f_Y^2)].$$

1.2. Propagación SPLIT STEP (SS)

Cuando se intenta hacer una propagación de una fuente óptica suelen utilizarse las ecuaciones clásicas de difracción, en especial, la aproximación de Fresnel. Pero existe el inconveniente de que la difracción de Fresnel sufre de problemas de muestreo a largas distancias. Por lo tanto, se puede pensar en una propagación de larga distancia dividiéndose en tramos más cortos (ver Figuras 3 y 4) y que en cada uno de estos tramos se haga una propagación de Fresnel hasta llegar al siguiente tramo, y nuevamente comenzar con una nueva propagación, realizar este proceso de manera iterativa hasta llegar al plano de observación se conoce como el método split-step. Por lo tanto, si un tramo z_n se divide en trozos más pequeños, se puede mostrar que,²²

$$H(f_X, f_Y; z_N) = H(f_X, f_Y; z_1) H(f_X, f_Y; z_2 - z_1) \dots H(f_X, f_Y; z_N - z_{N-1}). \quad (4)$$

Lo que indica que el muestreo aún se verá afectado debido a que representa lo mismo propagar en tramos pequeños que hacerlo completamente. Sin embargo, la propagación **SS** es realmente útil cuando en cada tramo de distancia se necesita agregar una diferencia de fase producida por algún obstáculo.

²⁰ Goodman, ver Referencia n. 18.

²¹ Voelz, ver Referencia n. 7.

²² Voelz, ver Referencia n. 7.

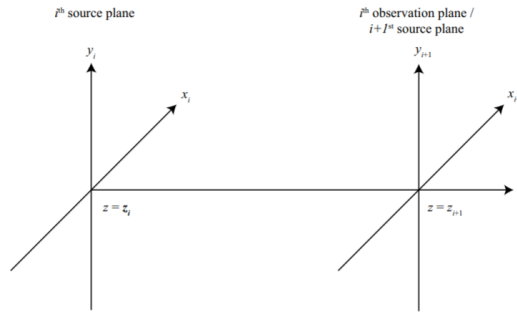


Figura 3. Diagrama de planos en la propagación. *Referencia*. Joseph W. Goodman. *Introduction to Fourier Optics*. 3rd ed. Englewood: Roberts & Co., 2005.

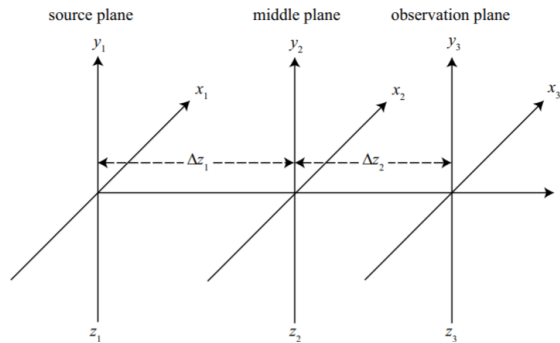


Figura 4. Múltiples propagaciones divididas en diferentes planos. *Referencia* Joseph W. Goodman. *Introduction to Fourier Optics*. 3rd ed. Englewood: Roberts & Co., 2005

1.3. Turbulencia de Kolmogorov

El análisis de la turbulencia comienza en 1941 gracias a la teoría de Kolmogorov^{23,24} la cual se conoce comúnmente como K41.²⁵ La atmósfera terrestre presenta cambios en el

²³ Kolmogorov, “The local structure of turbulence in incompressible viscous fluid for very large Reynolds numbers”, ver Referencia n. 4.

²⁴ A. N. Kolmogorov. “Dissipation of Energy in the Locally Isotropic Turbulence”. En: *Proceedings: Mathematical and Physical Sciences* 434.1890 (1991), págs. 15-17. URL: <http://www.jstor.org/stable/51981>.

²⁵ A. Labeyrie, S. G. Lipson y P. Nisenson. *An Introduction to Optical Stellar Interferometry*. Cambridge University Press, 2006. DOI: 10.1017/CB09780511617638.

transcurso del día debido a variaciones en la temperatura y presión,²⁶ lo que produce torbellinos de diferente tamaño y temperatura dependiendo de la altura. Se puede decir que la turbulencia es un fenómeno causado por fluctuaciones espaciales y temporales en el índice de refracción del aire.²⁷

La energía cinética en la turbulencia se caracteriza por un espectro de escalas de longitud y tiende a ir en forma de cascada, la energía cinética se transfiere de remolinos grandes a medianos, y estos a pequeños, y finalmente se disipa en forma de calor dentro del fluido. La región en que este intercambio de energía ocurre se conoce como subrango inercial y se encuentra entre L_0 , la escala externa, (región de transferencia de energía) y l_0 , la escala interna, (región de disipación de energía) como se muestra en la Figura 5.

Gracias al análisis realizado por Kolmogorov se pudo establecer que dentro del subrango inercial $l_0 < x < L_0$ los remolinos son estadísticamente homogéneos e isotrópicos dentro de pequeñas regiones del espacio, lo que significa, que la energía cinética del fluido es proporcional al diámetro de los remolinos turbulentos. Por los motivos mencionados anteriormente se usa la función de estructura²⁸ para describir los cambios que presenta la atmósfera.

²⁶ Z. P. Reyes Quijano, "Decodificación de información en sistemas QKD ópticos multidimensionales basada en inteligencia artificial", *Biblioteca Universidad Industrial de Santander*, 2019 Propuesta de Tesis de Doctorado, págs. 5-6.

²⁷ A. Ballesteros Díaz, "Parámetros de turbulencia atmosférica a escala de laboratorio utilizando Telescopía de Fourier de tiempo promedio", *Biblioteca Universidad Industrial de Santander*, 2019 Tesis de Maestría, págs. 17-29.

²⁸ Schmidt, ver Referencia n. 10.

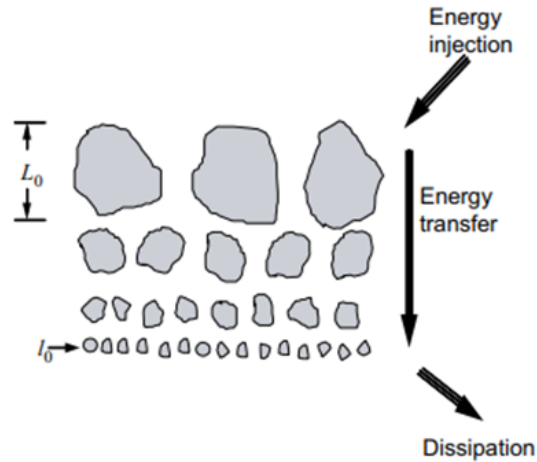


Figura 5. Energía en cascada por transferencias de energía de remolinos de mayor diámetro a menor diámetro *Referencia* L.C. Andrews y R.L. Phillips. *Laser Beam Propagation Through Random Media*. SPIE Press monograph. Society of Photo Optical, 2005. URL: <https://books.google.com.co/books?id=4NXHYg70qqIC>

La función de estructura se define para una variable aleatoria x como,^{29,30,31}

$$D_x(r_1, r_2) = \langle |x(r_2) - x(r_1)|^2 \rangle, \quad (5)$$

Donde $\langle \rangle$ denota el promedio temporal y, r_1 y r_2 son los puntos donde se realiza la medición de la variable única x .

La función de estructura para el índice de refracción en un medio homogéneo se puede

²⁹ L.C. Andrews y R.L. Phillips. *Laser Beam Propagation Through Random Media*. SPIE Press monograph. Society of Photo Optical, 2005. URL: <https://books.google.com.co/books?id=4NXHYg70qqIC>.

³⁰ V.I. Tatarski. *Wave Propagation in a Turbulent Medium*. McGraw-Hill, 1961. URL: <https://books.google.com.co/books?id=pqqTnAEACAAJ>.

³¹ N. Randunu Pathirannehelage, "Imaging through ground-level turbulence by fourier telescropy: simulations and preliminary experiments", *Florida Atlantic University*, 2015 PHD thesis, págs. 9-11.

escribir como,³²

$$D_n(r) = [n(r_1 + r) - n(r_1)]^2, \quad (6)$$

Siendo $r = r_2 - r_1$.

Gracias a Kolmogorov se puede redefinir la función de estructura para el índice de refracción de la siguiente forma,

$$D_n(r) = \begin{cases} C_n^2 l_0^{-4/3} r^2, & 0 \leq r \ll l_0 \\ C_n^2 r^{2/3}, & l_0 \ll r \ll L_0 \end{cases}. \quad (7)$$

Donde $C_n^2 [m^{-2/3}]$ es la constante de estructura para el índice de refracción y expresa la fuerza de las fluctuaciones para el índice de refracción,³³ generalmente, oscilando entre los rangos de turbulencia fuerte en el orden de $1 \times 10^{-13} m^{-2/3}$ y turbulencia débil alrededor de $1 \times 10^{-18} m^{-2/3}$.

Frecuentemente, se necesita tener una descripción espectral de las fluctuaciones del índice de refracción.³⁴ Según la teoría de Kolmogorov la **densidad espectral de potencia** (PSD) del índice de refracción se calcula de la siguiente forma,

$$\Phi_n^K(\kappa) = \frac{1}{4\pi^2 \kappa^2} \int_0^\infty \frac{\sin(\kappa r)}{\kappa r} \frac{d}{dr} \left[r^2 \frac{d}{dr} D_n(r) \right] dr, \quad (8)$$

$$\Phi_n^K(\kappa) = 0.033 C_n^2 \kappa^{-11/3} \quad \text{para} \quad \frac{1}{L_0} \ll \kappa \ll \frac{1}{l_0}, \quad (9)$$

³² Monish R Chatterjee y Fathi HA Mohamed. "Split-step approach to electromagnetic propagation through atmospheric turbulence using the modified von Karman spectrum and planar apertures". En: *Optical Engineering* 53.12 (2014), págs. 1 -17.

³³ Andrews y Phillips, ver Referencia n. 29.

³⁴ Schmidt, ver Referencia n. 10.

En general, los algoritmos que realizan simulaciones de propagación en medios turbulentos usan modelos basados en el **parámetro de Fried o la longitud de coherencia de Fried**.³⁵

El **parámetro de Fried**³⁶ es una medida de la calidad de la transmisión óptica a través de la atmósfera debido a heterogeneidades aleatorias en el índice de refracción de la atmósfera. El parámetro de Fried está relacionado con la fuerza de la turbulencia o parámetro de estructura en del índice de refracción, y con la distancia de propagación mediante la expresión,³⁷

$$r_0 = (0.423C_n^2 k^2 z)^{-3/5}, \quad (10)$$

Gracias al parámetro de Fried se puede reescribir el PSD de fase de Kolmogorov de la siguiente forma,³⁸

$$\Phi_\phi^K(\kappa) = 0.49r_0^{-5/3}\kappa^{-11/3}, \quad (11)$$

Uno de los parámetros más utilizados para medir el efecto producido por la propagación dentro de un medio turbulento es el índice de centelleo, el cual describe las fluctuaciones de la irradiancia recibida, y se calcula mediante la varianza normalizada de las fluctuacio-

³⁵ D. L. Fried. "Optical Resolution Through a Randomly Inhomogeneous Medium for Very Long and Very Short Exposures". En: *J. Opt. Soc. Am.* 56.10 (1966), págs. 1372-1379. DOI: 10.1364/JOSA.56.001372. URL: <https://opg.optica.org/abstract.cfm?URI=josa-56-10-1372>.

³⁶ Fried, ver Referencia n. 35.

³⁷ Hanyu Zhan, Erandi Wijerathna y David Voelz. "Is the formulation of the Fried parameter accurate in the strong turbulent scattering regime?" En: *OSA Continuum* 3.9 (2020), págs. 2653-2659. DOI: 10.1364/OSAC.404983. URL: <https://opg.optica.org/osac/abstract.cfm?URI=osac-3-9-2653>.

³⁸ Schmidt, ver Referencia n. 10.

nes de intensidad,³⁹

$$\sigma^2(r, L) = \frac{\langle I^2(r, L) \rangle}{\langle I(r, L) \rangle^2} - 1, \quad (12)$$

1.4. Pantallas de fase (PS)

Modelar un medio turbulento en un espacio de gran volumen es una tarea sumamente compleja matemáticamente,⁴⁰ por lo tanto, en lugar de modelar la turbulencia completamente a lo largo de una distancia, se usa el modelo de **pantallas infinitesimalmente delgadas** (ver Figura 6).

Las pantallas de fase son creadas por la inserción de números aleatorios generados computacionalmente en dos dimensiones.⁴¹ El método más utilizado para la generación de las pantallas de fase aleatorias, para una realización independiente aleatoria con una densidad de potencia preestablecida, es descrito por,⁴²

$$\Phi(X, Y) = \Re \left\{ \mathcal{F}^{-1} \left(\mathbb{C}_{NN} \sqrt{\Phi_{NN}(\kappa)} \right) \right\}. \quad (13)$$

Siendo X, Y las coordenadas cartesianas, \Re a la parte real de la función, \mathcal{F}^{-1} la transformación rápida de Fourier inversa, \mathbb{C}_{NN} son números complejos aleatorios siguiendo una

³⁹ Michael G. Panich et al. "Scintillation fluctuations of optical communication lasers in atmospheric turbulence". En: *Laser Radar Technology and Applications XIX; and Atmospheric Propagation XI*. Ed. por Monte D. Turner et al. Vol. 9080. International Society for Optics y Photonics. SPIE, 2014, págs. 348 -356. DOI: 10.1117/12.2053338. URL: <https://doi.org/10.1117/12.2053338>.

⁴⁰ Ver Referencia n. 31.

⁴¹ Ver Referencia n. 31.

⁴² Lane, Glindemann y Dainty, ver Referencia n. 8.

distribución normal de media 0 y varianza 1 que se encuentran en una matriz $N \times N$ ⁴³, y $\Phi_{NN}(k)$ corresponde a una realización aleatoria de la densidad de potencia (PSD) preestablecida (en este caso la densidad de potencia de Kolmogorov).

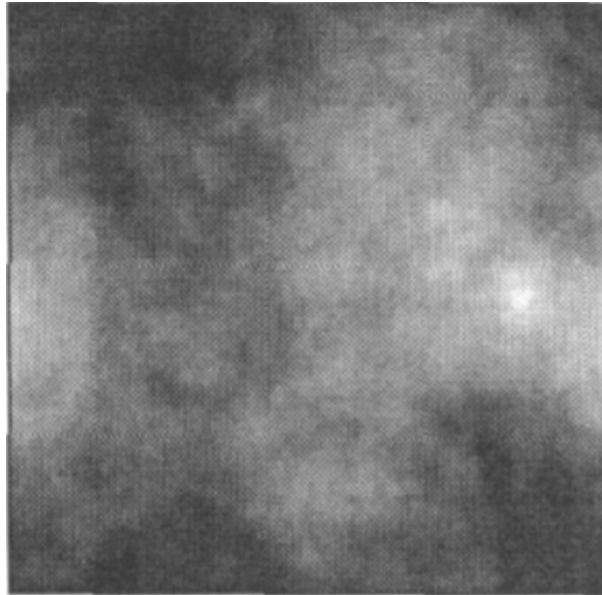


Figura 6. Aproximación de una pantalla de fase aleatoria producida del muestreo del espacio de kolmogorov. Referencia R G Lane, A Glindemann y J C Dainty. "Simulation of a Kolmogorov phase screen". En: *Waves in Random Media* 2.3 (1992), págs. 209-224. DOI: 10.1088/0959-7174/2/3/003. eprint: <https://doi.org/10.1088/0959-7174/2/3/003>. URL: <https://doi.org/10.1088/0959-7174/2/3/003>

⁴³ Ver Referencia n. 26.

1.5. Split-Step Beam Propagation Method (SSBPM)

SSBPM es uno de los algoritmos más ampliamente usados usados,⁴⁴⁴⁵⁴⁶⁴⁷⁴⁸ en cuanto a la propagación de medios turbulentos se refiere. Su funcionamiento se puede resumir en el siguiente orden:

- Se toma una distancia de propagación $Z=L$.
- Se divide la distancia L en n tramos más pequeños de largo Δz .
- Al final de cada tramo se sitúa una pantalla de fase generada.
- Se comienza a propagar una fuente desde el plano de la apertura $Z=0$.
- La fuente es propagada usando la función de transferencia en el vacío. (Para el caso de la Figura 6 se usa la función de transferencia de Fresnel-Kirchhoff)

⁴⁴ Dongxiao Zhang et al. "Accurate simulation of turbulent phase screen using optimization method". En: *Optik* 178 (2019), págs. 1023 -1028. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2018.10.083>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0030402618315924>.

⁴⁵ Monish R Chatterjee y Fathi HA Mohamed. "Investigation of profiled beam propagation through a turbulent layer and temporal statistics of diffracted output for a modified von Karman phase screen". En: *Free-Space Laser Communication and Atmospheric Propagation XXVI*. Vol. 8971. International Society for Optics y Photonics. 2014, pág. 897102.

⁴⁶ Chatterjee y Mohamed, "Split-step approach to electromagnetic propagation through atmospheric turbulence using the modified von Karman spectrum and planar apertures", ver Referencia n. 32.

⁴⁷ Connor E Murphy y Mark F Spencer. "Investigation of turbulence thermal blooming interaction using the split-step beam propagation method". En: *Unconventional and Indirect Imaging, Image Reconstruction, and Wavefront Sensing 2018*. Vol. 10772 # 1077208. International Society for Optics y Photonics. 2018.

⁴⁸ Hang Zhou, Rémi Douvenot y Alexandre Chabory. "Modeling the long-range wave propagation by a split-step wavelet method". En: *Journal of Computational Physics* 402 # 109402 (2020). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2019.109042>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S002199911930748X>.

- Una vez la fuente se encuentra con una pantalla se hace una multiplicación de la entrada (U_{in}) con la fase que presenta dicha pantalla,⁴⁹

$$U_{out}(x_i, y_i) = U_{in}(x_i, y_i) e^{j\varphi(x_i, y_i)} \quad (14)$$

- Justo después de pasar por la primera pantalla de fase se toma este nuevo (U_{out}) campo como un nuevo campo de entrada (U_{in}) para nuevamente comenzar a propagarse en el vacío usando la función de transferencia.
- De forma iterativa la fuente se propaga n veces, hasta finalmente llegar al plano de salida donde se recibe la información.

El algoritmo SSBPM es representado visualmente en la Figura 7.

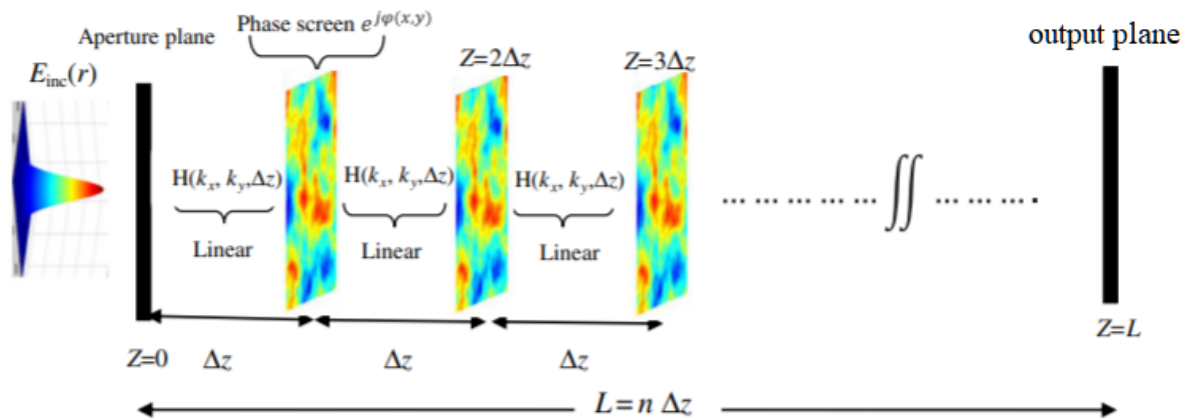


Figura 7. Esquema del funcionamiento de SSBP. Referencia Monish R Chatterjee y Fathi HA Mohamed. “Split-step approach to electromagnetic propagation through atmospheric turbulence using the modified von Karman spectrum and planar apertures”. En: *Optical Engineering* 53.12 (2014), págs. 1 -17.

⁴⁹ Chatterjee y Mohamed, “Split-step approach to electromagnetic propagation through atmospheric turbulence using the modified von Karman spectrum and planar apertures”, ver Referencia n. 32.

En este capítulo se presentan las pruebas realizadas al software seleccionado, WavePy, como librería base para los resultados mostrados posteriormente en los informes.

La mayor parte del software escrito para las simulaciones ópticas (WOS) se encuentra escrito en el lenguajes de programación de código cerrado o con costos de licencia en sus librerías lo cual influye en restricciones en el uso y la divulgación del mismo. Uno de los códigos más utilizados usando el SSBP es el presentado en el libro de Schmidt *Numerical Simulation of Optical Wave Propagation With Examples in MATLAB*. Debido a los problemas mencionados anteriormente muchos investigadores han recurrido a herramientas de código abierto para evitar tarifas de licencia y restricciones de uso.⁵⁰

Por tanto, se han creado alternativas en otros lenguajes de programación siendo el más destacado el lenguaje Python debido a sus múltiples librerías como Numpy (que ofrece funciones matemáticas, matrices, integrales, generadores de números aleatorios, rutinas de álgebra lineal, transformadas de Fourier entre otros), y Pandas (que permite el manejo, recolección y manipulación de los datos), además de tener una comunidad amplia, la cual permite el trabajo colaborativo entre múltiples desarrolladores.

WavePy surge como una alternativa en Python al código utilizado en MATLAB por parte de Schmidt, según sus autores: "No pretende ser restrictivo". Esencialmente, los creadores conservan todos los derechos. *Jeremy P. Bos, PhD, P.E Assistant Professor Electrical and Computer Engineering Department, Michigan Technological University*. WavePy hace uso del generador de pantalla de fase de turbulencia basado en la versión de MATLAB y un pro-

⁵⁰ Beck, Bekins y Bos, ver Referencia n. 11.

pagador SSBP de Fresnel.

Python, al ser un lenguaje orientado a objetos, facilita la reutilización de código mediante herencia. WavePy hace uso de ésta funcionalidad, permitiendo la fácil creación de un objeto al cual se le asignan los atributos antes de comenzar la propagación del mismo. Para el modelado de la turbulencia, WavePy usa la densidad espectral de potencia de Kolmogorov. Para más detalles en el funcionamiento de WavePy visitar la wiki del **repositorio** en <https://github.com/jpbos/WavePy/wiki> y si desea descargar el código fuente desde la pagina <https://github.com/jpbos/WavePy> construido bajo Python 2.7

Con WavePy⁵¹ se pueden conseguir simulaciones de haces, pantallas de fase y técnicas de Fourier para modelar con precisión el cambio del haz que viaja en un medio con turbulencia a trayectoria horizontal. Entre los parámetros de la simulación para modelar un haz, se encuentra la fuente deseada para propagar, entre ellas, onda plana, onda esférica, y haz gaussiano, siendo este último usado dentro de las simulaciones de este proyecto ya que casi todos los experimentos conducidos a escala de laboratorio y en campo abierto usan láseres de perfil gaussiano. Si queremos analizar el comportamiento del haz gaussiano a medida que pasa por cada pantalla de fase, WavePy permite agregar diferentes números de pantallas de fase en el recorrido del haz, haciendo un ajuste equidistante según la distancia de propagación previamente establecida y el número de pantallas de fase que se van a utilizar, lo que supondría una geometría fija para los parámetros establecidos al declarar el objeto wavepy.

El código base de WavePy fue modificado por motivos de bugs y para mantener por defecto algunos atributos que serán reutilizados a lo largo de las simulaciones que se realizaron

⁵¹ Beck, Bekins y Bos, ver Referencia n. 11.

en este proyecto de grado. **Es posible consultar el código modificado entrando al enlace de Google Drive**

https://drive.google.com/file/d/1Y6EBJcSjHfQlaNgVa1vefgXI_Kiz_4XY/view?usp=sharing
con una pequeña guía del uso del software bajo python 2.7, todos los derechos permanecen a los creadores del repositorio.

Wavepy hace uso de una fuente de haz gaussiano con un frente de fase uniforme, al tratarse de una geometría fija, en Wavepy se declaran los atributos de la siguiente forma:

```
1 Prueba1 = wavepy(simOption=2,N=256,NumScr=5,PropDist=500,Cn2=1e-14) #De esta forma
  ↳ se crea el objeto wavepy() llamado prueba1
2 # Con los parametros a simula:
3 # simOption=2 indica la fuente en este caso gaussiana
4 # N = numero de pixeles
5 #NumScr = Numero de pantallas
6 #Cn2= parámetro de estructura del índice de refracción
7
```

Para graficar el haz gaussiano se ejecuta la siguiente línea de código,

```
1 plt.imshow(np.abs(Prueba1.Source)**2) # De esta forma se muestra la fuente Source
2 # simOption = 2 me genera un haz gaussiano
3
4
```

Y para graficar una de las pantallas de fase generada aleatoriamente,

```
1 plt.imshow(Prueba1.PhaseScreen()) #Me muestra una de las pantallas de fase
  ↳ generadas en el constructor para esto se pone el
2 # Objeto Prueba seguido de un . continuando con la función que queremos llamar de
  ↳ esta forma
3 #Prueba1.PhaseScreen() me arroja la matriz para generada para la pantalla de fase
4 # Finalmente plt.imshow me muestra el resultado grafico de PhaseScreen()
5
```

La ubicación de las pantallas de fase en el trayecto en WavePy es, en general, equidistante, sin embargo, la distancia entre el plano fuente y la primer pantalla, se encuentra a la mitad de distancia de separación entre pantallas, es decir si la distancia de separación de pantallas es de 100 [m], la primer pantalla se encuentra a 50[m] entre el plano fuente y la siguiente pantalla, similar a lo que ocurre con la última pantalla de fase la cual se encuentra a 50[m] de la pantalla anterior y el plano de salida, esto se debe a estudios realizados en trabajos de Jack E. McCrae, Santasri R. Bose-Pillai,⁵² entre otros autores, que sostienen que ésta distribución produce mejores resultados y más precisos. Por lo tanto si se quiere conocer en donde se ubican cada una de las pantallas generadas se usa

```
1 Prueba1.ScrnLoc
2 # Da como resultado array([ 50., 100., 200., 300., 450.])
3
```

Para ejecutar la simulación de propagación en el vacío se usa

```
1 Prueba1.VacuumProp() #Propagacion en el vacio usando split step con remuestreo
2
```

Para ejecutar la simulación de la propagación a través de turbulencia,

```
1 Prueba1.TurbSim() #Ejecuta la simulación usando el método split step con
  ↳ propagación de difracción de fresnel
2
```

Para evaluar el índice de centello del haz propagado en el plano de salida se ejecuta

⁵² Milo W. Hyde et al. "Generating partially coherent Schell-model sources using a modified phase screen approach". En: *Optical Engineering* 54.12 (2015), pág. 120501. DOI: 10.1117/1.OE.54.12.120501. URL: <https://doi.org/10.1117/1.OE.54.12.120501>.

```
1 Prueba1.EvalSI() # Calcula y Me devuelve el índice de centelleo
2
```

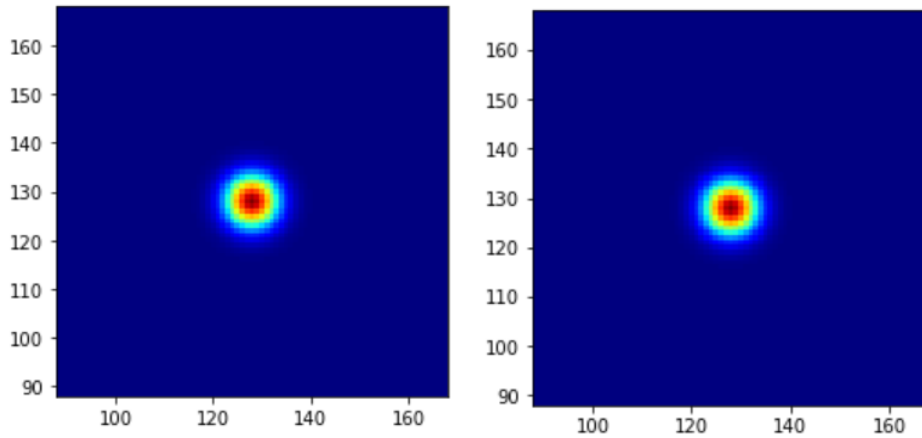


Figura 8. (Izq.) Resultado de la fuente del haz gaussiano en píxeles. (Der.) Resultado de la propagación del haz gaussiano a $500m$ en el vacío en píxeles.

La Figura 8 muestra la fuente gaussiana en el plano de salida y la fuente gaussiana propagada $500m$ en el vacío. Las gráficas muestran valores de la imagen en píxeles, por lo que un lado corresponde a 256 píxeles, es decir, una resolución de 256×256 . Así, si analizamos el comportamiento de un haz gaussiano en el vacío $500m$ después de salir de la fuente y sin ninguna pantalla de fase, observamos que no hay cambio en el haz desde que sale de la fuente hasta que ha recorrido $500m$ de distancia. Este resultado es acorde a lo que ocurre en la realidad, ya que no existe turbulencia en el vacío, por tal motivo no se presenta distorsión en cuanto al patrón de intensidad del haz gaussiano.

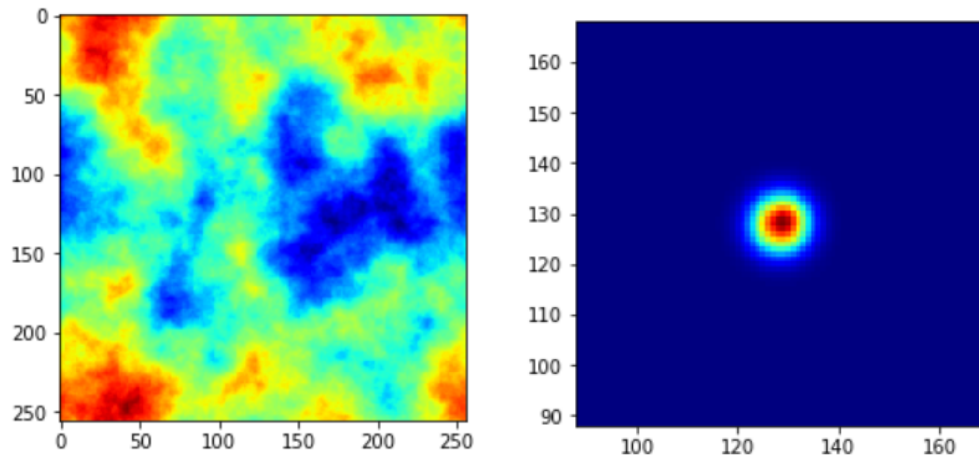


Figura 9. (Izq.) Pantalla de fase de Kolmogorov generada aleatoriamente en pixeles. (Der.) Resultado de la propagación del haz gaussiano a $500m$ con turbulencia débil en pixeles.

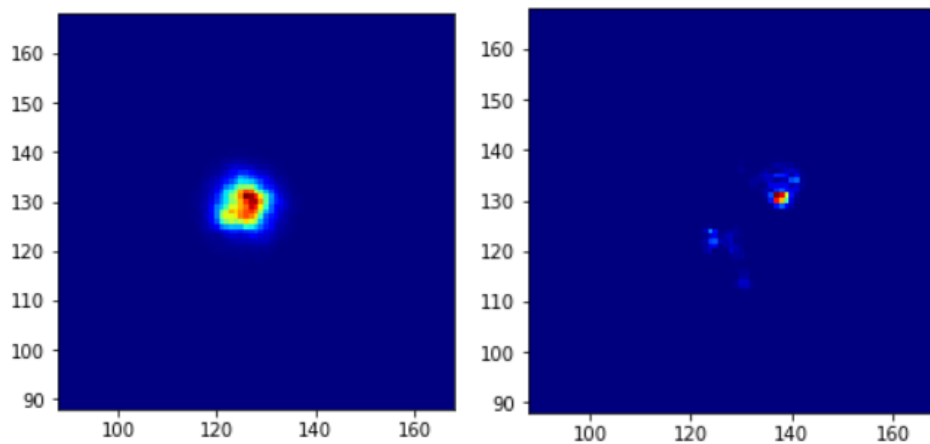


Figura 10. (Izq.) Resultado de la propagación del haz gaussiano a $500m$ con turbulencia moderada en pixeles. (Der.) Resultado de la Propagación del haz gaussiano a $500m$ con turbulencia fuerte en pixeles.

Por otra parte, si agregamos una pantalla de fase de Kolmogorov, generada usando la expresión (13) como se puede ver en la Figura 8 (Izq) para modelar un medio turbulento bajo propagación horizontal, se encuentra que valores bajos de turbulencia dan resultados similares a un haz gaussiano en el vacío, como se muestra en la Figura 9 (Der.). Valores medios de turbulencia resultan en distorsiones del haz en intensidad de forma moderada

conservando una forma gaussiana a simple vista (ver Figura 10 (Izq.)). Y para valores altos de turbulencia se puede apreciar que se distorsiona por completo el haz propagado, lo que indica pérdidas de información muy alta (ver Figura 10(Der.)) como es de esperarse para el caso de valores altos del parámetro C_n^2 . Para el presente trabajo se usó el entorno de desarrollo en cuadernos de Jupyter de la distribución de Python de Anaconda3. Para mantener las simulaciones lo más controladas posible se realizan las pruebas en un mismo hardware y condiciones similares con el fin de tener un mejor control en los tiempos de ejecución y que estos no varíen considerablemente.

Jupyter Notebook al ejecutar el intérprete de Python 2.7 hace uso de alrededor de la mitad del procesador (a pesar de no hacer uso completo del hardware se escoge este entorno de desarrollo por la comodidad y porque las variables son guardadas sin necesidad de ejecutar nuevamente el programa, haciendo que los datos puedan ser almacenados y re-utilizados cuando se solicite), sin embargo, no se realizaron simulaciones en simultáneo debido a la saturación de éste al estar ejecutando, en ocasiones, aplicaciones en segundo plano que pueden producir alteraciones en el tiempo de cómputo dando lugar a tiempos erróneos. Para el presente trabajo se utiliza el Hardware y Software mostrados en la Tabla 1.

Motherboard	Asus Prime H310M-A R 2.0
Procesador	Intel Core I3 9100f 3.60 GHz
Ram	1 módulo 8 gigas DDR 4 2666 MHz
Tarjeta gráfica	MSI GeForce GTX 1650 SUPER
Disco	SSD 240 GB sata Adata
Sistema Operativo	Windows 10 Pro 21H1

Tabla 1. Tabla de Hardware y Software utilizados en la simulaciones ópticas.

Para las pruebas realizadas a WP debido a limitaciones del hardware y el tiempo de cálculo en cada una de las ejecuciones, se estableció un número de pixeles de 256 siendo una medida balanceada entre información que provee y un tiempo de ejecución moderado.

3

SIMULACIONES

En esta sección se muestra el proceso realizado y los parámetros con los cuales se simularon las propagaciones con y sin turbulencia atmosférica, para un haz gaussiano bajo trayectorias horizontales.

3.1. Simulaciones de turbulencia atmosférica a una misma distancia de propagación

3.1.1. Simulación en el vacío. En la Tabla 2 se muestran los parámetros de la simulación para un haz gaussiano en el vacío.

N(numero de pixeles por lado)	256
Intervalo de muestreo en el plano fuente	5×10^{-3} [m]
Intervalo de muestreo en el plano de llegada	5×10^{-3} [m]
Longitud de onda	$6,32 \times 10^{-7}$ [m]
Distancia de propagación	500 [m]
Numero de onda k	$\frac{2 * \pi}{\lambda}$
Fuente	Gaussiana
Cintura del haz	0,1 [m]

Tabla 2. Parámetros para la simulación de un haz gaussiano que se propaga en el vacío.

La fuente a propagar es mostrada a continuación, en la Figura 11, siguiendo los parámetros mostrados en la Tabla 2.

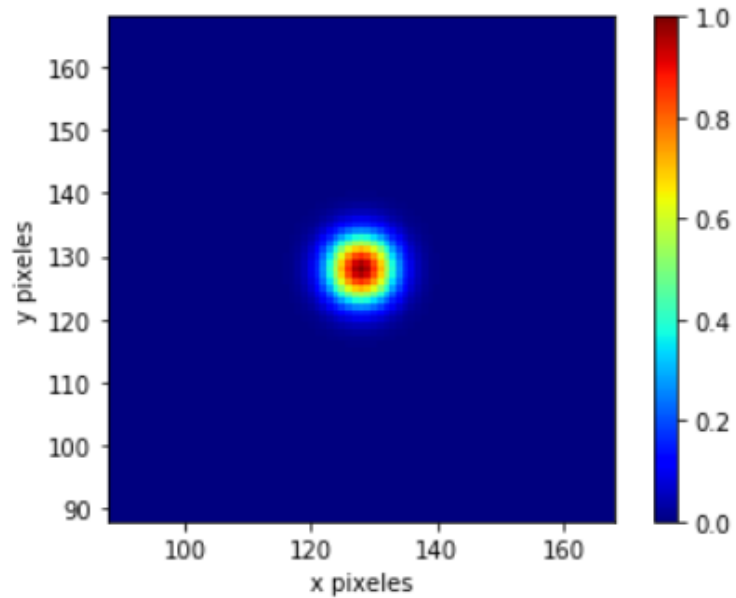


Figura 11. Patrón de intensidad en el plano fuente para el haz gaussiano a propagar a 500[m].

Para comparar los resultados con turbulencia, primero se procede a realizar las propagaciones en el espacio libre. Una de las características que se evalúa es el tiempo en el que tarda en ejecutarse la simulación de la propagación, esto se realiza usando la librería de Python 2.7 *Timeit*. Para el caso de un objeto llamado *Prueba1* se calcula el tiempo de la simulación de la propagación de la siguiente forma,

```

1 import timeit
2 Prueba1 = wavepy(simOption=2,N=256,PropDist=500)
3 start_time = timeit.default_timer()
4 Prueba1.VacuumProp()
5 elapsed = timeit.default_timer() - start_time
6

```

Para este caso, se llama a la variable *elapsed* para conocer el tiempo transcurrido obteniéndose un valor de 0,1169 [s], lo cual es de esperarse para una ejecución de la simulación sin turbulencia.

En la Figura 12 muestra el resultado de propagar usando el SSBM en el haz gaussiano presentado en la Figura 11 con los valores preestablecidos,

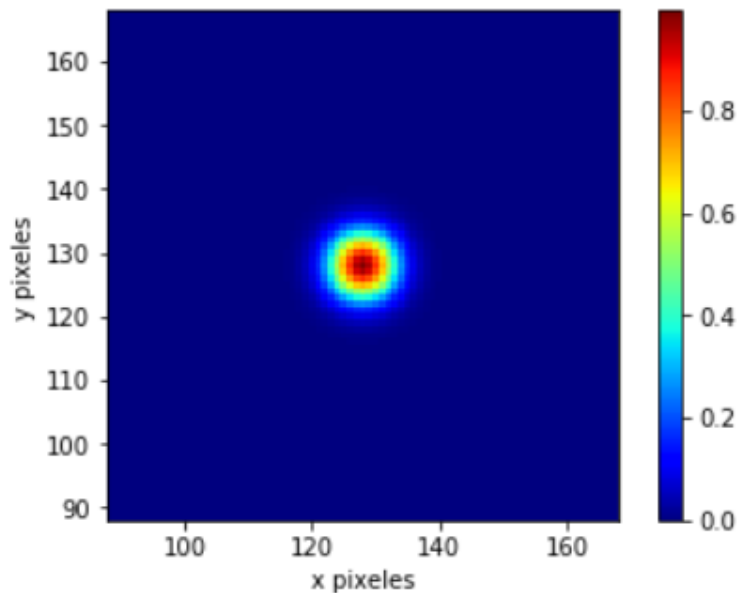


Figura 12. Distribución de intensidad para la Propagación de un haz gaussiano en el espacio libre a distancia de propagación 500 [m].

Se aprecia la nula distorsión que posee el haz de la Tabla 2 cuando se propaga sin turbulencia a una distancia de 500 [m]. Para la siguiente subsección donde se mantiene constante la distancia de propagación, la Figura 12 será la referencia para comparar los patrones de intensidad con aquellos propagados con diferentes números de pantallas de fase y distintos valores de C_n^2

3.1.2. Simulación turbulencia atmosférica prácticamente nula a un valor de $C_n^2 = 1 \times 10^{-200} [m^{-\frac{2}{3}}]$

Para realizar la simulación de un haz gaussiano propagado a través de un medio turbulento, nuevamente se crea un objeto de WavePy siguiendo los parámetros mostrados en la Tabla 3,

N(numero de pixeles por lado)	256
Ancho pantallas de fase	1,28[m]
Intervalo de muestreo en el plano fuente	5×10^{-3} [m]
Intervalo de muestreo en el plano de llegada	5×10^{-3} [m]
Escala interna $L_{\{0\}}$	1×10^{-3} [m]
Escala externa $L_{\{0\}}$	1×10^3 [m]
Numero de pantallas de fase	variable
Longitud de onda	$6,32 \times 10^{-7}$ [m]
Distancia de propagación	500 [m]
C_n^2	variable [$m^{-\frac{2}{3}}$] (3 muestras)
Numero de onda k	$\frac{2*\pi}{\lambda}$ [rad/m]
Fuente	Gaussiana
Cintura del haz	0,1 [m]

Tabla 3. Parámetros para la simulación de un haz gaussiano que se propaga a través de turbulencia atmosférica.

Se comenzará con un primer valor de $C_n^2 = 1 \times 10^{-200} [m^{-\frac{2}{3}}]$, muy bajo, para destacar el efecto de este parámetro al variar el número de pantallas de fase.

```

1 import timeit
2 Prueba1 = wavepy(simOption=2,N=256,NumScr=1,PropDist=500,Cn2=1e-200)
3 start_time = timeit.default_timer()
4 Prueba1.TurbSim()
5 elapsed = timeit.default_timer() - start_time
6

```

Para el caso de una sola pantalla de fase se puede observar que el tiempo de ejecución, la variable *elapsed* es de 0,68 segundos. Además, al realizar el cálculo del centelleo usando la expresión (12) se obtiene el valor de 0,01117 lo cual es de esperarse debido al prácticamente nulo nivel de turbulencia añadido por ésta única pantalla de fase,

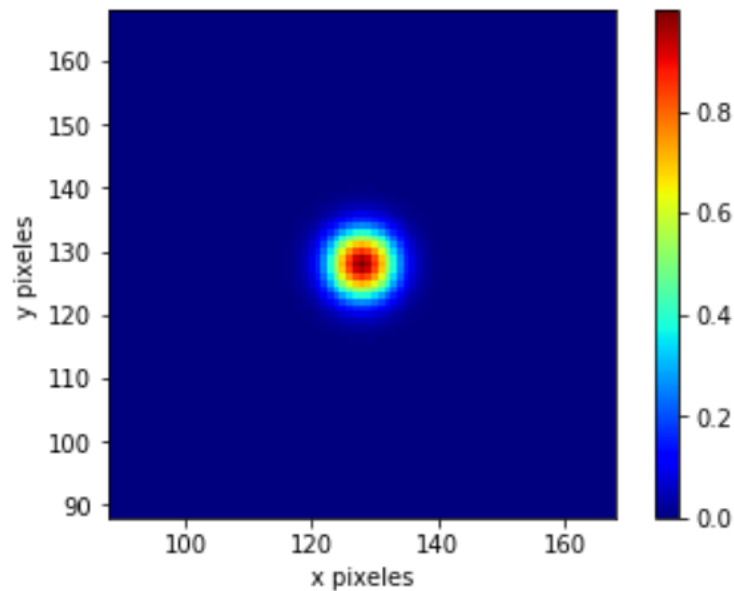


Figura 13. Distribución de intensidad para la Propagación de un haz gaussiano con baja turbulencia atmosférica a distancia de propagación 500 [m] con una pantalla de fase.

En la Figura 13 a simple vista, la distribución de intensidad parece ser igual a la distribución obtenida en el caso de la propagación en el vacío, una nula distorsión del haz propagado, correspondiente al valor tan bajo de índice de centelleo obtenido. Al tratarse de un proceso aleatorio, se realizó esta simulación múltiples ocasiones, sin embargo, se encontró que el índice de centelleo no variaba, por lo tanto, el promedio del índice de centelleo corresponde al mismo obtenido en la primera simulación, variando únicamente el valor del tiempo de ejecución de la simulación, que oscilaba entre 0,67 y 0,70 segundos.

Para el caso de 2 pantallas de fase (del código anterior NumScr = 2) se obtuvo un valor de centelleo de 0,01117, igual al obtenido con una pantalla de fase, sin embargo, el tiempo de ejecución paso de 0,6810 a un valor de 1,31 segundos, en la siguiente figura se presenta la distribución de intensidad para esta simulación.

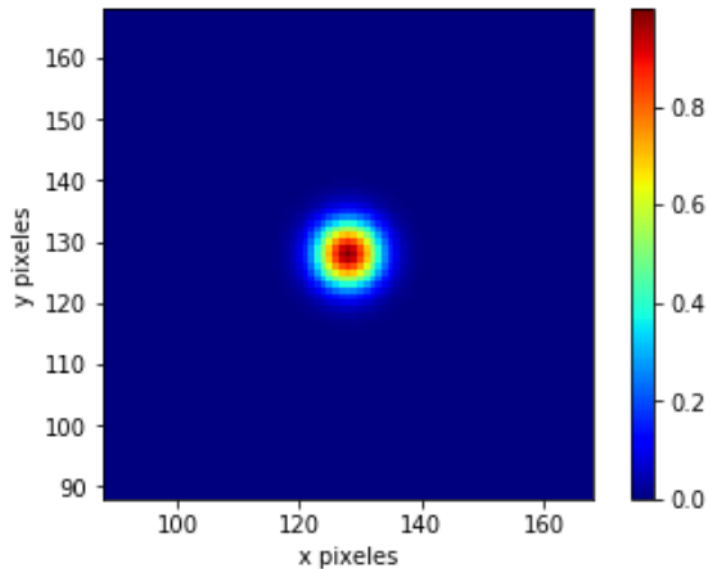


Figura 14. Distribución de intensidad para la Propagación de un haz gaussiano a baja turbulencia a distancia de propagación 500 [m] con 2 pantallas de fase.

Al igual que la Figura 13, en la figura 14 no se aprecia ningún tipo de distorsión.

Al ejecutar la simulación para 3 pantallas de fase se encuentra un valor más bajo de índice de centelleo siendo este de 0,01115 pero se encuentra con un tiempo de ejecución de la simulación de 1,73 segundos. Sin embargo, la Figura 15 no muestra a simple vista, cambio alguno en la distorsión que sufre el haz.

Como se demostró, a pesar de que las imágenes no presentan cambios notables, el índice de centelleo y el tiempo de ejecución de la simulación varían. Para el caso de una turbulencia tan baja, es posible realizar únicamente una sola ejecución para determinar el índice de centelleo ya que se obtiene un mismo valor de índice de centelleo para diferentes ejecuciones, por lo tanto, es posible realizar una función dentro del entorno de desarrollo de Jupyter Notebook para que realice un proceso iterativo aumentando en 1 la variable NumScreen, y en cada proceso evaluando el índice de centelleo y el tiempo que

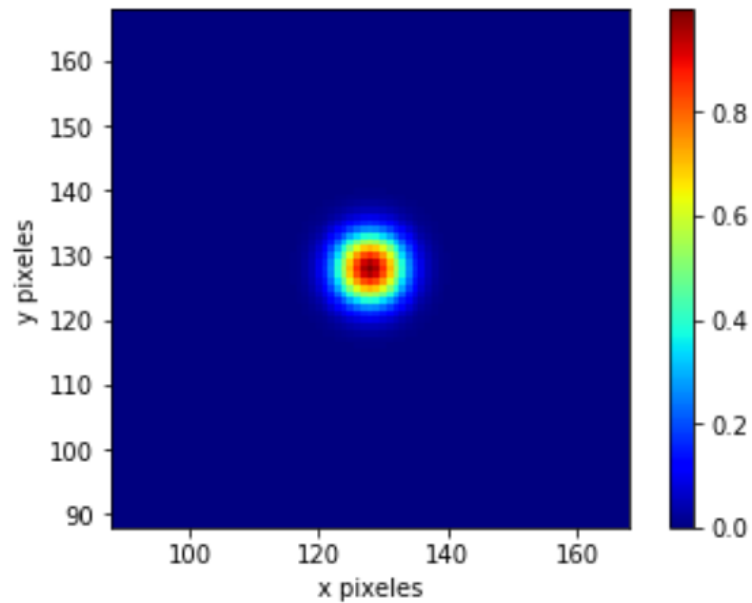


Figura 15. Distribución de intensidad para la Propagación de un haz gaussiano a baja turbulencia a distancia de propagación 500 [m] con 3 pantallas de fase.

tarda en ejecutarse la simulación, siendo la información guardada en un archivo .xlsx, con el cual se podrá automatizar el proceso de ejecución. Dicha función se presenta en el Anexo A.

Los resultados de todas las simulaciones se encuentran almacenadas en el siguiente enlace de **Google Drive**,

<https://drive.google.com/drive/folders/1SLkKdiQwG7tmoZztHNYB2eksiLjKvlf2?usp=sharing>

Los resultados obtenidos al usar la función del Anexo A se muestran en en la Tabla 4.

Núm. Pantallas	Distancia Propagación[m]	$C_n^2 [m^{-\frac{2}{3}}]$	Índice centelleo	Tiempo[s]
1	500	1E-200	0,011180	0,677
2	500	1E-200	0,011180	1,312
3	500	1E-200	0,011150	1,731
4	500	1E-200	0,011140	2,236
5	500	1E-200	0,011130	2,821
6	500	1E-200	0,011120	3,359
7	500	1E-200	0,011120	3,927
8	500	1E-200	0,011120	4,635
9	500	1E-200	0,011117	4,987
10	500	1E-200	0,011113	5,544
11	500	1E-200	0,011113	6,309
12	500	1E-200	0,011113	6,754
13	500	1E-200	0,011110	7,564
14	500	1E-200	0,011111	7,935
15	500	1E-200	0,011108	8,585
16	500	1E-200	0,011106	8,854
17	500	1E-200	0,011107	9,744
18	500	1E-200	0,011109	10,139
19	500	1E-200	0,011105	10,530
20	500	1E-200	0,011102	11,289
21	500	1E-200	0,011109	11,806
22	500	1E-200	0,011108	12,127
23	500	1E-200	0,011108	15,743
24	500	1E-200	0,011109	13,746
25	500	1E-200	0,011100	14,030

Tabla 4. Resultados del proceso iterativo para el índice de centelleo y tiempo de ejecución de la simulación a diferente numero de pantallas para un valor de $C_n^2 = 1 \times 10^{-200} [m^{-\frac{2}{3}}]$.

Las gráficas que se muestran a lo largo del documento, están sacadas del informe del capítulo 4 donde se analizan a detalle.

A continuación se muestra la representación gráfica del índice de centelleo en función del número de pantallas de fase,

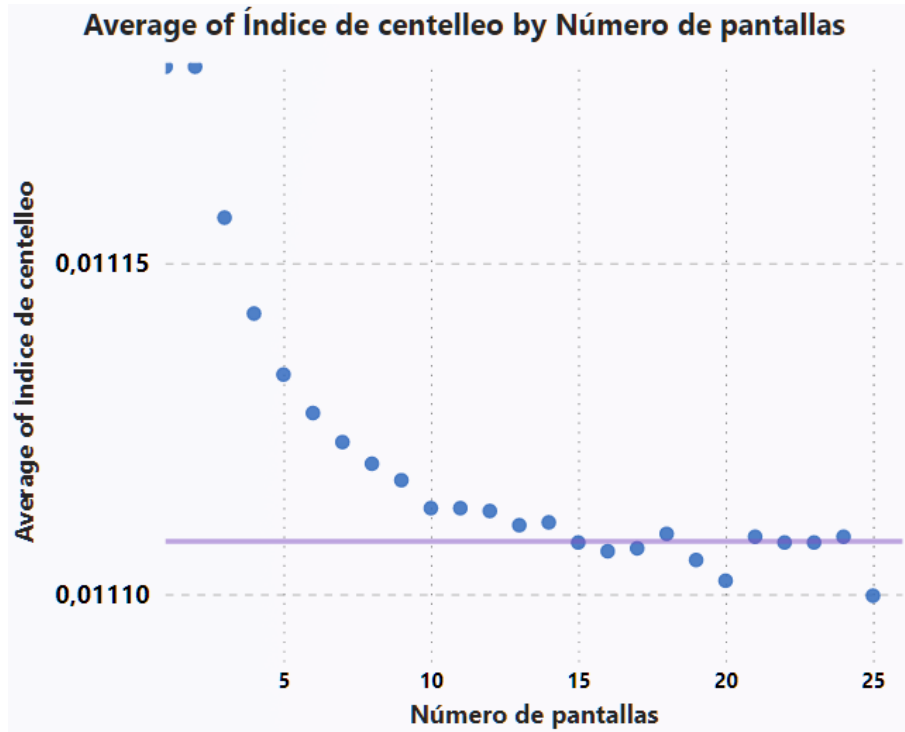


Figura 16. comportamiento del índice de centelleo contra el aumento del número de pantallas de fase.

Como se puede apreciar en la Figura 16, a medida que se aumenta el número de pantallas de fase, el índice de centelleo comienza a descender rápidamente hasta tender a estabilizarse alrededor de las 12 pantallas de fase con un valor de centelleo de 0,0111. Para el caso de valores muy bajos del parámetro C_n^2 , es de esperarse un valor bajo del índice de centelleo debido a la baja distorsión que presenta el haz gaussiano. En la Figura 16 los dos primeros valores de 1 y 2 pantallas, que presentan el mismo valor de centelleo se encuentran a mayor distancia de la mediana de 0,0111, y aproximadamente desde las 12 pantallas se observa un valor bastante cercano a este, lo cual indica una tendencia a aumentar de la precisión a medida que se incrementa, en la simulación, el número de pantallas de fase. Cabe destacar que a pesar de tratarse de un C_n^2 despreciable, el número de pantallas de

fase influye en el comportamiento de la propagación.

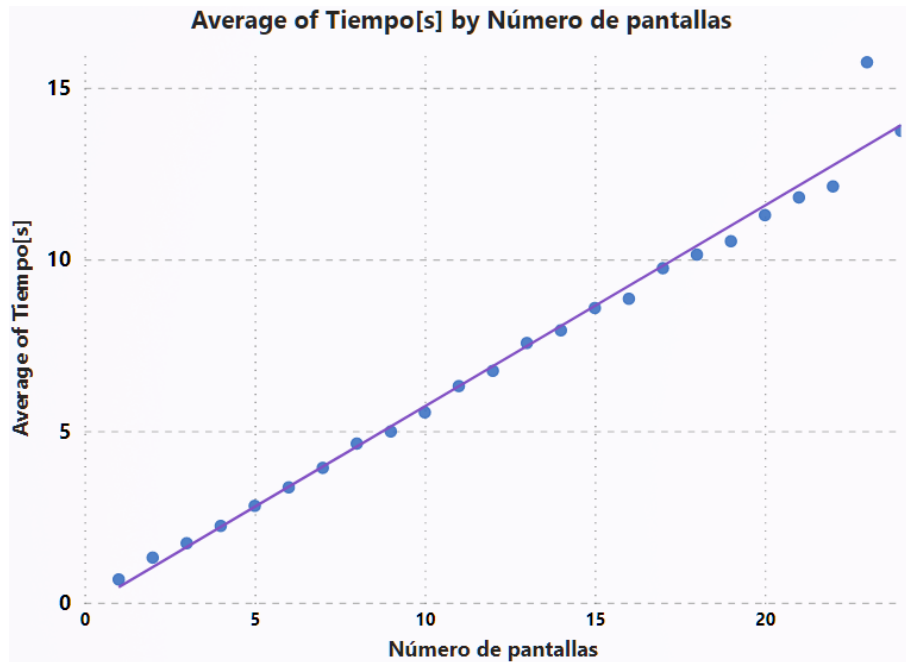


Figura 17. Tiempo de ejecución de la simulación vs el número de pantallas de fase.

En la Figura 17 se observa que el tiempo de ejecución de la simulación aumenta linealmente como es de esperarse, por medio de ajuste de mínimos cuadrados se encuentra la ecuación $y = 0,581x - 0,097$. Se observa una anomalía en la pantalla número 23, al presentar un mayor tiempo de ejecución que las pantallas 24 y 25, esto se debe al aumento de los subprocesos en segundo plano presentados por el equipo de cómputo al momento de cálculo, aumentando la carga que presenta el procesador y comprometiendo los cálculos que puede realizar simultáneamente, dando como resultado esta anomalía.

3.1.3. Simulación turbulencia atmosférica moderada a un valor de $C_n^2 = 1 \times 10^{-15} [m^{-\frac{2}{3}}]$

Para esta sección se usan los parámetros establecidos en la Tabla 3, colocando en el objeto de WavePy, una turbulencia dada por el parámetro $C_n^2 = 1 \times 10^{-15} [m^{-\frac{2}{3}}]$, al ejecutar la simulación para una única pantalla de fase se tiene la siguiente distribución de intensidad,

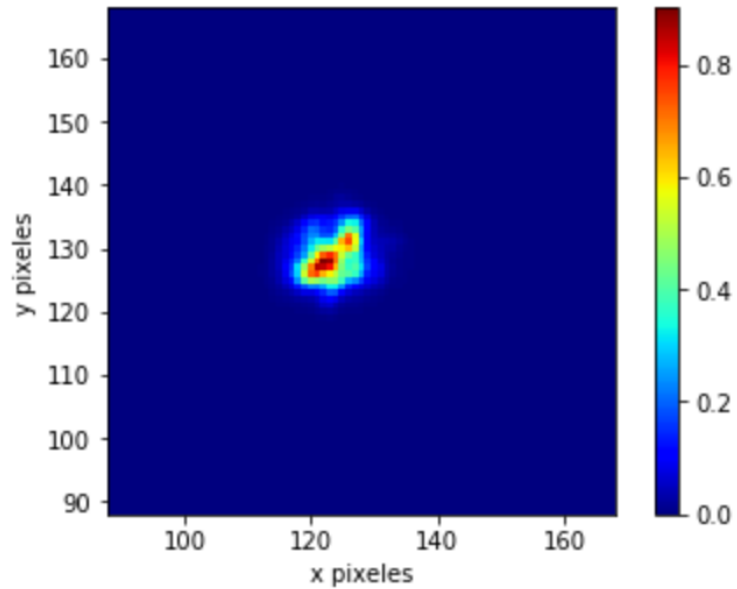


Figura 18. Distribución de intensidad para la Propagación de un haz gaussiano a turbulencia moderada a distancia de propagación 500 [m] con una pantalla de fase.

La Figura 18 muestra una distorsión apreciable en cuanto a su patrón de intensidad, lo que causa una pérdida de la forma gaussiana, y que se traduce en pérdidas de información. Para la realización mostrada en la Figura 18 se obtuvo un tiempo de ejecución de la simulación muy cercano al presentado en la Figura 13 con un valor de 0,60 segundos, por lo que el aumento de la turbulencia no supone un incremento en el tiempo de ejecución de la simulación.

Para el caso de turbulencias moderadas ($C_n^2 = 1 \times 10^{-15} [m^{-\frac{2}{3}}]$) y fuertes ($C_n^2 = 1 \times 10^{-13} [m^{-\frac{2}{3}}]$) se presentan variaciones en las distorsiones de los haces al tratarse de un proceso aleatorio, por lo tanto, es de esperarse diferentes distorsiones a pesar de mantener un mismo valor de turbulencia para cada realización. En en ésta subsección se presentan los resultados de múltiples **realizaciones** para cada una de los números de pantallas de fase establecidos. En el presente trabajo, el algoritmo se ejecutó 100 veces, promediando los tiempos de ejecución y los índices de centelleo mediante la función creada en el Anexo B.

Los resultados obtenidos para una sola pantalla de fase se muestran en la siguiente tabla.

Núm. realización	Distancia Propagación[m]	$C_n^2[m^{-\frac{2}{3}}]$	Índice centelleo	Tiempo[s]
1	500	1E-15	0,111	0,602
2	500	1E-15	0,048	0,647
3	500	1E-15	0,079	0,657
4	500	1E-15	0,206	0,707
5	500	1E-15	0,119	0,615
6	500	1E-15	0,716	0,600
7	500	1E-15	0,289	0,606
8	500	1E-15	0,088	0,604
9	500	1E-15	0,098	0,608
...
100	500	1E-15	0,911	0,813

Tabla 5. Resultados del proceso iterativo para el índice de centelleo y tiempo para una pantalla de fase con múltiples ejecuciones de la simulación para un valor de $C_n^2 = 1 \times 10^{-15} [m^{-\frac{2}{3}}]$.

Se obtuvo un resultado de centelleo promedio de 0,34 y un tiempo de ejecución promedio de 0,67 segundos. El proceso realizado anteriormente se repite para el caso de 2,3,4,5,6,7,8,9,10,15,20 y 25 pantallas , respectivamente.

Debido a la gran cantidad de datos obtenidos para esta sección se mostrarán algunas de las tablas, sin embargo, toda la información se presenta al lector mediante el siguiente enlace de **Google Drive**,

<https://drive.google.com/drive/folders/1SLkKdiQwG7tmoZztHNYB2eksiLjKvlf2?usp=sharing>

La distorsión de la intensidad del haz propagado, para el caso de 3 pantallas de fase se puede observar en la Figura 19.

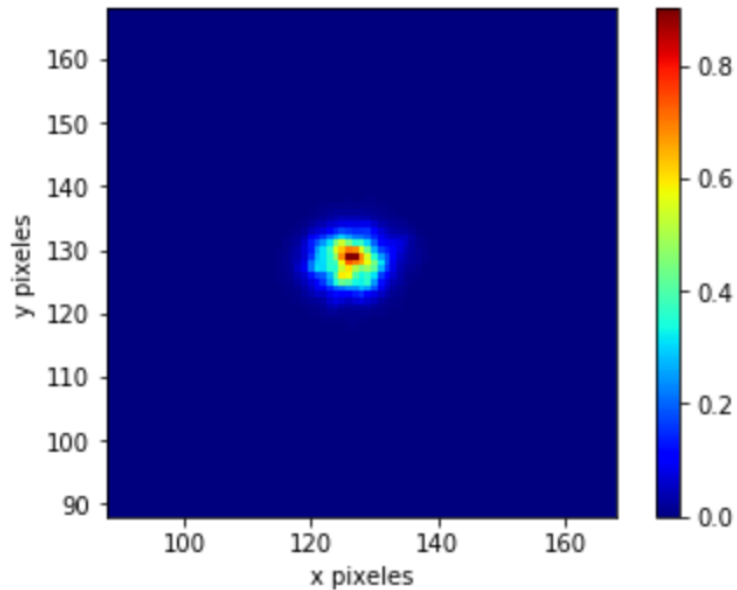


Figura 19. Distribución de intensidad para la Propagación de un haz gaussiano a turbulencia moderada a distancia de propagación 500 [m] usando 3 pantallas de fase.

A simple vista se puede apreciar una distorsión moderada en la intensidad del haz propagado comparable a la presentada en la Figura 18.

Usando la función `simulateMultiplePropDist` (ver Anexo B) se obtuvieron los siguientes resultados mostrados en la Tabla 6, para el caso de 3 pantallas de fase a un $C_n^2[m^{-\frac{2}{3}}]$, a distancia de 500[m].

Núm. realización	Distancia Propagación[m]	$C_n^2[m^{-\frac{2}{3}}]$	Índice centelleo	Tiempo[s]
1	500	1E-15	0,509	2,003
2	500	1E-15	0,511	1,797
3	500	1E-15	0,244	1,759
4	500	1E-15	0,413	1,988
5	500	1E-15	0,342	2,044
6	500	1E-15	0,289	2,180
7	500	1E-15	0,052	2,221
8	500	1E-15	0,093	1,795
9	500	1E-15	0,211	1,772
...
100	500	1E-15	0,121	1,809

Tabla 6. Resultados del proceso iterativo para el índice de centelleo y tiempo para 3 pantallas de fase con múltiples ejecuciones para un valor de $C_n^2 = 1 \times 10^{-15} [m^{-\frac{2}{3}}]$.

De los resultados obtenidos para 3 pantallas de fase se encuentra un promedio de 2,29 segundos de tiempo de ejecución de la simulación y de 0,19 de índice de centelleo en comparación a los 0,34 de una sola pantalla de fase. Se aprecia el aumento en el tiempo de ejecución de la simulación. Sin embargo, el índice de centelleo promedio de todas las simulaciones disminuye considerablemente a pesar del aumento de la cantidad de pantallas.

La gráfica de distorsión para el caso de 5 pantallas de fase con un $C_n^2 = 1 \times 10^{-15} [m^{-\frac{2}{3}}]$ a una distancia de 500[m], se presenta a continuación en la Figura 20, junto con los resultados respectivos de la Tabla 7.

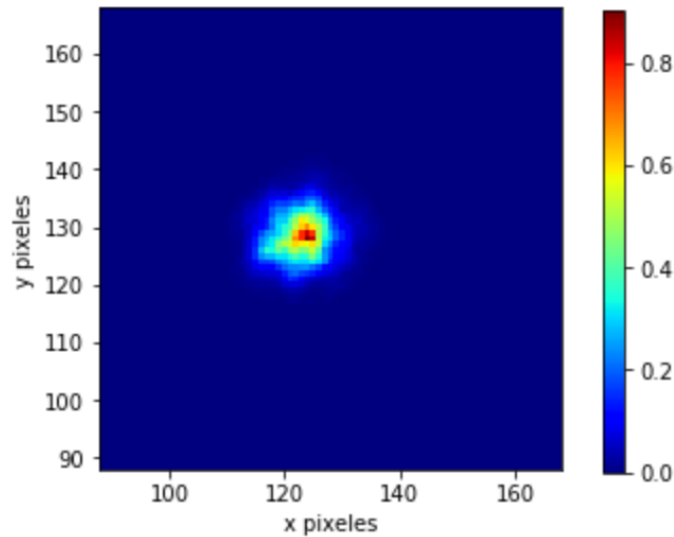


Figura 20. Distribución de intensidad para la Propagación de un haz gaussiano a turbulencia moderada a distancia de propagación 500 [m] usando 5 pantallas de fase.

Núm. realización	Distancia Propagacion[m]	$C_n^2[m^{-\frac{2}{3}}]$	Indice centelleo	Tiempo[s]
1	500	1E-15	0,072	3,548
2	500	1E-15	0,071	3,633
3	500	1E-15	0,176	3,105
4	500	1E-15	0,312	3,145
5	500	1E-15	0,078	3,300
6	500	1E-15	0,033	3,345
7	500	1E-15	0,095	2,920
8	500	1E-15	0,066	2,940
9	500	1E-15	0,210	4,292
...
100	500	1E-15	0,166	3,394

Tabla 7. Resultados del proceso iterativo para el índice de centelleo y tiempo para 5 pantallas de fase con múltiples ejecuciones para un valor de $C_n^2 = 1 \times 10^{-15} [m^{-\frac{2}{3}}]$.

Para los resultados de 5 pantallas de fase se obtuvo un tiempo promedio de ejecución de la simulación de 3,45 segundos y un centelleo promedio de 0,16, comparando con los valores obtenidos para 1 y 3 pantallas de fase se puede apreciar el aumento lineal del tiempo en que se termina de ejecutar el algoritmo, además de tener una tendencia a disminuir

el centelleo a medida que aumenta el número de pantallas de fase. Sin embargo, la diferencia de centelleo que ocurre entre 1 y 3 pantallas es de $\Delta\sigma_{1,3} = 0,34 - 0,19 = 0,15$; y la diferencia entre 3 y 5 pantallas $\Delta\sigma_{3,5} = 0,19 - 0,16 = 0,03$.

A continuación se muestran todos los resultados promedio de tiempo y centelleo en la Tabla 8 para el caso analizado en esta subsección.

Número pantallas	Distancia Propagación[m]	$C_n^2[m^{-\frac{2}{3}}]$	Índice centelleo promedio	Tiempo[s] promedio
1	500	1E-15	0,34	0,67
2	500	1E-15	0,24	1,43
3	500	1E-15	0,19	2,43
4	500	1E-15	0,17	2,60
5	500	1E-15	0,16	3,47
6	500	1E-15	0,18	3,70
7	500	1E-15	0,16	4,82
8	500	1E-15	0,18	5,17
9	500	1E-15	0,14	5,87
10	500	1E-15	0,16	6,58
11	500	1E-15	0,16	8,70
12	500	1E-15	0,17	7,08
15	500	1E-15	0,18	8,55
20	500	1E-15	0,16	11,43
25	500	1E-15	0,17	14,17

Tabla 8. Resultados promedio de centelleo y tiempo para diferente numero de pantallas de fase con múltiples ejecuciones para un valor de $C_n^2 = 1 \times 10^{-15} [m^{-\frac{2}{3}}]$.

En la Figura 21 puede apreciar como a partir de la 4ta pantalla de fase la diferencia entre centelleos se vuelve mínima y comienza a tender al valor de la mediana, la cual es 0,17, mostrada por la línea continua de color morado, este comportamiento es muy similar al mostrado en la Figura 16.

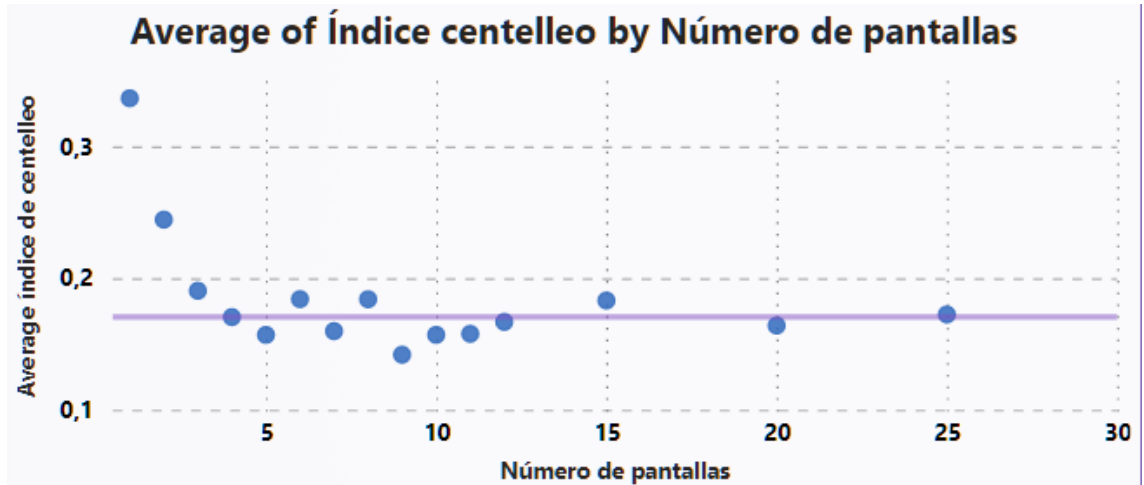


Figura 21. Comportamiento del centelleo promedio según el número de pantallas de fase a turbulencia moderada con $C_n^2 = 1 \times 10^{-15} [m^{-\frac{2}{3}}]$.

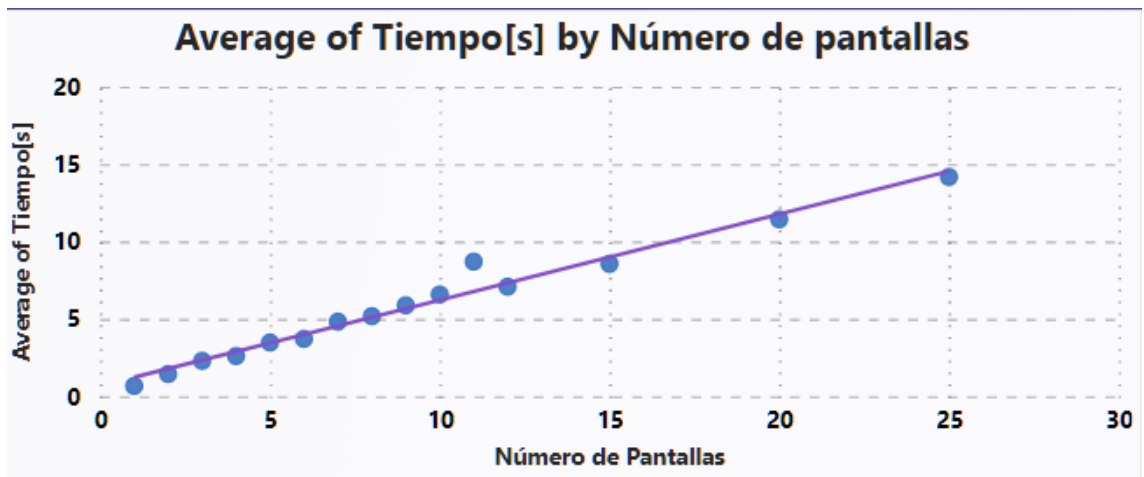


Figura 22. Comportamiento del tiempo promedio según la cantidad de pantallas de fase utilizando turbulencia moderada $C_n^2 = 1 \times 10^{-15} [m^{-\frac{2}{3}}]$.

En la Figura 22 se ve claramente el comportamiento lineal ascendente del tiempo de ejecución a medida que se aumentan las pantallas de fase con ecuación $y = 0,5535x + 0,6862$, se aprecia que la pendiente es muy similar a la mostrada en la Figura 17, por lo que no es posible relacionar el nivel de turbulencia dado por el C_n^2 con el tiempo de ejecución.

3.1.4. Simulación turbulencia atmosférica fuerte a un valor de $C_n^2 = 1 \times 10^{-13} [m^{-\frac{2}{3}}]$ Para esta sección se usan los parámetros consignados en la Tabla 3, estableciendo en el objeto de WP una turbulencia dada por el parámetro $C_n^2 = 1 \times 10^{-13} [m^{-\frac{2}{3}}]$ tratándose de turbulencia muy fuerte, por lo tanto, es de esperarse resultados más distorsionados y aleatorios, producto de la "fuerza" dada por las pantallas, al ejecutar la simulación para una sola pantalla de fase se tiene la siguiente distribución de intensidad.

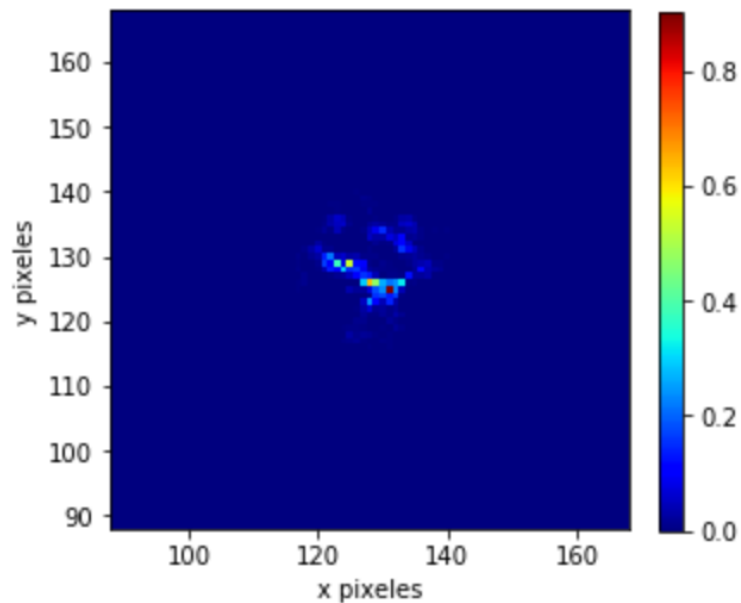


Figura 23. Distribución de intensidad para la Propagación de un haz gaussiano a turbulencia fuerte a distancia de propagación 500 [m] con una pantalla de fase.

La Figura 23 muestra una distorsión muy fuerte en cuanto a su patrón de intensidad, perdiéndose totalmente el perfil gaussiano con pequeños tintes de intensidad sin ningún patrón conocido, lo cual se traduce en pérdidas muy importantes en la información. Para la realización mostrada en esta figura se obtuvo un tiempo de la simulación muy cercano al presentado en los casos de las Figuras 13 y 18, con un valor de 0,63 segundos, por lo que el aumento de la turbulencia no muestra un incremento considerable en los tiempos de ejecución del algoritmo como se mostró anteriormente.

En esta sección se procederá nuevamente a usar 100 simulaciones para posteriormente promediar los resultados y obtener un estimado del índice de centelleo. Sin embargo, al tratarse de distorsiones tan fuertes se torna más compleja y menos precisa la evaluación del centelleo. Por lo tanto, realizando 100 ejecuciones para el caso de una pantalla de fase con turbulencia fuerte se encuentran los resultados mostrados en la tabla 9.

Núm. realización	Distancia Propagación[m]	$C_n^2 [m^{-\frac{2}{3}}]$	Índice centelleo	Tiempo[s]
1	500	1E-13	1,484	0,636
2	500	1E-13	1,135	0,605
3	500	1E-13	2,115	0,611
4	500	1E-13	1,351	0,646
5	500	1E-13	1,506	0,663
6	500	1E-13	1,941	0,634
7	500	1E-13	1,413	0,615
8	500	1E-13	2,040	0,605
9	500	1E-13	2,488	0,605
...
100	500	1E-13	2,356	0,612

Tabla 9. Resultados del proceso iterativo para el índice de centelleo y tiempo para una pantalla de fase con múltiples ejecuciones para un valor de $C_n^2 = 1 \times 10^{-13} [m^{-\frac{2}{3}}]$.

Se puede observar el aumento del índice de centelleo dando un promedio de 1,98 y un tiempo de ejecución promedio de 0,63 segundos (menor respecto a los 0,67 de la subsección anterior). El proceso realizado anteriormente se ejecutó nuevamente para el caso de 2,3,4,5,6,7,8,9,10,15,20 y 25 pantallas, respectivamente.

Debido a la gran cantidad de datos obtenidos para esta sección se mostrarán los resultados para 1, 3 y 5 pantallas en las siguientes tablas, sin embargo, toda la información se encuentra en el enlace de la subsección anterior.

La gráfica de distorsión de la intensidad del haz propagado para el caso de tres pantallas de fase esta dada en la Figura 24.

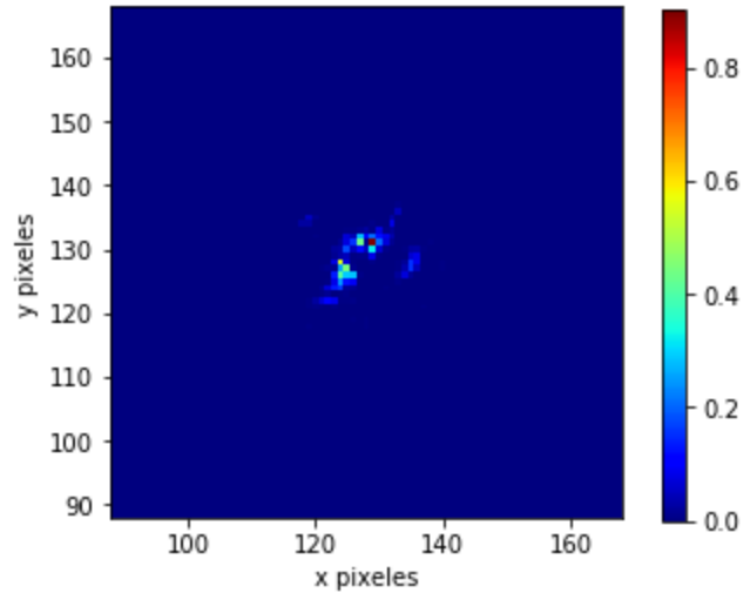


Figura 24. Distribución de intensidad para la Propagación de un haz gaussiano a turbulencia fuerte a distancia de propagación 500 [m] usando tres pantallas de fase.

Al igual que en la imagen de la Figura 23 se pierde en casi su totalidad la calidad del haz, presentando leves tintes de intensidad.

Utilizando la función `simulateMultiplePropDist` (ver Anexo B) se procede a generar un archivo `.xlsx` donde se guardan los resultados mostrados en la Tabla 10, para el caso de tres pantallas de fase a un $C_n^2 = 1 \times 10^{-13} [m^{-3/2}]$, a distancia de 500[m].

Núm. realización	Distancia Propagación[m]	$C_n^2[m^{-\frac{2}{3}}]$	Índice centelleo	Tiempo[s]
1	500	1E-13	1,818	2,032
2	500	1E-13	7,161	2,122
3	500	1E-13	5,007	1,877
4	500	1E-13	1,991	1,732
5	500	1E-13	4,167	1,868
6	500	1E-13	2,401	1,840
7	500	1E-13	2,499	1,748
8	500	1E-13	8,708	1,717
9	500	1E-13	3,205	1,724
...
100	500	1E-13	2,52	1,704

Tabla 10. Resultados del proceso iterativo para el índice de centelleo y tiempo para tres pantallas de fase con múltiples ejecuciones para un valor de $C_n^2 = 1 \times 10^{-13} [m^{-\frac{2}{3}}]$.

De los resultados obtenidos para tres pantallas de fase se encuentra un promedio de tiempo de ejecución de 1,79 segundos y un valor de centelleo global de 3,79. Se aprecia el aumento considerable del centelleo al aumentar el número de pantallas de fase, siendo la diferencia entre éstas $\Delta\sigma_{1,3} = 3,79 - 1,98 = 1,81$ lo cual indica una influencia muy fuerte en el número de pantallas de fase para valores altos de C_n^2 .

La gráfica de distorsión para el caso de cinco pantallas de fase y valores fuertes de turbulencia, $C_n^2 = 1 \times 10^{-13} [m^{-\frac{2}{3}}]$, a distancia de 500[m], se presenta a continuación en la Figura 25, junto con los resultados en la Tabla 11.

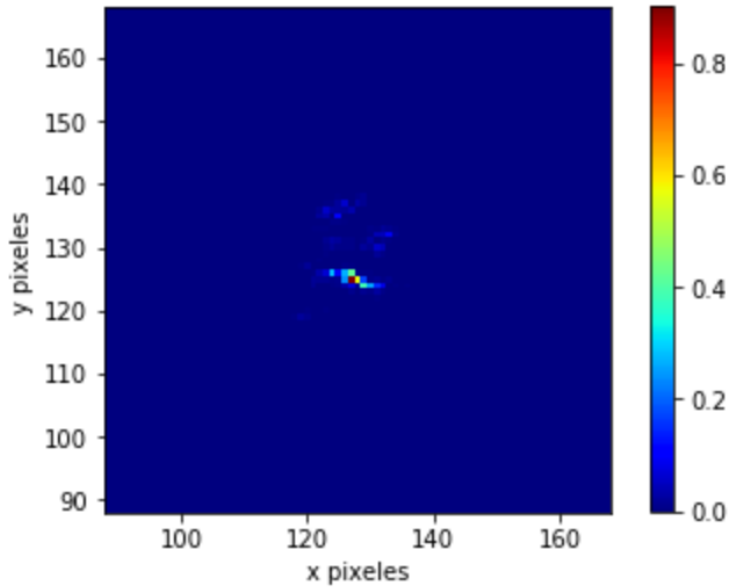


Figura 25. Distribución de intensidad para la Propagación de un haz gaussiano a turbulencia fuerte a distancia de propagación 500 [m] usando cinco pantallas de fase.

Num realizacion	Distancia Propagacion[m]	$C_n^2 [m^{-\frac{2}{3}}]$	Indice centelleo	Tiempo[s]
1	500	1E-13	10,588	2,820
2	500	1E-13	5,454	2,958
3	500	1E-13	2,666	3,752
4	500	1E-13	3,405	3,739
5	500	1E-13	4,187	3,333
6	500	1E-13	4,884	3,276
7	500	1E-13	0,607	3,745
8	500	1E-13	2,953	3,001
9	500	1E-13	3,382	2,807
...
100	500	1E-13	4,348	2,750

Tabla 11. Resultados del proceso iterativo para el índice de centelleo y tiempo para cinco pantallas de fase con múltiples ejecuciones para un valor de $C_n^2 = 1 \times 10^{-13} [m^{-\frac{2}{3}}]$.

Para los resultados de cinco pantallas de fase se obtuvo un tiempo promedio de ejecución de la simulación de 2,90 segundos (menor presentado al de la sección anterior), y un centelleo promedio de 3,83. Comparando con los valores obtenidos para una y tres pantallas

de fase se obtiene una diferencia apreciable a comparación con una pantalla, pero mínima a comparación con tres pantallas de fase $\Delta\sigma_{3,5} = 3,83 - 3,79 = 0,04$. A partir de dos pantallas de fase, el promedio de centelleo tiende a un mismo valor dado por la mediana de 4,07.

A continuación se muestran todos los resultados promedio de tiempo y centelleo en la Tabla 12 para el caso analizado en esta subsección.

Número pantallas	Distancia Propagación[m]	$C_n^2[m^{-\frac{2}{3}}]$	Índice centelleo promedio	Tiempo[s] promedio
1	500	1E-13	1,98	0,63
2	500	1E-13	3,87	1,35
3	500	1E-13	3,79	1,79
4	500	1E-13	3,81	2,43
5	500	1E-13	3,83	2,90
6	500	1E-13	4,59	3,47
7	500	1E-13	4,23	3,96
8	500	1E-13	4,19	4,52
9	500	1E-13	4,29	4,99
10	500	1E-13	4,13	5,73
11	500	1E-13	4,04	8,71
12	500	1E-13	4,00	6,87
15	500	1E-13	4,12	8,42
20	500	1E-13	4,27	11,14

Tabla 12. Resultados promedio de centelleo y tiempo para diferente numero de pantallas de fase con múltiples ejecuciones para un valor de $C_n^2 = 1 \times 10^{-13} [m^{-\frac{2}{3}}]$.

En la Figura 26 puede apreciar como a partir de la segunda pantalla de fase la diferencia entre centelleos se atenúa, y comienza a tender al valor de la mediana la cual es 4,07, mostrada por la línea continua de color morado, sin embargo, la diferencia mínima ocurre a partir de las 7 pantallas de fase.

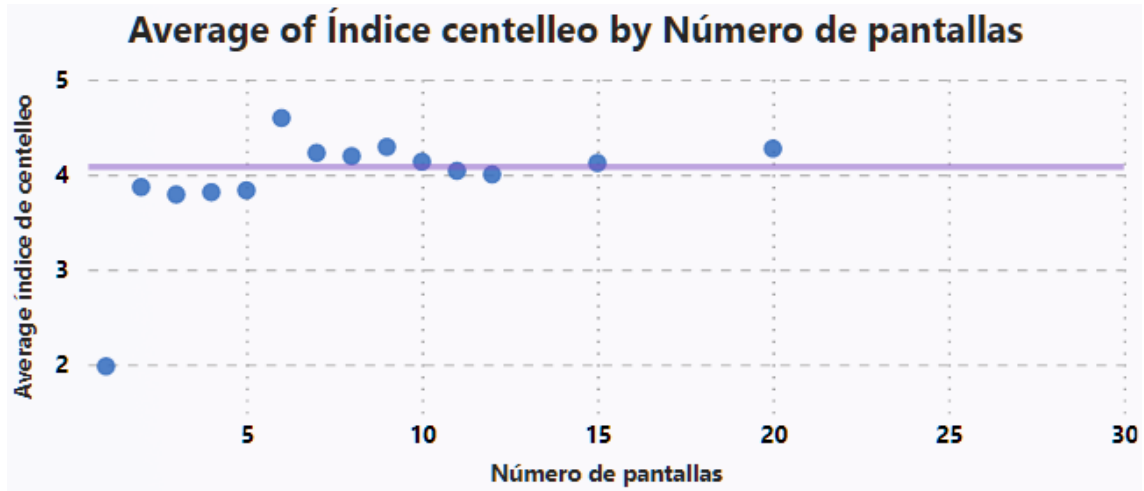


Figura 26. Comportamiento del centelleo promedio según el número de pantallas de fase a turbulencia fuerte con $C_n^2 = 1 \times 10^{-13} [m^{-\frac{2}{3}}]$.

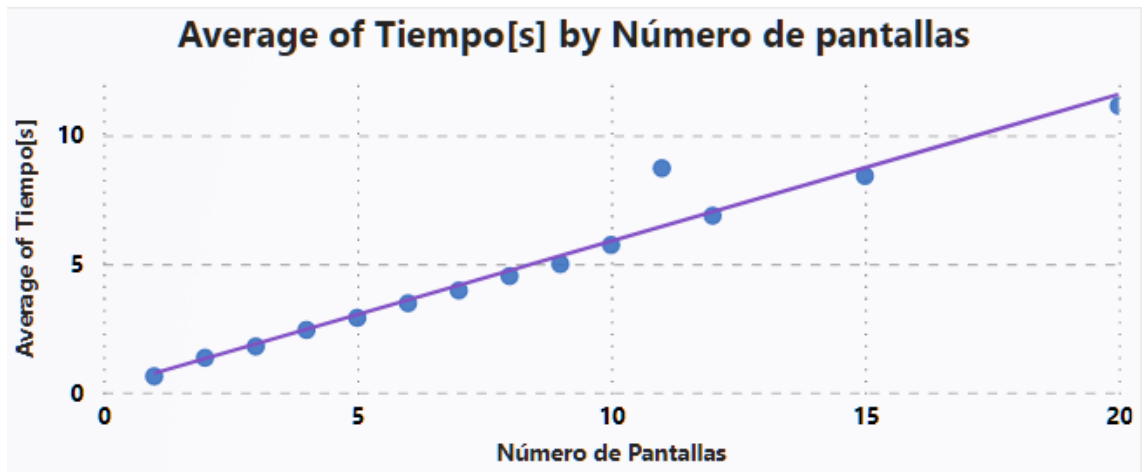


Figura 27. Comportamiento del tiempo promedio según la cantidad de pantallas de fase utilizado turbulencia fuerte $C_n^2 = 1 \times 10^{-13} [m^{-\frac{2}{3}}]$.

En la figura 27 se ve claramente el comportamiento lineal ascendente del tiempo de ejecución a medida que se aumenta el número de pantallas de fase, con ecuación $y = 0,5707x + 0,173$, se aprecia que la pendiente es muy similar a la mostrada en las Figuras 17 y 22, por lo que nuevamente, no es posible relacionar el nivel de turbulencia dado por el C_n^2 con el tiempo de ejecución del algoritmo.

El comportamiento de la Figura 26 es similar al mostrado en las Figuras 16 y 21, sin embargo, en lugar de disminuir el valor de centelleo, éste aumenta, y luego tiende a la asíntota presentada por la mediana, siendo la diferencia más notoria para las simulaciones con una y dos pantallas de fase.

De los resultados obtenidos para las subsecciones 3.1.2, 3.1.3 y 3.1.4 es clara la tendencia de que a medida que se aumenta el nivel de turbulencia, como es de esperarse, el centelleo aumenta, además se encontró que el número de pantallas de fase no implica directamente un aumento o disminución lineal del centelleo, sino que se presenta una tendencia a permanecer en el mismo valor luego de superar cierto número de pantallas de fase. Sin embargo, los tiempos de ejecución si crecen linealmente y sin límite, por lo que a pesar de aumentar en gran medida la cantidad de pantallas no se muestran resultados distintos o con mucha variación lo cual supone un gasto computacional y tiempo en la ejecución. Al variar el nivel de turbulencia dada por el C_n^2 , los cambios más drásticos ocurren entre las primeras cinco pantallas de fase, por tanto, en esta sección se pudo observar que a pesar de ser turbulencia débil, moderada o fuerte presentan comportamiento muy similar en cuanto al número de pantallas de fase que hay que utilizar para obtener resultados óptimos.

3.2. Simulaciones de turbulencia atmosférica variando la distancia de propagación

Para esta sección se realizan las simulaciones para distintos valores de C_n^2 variando la distancia de propagación, los valores establecidos se muestran en la tabla 13.

N(numero de pixeles por lado)	256
Ancho pantallas de fase	1,28[m]
Intervalo de muestreo en el plano fuente	5×10^{-3} [m]
Intervalo de muestreo en el plano de llegada	5×10^{-3} [m]
Escala interna $L_{\{0\}}$	1×10^{-3} [m]
Escala externa $L_{\{0\}}$	1×10^3 [m]
Numero de pantallas de fase	variable
Longitud de onda	$6,32 \times 10^{-7}$ [m]
Distancia de propagación	Variable
C_n^2	variable [$m^{-\frac{2}{3}}$]
Numero de onda k	$\frac{2*\pi}{\lambda}$ [rad/m]
Fuente	Gaussiana
Cintura del haz	0,1 [m]

Tabla 13. Parámetros para la simulación de un haz gaussiano que se propaga con turbulencia atmosférica a diferentes distancias.

Para cambiar la distancia de propagación en el objeto de WP se debe cambiar el parámetro de PropDist, para 25 metros sería,

```
1 import timeit
2 Prueba1 = wavepy(simOption=2,N=256,NumScr=1,PropDist=25,Cn2=1e-15)
3 start_time = timeit.default_timer()
4 Prueba1.TurbSim()
5 elapsed = timeit.default_timer() - start_time
6
```

Ejecutando el código anterior para verificar el tiempo de ejecución del algoritmo de la simulación, el valor de *elapsed* es de 0,62 segundos, para 1 pantalla de fase y 25 metros de propagación. Si el parámetro de PropDist se cambia para una distancia lejana, por ejemplo de 5000 [m], para el valor de *elapsed* se encuentra un valor de 0,65 segundos, por lo

cual se concluye que la distancia de propagación no es un factor de peso para el aumento en los tiempos de ejecución debido a que solo corresponde a un cambio en la geometría de la propagación y no un aumento en los cálculos.

Para poder obtener los resultados para diferentes distancias de propagación para un mismo valor de turbulencia y determinado número de pantallas de fase, se construye la función presentada en el Anexo C, la cual actúa de manera similar a la función del Anexo B, creando un ciclo en el cual en cada ejecución la distancia de propagación aumenta en 25 metros, iniciando en un valor de 50 metros hasta llegar a una distancia de 5000 metros, y permite almacenar los resultados en formato .xlsx automáticamente para su posterior análisis.

3.2.1. Simulación de turbulencia atmosférica muy débil a diferentes distancias para un valor de $C_n^2 = 1 \times 10^{-200} [m^{-\frac{2}{3}}]$ Para el caso de un valor bajo de C_n^2 se ha visto el efecto casi nulo en el centelleo y en las imágenes mostradas anteriormente. En ésta subsección se analiza el efecto de las pantallas de fase en el comportamiento del haz que se propaga a diferentes distancias.

Para el caso de una pantalla de fase se obtienen los siguientes resultados

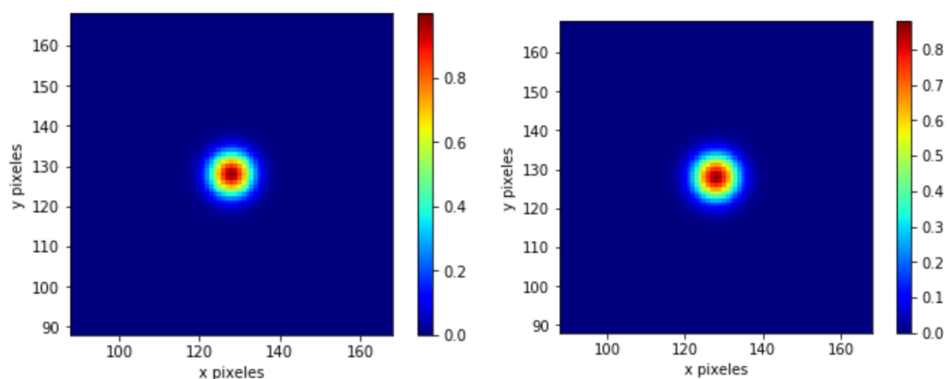


Figura 28. (Izq.) Distribución de intensidad para la Propagación de un haz gaussiano a turbulencia débil, a distancia de propagación 50 [m] usando una pantalla de fase (Der.) Distribución de intensidad para la Propagación de un haz gaussiano a turbulencia débil a distancia de propagación 5000 [m] usando una pantalla de fase.

A simple vista, para una pantalla de fase con turbulencias muy bajas y a corta distancia, la Figura 28 (Izq) se diferencia un poco de la Figura 28 (Der), se observa una muy ligera expansión, lo cual es de esperarse por la naturaleza expansiva del láser. Para 3 pantallas de fase se obtienen imágenes que se presentan a continuación.

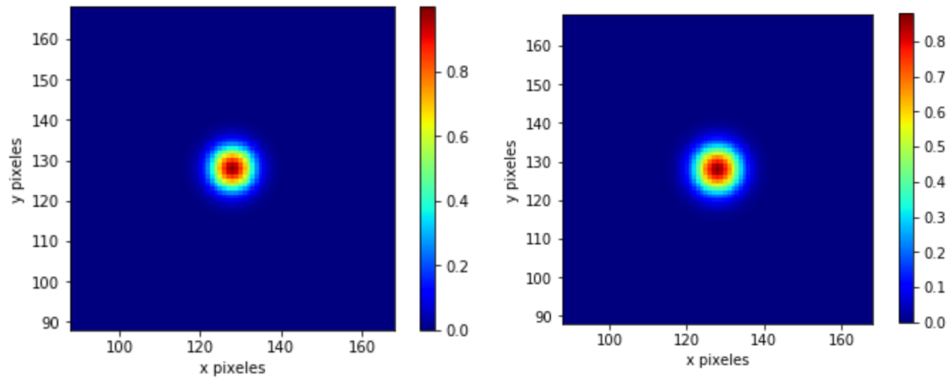


Figura 29. (Izq.) Distribución de intensidad para la Propagación de un haz gaussiano a turbulencia débil a distancia de propagación 50 [m] usando tres pantallas de fase (Der.) Distribución de intensidad para la Propagación de un haz gaussiano a turbulencia débil a distancia de propagación 5000 [m] usando tres pantallas de fase.

Al igual que ocurre en la Figura 28 la Figura 29 se aprecia una ligera expansión, aunque no representa una gran diferencia a simple vista entre las dos distribuciones.

Para cinco pantallas de fase obtuvieron los siguientes resultados.

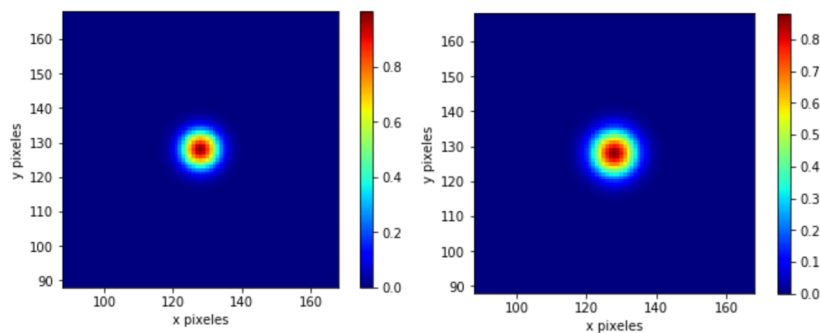


Figura 30. (Izq.) Distribución de intensidad para la Propagación de un haz gaussiano a turbulencia débil a distancia de propagación 50 [m] usando cinco pantallas de fase (Der.) Distribución de intensidad para la Propagación de un haz gaussiano a turbulencia débil a distancia de propagación 5000 [m] usando cinco pantallas de fase.

En la Figura 30 nuevamente no se aprecian grandes cambios en comparación a los mostrados previamente para un menor número de pantallas de fase.

Al igual que en la sección anterior se procede a obtener los resultados luego de la ejecución de la función. Los resultados obtenidos variando en 25 metros la distancia de propagación para cada ejecución, desde 50 hasta 5000 metros son mostrados en la Tabla 14, para 1 pantalla de fase.

Núm. Pantallas	Distancia Propagación[m]	$C_n^2 [m^{-\frac{2}{3}}]$	Índice centelleo	Tiempo[s]
1	25	1E-200	0,011210	0,629
1	50	1E-200	0,011209	0,608
1	75	1E-200	0,011209	0,616
1	100	1E-200	0,011208	0,708
1	125	1E-200	0,011208	0,828
1	150	1E-200	0,011207	0,689
1	175	1E-200	0,011206	0,615
1	200	1E-200	0,011205	0,683
...
1	2400	1E-200	0,010549	0,715
1	2425	1E-200	0,010535	0,696
1	2450	1E-200	0,010522	0,683
1	2475	1E-200	0,010509	0,749
1	2500	1E-200	0,010495	0,663
1	2525	1E-200	0,010481	0,690
1	2550	1E-200	0,010468	0,686
1	2575	1E-200	0,010454	0,813
1	2600	1E-200	0,010440	0,707
...
1	4900	1E-200	0,008800	0,957
1	4925	1E-200	0,008780	0,876
1	4950	1E-200	0,008759	0,657
1	4975	1E-200	0,008739	0,630
1	5000	1E-200	0,008718	0,701

Tabla 14. Resultados del proceso iterativo para los diferentes valores de distancia de propagación para una pantalla de fase y para un valor de turbulencia muy débil $C_n^2 = 1 \times 10^{-200} [m^{-\frac{2}{3}}]$.

Claramente se aprecia la disminución del índice de centelleo a medida que aumenta la distancia de propagación, sin embargo, el tiempo de ejecución de la simulación permanece oscilando en valores muy cercanos. Como se mencionó anteriormente el enlace de los resultados completos se encuentra en el drive dado en **Google Drive** <https://drive.google.com/drive/folders/1SLkKdiQwG7tmoZztHNYB2eksiLjKvlf2> en la carpeta de distancias de propagación.

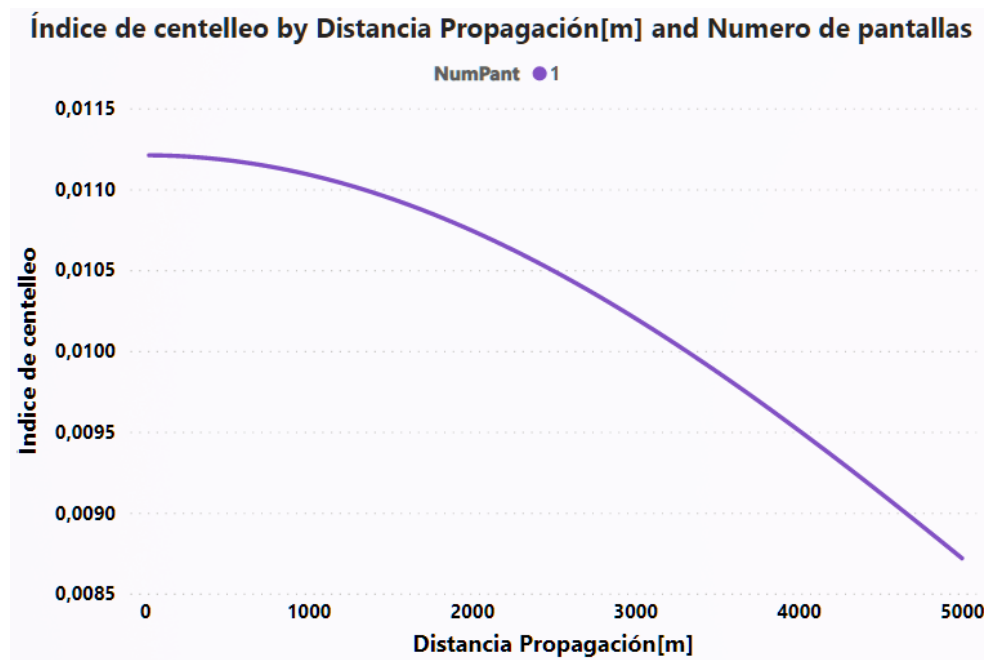


Figura 31. Comportamiento del índice de centelleo para diferentes distancias en presencia de una turbulencia muy débil, $C_n^2 = 1 \times 10^{-200} [m^{-\frac{2}{3}}]$ para una pantalla de fase.

En la Figura 31 se aprecia una clara disminución en el índice de centelleo a medida que la distancia de propagación aumenta.

Los resultados para tres pantallas de fase intermedias se muestran en la Tabla 15.

Núm. Pantallas	Distancia Propagación[m]	$C_n^2[m^{-\frac{2}{3}}]$	Índice centelleo	Tiempo[s]
3	50	1E-200	0,011209	1,695
3	75	1E-200	0,011208	1,891
3	100	1E-200	0,011208	1,682
3	125	1E-200	0,011206	1,672
3	150	1E-200	0,011205	1,657
3	175	1E-200	0,011203	1,659
3	200	1E-200	0,011201	1,665
3	225	1E-200	0,011199	1,666
...
3	2400	1E-200	0,010074	2,258
3	2425	1E-200	0,010053	1,903
3	2450	1E-200	0,010032	2,12
3	2475	1E-200	0,010008	2,138
3	2500	1E-200	0,009986	1,774
3	2525	1E-200	0,009965	1,915
3	2550	1E-200	0,00994	2,088
3	2575	1E-200	0,009918	1,684
3	2600	1E-200	0,009896	1,914
...
3	4900	1E-200	0,007426	1,683
3	4925	1E-200	0,007399	1,709
3	4950	1E-200	0,007369	1,702
3	4975	1E-200	0,007342	1,690
3	5000	1E-200	0,007315	1,743

Tabla 15. Resultados del proceso iterativo para la diferentes valores de distancia de propagación para tres pantallas de fase para un valor de turbulencia muy débil, $C_n^2 = 1 \times 10^{-200}[m^{-\frac{2}{3}}]$.

Haciendo la comparación entre los resultados de las Tablas 14 y 15 observamos que se encuentran diferencias entre los resultados para las distancias de propagación, el tiempo de ejecución de la simulación es mayor y el valor del índice de centelleo es ligeramente menor en el caso de tres pantallas de fase.

En la figura 32 se presenta una comparación de los resultados descritos anteriormente.

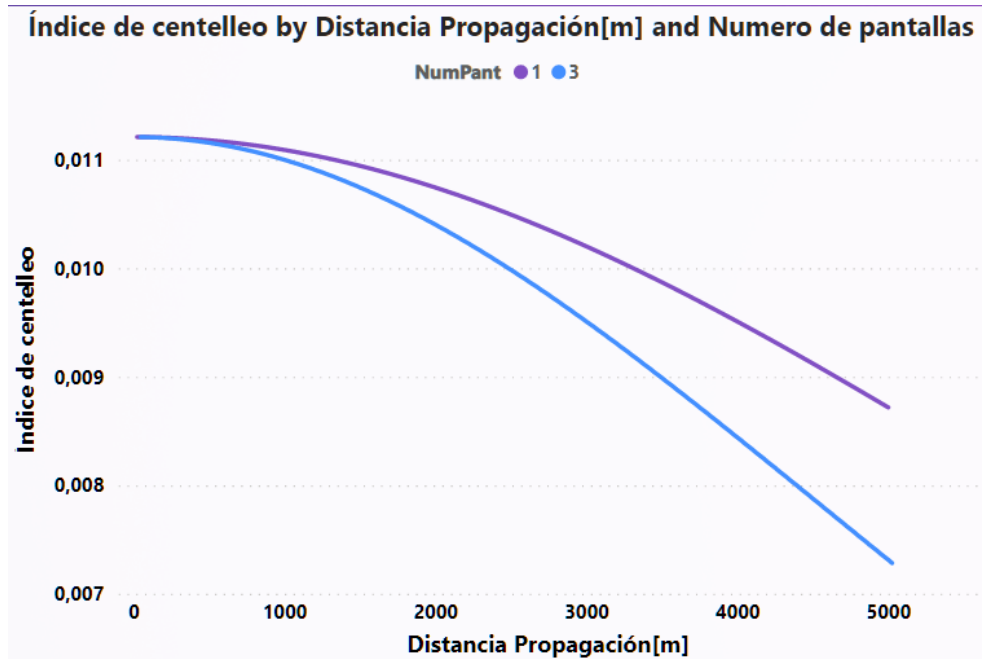


Figura 32. Comportamiento del índice de centelleo para diferentes distancias en presencia de una turbulencia muy débil, $C_n^2 = 1 \times 10^{-200} [m^{-\frac{2}{3}}]$ para tres (azul) y una (morada) pantalla de fase.

En la Figura 32 fácilmente se puede observar que a distancias cortas no se presentan grandes cambios en el índice de centelleo, pero a medida que la distancia aumenta se presenta una separación de estos valores siendo su mayor valor en la última ejecución de la función, es decir, a los 5000 [m], claramente se observa una tendencia a presentar el mismo comportamiento a distancias cortas y diferenciarse a medida que aumenta la distancia de propagación.

Los resultados para cinco pantallas de fase intermedias se muestran en la Tabla 16

Núm. Pantallas	Distancia Propagación[m]	$C_n^2[m^{-\frac{2}{3}}]$	Índice centelleo	Tiempo[s]
5	25	1E-200	0,011209	2,877
5	50	1E-200	0,011209	3,022
5	75	1E-200	0,011208	3,256
5	100	1E-200	0,011207	3,376
5	125	1E-200	0,011205	3,328
5	150	1E-200	0,011203	3,373
5	175	1E-200	0,01120	3,340
5	200	1E-200	0,011197	3,345
...
5	2400	1E-200	0,009628	2,892
5	2425	1E-200	0,009599	3,154
5	2450	1E-200	0,009569	3,017
5	2475	1E-200	0,009539	2,900
5	2500	1E-200	0,009509	3,256
5	2525	1E-200	0,009479	3,649
5	2550	1E-200	0,009449	2,873
5	2575	1E-200	0,009419	3,271
5	2600	1E-200	0,009388	3,061
...
5	4900	1E-200	0,006344	2,830
5	4925	1E-200	0,006312	2,830
5	4950	1E-200	0,006280	2,855
5	4975	1E-200	0,006248	2,926
5	5000	1E-200	0,006216	2,978

Tabla 16. Resultados del proceso iterativo para diferentes valores de distancia de propagación para cinco pantallas de fase y para un valor de turbulencia muy débil, $C_n^2 = 1 \times 10^{-200}[m^{-\frac{2}{3}}]$.

Por los valores obtenidos se repite el comportamiento de disminución del índice de centelleo.

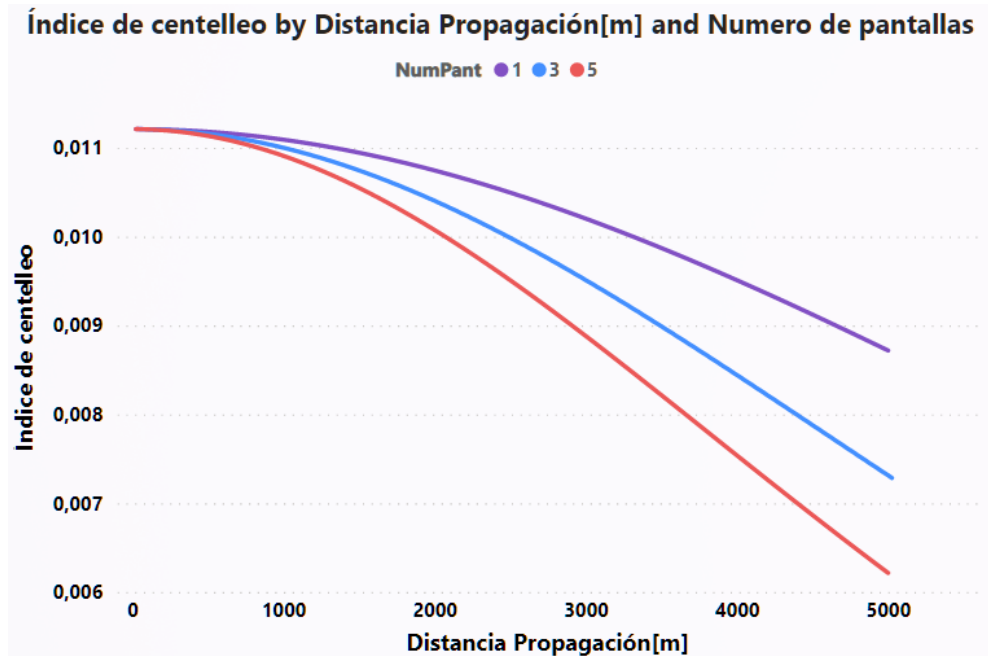


Figura 33. Comportamiento del índice de centelleo para diferentes distancias en presencia de una turbulencia muy débil, $C_n^2 = 1 \times 10^{-200} [m^{-\frac{2}{3}}]$ para cinco (rojo), tres (azul) y una (morada) pantalla de fase.

En la figura 33 se aprecia claramente el comportamiento descrito antes, para cinco pantallas de fase a cortas distancias no se observan cambios, en alrededor de 500[m] las tres gráficas comienzan a separarse y su separación máxima ocurre a los 5000 [m], cabe destacar que la distancia de separación final entre la línea azul y la roja disminuye en comparación a la azul y la morada.

Ya teniendo en cuenta los ejemplos y las tendencias a continuación se muestran los resultados obtenidos para 1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,15,20,25 y 30 pantallas de fase, su comportamiento indicado por diferentes colores.

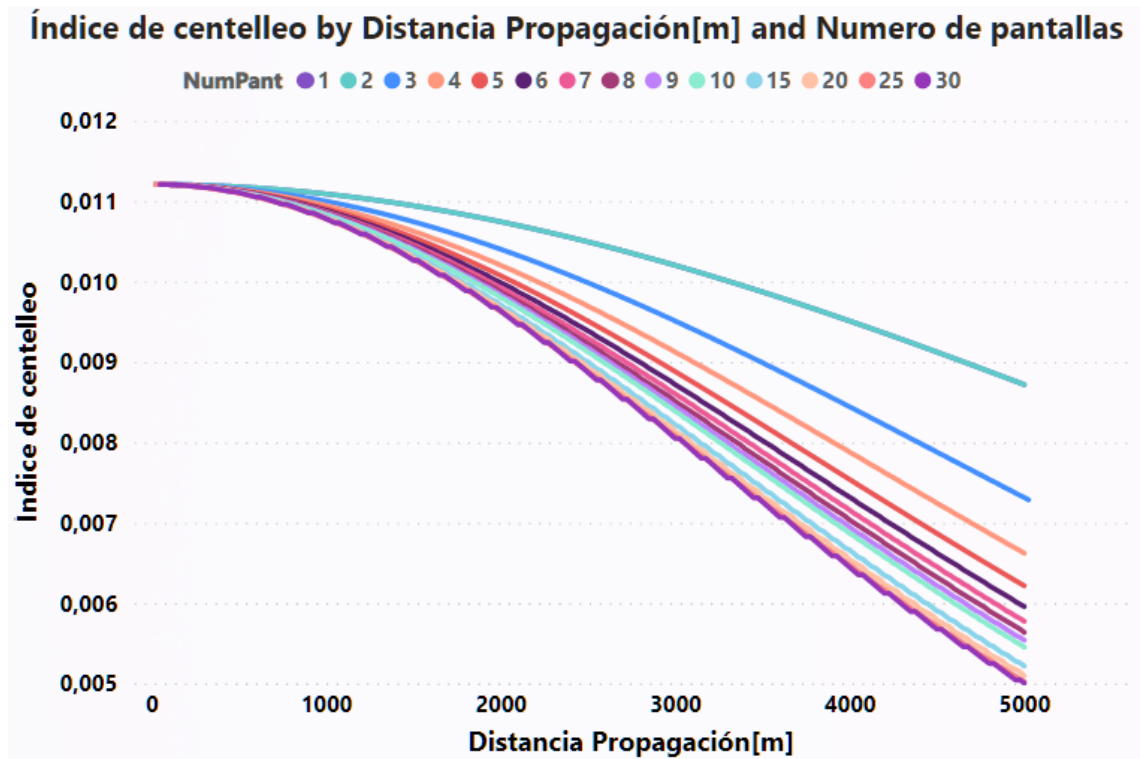


Figura 34. Comportamiento del índice de centelleo para diferentes distancias en presencia de una turbulencia muy débil, $C_n^2 = 1 \times 10^{-200} [m^{-\frac{2}{3}}]$ para múltiples pantallas de fase intermedias.

En la Figura 34 se puede observar que para 30 pantallas no fue posible realizar la simulación, en el caso de 25[m], esto debido a que la relación máxima aceptable para el software, siendo ésta en un mínimo de una pantalla por cada metro.

La Figura 34 muestra el mismo patrón de comportamiento a distancias cortas y de separación entre curvas a distancias largas, tal y como se venía exponiendo en los ejemplos de resultados anteriores. Sin embargo, es de gran importancia observar que en este comportamiento de separación a medida que se aumenta considerablemente el número de pantallas intermedias, la separación entre ellas tiende a desaparecer, se observa que en el salto de 10 pantallas a 15 pantallas es apreciable la distancia entre estas curvas, sin embargo, a pesar de saltar de 15 pantallas a 20 pantallas, la distancia entre ellas disminuye,

y de 25 a 30 pantallas es mínima, lo cual indica un criterio de convergencia en donde, la curva más baja, se convertirá en asíntota y no se presentarán cambios aún si se aumenta en gran medida la cantidad de pantallas de fase.

A pesar de tratarse de turbulencia muy baja, se observa un gran impacto en el comportamiento del índice de centelleo para diferentes pantallas de fase a medida que aumenta la distancia de propagación. Por lo tanto, para cortas distancias se puede usar cualquier número de pantallas de fase según la discriminación y tolerancia que elija el autor que desee hacer la simulación, y no se presentarán grandes cambios en los resultados a menos de 500 metros de distancia, pero sí se realiza una propagación a mayor distancia es importante tener en cuenta los cambios en los resultados que se presentarán si no usa un mayor número de pantallas de fase, dando lugar a imprecisiones.

También hay que tener en cuenta el tiempo que tarda en ejecutarse cada una de las simulaciones, el cual puede apreciarse en la siguiente gráfica.

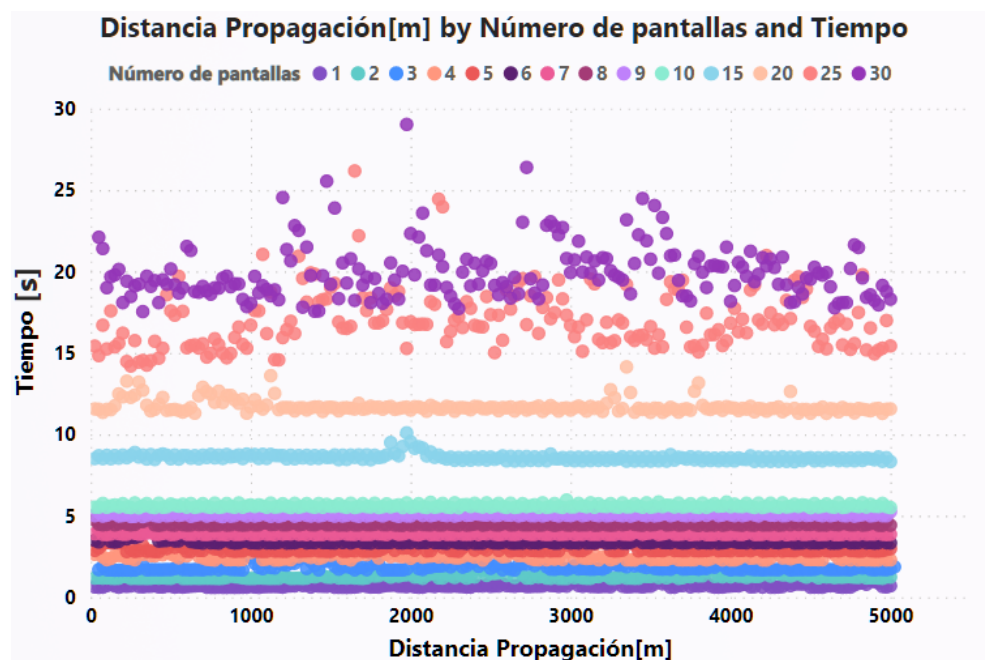


Figura 35. Comportamiento del tiempo para diferentes distancias a un $C_n^2 = 1 \times 10^{-200} [m^{-\frac{2}{3}}]$ para múltiples pantallas de fase.

A pesar de que el tiempo y el gasto computacional que toma ejecutar una simulación para un número elevado de pantallas de fase, el cual aumenta exponencialmente para imágenes de alta resolución como puede ser 1024 x 1024 píxeles, es necesario optar por un mayor número de pantallas para evitar imprecisiones considerables.

En la Figura 34 se puede establecer una tolerancia teniendo en cuenta la precisión y el tiempo de ejecución para una distancia de propagación, la tolerancia puede encontrarse al restar los centelleos respecto al centelleo del mayor número de pantallas de fase usadas (la cual es 30 en el presente estudio) para un determinado valor de distancia de propagación, siendo la diferencia entre ellas menor a 0,00001, lo cual se cumple en al menos 3 pantallas cada 500 metros, es decir para alrededor de 500 metros usar al menos 3 pantallas, para 500-999 metros se recomienda al menos usar 6 pantallas, para 1000-1499 metros usar al menos 9 pantallas y continuar de esta forma, teniendo en cuenta que en la Figura 34 la gráfica para 25 pantallas y la gráfica para 30 pantallas se encuentran en gran parte superpuestas presentando cambios mínimos a los 5000 [m]. En contraste, se puede comparar con las subsecciones 3.1 donde se usan 500(m) y se tiene un gran salto aproximadamente a partir de la tercera a quinta pantallas y luego no se tienen grandes cambios, es decir, se encuentra la asíntota rápidamente.

3.2.2. Simulación turbulencia atmosférica moderada a diferentes distancias con un valor de $C_n^2 = 1 \times 10^{-15} [m^{-\frac{2}{3}}]$ Para el caso de un valor moderado de C_n^2 se ha mostrado el efecto de distorsión que presenta el haz gaussiano con valores de centelleo promedio de 0,16 a una misma distancia. En esta subsección se analiza el efecto del número de pantallas de fase en el comportamiento del haz que se propaga a diferentes distancias.

Para el caso de una pantalla de fase se obtienen los resultados de la Figura 36

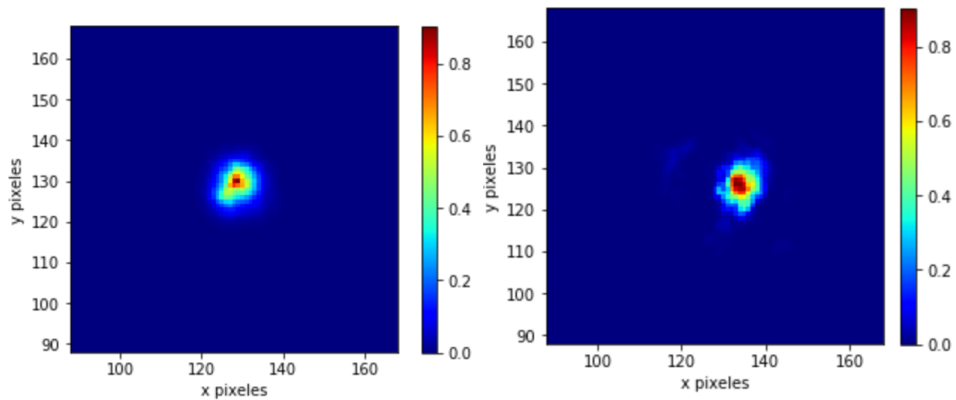


Figura 36. (Izq.) Distribución de intensidad para la Propagación de un haz gaussiano a turbulencia moderada a distancia de propagación 50 [m] usando una pantallas de fase (Der.) Distribución de intensidad para la Propagación de un haz gaussiano a turbulencia moderada a distancia de propagación 5000 [m] usando una pantalla de fase.

Se puede apreciar las distorsiones que presentan los haces que se propagan, a larga distancia se muestra un poco más de variación y movimiento del eje central y un lóbulo central más fuerte presentando tintes celestes alejados de él. A pesar de tratarse de turbulencia moderada la distorsión del haz es bastante notable.

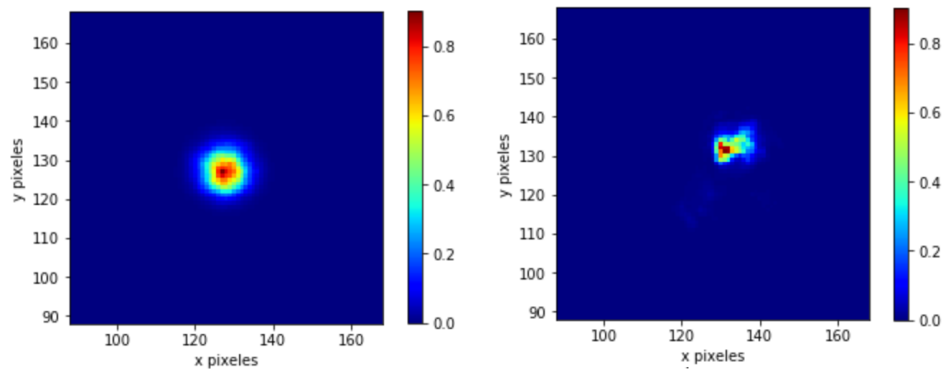


Figura 37. (Izq.) Distribución de intensidad para la Propagación de un haz gaussiano a turbulencia moderada a distancia de propagación 50 [m] usando tres pantallas de fase (Der.) Distribución de intensidad para la Propagación de un haz gaussiano a turbulencia moderada a una distancia de propagación de 5000 [m] usando tres pantallas de fase.

Para el caso de tres pantallas de fase, Figura 37(Izq), se muestra una diferencia en comparación al mostrado en la Figura 36, una pantalla de fase (Izq), donde la intensidad del

haz tiene mejor forma gaussiana. A simple vista, en la Figura 37(Der) se muestra el mismo patrón que en la Figura 36(Der) con una tendencia a abandonar el centro.

Otro ejemplo para el caso de cinco pantallas de fase se presenta en la siguiente figura,

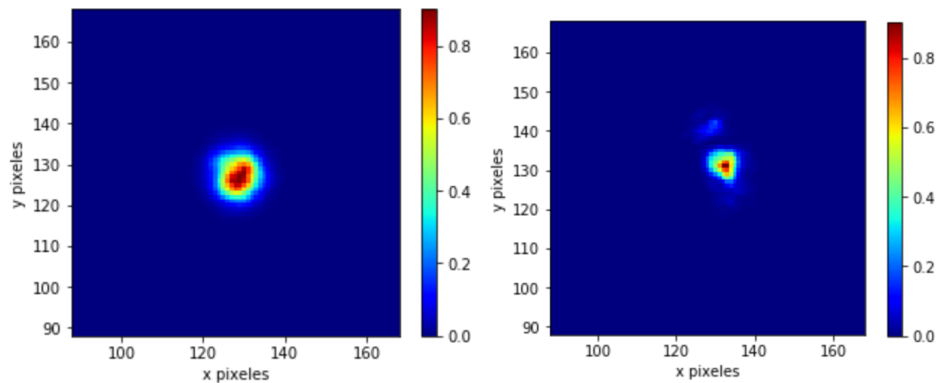


Figura 38. (Izq.) Distribución de intensidad para la Propagación de un haz gaussiano a turbulencia moderada a distancia de propagación 50 [m] usando cinco pantallas de fase (Der.) Distribución de intensidad para la Propagación de un haz gaussiano a turbulencia moderada a distancia de propagación 5000 [m] usando cinco pantallas de fase.

En la Figura 38 (Izq) nuevamente se observa el comportamiento presentado en la Figura 37 (Izq), el cual se diferencia en gran medida al presentado en la Figura 36 (Izq). La Figura 37 (Der) y 38 (Der) son más similares entre sí que la mostrada en 36 (Der).

A continuación se muestran los resultados obtenidos ejecutando la función del Anexo C, para turbulencia moderada y una pantalla de fase en la Tabla 17:

Núm. Pantallas	Distancia Propagación[m]	$C_n^2 [m^{-\frac{2}{3}}]$	Índice centelleo	Tiempo[s]
1	50	1E-15	0,011249	0,649
1	75	1E-15	0,242797	0,718
1	100	1E-15	0,026145	1,079
1	125	1E-15	0,072867	1,015
1	150	1E-15	0,200270	0,879
1	175	1E-15	0,084134	0,726
1	200	1E-15	0,084896	0,681
1	225	1E-15	0,203013	0,673
...
1	2400	1E-15	3,231714	0,674
1	2425	1E-15	1,540690	0,655
1	2450	1E-15	0,530282	0,659
1	2475	1E-15	1,282918	0,657
1	2500	1E-15	0,945962	0,652
1	2525	1E-15	0,546534	0,711
1	2550	1E-15	0,735164	0,713
1	2575	1E-15	0,111491	0,926
1	2600	1E-15	2,149990	0,747
...
1	4900	1E-15	1,153581	0,685
1	4925	1E-15	0,324869	0,640
1	4950	1E-15	1,130908	0,637
1	4975	1E-15	0,678277	0,637
1	5000	1E-15	0,863603	0,631

Tabla 17. Resultados del proceso iterativo para los diferentes valores de distancia de propagación, para una pantalla de fase y un valor de turbulencia moderada, con $C_n^2 = 1 \times 10^{-15} [m^{-\frac{2}{3}}]$.

Los resultados se presentan gráficamente en la Figura 39:

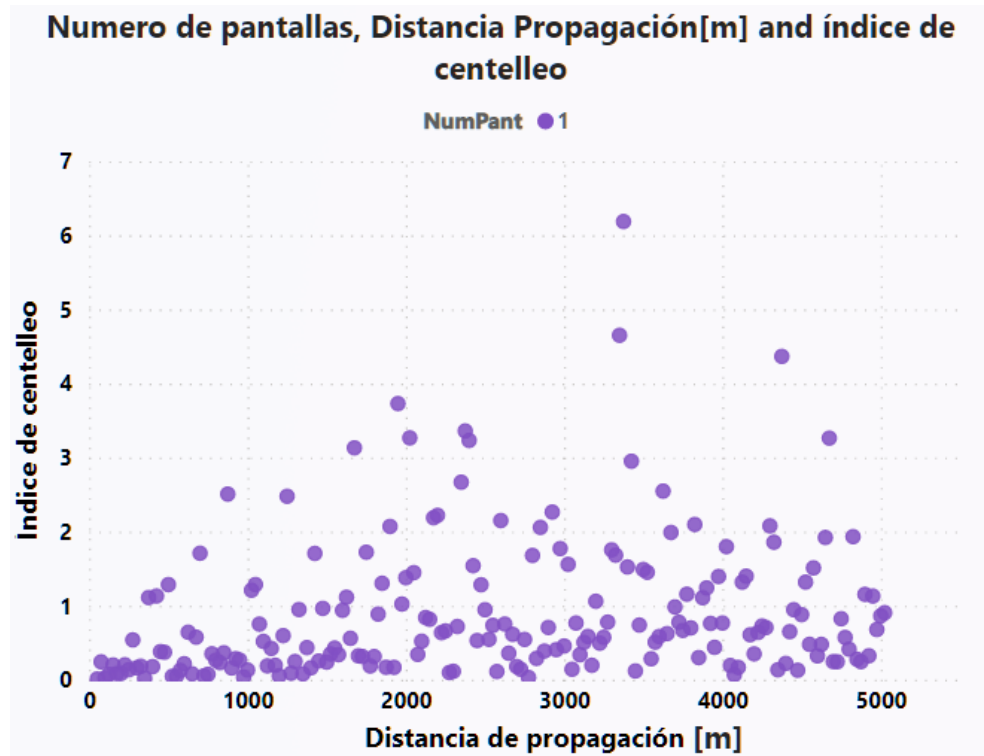


Figura 39. Comportamiento del índice de centelleo para diferentes distancias en presencia de una turbulencia moderada, $C_n^2 = 1 \times 10^{-15} [m^{-\frac{2}{3}}]$, para una pantalla de fase.

A pesar de tratarse de una turbulencia moderada los resultados son inestables tal como se muestra en la Figura 39.

Para el caso de una pantalla de fase se encuentra un centelleo promedio, para todas las propagaciones, de 0,89, lo cual es mucho mayor al que se calculó en en la subsección 3.1.3, el cual presenta un valor de 0,34, sin embargo, el tiempo promedio de ejecución de la simulación se mantiene cercano, en un valor de 0,70 segundos.

Los resultados para tres pantallas de fase se muestran en la Tabla 18

Núm. Pantallas	Distancia Propagación[m]	$C_n^2[m^{-\frac{2}{3}}]$	Índice centelleo	Tiempo
3	50	1E-15	0,057936	2,177
3	75	1E-15	0,052256	2,046
3	100	1E-15	0,025527	2,020
3	125	1E-15	0,064495	1,983
3	150	1E-15	0,006629	1,974
3	175	1E-15	0,166345	2,098
3	200	1E-15	0,054566	2,030
3	225	1E-15	0,222351	2,236
...
3	2400	1E-15	0,067237	1,838
3	2425	1E-15	0,535302	2,112
3	2450	1E-15	0,982085	1,920
3	2475	1E-15	0,187486	1,809
3	2500	1E-15	0,229912	1,845
3	2525	1E-15	0,239995	2,096
3	2550	1E-15	0,15965	1,819
3	2575	1E-15	1,746223	1,824
3	2600	1E-15	1,104039	1,862
...
3	4900	1E-15	0,310096	1,814
3	4925	1E-15	0,337336	1,881
3	4950	1E-15	1,080666	1,796
3	4975	1E-15	0,112092	1,797
3	5000	1E-15	0,410466	1,806

Tabla 18. Resultados del proceso iterativo para la diferentes valores de distancia de propagación, para tres pantallas de fase con un valor de $C_n^2 = 1 \times 10^{-15} [m^{-\frac{2}{3}}]$.

Haciendo la comparación entre los resultados de las Tablas 17 y 18 se observa que se encuentran diferencias entre los resultados para las distancias de propagación, presentándose en ésta última, valores de centelleo más bajos.

Los resultados de la tabla 18 se presentan gráficamente en la siguiente Figura

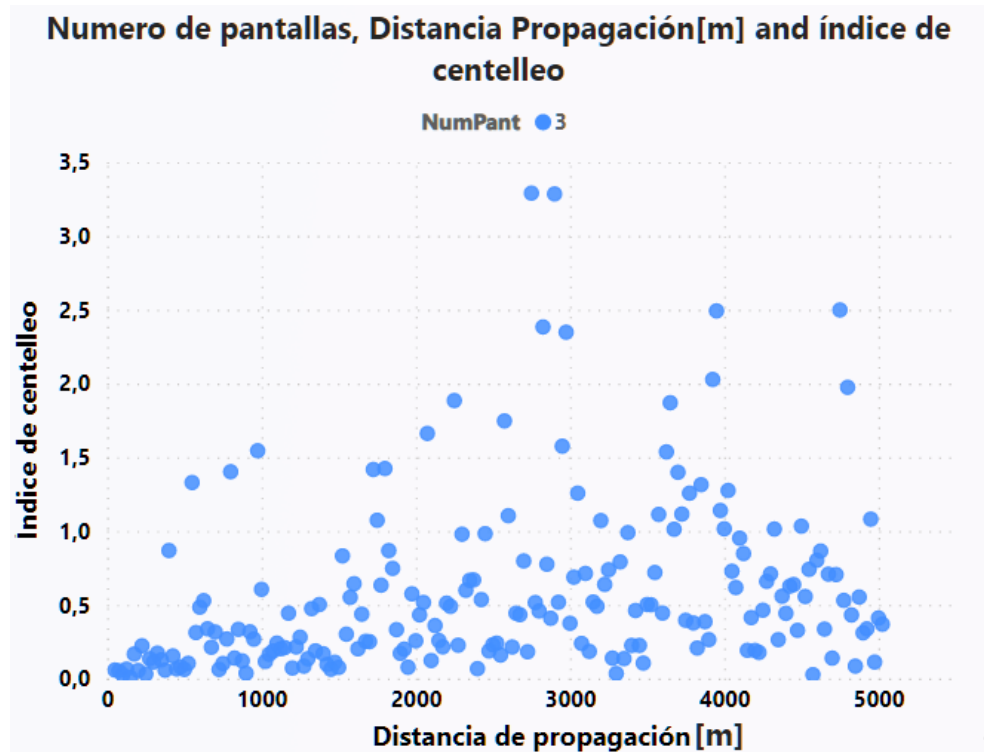


Figura 40. Comportamiento del índice de centelleo para diferentes distancias en presencia de una turbulencia moderada, $C_n^2 = 1 \times 10^{-15} [m^{-\frac{2}{3}}]$ para tres pantallas de fase.

En la Figura 40 se muestran valores más bajos, con un máximo de centelleo de 3,29 y con un promedio de 0,58 en comparación con el máximo que se encuentra en la Figura 39 de 6.19.

Para cinco pantallas de fase se obtuvo la siguiente tabla de resultados.

Núm. Pantallas	Distancia Propagación[m]	$C_n^2[m^{-\frac{2}{3}}]$	Índice centelleo	Tiempo
5	50	1E-15	0,076256	2,981
5	75	1E-15	0,009020	3,621
5	100	1E-15	0,015692	3,201
5	125	1E-15	0,095316	3,038
5	150	1E-15	0,110048	3,054
5	175	1E-15	0,032941	3,399
5	200	1E-15	0,055712	3,232
5	225	1E-15	0,091003	2,981
...
5	2400	1E-15	0,332636	3,044
5	2425	1E-15	1,226720	2,789
5	2450	1E-15	1,143417	2,799
5	2475	1E-15	0,788240	2,806
5	2500	1E-15	0,966745	2,795
5	2525	1E-15	2,172711	2,933
5	2550	1E-15	0,162006	2,862
5	2575	1E-15	1,010477	2,796
5	2600	1E-15	1,198983	2,773
...
5	4900	1E-15	0,043194	2,763
5	4925	1E-15	1,029609	3,071
5	4950	1E-15	0,61835	2,832
5	4975	1E-15	0,143279	2,772
5	5000	1E-15	0,537795	2,750

Tabla 19. Resultados del proceso iterativo para la diferentes valores de distancia de propagación para cinco pantallas de fase para un en presencia de una turbulencia moderada de valor $C_n^2 = 1 \times 10^{-15} [m^{-\frac{2}{3}}]$.

En la tabla 19 se aprecia un cambio leve en los valores obtenidos, con un promedio de 0.54 de índice de centelleo.

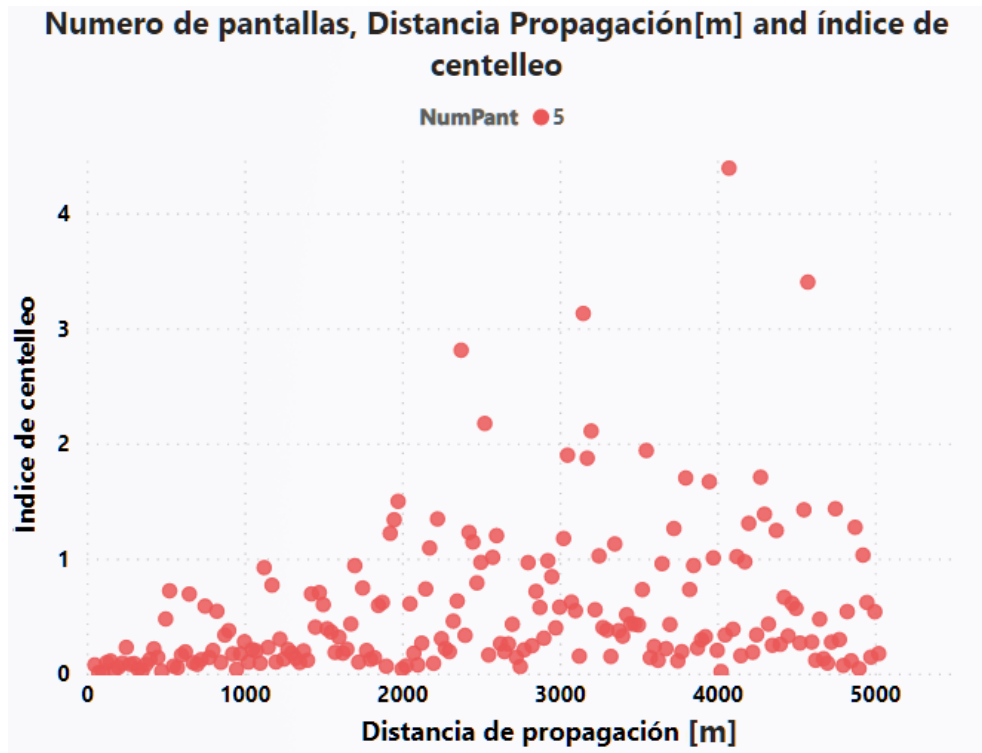


Figura 41. Comportamiento del índice de centelleo para diferentes distancias en presencia de una turbulencia moderada de $C_n^2 = 1 \times 10^{-15} [m^{-\frac{2}{3}}]$ para cinco pantallas de fase.

En la Figura 41 se aprecia claramente el comportamiento para cinco pantallas de fase, en el que a cortas distancias no se observan importantes variaciones, pero a partir de aproximadamente 2000[m] se comienzan a separarse más entre sí los valores,

Teniendo en cuenta los ejemplos presentados y las tendencias descritas, a continuación se muestran los resultados obtenidos para 1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,15 y 20 pantallas de fase y su comportamiento.

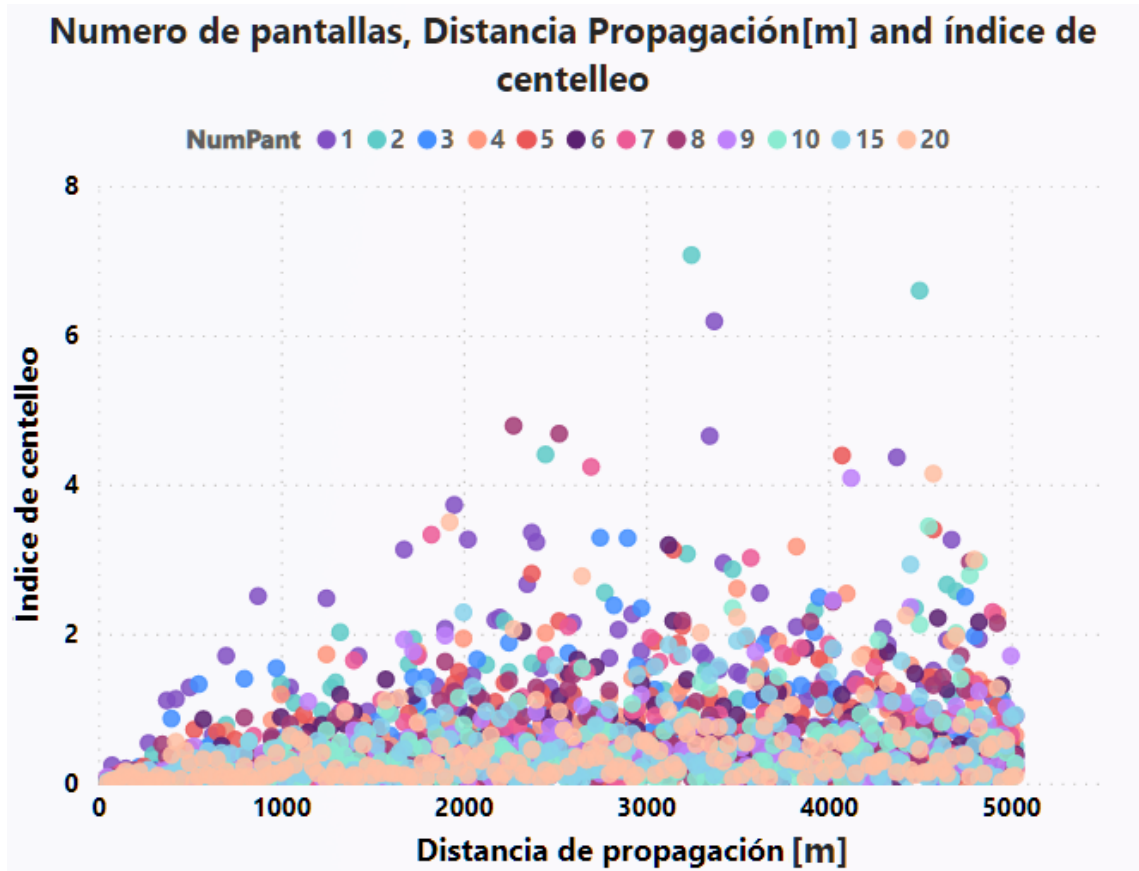


Figura 42. Comportamiento del índice de centelleo para diferentes distancias en presencia de una turbulencia moderada de $C_n^2 = 1 \times 10^{-15} [m^{-\frac{2}{3}}]$ para múltiples pantallas de fase.

En la Figura 42 se aprecia una ligera tendencia, los valores de centelleo comienzan a disminuir a medida que se aumenta la cantidad de pantallas de fase, siendo más destacado al tener las medidas de los promedios de centelleo para cada una de las pantallas de fase, siendo el menor de ellos para 20 pantallas, 0,45 de promedio de índice de centelleo, el cual es similar al presentado en la Figura 34, aunque por tratarse de turbulencia moderada se complica observar el patrón desde las figuras.

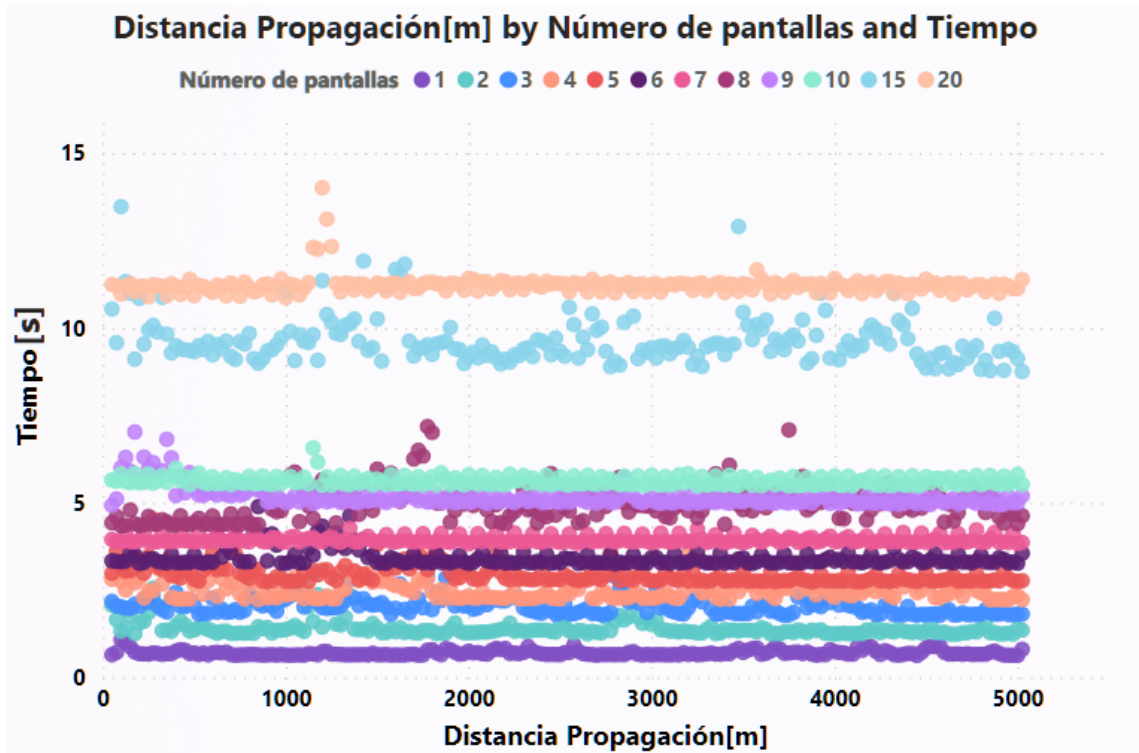


Figura 43. Comportamiento del tiempo de ejecución para diferentes distancias en presencia de una turbulencia moderada de $C_n^2 = 1 \times 10^{-15} [m^{-\frac{2}{3}}]$ para múltiples pantallas de fase.

Los tiempos de ejecución mostrados en la figura 43 al igual que en la Figura 35 presentan pequeños saltos entre ellos para un mismo valor de número de pantallas lo cual es normal sustentado por la carga que tiene el procesador al ejecutar el algoritmo.

3.2.3. Simulación turbulencia atmosférica fuerte a diferentes distancias con un valor de $C_n^2 = 1 \times 10^{-13} [m^{-\frac{2}{3}}]$ Para el caso de un valor fuerte de C_n^2 se ha observado la gran cantidad de distorsión que produce, haciendo indistinguible el patrón gaussiano una vez propagado el haz, por tal motivo, se dificulta encontrar patrones en el plano donde se mide el índice de centelleo. En ésta subsección se analiza el efecto de las pantallas de fase con turbulencia fuerte a diferentes distancias y con diferente número de pantallas de fase. Para el caso de una pantalla de fase se obtiene la distribución de intensidad de la Figura

44.

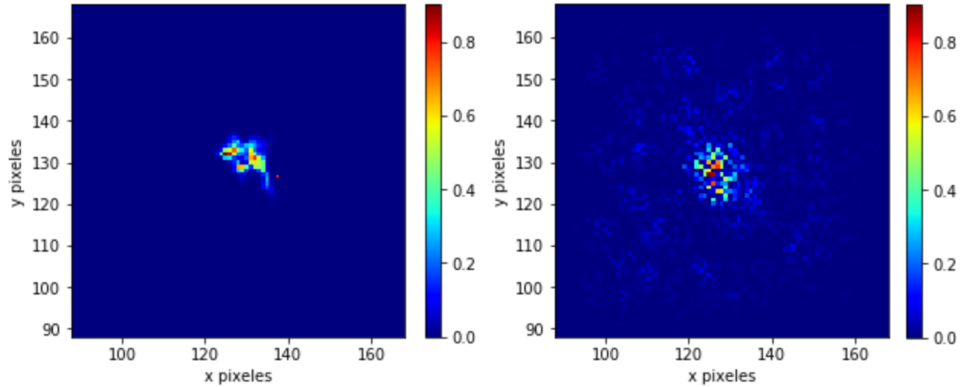


Figura 44. (Izq.) Distribución de intensidad para la propagación de un haz gaussiano a través de turbulencia fuerte, con una distancia de propagación 50 [m], usando una pantalla de fase (Der.) Distribución de intensidad para la propagación de un haz gaussiano a través de turbulencia fuerte, con una distancia de propagación 5000 [m], usando una pantalla de fase.

Se muestra en la Figura 44, la gran pérdida del patrón gaussiano del haz que se sufre, sin embargo, a 50 metros se presenta distorsión más centralizada, mientras que para 5000 metros ésta distorsión comienza a aumentar significativamente.

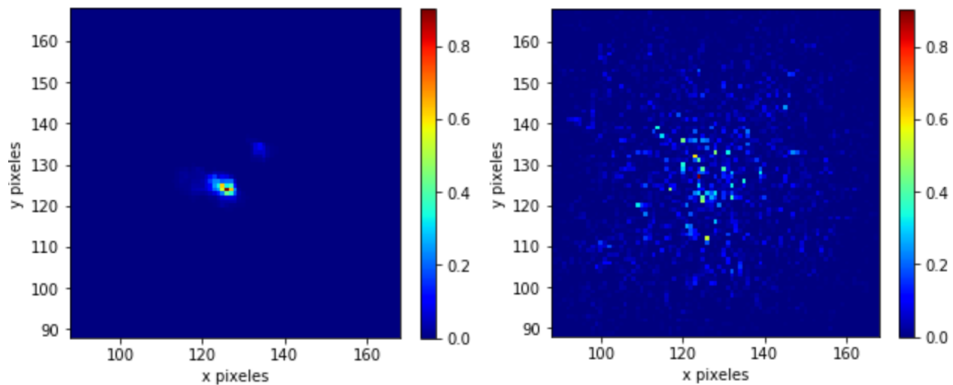


Figura 45. (Izq.) Distribución de intensidad para la propagación de un haz gaussiano a través de turbulencia fuerte, a una distancia de propagación 50 [m], usando tres pantallas de fase (Der.) Distribución de intensidad para la propagación de un haz gaussiano a través de turbulencia fuerte, con una distancia de propagación 5000 [m] usando tres pantallas de fase.

Para el caso de tres pantallas de fase, en la Figura 45(Izq.) se observa una diferencia notable en la distribución de intensidad en comparación con la Figura 44(Izq.), con una pantalla de fase, donde la intensidad del haz tiene mayor forma gaussiana, y para el caso de la Figura 45(Der.) se muestra mayor dispersión de la distorsión, en comparación con el esquema de la Figura 44(Der.)

Otro ejemplo, dado por cinco pantallas de fase, presenta las siguientes distribuciones de intensidad,

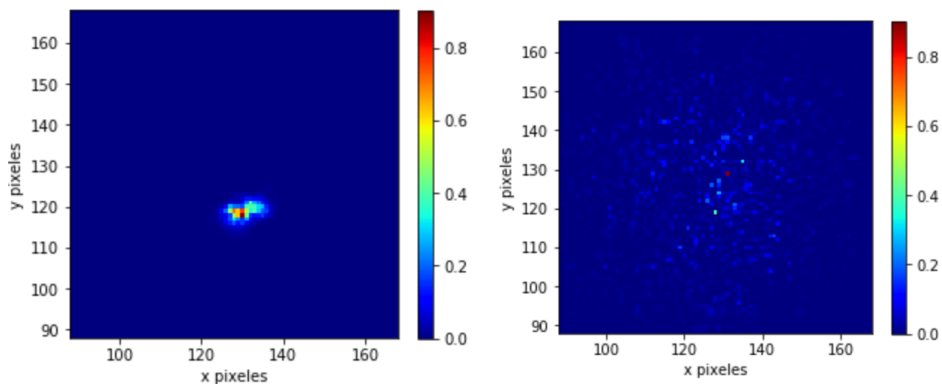


Figura 46. (Izq.) Distribución de intensidad para la propagación de un haz gaussiano a través de turbulencia fuerte, con una distancia de propagación de 50 [m] usando cinco pantallas de fase (Der.) Distribución de intensidad para la propagación de un haz gaussiano a través de turbulencia fuerte, con una distancia de propagación de 5000 [m], usando cinco pantallas de fase.

En la Figura 46 (Izq.) se observa una distorsión similar al presentado en la Figura 45 (Izq) el cual se diferencia del patrón presentado en la Figura 44 (Izq) además de la Figuras 46 (Der) y 45(Der.) se aprecia la misma tendencia de la intensidad distorsionada a diferencia de la presentada en la Figura 44 (Der). A continuación se muestran los resultados ejecutando la función del Anexo C, para turbulencia fuerte y una pantalla de fase, en la Tabla 20.

Núm. Pantallas	Distancia Propagación[m]	$C_n^2[m^{-\frac{2}{3}}]$	Índice centelleo	Tiempo[s]
1	50	1E-13	1,057609	0,598
1	75	1E-13	1,983540	0,620
1	100	1E-13	0,985132	0,611
1	125	1E-13	3,377130	0,609
1	150	1E-13	0,604388	0,611
1	175	1E-13	4,566109	0,591
1	200	1E-13	2,624299	0,612
1	225	1E-13	4,916237	0,602
...
1	2400	1E-13	2,057973	0,615
1	2425	1E-13	1,710311	0,594
1	2450	1E-13	1,063162	0,633
1	2475	1E-13	2,068053	0,645
1	2500	1E-13	1,545231	0,649
1	2525	1E-13	1,543892	0,636
1	2550	1E-13	0,809552	0,653
1	2575	1E-13	2,076588	0,602
1	2600	1E-13	1,068466	0,614
...
1	4900	1E-13	1,155835	0,614
1	4925	1E-13	0,555667	0,609
1	4950	1E-13	1,208851	0,614
1	4975	1E-13	0,821453	0,598
1	5000	1E-13	1,676822	0,600

Tabla 20. Resultados del proceso iterativo para la diferentes valores de distancia de propagación, para una pantalla de fase, y un valor de $C_n^2 = 1 \times 10^{-13} [m^{-\frac{2}{3}}]$.

De forma gráfica:

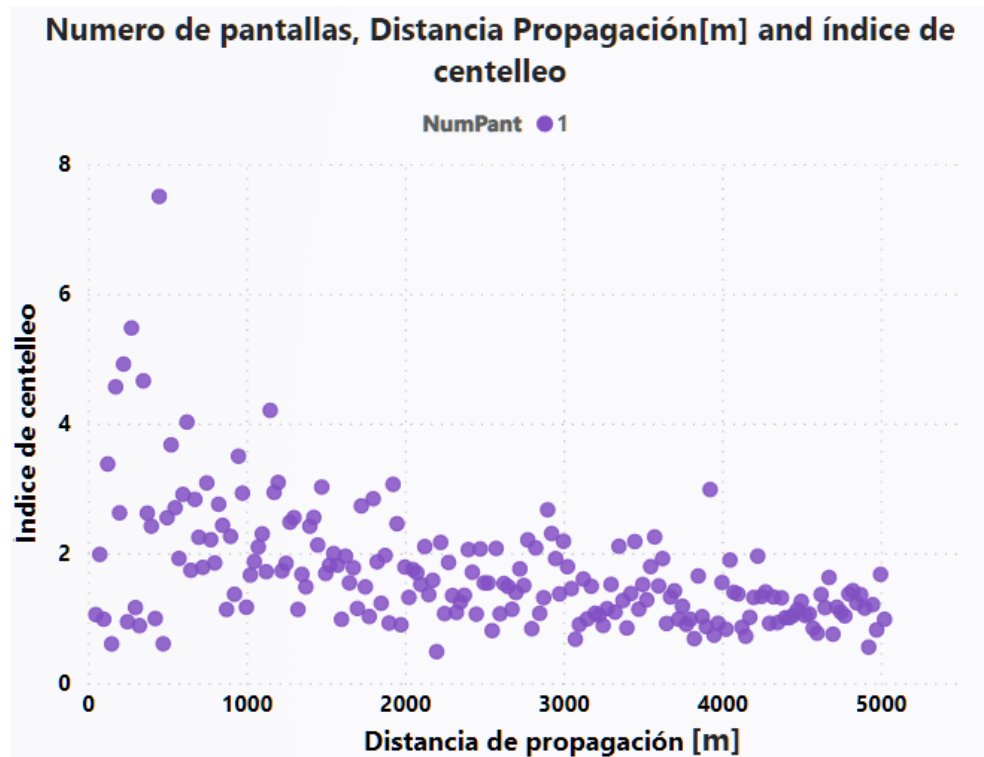


Figura 47. Comportamiento del índice de centelleo para diferentes distancias a un $C_n^2 = 1 \times 10^{-13} [m^{-\frac{2}{3}}]$ para una pantalla de fase.

En la anterior figura se observa gran inestabilidad de los resultados, esto era de esperarse debido a la fuerte turbulencia. A pesar de tratarse de una turbulencia fuerte, para una pantalla de fase se encuentra un centelleo promedio relativamente bajo de 1,71, el cual es similar al centelleo encontrado para una pantalla de fase en la subseccion 3.1.4 que fue de 1,98. Para una pantalla de fase también se observa que para menos de 1000 metros se obtienen valores del índice de centelleo más dispersos entre sí, mientras que a más de 2000 metros de propagación se observa cómo éstos valores comienzan a acercarse más entre sí.

Los resultados para tres pantallas de fase se muestran en la Tabla 21

Núm. Pantallas	Distancia Propagación[m]	$C_n^2[m^{-\frac{2}{3}}]$	Índice centelleo	Tiempo
3	50	1E-13	1,905362	1,870
3	75	1E-13	2,508792	2,018
3	100	1E-13	0,523673	1,845
3	125	1E-13	4,006798	1,713
3	150	1E-13	0,931901	1,926
3	175	1E-13	1,093322	1,912
3	200	1E-13	4,872260	1,838
3	225	1E-13	2,918453	1,696
...
3	2400	1E-13	2,404335	1,708
3	2425	1E-13	3,258959	1,688
3	2450	1E-13	2,189006	1,732
3	2475	1E-13	3,963586	1,701
3	2500	1E-13	2,065733	1,696
3	2525	1E-13	1,058409	1,693
3	2550	1E-13	2,162351	1,685
3	2575	1E-13	1,502504	1,802
3	2600	1E-13	2,758597	1,799
...
3	4900	1E-13	1,605919	1,685
3	4925	1E-13	3,04391	1,699
3	4950	1E-13	1,493317	1,688
3	4975	1E-13	1,408922	1,673
3	5000	1E-13	2,123701	1,683

Tabla 21. Resultados del proceso iterativo para la diferentes valores de distancia de propagación, para tres pantallas de fase, con un valor de $C_n^2 = 1 \times 10^{-13} [m^{-\frac{2}{3}}]$.

En este caso se puede observar que se tienen más bajos valores tanto en el índice de centelleo como en el tiempo de ejecución en la Tabla 20 en comparación a la Tabla 21.

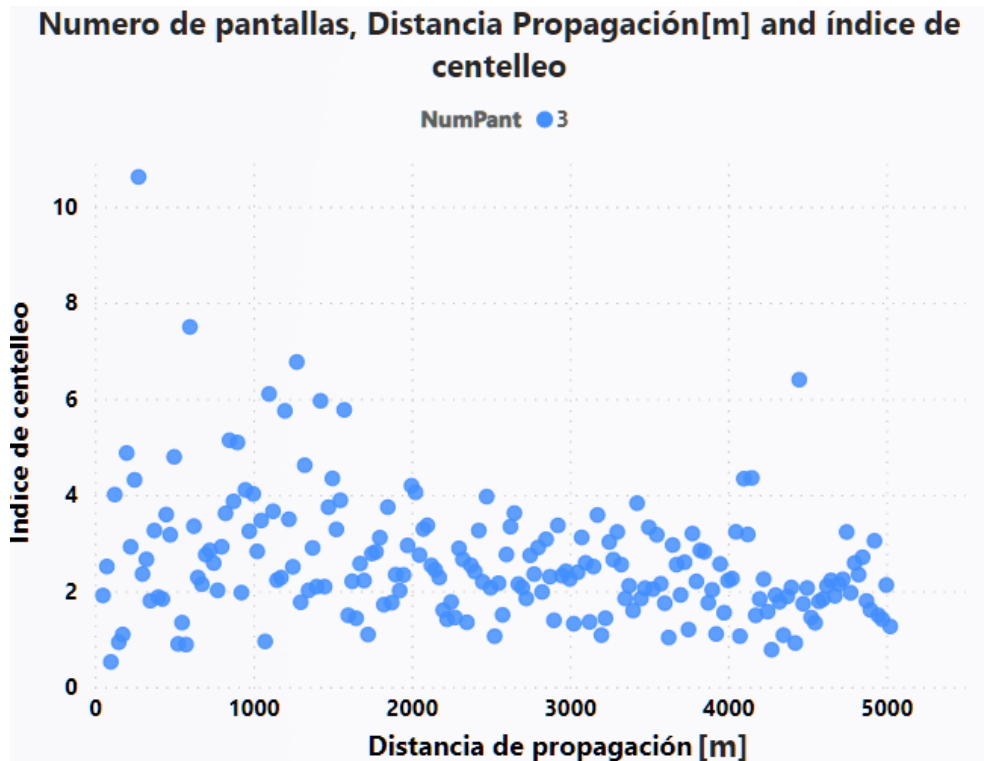


Figura 48. Comportamiento del índice de centelleo para diferentes distancias a un $C_n^2 = 1 \times 10^{-13} [m^{-\frac{2}{3}}]$ para tres pantallas de fase.

En la Figura 48 se muestra un comportamiento similar al de la Figura 47, sin embargo, en este caso mostrado en la Figura 48 los valores que se muestran son más elevados con un índice de centelleo promedio de 2,61 debido al aumento del número de pantallas de fase tal como ocurrió en la sección 3.1.

Para cinco pantallas de fase se obtuvieron los resultados que se muestran en la Tabla 22.

Núm. Pantallas	Distancia Propagación[m]	$C_n^2[m^{-\frac{2}{3}}]$	Índice centelleo	Tiempo[s]
5	50	1E-13	2,505036	2,796
5	75	1E-13	1,069336	3,038
5	100	1E-13	0,790657	2,797
5	125	1E-13	2,513767	2,780
5	150	1E-13	1,193784	2,798
5	175	1E-13	3,616049	2,791
5	200	1E-13	14,18792	2,795
5	225	1E-13	0,951128	2,990
...
5	2400	1E-13	2,009901	2,780
5	2425	1E-13	0,992434	2,785
5	2450	1E-13	2,433154	2,883
5	2475	1E-13	4,918209	2,927
5	2500	1E-13	3,224334	2,795
5	2525	1E-13	2,084107	2,783
5	2550	1E-13	2,517028	2,803
5	2575	1E-13	3,421550	2,783
5	2600	1E-13	1,949450	2,999
...
5	4900	1E-13	2,298071	2,781
5	4925	1E-13	6,553397	2,788
5	4950	1E-13	2,634325	2,790
5	4975	1E-13	1,300818	2,912
5	5000	1E-13	2,590838	2,876

Tabla 22. Resultados del proceso iterativo para la diferentes valores de distancia de propagación para cinco pantallas de fase para un valor de $C_n^2 = 1 \times 10^{-13} [m^{-\frac{2}{3}}]$.

Se aprecia un ligero aumento en los valores obtenidos, con un promedio de 3,20 de índice de centelleo.

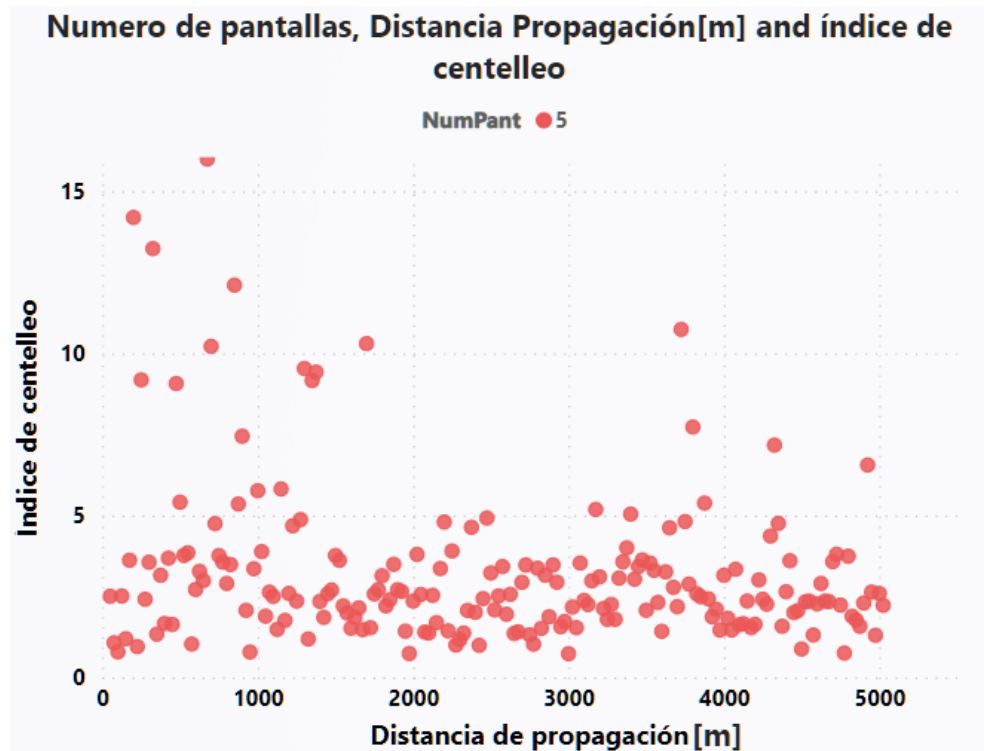


Figura 49. Comportamiento del índice de centelleo para diferentes distancias de propagación con $C_n^2 = 1 \times 10^{-13} [m^{-\frac{2}{3}}]$, para cinco pantallas de fase.

En la figura 49 se aprecian saltos muy fuertes para distancias menores a los 2000 metros de propagación, y a partir de los 2000 metros la tendencia de presentar estos saltos disminuye considerablemente.

Siendo presentadas las tendencias de las figuras anteriores para 1,3 y 5 pantallas, se muestran todos los valores diferenciados por color para 1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,15,20 pantallas de fase.

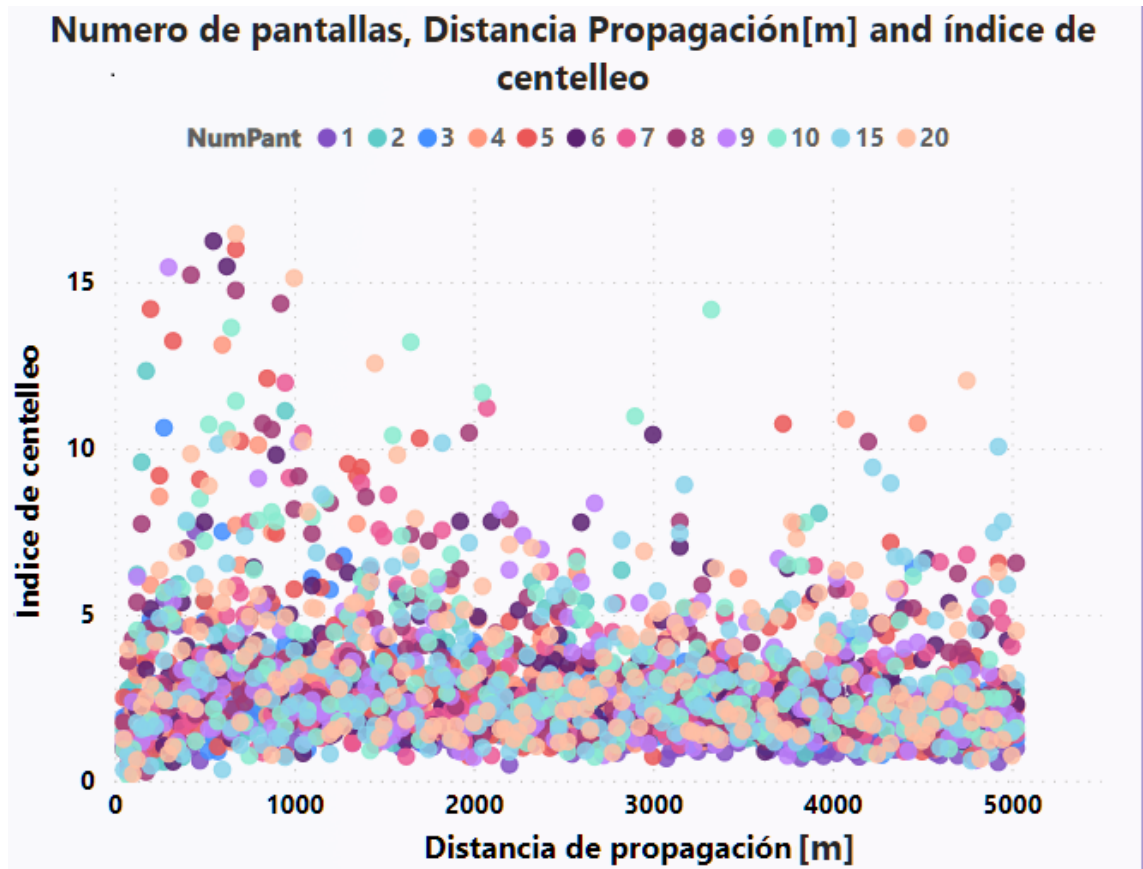


Figura 50. Comportamiento del índice de centelleo para diferentes distancias de propagación con $C_n^2 = 1 \times 10^{-13} [m^{-\frac{2}{3}}]$, para múltiple número de pantallas de fase.

En la Figura 50 se observa una gran inestabilidad en los resultados en comparación con los resultados presentados en la gráfica de la Figura 42, debido, a las mayores fluctuaciones producto del alto nivel de turbulencia que se usó para esta subsección.

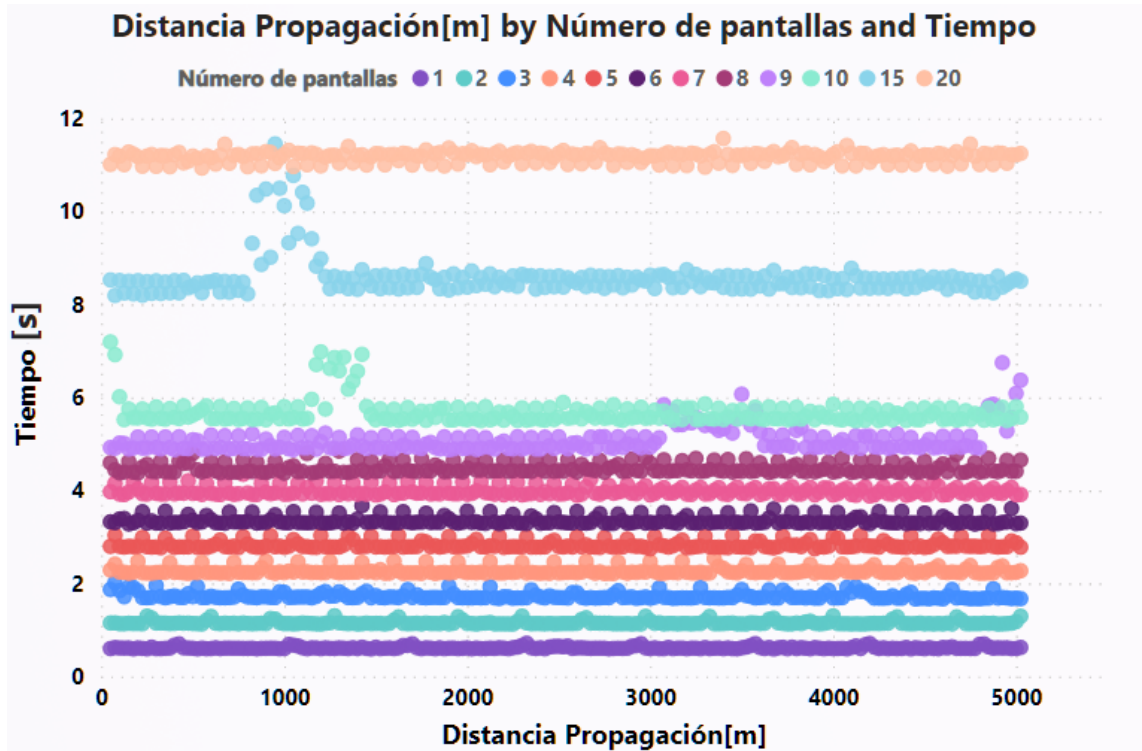


Figura 51. Comportamiento del tiempo de ejecución para diferentes distancias de propagación, con $C_n^2 = 1 \times 10^{-13} [m^{-\frac{2}{3}}]$, para múltiples pantallas de fase.

Los tiempos de ejecución mostrados en la Figura 51 son muy similares a los demás presentados en este trabajo, no se encontró ningún indicio del aumento del tiempo ni para valores más altos de turbulencia ni de distancia, por lo tanto, estos parámetros son despreciables con respecto al tiempo de ejecución de las simulaciones usando WP.

Debido a la alta cantidad de resultados obtenidos durante el desarrollo de este trabajo de grado, se crearon dos informes dinámicos, que permiten una amplia exploración de los resultados, dándole al lector una herramienta visual y amigable para analizar las tendencias de los datos mostrados en las tablas.

4.1. Informe para diferentes valores de turbulencia a una misma distancia

Para acceder al reporte dinámico hacer click en el siguiente enlace:

<https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiMWZjZWYyYjctYWRhYi00N2E2LTNmMjYtNWZhZjkyMGJmNWE4IiwidCI6IjZDU1NzRjLWY5YmEtNDQyNi05NjU4LWU0NzdhZDc0MzlkYiIsImMiOiR9>

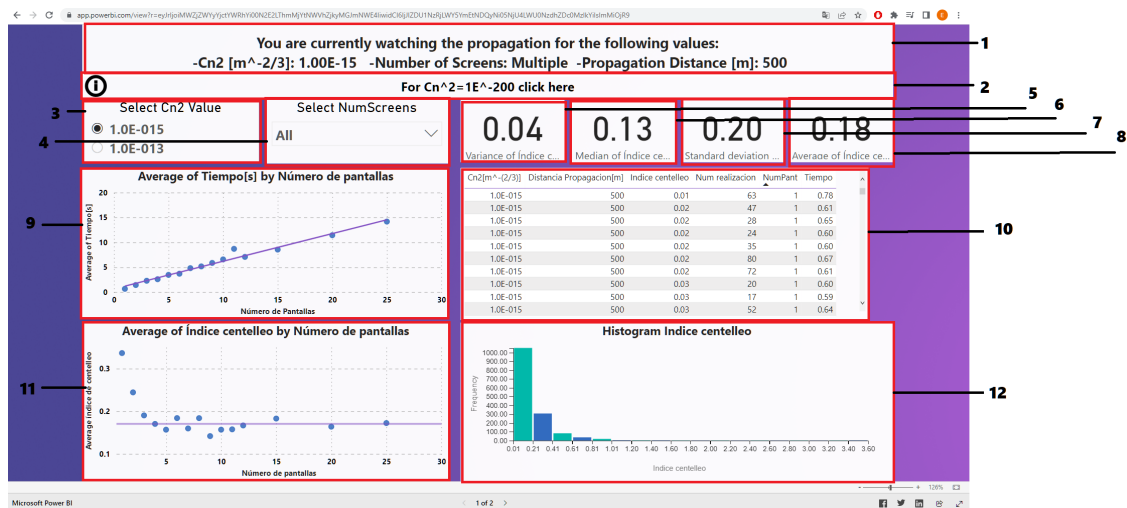


Figura 52. Elementos del primer reporte para diferentes valores de turbulencia a una misma distancia.

Al entrar al enlace se encontrará con el informe, el cual tiene los siguientes elementos mostrados en la Figura 52:

1. Título responsivo que indica los elementos que se filtran dentro del reporte.

2. Botón de cambio de página donde se muestra los resultados para un $C_n^2 = 1 \times 10^{-200} m^{-\frac{2}{3}}$.
3. Seleccionador del valor de C_n^2 , el cual filtrará todas las gráficas y tablas para los valores correspondientes.
4. Seleccionador de número de pantallas de fase, el cual filtrará las gráficas y tablas para la cantidad de pantallas seleccionadas, pueden ser seleccionadas múltiples pantallas.
5. Valor de la varianza del índice de centelleo para los datos filtrados según los seleccionadores.
6. Valor de la mediana del índice de centelleo para los datos filtrados según los seleccionadores.
7. Valor de la desviación estándar del índice de centelleo para los datos filtrados según los seleccionadores.
8. Valor del promedio del índice de centelleo para los datos filtrados según los seleccionadores.
9. Gráfica del tiempo de ejecución vs el número de pantallas filtrada según los seleccionadores.
10. Tabla que muestra todos los resultados siendo filtrada según los seleccionadores.
11. Gráfica del índice de centelleo vs el número de pantallas filtrada según los seleccionadores.
12. Histograma de los valores de centelleo filtrado según los seleccionadores.

A continuación se muestran algunos ejemplos en las Figuras 53 y 54 para seleccionar diferente número de pantallas de fase usando la tecla sostenida ctrl y click, para varias pantallas de fase. De igual forma al pasar el ratón cerca a los datos en las gráficas se detalla el

valor de los mismos. Al dar click el botón (2) se redirigirá a la segunda página del informe, la cual es muy similar a la primera y su funcionamiento el mismo.

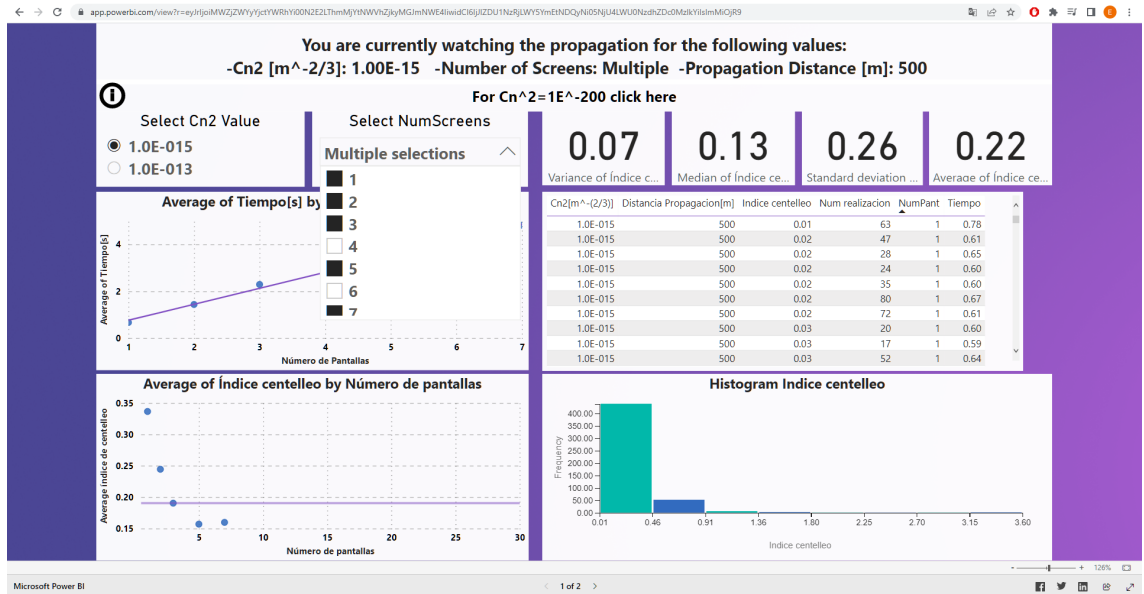


Figura 53. Ejemplo de uso del primer reporte, página 1.

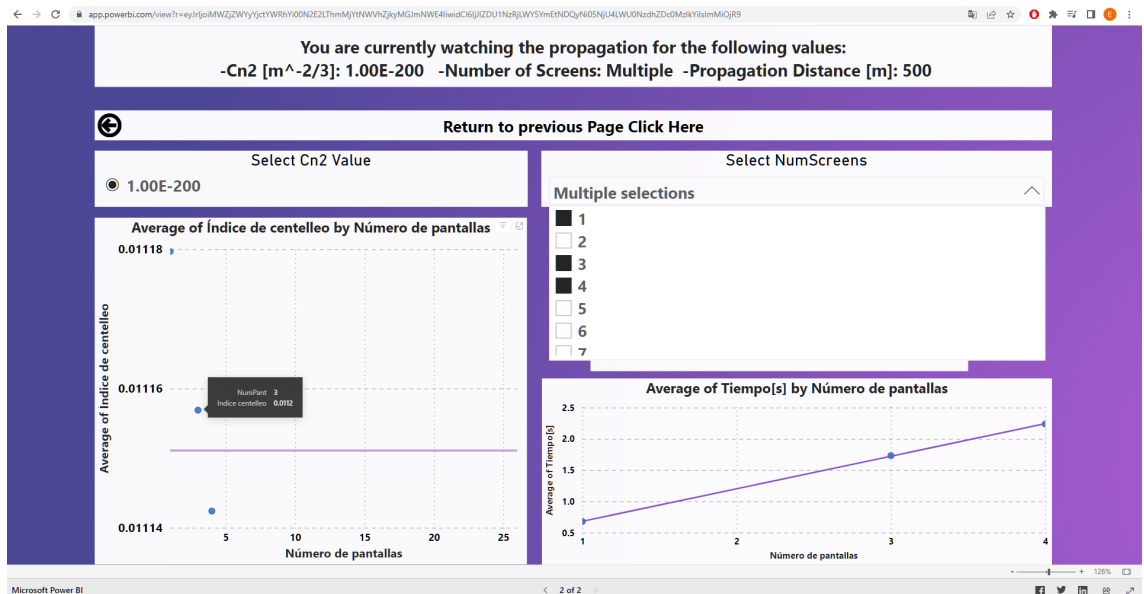


Figura 54. Ejemplo de uso del primer reporte, página 2.

4.2. Informe para diferentes valores de turbulencia y diferentes distancias

Los componentes del segundo reporte son muy similares a los mostrados en el primer reporte visto en la Figura 52, además su funcionamiento es igual, en éste caso se encuentra dividido en tres páginas, una principal, donde se muestran las gráficas de los resultados del índice de centelleo vs la distancia de propagación segmentado por el número de pantallas, la segunda página muestra el histograma de los resultados, y la tercera, los promedios y valores de los tiempos de ejecución obtenidos.

Para acceder al informe para diferentes distancias hacer click al siguiente enlace, <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiZmE5MjAxNjYtNWUwNi00NWE1LWFiMzctYWQxNzQzNGFlMzA4IiwidCI6IjZDU1NzRjLWY5YmEtNDQyNi05NjU0LWU0NzdhZDc0MzlkYiIsImMiOiJR9>



Figura 55. Elementos extras segundo informe.

Siendo

1. Botón de navegación para la página 2.

II. Botón de navegación para la página 3.

III. Gráfico de línea para comparar los distintos valores entre pantallas de fase según los filtros dados por los seleccionadores.

A continuación se muestran las páginas 2 y 3 del segundo informe, en las Figuras 56 y 57, con algunos datos seleccionados.



Figura 56. Segundo informe, página 2.



Figura 57. Segundo informe, página 3.

4.3. Resultados del informe

Los resultados obtenidos y mostrados tanto en el presente informe como a lo de este trabajo enfatizan el efecto que tienen las pantallas de fase sobre un haz que se propaga a diferentes distancias y a través de un medio con diferentes valores de C_n^2 . Los datos de centelleo obtenidos para los distintos niveles de turbulencia y distancia de propagación establecidos son altamente comparables con aquellos descritos en la literatura y varios artículos que estudian el efecto de la turbulencia atmosférica^{53,54,55}. Sin embargo en la literatura algunos artículos científicos^{56,57} muestran que al aumentar las pantallas de fase aumenta el nivel de turbulencia, es decir, que el efecto de las pantallas de fase implica un aumento en la cantidad de distorsión del haz luego de propagarse, lo cual no aparece en los comportamientos de las gráficas obtenidas.

La información obtenida en este trabajo muestra la tendencia de mejora en los resultados a medida que se aumenta el número de pantallas de fase, este comportamiento se acentúa cuando se aumenta la distancia de propagación, al ser necesario un mayor número de pantallas de fase para obtener resultados más precisos. En general, se encontró una gran discrepancia entre los resultados para una y dos pantallas de fase, en comparación con tres o más pantallas de fase.

-
- ⁵³ Roman Baskov y Oleksandr Chumak. *Laser beam scintillations for weak and moderate turbulence*. Mar. de 2018. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.97.043817>.
- ⁵⁴ Oleksandr Chumak y Roman Baskov. *Correlations of photon trajectories in the problem of light scintillations*. Sep. de 2015. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1509.04548>.
- ⁵⁵ Chatterjee y Mohamed, “Investigation of profiled beam propagation through a turbulent layer and temporal statistics of diffracted output for a modified von Karman phase screen”, ver Referencia n. 45.
- ⁵⁶ Chatterjee y Mohamed, “Split-step approach to electromagnetic propagation through atmospheric turbulence using the modified von Karman spectrum and planar apertures”, ver Referencia n. 32.
- ⁵⁷ Maxime Dedo et al. “Retrieving Performances of Vortex Beams with GS Algorithm after Transmitting in Different Types of Turbulences”. En: *Applied Sciences* 9 (mayo de 2019), pág. 2269. DOI: 10.3390/app9112269.

Como se muestra en el presente trabajo, se optó por el uso de un equipo local para evitar la diferencia de tiempos, costos y en ocasiones cierres de sesión presentados por la computación en la nube, por lo tanto, se encontraron limitaciones impuestas por el equipo de cómputo, las simulaciones se hicieron con una densidad de pixeles de 256x256 debido a los altos tiempos de ejecución del algoritmo, a pesar de tratarse de una aceptable cantidad de pixeles, para obtener resultados mucho más precisos es necesario elevar esta cifra, además, por el uso de programas en segundo plano se observaron algunas variaciones en los tiempos de las simulaciones. Cabe destacar que debido la versión de Python utilizada 2.7, se presentan ligeras desventajas frente a las nuevas versiones de Python 3.8 o superior las cuales presentan mejor estabilidad y funcionamiento, la actualización de WP para las nuevas versiones de Python aún se encuentra en desarrollo.

Para reducir los tiempos de cálculo se puede sugiere optar por computación mediante el uso de GPU dedicada, la cual es mejor aprovechada por los lenguajes de programación entre ellos Python, mejorando los tiempos de cálculo considerablemente, una de las librerías de Python utilizadas para para este tipo de operación es CuPy análogo a la librería de uso de CPU NumPy.⁵⁸

Para trabajos futuros se recomienda actualizar las versiones del software a una versión de Python más reciente corrigiendo los bugs existentes, y analizar si existe una mejor distribución de pantallas, por ejemplo, pantallas no equidistantes, lo cual podría permitir mejorar los tiempos y la precisión del algoritmo.

⁵⁸ Jeffrey Beck y Jeremy Bos. “Open source acceleration of wave optics simulations on energy efficient high-performance computing platforms”. En: mayo de 2017, 102040F. DOI: 10.1117/12.2264874.

- En este trabajo de grado se estudiaron computacionalmente los efectos de la turbulencia atmosférica y el número de pantallas de fase para un haz gaussiano que se propaga horizontalmente a baja altura usando el algoritmo SSBP.
- Se realizaron múltiples simulaciones manteniendo constante la distancia de propagación para haces gaussianos en el vacío y para tres grados de turbulencia atmosférica representativos, dados por los valores del C_n^2 siendo éstos débiles $C_n^2 = 1 \times 10^{-200} [m^{-\frac{2}{3}}]$, moderados $C_n^2 = 1 \times 10^{-15} [m^{-\frac{2}{3}}]$ y fuertes $C_n^2 = 1 \times 10^{-13} [m^{-\frac{2}{3}}]$, y mostrando el efecto que dichos valores producen sobre los haces que se propagan. De la información obtenida y almacenada en el informe se encontró que, al aumentar el número de pantallas de fase, el índice de centelleo comenzaba a variar, sin embargo, a partir de un determinado umbral en la cantidad de pantallas, el índice de centelleo comienza a tender a un mismo valor, independientemente si se agregaba mayor cantidad de pantallas de fase, lo cual implica la existencia de una asíntota, y por lo tanto, indica un aumento de la precisión .
- Se ejecutaron múltiples simulaciones para diferentes distancias de propagación para tres valores distintos de turbulencia; débil, moderada y fuerte, donde se mostró que, a distancias cortas la cantidad de pantallas de fase mostraban el mismo comportamiento, sin embargo a medida que se aumentaba la distancia de propagación se encontró una gran discrepancia entre los resultados del índice de centelleo para un número bajo y un número alto de pantallas de fase. A mayor distancia se presentaron mejores resultados, es decir, con mayor precisión, ya que se encontró la tendencia a un mismo valor cuando la cantidad de pantallas interpuestas era mayor, con lo cual permitió establecer un número umbral adecuado de pantallas de fase con la cual existe un excelente compromiso entre precisión y tiempo de cómputo para los parámetros preestablecidos, siendo el factor de la distancia de propagación

el de mayor peso en su determinación.

- Se realizaron informes dinámicos reuniendo todos los resultados para obtener visualizaciones más rápidas y flexibles sobre el tiempo de ejecución y las gráficas del índice de centelleo, agrupando por diferentes criterios de selección, y haciendo la comparación entre los datos más intuitivo y sencillo.

Bibliografía

- S. E. Reyes Aparicio, A. F. Vásquez Caicedo, "Caracterización de los efectos de la turbulencia atmosférica sobre el camino de propagación de un haz láser a diferentes distancias horizontales y baja altura", *Biblioteca Universidad Industrial de Santander*, 2019 Tesis de pregrado, págs. 20-28 (vid. pág. 21).
- O. J. Tijaro Rojas, "Caracterización experimental de la turbulencia a diferentes distancias horizontales y baja altura mediante la técnica de Telescopía de Fourier para aplicaciones en seguridad", *Biblioteca Universidad Industrial de Santander*, 2019 Tesis Doctoral, págs. 8-12 (vid. pág. 21).
- Z. P. Reyes Quijano, "Decodificación de información en sistemas QKD ópticos multidimensionales basada en inteligencia artificial", *Biblioteca Universidad Industrial de Santander*, 2019 Propuesta de Tesis de Doctorado, págs. 5-6 (vid. págs. 30, 35).
- A. Ballesteros Díaz, "Parámetros de turbulencia atmosférica a escala de laboratorio utilizando Telescopía de Fourier de tiempo promedio", *Biblioteca Universidad Industrial de Santander*, 2019 Tesis de Maestría, págs. 17-29 (vid. pág. 30).
- N. Randunu Pathirannehelage, "Imaging through ground-level turbulence by fourier telescopy: simulations and preliminary experiments", *Florida Atlantic University*, 2015 PHD thesis, págs. 9-11 (vid. págs. 31, 34).
- Andrews, L.C. y R.L. Phillips. *Laser Beam Propagation Through Random Media*. SPIE Press monograph. Society of Photo Optical, 2005. URL: <https://books.google.com.co/books?id=4NXHYg70qqIC> (vid. págs. 31, 32).
- Andrews, L.C., R.L. Phillips y A.R. Weeks. "Propagation of a Gaussian-beam wave through a random phase screen". En: *Waves in Random Media* 7.2 (1997). Provided by the SAO/NASA Astrophysics Data System, págs. 229-244. DOI: 10.1088/0959-7174/7/2/005. URL: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1997WRM...7..229A> (vid. pág. 22).

- Baskov, Roman y Oleksandr Chumak. *Laser beam scintillations for weak and moderate turbulence*. Mar. de 2018. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.97.043817> (vid. pág. 107).
- Beck, Jeffrey, Celina Bekins y Jeremy Bos. “WavePy: A Python package for wave optics”. En: mayo de 2016, pág. 984603. DOI: [10.1117/12.2225769](https://doi.org/10.1117/12.2225769) (vid. págs. 22, 38, 39).
- Beck, Jeffrey y Jeremy Bos. “Open source acceleration of wave optics simulations on energy efficient high-performance computing platforms”. En: mayo de 2017, 102040F. DOI: [10.1117/12.2264874](https://doi.org/10.1117/12.2264874) (vid. pág. 108).
- Chatterjee, Monish R y Fathi HA Mohamed. “Investigation of profiled beam propagation through a turbulent layer and temporal statistics of diffracted output for a modified von Karman phase screen”. En: *Free-Space Laser Communication and Atmospheric Propagation XXVI*. Vol. 8971. International Society for Optics y Photonics. 2014, pág. 897102 (vid. págs. 36, 107).
- “Split-step approach to electromagnetic propagation through atmospheric turbulence using the modified von Karman spectrum and planar apertures”. En: *Optical Engineering* 53.12 (2014), págs. 1 -17 (vid. págs. 32, 36, 37, 107).
- Chumak, Oleksandr y Roman Baskov. *Correlations of photon trajectories in the problem of light scintillations*. Sep. de 2015. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1509.04548> (vid. pág. 107).
- Dedo, Maxime et al. “Retrieving Performances of Vortex Beams with GS Algorithm after Transmitting in Different Types of Turbulences”. En: *Applied Sciences* 9 (mayo de 2019), pág. 2269. DOI: [10.3390/app9112269](https://doi.org/10.3390/app9112269) (vid. pág. 107).
- Dedo, Maxime Irene et al. “Retrieving performances of vortex beams with GS algorithm after transmitting in different types of turbulences”. En: *Applied Sciences* 9.11 (2019), pág. 2269. DOI: [10.3390/app9112269](https://doi.org/10.3390/app9112269) (vid. pág. 24).
- Fried, D. L. “Optical Resolution Through a Randomly Inhomogeneous Medium for Very Long and Very Short Exposures”. En: *J. Opt. Soc. Am.* 56.10 (1966), págs. 1372-1379.

- DOI: 10.1364/JOSA.56.001372. URL: <https://opg.optica.org/abstract.cfm?URI=josa-56-10-1372> (vid. pág. 33).
- Goodman, Joseph W. *Introduction to Fourier Optics*. 3rd ed. Englewood: Roberts & Co., 2005 (vid. págs. 26-29).
- Harding, Cressida M, Rachel Johnston y Richard G Lane. “Fast simulation of a Kolmogorov phase screen”. En: *Applied optics* 38.11 (1999), págs. 2161-2170. DOI: <https://doi.org/10.1364/AO.38.002161> (vid. pág. 22).
- Hyde, Milo W. et al. “Generating partially coherent Schell-model sources using a modified phase screen approach”. En: *Optical Engineering* 54.12 (2015), pág. 120501. DOI: 10.1117/1.OE.54.12.120501. URL: <https://doi.org/10.1117/1.OE.54.12.120501> (vid. pág. 41).
- Ishimaru, Akira. “Theory Of Optical Propagation In The Atmosphere”. En: *Optical Engineering* 20.1 (1981), págs. 63 -70. DOI: 10.1117/12.7972665. URL: <https://doi.org/10.1117/12.7972665> (vid. pág. 21).
- Kolmogorov, A. N. “Dissipation of Energy in the Locally Isotropic Turbulence”. En: *Proceedings: Mathematical and Physical Sciences* 434.1890 (1991), págs. 15-17. URL: <http://www.jstor.org/stable/51981> (vid. pág. 29).
- “The local structure of turbulence in incompressible viscous fluid for very large Reynolds numbers”. En: *C. R. Acad. Sci. URSS* 30 (1941), págs. 301-305. URL: <https://ci.nii.ac.jp/naid/20000584634/en/> (vid. págs. 21, 29).
- Labeyrie, A., S. G. Lipson y P. Nisenson. *An Introduction to Optical Stellar Interferometry*. Cambridge University Press, 2006. DOI: 10.1017/CB09780511617638 (vid. pág. 29).
- Lane, R G, A Glindemann y J C Dainty. “Simulation of a Kolmogorov phase screen”. En: *Waves in Random Media* 2.3 (1992), págs. 209-224. DOI: 10.1088/0959-7174/2/3/003. eprint: <https://doi.org/10.1088/0959-7174/2/3/003>. URL: <https://doi.org/10.1088/0959-7174/2/3/003> (vid. págs. 22, 34, 35).

- Mansuripur, Masud. "Gaussian beam optics". En: *Optics & Photonics News - OPT PHOTONICS NEWS* 12 (ene. de 2001) (vid. pág. 23).
- Marshall. G.F. *Gaussian Laser Beam Diameters*. In *Laser Beam Scanning*; O. Optical Engineering Series, Marcel Dekker; Vol. 9, 1985, págs. 289–301. DOI: 10.1201/9780203749142-6 (vid. pág. 23).
- Murphy, Connor E y Mark F Spencer. "Investigation of turbulence thermal blooming interaction using the split-step beam propagation method". En: *Unconventional and Indirect Imaging, Image Reconstruction, and Wavefront Sensing 2018*. Vol. 10772 # 1077208. International Society for Optics y Photonics. 2018 (vid. pág. 36).
- Panich, Michael G. et al. "Scintillation fluctuations of optical communication lasers in atmospheric turbulence". En: *Laser Radar Technology and Applications XIX; and Atmospheric Propagation XI*. Ed. por Monte D. Turner et al. Vol. 9080. International Society for Optics y Photonics. SPIE, 2014, págs. 348 -356. DOI: 10.1117/12.2053338. URL: <https://doi.org/10.1117/12.2053338> (vid. pág. 34).
- "Preface". En: *Contemporary Optical Image Processing With MATLAB*. Ed. por Ting-Chung Poon y Partha P. Banerjee. Oxford: Elsevier, 2001, págs. v-vi. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-008043788-0/50000-7>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780080437880500007> (vid. pág. 27).
- Schmidt, J.D. *Numerical simulation of optical wave propagation: With examples in MATLAB*. Ene. de 2010, págs. 1-197. DOI: 10.1117/3.866274. eprint: <https://doi.org/10.1117/3.866274>. URL: <https://doi.org/10.1117/3.866274> (vid. págs. 22, 30, 32, 33).
- Sengupta, D.L. y T.K. Sarkar. "Maxwell, Hertz, the Maxwellians, and the early history of electromagnetic waves". En: *IEEE Antennas and Propagation Magazine* 45.2 (2003), págs. 13-19. DOI: 10.1109/MAP.2003.1203114 (vid. pág. 21).
- Tatarski, V.I. *Wave Propagation in a Turbulent Medium*. McGraw-Hill, 1961. URL: <https://books.google.com.co/books?id=pqqTnAECAAJ> (vid. pág. 31).

- Voelz, D. "Computational Fourier Optics: A MATLAB Tutorial". En: SPIE Press, 2011, págs. 29-100. DOI: <https://doi.org/10.1117/3.858456> (vid. págs. 22, 26-28).
- Voelz, David G. y Michael C. Roggemann. "Digital simulation of scalar optical diffraction: revisiting chirp function sampling criteria and consequences". En: *Appl. Opt.* 48.32 (nov. de 2009), págs. 6132-6142. DOI: 10.1364/AO.48.006132. URL: <http://www.osapublishing.org/ao/abstract.cfm?URI=ao-48-32-6132> (vid. pág. 22).
- Wu, Chensheng, William Nelson y Christopher Davis. "3D Geometric Modeling and Simulation of Laser Propagation through Turbulence with Plenoptic Functions". En: vol. 9224. Oct. de 2014, 92240O-92240O. DOI: 10.1117/12.2062945 (vid. pág. 23).
- Zhan, Hanyu, Erandi Wijerathna y David Voelz. "Is the formulation of the Fried parameter accurate in the strong turbulent scattering regime?" En: *OSA Continuum* 3.9 (2020), págs. 2653-2659. DOI: 10.1364/OSAC.404983. URL: <https://opg.optica.org/osac/abstract.cfm?URI=osac-3-9-2653> (vid. pág. 33).
- Zhang, Dongxiao et al. "Accurate simulation of turbulent phase screen using optimization method". En: *Optik* 178 (2019), págs. 1023 -1028. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2018.10.083>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0030402618315924> (vid. pág. 36).
- Zhou, Hang, Rémi Douvenot y Alexandre Chabory. "Modeling the long-range wave propagation by a split-step wavelet method". En: *Journal of Computational Physics* 402 # 109402 (2020). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2019.109042>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S002199911930748X> (vid. pág. 36).

ANEXOS

Anexo A. Simulación para varios números de pantallas de fase para valores bajos de C_n^2

A continuación se presenta el código construido para obtener los resultados de múltiples pantallas de fase a bajos niveles de turbulencia, construido en lenguaje Python y compilado en Jupyter Notebook.

Este código representa las simulaciones realizadas para cada número de pantallas de fase. En la línea 3 se aprecian las variables requeridas para una correcta simulación. El número de simulaciones está representada con n , el número de pantallas se representa con NumPant, que para este caso permanecerá con valor 1, el cual aumentará en una unidad en el loop hasta n iteraciones indicadas por el usuario, la distancia de propagación se representa con DistProp, y CnSquared representa el parámetro de turbulencia.

```
1
2 import timeit
3 Carpeta = "E:/ResultadoSimulaciones/"
4 def simulateMultipleScreens(n, OpcionSource = 2, NumPix =256, NumPant = 1, DistProp
  ↳ = 500, CnSquared = 1e-200):
5     rows = []
6     for i in range(1, n+1):
7         start_time = timeit.default_timer()
8         x_i = wavepy(simOption=OpcionSource, N=NumPix, NumScr=NumPant,
  ↳ PropDist=DistProp, Cn2=CnSquared)
9         x_i.TurbSim()
10        x_i.EvalSIGauss()
11        elapsed = timeit.default_timer() - start_time
12        rows.append([NumPant, x_i.PropDist, x_i.Cn2, x_i.EvalSIGauss(), elapsed])
13        NumPant = NumPant + 1
14
15    df = pd.DataFrame(rows, columns=["NumPant", "Distancia Propagacion[m]",
  ↳ "Cn2[m-(2/3)]", "Indice centelleo", "Tiempo"])
16
17    df.to_excel(str(Carpeta) + "n= " + str(n) + " NumScreen= Multiple" + " Dist=" +
  ↳ str(DistProp) + " Cn2=" + str(CnSquared) + ".xlsx",index = False)
```

18

```
return df
```

19

Se realizaron las simulaciones manteniendo constantes las variables DistProp con un $n=25$ iteraciones con un valor de $500m$ de distancia. Por cada simulación, el número de pantallas se cambiaba con valores de 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12.... 25. Esto se realizó para el valor de C_n^2 de $10^{-200}[m^{-\frac{2}{3}}]$. Debido a que el parámetro de turbulencia es muy bajo, no es necesario realizar varias simulaciones para obtener un promedio del índice de centelleo, ya que en cada simulación se obtiene el mismo valor, así que se realiza solo una simulación por cada número de pantallas de fase.

Siguiendo las indicaciones de la línea 15, se crea un dataframe, en el cual se guardan, en un archivo .xlsx los resultados tales como el número de pantallas (NumPant), la distancia de propagación (Distancia Propagación [m]), el parámetro de turbulencia ($C_n^2[m^{-\frac{2}{3}}]$) el índice de centello (Indice centelleo) y el tiempo de ejecución (Tiempo).

Anexo B. Múltiples simulaciones para diferentes números de pantallas de fase a 500m de distancia de propagación para varios valores de C_n^2

A continuación se presenta el código construido para obtener los resultados para turbulencia moderada y fuerte, en lenguaje Python y compilado en Jupyter Notebook.

Este código representa una sucesión de n simulaciones realizadas para cada número de pantallas de fase. En la línea 3 se tienen las variables requeridas para una correcta simulación. El número de simulaciones está representada con n , el número de pantallas se representa con NumPant, la distancia de propagación se representa con DistProp, y CnSquared representa el parámetro de turbulencia.

```
1
2 import timeit
3 Carpeta = "E:/Nuevas simulaciones/"
4 def simulateMultipleRealizations(n, OpcionSource = 2, NumPix =256, NumPant = 1,
5     ← DistProp = 500, CnSquared = 1e-15):
6     rows = []
7     for i in range(1, n+1):
8         start_time = timeit.default_timer()
9         x_i = wavepy(simOption=OpcionSource, N=NumPix, NumScr=NumPant,
10             ← PropDist=DistProp, Cn2=CnSquared)
11         x_i.TurbSim()
12         x_i.EvalSIGauss()
13         elapsed = timeit.default_timer() - start_time
14         rows.append([i,NumPant, x_i.PropDist, x_i.Cn2, x_i.EvalSIGauss(), elapsed])
15
16 df = pd.DataFrame(rows, columns=["Num realizacion", "NumPant", "Distancia
17     ← Propagacion[m]", "Cn2[m-(2/3)]", "Indice centelleo", "Tiempo"])
18
19 df.to_excel(str(Carpeta) + "n= " + str(n) + " NumScreen=" + str(NumPant) + "
20     ← Dist=" + str(DistProp) + " Cn2=" + str(CnSquared) + ".xlsx", index = False)
21 return df
```

Se realizaron las simulaciones manteniendo constantes las variables DistProp y n, de 100 realizaciones a un valor de 500m de distancia, respectivamente. Para cada 100 simulacio-

nes, el número de pantallas se cambiaba con valores de 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 15, 20 y 25. Esto se realizó para dos valores del parámetro de turbulencia: $10^{-13}[m^{-\frac{2}{3}}]$ y $10^{-15}[m^{-\frac{2}{3}}]$. Debido a que el parámetro de turbulencia es relativamente alto, por tal motivo la gran cantidad de repeticiones por cada número de pantallas de fase para obtener un promedio del índice de centelleo.

Siguiendo las indicaciones de la línea 14, se crea un dataframe, en el cual se guardan en un archivo excel, los resultados tales como el número de simulaciones (Num realizacion), el número de pantallas (NumPant), la distancia de propagación (Distancia Propagacion [m]), el parámetro de turbulencia $Cn2[m^{-(2/3)}]$, el índice de centelleo `Indice centelleo` y el tiempo `Tiempo de ejecución de la simulación`.

Anexo C. Simulaciones para diferentes números de pantallas de fase cambiando la distancia de propagación para varios valores de C_n^2

A continuación se presenta el código construido para obtener los resultados, construido en lenguaje Python y compilado en Jupyter Notebook.

Este código representa una sucesión de n simulaciones realizadas para cada número de pantallas de fase. En la línea 3 se aprecian las variables requeridas para una correcta simulación. La distancia de propagación DistProp la cual va desde 25 hasta 5000 metros, aumentando de 25 metros en cada iteración, el número de pantallas se representa con NumPant, y CnSquared representa el parámetro de turbulencia.

```
1
2 import timeit
3 Carpeta = "E:/ResultadoSimulaciones/"
4 def simulateMultiplePropDist(n, step, OpcionSource = 2, NumPix =256, NumPant = 1,
5     ← DistProp = 25, CnSquared = 1e-14):
6     rows = []
7     for i in range(0, n, step):
8         start_time = timeit.default_timer()
9         x_i = wavepy(simOption=OpcionSource, N=NumPix, NumScr=NumPant,
10             ← PropDist=DistProp, Cn2=CnSquared)
11         x_i.TurbSim()
12         x_i.EvalSIGauss()
13         elapsed = timeit.default_timer() - start_time
14         rows.append([NumPant, x_i.PropDist, x_i.Cn2, x_i.EvalSIGauss(), elapsed])
15         DistProp = DistProp + step
16
17     df = pd.DataFrame(rows, columns=["NumPant", "Distancia Propagacion[m]",
18         ← "Cn2[m-(2/3)]", "Indice centelleo", "Tiempo"])
19
20     df.to_excel(str(Carpeta) + "n MaxDist= " + str(n) + " NumScreen= " +
21         ← str(NumPant) + " Dist=" + str(DistProp) + " Cn2=" + str(CnSquared) +
22         ← ".xlsx",index = False)
23     return df
```

Se realizaron las simulaciones para valores bajos y valores altos del parámetro de turbu-

lencia: $10^{-200}[m^{-\frac{2}{3}}$, $10^{-15}[m^{-\frac{2}{3}}$ y $10^{-13}[m^{-\frac{2}{3}}$, respectivamente. La distancia de propagación cambia cada $25m$ hasta llegar a $5000m$. La simulación se realizó para los siguientes números de pantallas de fase: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 15, 20.

Siguiendo las indicaciones de la línea 15, se crea un dataframe, en el cual, en la línea 17 se guarda en un archivo excel, los resultados tales como el número de pantallas (NumPant), la distancia de propagación (Distancia propagacion [m]), el parámetro de turbulencia $Cn2[m^{-(2/3)}]$, el índice de centelleo (Indice centelleo) y el tiempo (Tiempo).