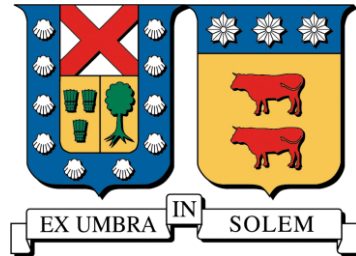


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARIA
DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA
VALPARAÍSO-CHILE



**“Desarrollo de herramientas educativas dirigidas
al estudio de líneas de transmisión, guías de onda
y fibra óptica”**

GABRIELA BELÉN GONZÁLEZ MORENO

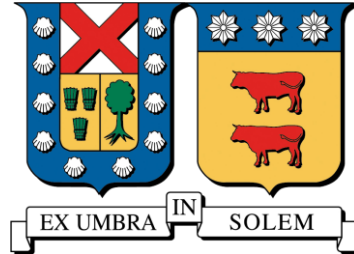
**MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO
CIVIL ELECTRÓNICO, MENCIÓN CONTROL E INSTRUMENTACIÓN**

PROFESOR GUIA:

MARCELO SOTO

ENERO 2022

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARIA
DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA
VALPARAÍSO-CHILE



“Desarrollo de herramientas educativas dirigidas al estudio de líneas de transmisión, guías de onda y fibra óptica”

GABRIELA BELÉN GONZÁLEZ MORENO

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL ELECTRÓNICO, MENCIÓN CONTROL E INSTRUMENTACIÓN

PROFESOR GUIA:

MARCELO SOTO

PROFESOR CORREFERENTE:

RICARDO OLIVARES

“Material de referencia, su uso no involucra responsabilidad del autor o de la Institución”

Enero 2022

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi familia por el apoyo constante e incondicional a lo largo de mi carrera, especialmente a mi padre por motivarme a superarme siempre para ser mejor cada día. Sé que ahora observa orgulloso mis logros desde el cielo.

A mis amigos y compañeros de universidad por siempre luchar a mi lado para salir adelante con los mejores esfuerzos acompañada de muchas risas y alegrías.

A mis tres tutores de práctica profesional, por lograr que tuviese un reencanto hacia mi carrera e impulsar en mí un gran crecimiento personal y profesional.

A mi profesor guía por su buena disposición y retroalimentación constante.

A todos quienes me apoyaron en el desarrollo de mi memoria de título, tanto en ánimo como en aportes técnicos.

Al proyecto Basal FB008, ANID de la universidad Técnica Federico Santa María.

A Dios “porque El da la sabiduría, y de su boca viene el conocimiento y la inteligencia” (Proverbios 2:6).

*Dedicado a mi padre que observa mi crecimiento
y mis logros desde el cielo y a mi madre, hermanas
y cuñado por ser el apoyo fundamental
en mi día a día.*

Resumen

Esta memoria de titulación tiene como principal objetivo desarrollar un set de herramientas educativas para el aprendizaje y diseño de sistemas de líneas de transmisión, líneas microstrip, guías de onda y fibra óptica. Estas herramientas tienen interfaces gráficas interactivas, las cuales son elaboradas a través del software MATLAB, con el fin de entregar a estudiantes avanzados de Ingeniería Civil Electrónica los conceptos teóricos y prácticos más importantes involucrados en las temáticas mencionadas. Así, se pretende mejorar la eficiencia del aprendizaje en estos temas, y además, complementar con material práctico el desarrollo de las clases de los docentes. Las herramientas desarrolladas serán la base para poder resolver problemas reales de ingeniería en sistemas de líneas de transmisión, líneas microstrip, guías de onda y fibra óptica.

Abstract

The main objective of this thesis work is to develop a set of educational tools for the learning and design of telecommunication systems based on transmission lines, microstrip lines, waveguides and optical fibers. These tools have interactive graphical interfaces, which are developed through MATLAB software, in order to provide advanced students of Electronic Engineering with the most important theoretical and practical concepts involved in the mentioned topics. This way, it is expected that the students could improve their learning efficiency in these subjects, and also, complement the development of the teacher's lectures with practical and simulation approaches. The tools developed will be the basis for solving real engineering problems in transmission line systems, microstrip lines, waveguides and optical fibers.

INDICE

1 INTRODUCCIÓN	
1.1 Contexto.....	8
1.2 Motivación.....	9
1.3 Objetivos	9
2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS	
2.1 Líneas de transmisión y líneas planares.....	10
2.2 Guías de onda.....	21
2.3 Fibra óptica.....	29
3 METODOLOGÍA	
3.1 Estado del arte.....	41
3.2 Investigación y análisis del software	43
3.3 Metodología aplicada.....	47
4 SIMULACIONES DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN Y LÍNEAS PLANARES	
4.1 Voltaje en función del espacio y tiempo.....	49
4.1.1 Descripción de la simulación.....	49
4.1.2 Software desarrollado.....	50
4.1.3 Validación de la simulación.....	52
4.2 Voltaje, corriente e impedancia aparente fasorial.....	63
4.2.1 Descripción de la simulación.....	63
4.2.2 Software desarrollado.....	64
4.2.3 Validación de la simulación	66
4.3 Voltaje transiente con fuente de voltaje pulsada.....	70
4.3.1 Descripción de la simulación.....	70
4.3.2 Software desarrollado.....	71
4.3.3 Validación de la simulación ...	74
4.4 Voltaje transiente con fuente de voltaje constante.....	78
4.4.1 Descripción de la simulación.....	78
4.4.2 Software desarrollado.....	79
4.4.3 Validación de la simulación.....	82
4.5 Carta de Smith.....	88
4.5.1 Descripción de la simulación.....	88
4.5.2 Software desarrollado.....	90
4.5.3 Validación de la simulación	91
4.6 Parámetros de diseño Microstrip.....	94
4.6.1 Descripción de la simulación.....	94
4.6.2 Software desarrollado.....	95
4.6.3 Validación de la simulación	97

5 SIMULACIONES DE GUÍAS DE ONDA

5.1 Distribución espacial del campo para GGOO rectangular.....	102
5.1.1 Descripción de la simulación.....	102
5.1.2 Software desarrollado.....	103
5.1.3 Validación de la simulación	106
5.2 Distribución espacial del campo para GGOO circular.....	115
5.2.1 Descripción de la simulación.....	115
5.2.2 Software desarrollado.....	116
5.2.3 Validación de la simulación	119
5.3 Curvas de dispersión.....	125
5.3.1 Descripción de la simulación.....	125
5.3.2 Software desarrollado.....	126
5.3.3 Validación de la simulación	128
5.4 Velocidad de grupo versus velocidad de fase.....	131
5.4.1 Descripción de la simulación.....	131
5.4.2 Software desarrollado.....	132
5.4.3 Validación de la simulación	133

6 SIMULACIONES DE FIBRA ÓPTICA

6.1 Fibras multimodo versus monomodo.....	139
6.1.1 Descripción de la simulación.....	139
6.1.2 Software desarrollado.....	140
6.1.3 Validación de la simulación	142
6.2 Modos linealmente polarizados.....	145
6.2.1 Descripción de la simulación.....	145
6.2.2 Software desarrollado.....	146
6.2.3 Validación de la simulación	148
6.3 Dispersión cromática.....	151
6.3.1 Descripción de la simulación.....	151
6.3.2 Software desarrollado.....	152
6.3.3 Validación de la simulación	154
6.4 Dispersión intermodal.....	160
6.4.1 Descripción de la simulación.....	160
6.4.2 Software desarrollado.....	161
6.4.3 Validación de la simulación	162

7 CONCLUSIONES

1 INTRODUCCIÓN

Con la evolución de la tecnología se pueden crear herramientas computacionales que permiten interiorizar de mejor manera conocimientos teóricos, desarrollar competencias y adquirir una gran capacidad de aprendizaje. De esta forma, apoyando la metodología tradicional con material académico atractivo que permite una mejor comprensión y un aprendizaje activo y significativo en la interiorización de contenidos complejos [1].

Por esta razón, la presente tesis aborda el desarrollo de herramientas educativas interactivas dirigidas al estudio de líneas de transmisión, guías de onda y fibra óptica creadas a través de implementación de rutinas de programación realizadas en MATLAB [2]. La finalidad es entregar a estudiantes avanzados de ingeniería civil electrónica o afines, los conceptos teóricos y prácticos involucrados en los temas mencionados.

Este documento se inicia con el estudio del comportamiento teórico de la transmisión de información a través de distintos canales de comunicación. Posteriormente, se implementa la teoría matemática en rutinas de programación en Matlab para obtener simulaciones ilustrativas del comportamiento de cada tema mencionado. Finalmente se crean interfaces utilizando GUIDE de Matlab que permitan a un usuario interactuar con la simulación creada, ya sea ingresando distintas variables de entrada como permitiendo visualizar gráficas desde distintas perspectivas de interés.

1.1 Contexto

En el siglo XXI, el estudio y análisis de la teoría de comunicaciones ha alcanzado un alto nivel de desarrollo, por ende, existe a nuestro alcance una gran cantidad de información cada vez más compleja de comprender debido a la matemática avanzada que explica la teoría de la transmisión de la información. Por otro lado, se ha generado un avance significativo del nivel de método de cómputo numérico y soporte matemático que han alcanzado los softwares.

Este nivel de desarrollo del estudio de las comunicaciones junto con el gran avance de softwares matemáticos, se pueden complementar para generar potenciales herramientas computacionales educativas, con el fin de facilitar la comprensión y el aprendizaje de la información abstracta y compleja. Estas herramientas pueden ser un gran apoyo a la metodología tradicional de enseñanza, la cual se ve limitada al considerar solamente la parte teórica de la temática mediante clases expositivas, gráficos no interactivos, formularios, videos experimentales, etc. Según “El cono de la experiencia” de Edgar Dale, reconocido pedagogo estadounidense, se considera la metodología tradicional como aprendizaje pasivo que no supera el 30% del aprendizaje del alumnado [3]. Dicha problemática puede ser resuelta al transformar información abstracta y compleja de entender en información ilustrativa e interactiva mediante la utilización de herramientas educacionales, que permiten facilitar la comprensión de contenidos y mejorar el nivel de aprendizaje.

1.2 Motivación

Las nuevas tecnologías pueden convertirse en grandes herramientas de apoyo para un aprendizaje más activo, didáctico, intuitivo, interactivo y efectivo. Esto puede generar un mayor interés y comprensión por parte del estudiante, y a la vez, le permite reforzar el aprendizaje de los contenidos mediante su asociación con el mundo real de temas complejos y abstractos como son los temas de interés del presente trabajo.

El proyecto “Desarrollo de herramientas educativas dirigidas al estudio de líneas de transmisión, guías de onda y fibra óptica” pretende complementar la teoría del funcionamiento de cada uno de estos temas en el área de las telecomunicaciones, a través de la programación de simulaciones. Mediante la implementación de rutinas de programación elaboradas a través del software Matlab, se pretende lograr una visualización dinámica que describa el comportamiento de los diversos conceptos involucrados en los temas mencionados. Además, se realiza una interfaz de usuario que le permitirá interactuar con las simulaciones desarrolladas cambiando parámetros claves de la teoría y ver cómo se ven reflejadas las variaciones de éstos en el comportamiento de un fenómeno en particular.

El desarrollo de esta interfaz que vincula al usuario con el programa computacional es realizado a través de GUI de Matlab.

Adicionalmente, este trabajo posibilitará a los docentes complementar sus clases teóricas con material práctico en los temas mencionados, logrando un mayor interés, comprensión y eficiencia del aprendizaje de los estudiantes.

1.3 Objetivos

El objetivo general de la tesis es desarrollar herramientas educativas dirigidas al aprendizaje y diseño de sistemas de líneas de transmisión, guías de onda y fibra óptica mediante interfaces gráficas interactivas elaboradas a través del software Matlab, con el fin de entregar a estudiantes avanzados de Ingeniería Civil Electrónica los conceptos teóricos y prácticos más importantes involucrados en las temáticas mencionadas.

Como objetivos específicos, se busca mejorar la eficiencia del aprendizaje de los alumnos y futuros profesionales, complementar con material práctico el desarrollo de las clases de los docentes y resolver problemas reales de ingeniería en los macro temas mencionados.

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

El presente capítulo tiene como finalidad dos objetivos:

- Definir conceptos, teoría y ecuaciones básicas de los temas de líneas de transmisión, guías de onda y fibra óptica, con el fin de mejorar la comprensión de las simulaciones diseñadas. Permitirá asimilar el impacto que tienen las variables de entrada en cada interfaz creada para los distintos canales de comunicación.
- Permitir que la interacción entre el usuario y simulación sea de manera más intuitiva al comprender la teoría básica de los macro temas de la presente memoria de título.

2.1 Líneas de transmisión y líneas planares

Línea de transmisión: Es una estructura formada por dos conductores, y un material aislante (dieléctrico) donde se cumple que el largo de la línea L es mayor a un décimo de la longitud de onda λ de la señal que se propaga a través de ella ($L > \frac{\lambda}{10}$). Algunos ejemplos son: Cables coaxiales, cables bifilares o paralelos, cables trenzados y placas paralelas.

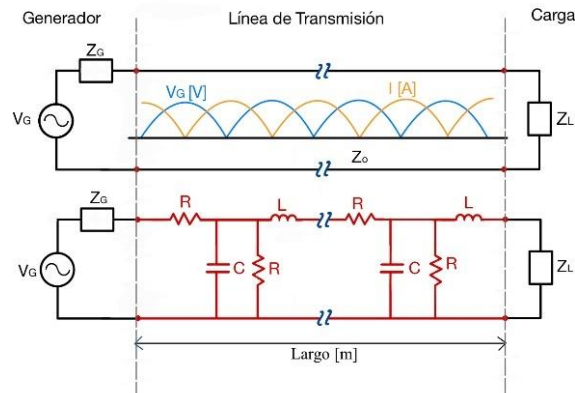


Figura 2.1 Línea de transmisión

Las líneas de transmisión confinan la energía electromagnética a una región del espacio limitada por el medio físico que constituye la propia línea, a diferencia de las ondas que se propagan en el aire, sin otra barrera que los obstáculos que encuentran en su camino [4].

Parámetros distribuidos de la línea de transmisión: Son parámetros que permiten modelar las ecuaciones de voltaje y corriente en una línea de transmisión, a través de un análisis diferencial de la línea. Estos son: Resistencia distribuida R [Ω/m], Inductancia distribuida L [H/m], conductancia distribuida G [S/m] y capacitancia distribuida C [F/m]. Cada uno de éstos representan dependencia del largo de la línea.

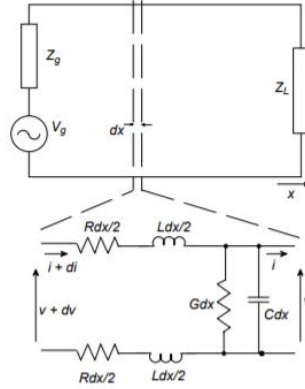


Figura 2.2 Elemento infinitesimal de una línea de transmisión [4].

En las líneas de transmisión no se pueden obtener los valores de voltaje y corriente directamente analizando las leyes de Kirchhoff y teoría de redes, por esta razón, se hace un análisis diferencial de la línea en el que aparecen los conceptos de parámetros distribuidos.

Resistencia distribuida: Representa la disipación de la potencia debido a la no idealidad de los conductores. El valor asociado a este parámetro dependerá principalmente de la resistividad del conductor y de la frecuencia de la señal que se propague a través de este (Efecto skin). Su nomenclatura es “ R [Ω/m]” e indica el valor de ohms que existen por metro de cable. Este parámetro contribuye a las pérdidas de la línea.

Conductancia distribuida (G): Representa la disipación de la potencia debido a la no idealidad del medio dieléctrico al poseer una resistividad finita. El valor asociado a este parámetro dependerá principalmente de la resistividad, del ancho y de la geometría del dieléctrico. Su nomenclatura es “ G [Si/m]” e indica el valor de siemens existentes por metro de cable. Este parámetro contribuye a las pérdidas de la línea.

Inductancia distribuida: Corresponde a la inductancia intrínseca existente en un conductor por el cual circula corriente eléctrica variable. Dependerá de la geometría del conductor, la separación entre ellos y del material dieléctrico de la línea de transmisión. Su nomenclatura es “ L [H/m]” e indica el valor de henrios por unidad de longitud.

Capacitancia distribuida: Corresponde al efecto capacitivo generado por el almacenamiento de energía debido a la distribución de potencial entre los conductores. Su valor dependerá de las dimensiones físicas y de la geometría de la línea, como también del dieléctrico. Su nomenclatura es “ C [F/m]” e indica el valor de faradios por unidad de longitud.

Constante de propagación: Constante que indica la manera en que se atenúan las señales que modelan una línea de transmisión y su cambio de fase. Debido a la propagación, ésta depende de los valores de los parámetros distribuidos y se caracteriza como indica la ecuación 2.1 [5].

$$\gamma = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} = \alpha \left[\frac{Np}{m} \right] + j\beta \left[\frac{rad}{m} \right] \quad (2.1)$$

α : Constante de atenuación medida en neper por unidad de metro.

β : Constante de fase medida en radianes por unidad de metro.

ω : Frecuencia de operación medida en radianes por segundo.

El factor que incluye la constante de propagación para todas las señales implicadas en el análisis de líneas de transmisión es:

$$e^{\pm\gamma z} = e^{\pm(\alpha+j\beta)z} \quad (2.2)$$

Constante de atenuación: Representa la atenuación de la señal de voltaje o corriente que se propaga a través de la línea. Su nomenclatura es α y se mide en neper por metro, lo que significa que cada un metro, la señal en cuestión se atenúa $1/e$ veces su amplitud original.

Las señales que se están propagando en una línea de transmisión con pérdidas, se caracteriza por tener una envolvente exponencial decreciente. Esto se puede observar en la figura 2.3.

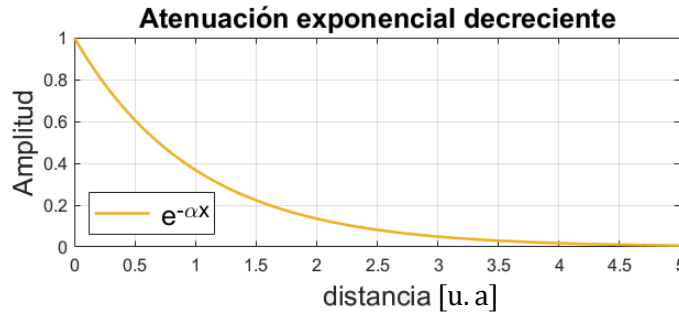


Figura 2.3 Envolvente exponencial de la amplitud decreciente del voltaje o la corriente en una línea de transmisión con $\alpha > 0$.

Constante de fase: Corresponde al cambio de fase de la señal que se propaga en la línea de transmisión por distancia recorrida. Su nomenclatura es “ β ” y se mide en radianes por metro.

Ondas estacionarias y ondas viajeras: Una onda viajera corresponde a la propagación de una perturbación que viaja a través del espacio y del tiempo transportando energía. Una onda estacionaria corresponde a la superposición de ondas viajeras que se propagan en sentidos contrarios [6].

Voltaje y corriente “viajero y estacionario”: Al analizar un modelo diferencial de una línea de transmisión, se llega a la solución general para las ecuaciones de onda fasorial del voltaje y la corriente dados por las ecuaciones 2.3 y 2.4 [4].

$$V(z) = |V_+|e^{j\phi_{V+}}e^{-\gamma z} + |V_-|e^{j\phi_{V-}}e^{\gamma z} \quad (2.3)$$

$$I(z) = |I_+|e^{j\phi_{I+}}e^{-\gamma z} + |I_-|e^{j\phi_{I-}}e^{\gamma z} \quad (2.4)$$

$|V_+|$: Magnitud del voltaje (onda viajera) que se propaga en dirección a la carga de la línea. Su unidad de medida es volts [V]

$|V_-|$: Magnitud del voltaje (onda viajera) que se propaga en dirección a la fuente de la línea. Su unidad de medida es volts [V].

φ_{V_+} : Fase del voltaje (onda viajera) que se propaga en dirección a la carga de la línea. Su unidad de medida es radianes [rad].

φ_{V_-} : Fase del voltaje (onda viajera) que se propaga en dirección a la fuente de la línea. Su unidad de medida es radianes [rad].

$|I_+|$: Magnitud de la corriente (onda viajera) que se propaga en dirección a la carga de la línea. Su unidad de medida es ampere [A]

$|I_-|$: Magnitud de la corriente (onda viajera) que se propaga en dirección a la fuente de la línea. Su unidad de medida es ampere [A].

φ_{I_+} : Fase de la corriente (onda viajera) que se propaga en dirección a la carga de la línea. Su unidad de medida es radianes [rad].

φ_{I_-} : Fase de la corriente (onda viajera) que se propaga en dirección a la fuente de la línea. Su unidad de medida es radianes [rad].

z : Sentido de propagación de la señal en la línea.

Donde los valores de V_+ y V_- se obtienen de las ecuaciones 2.5 y 2.6 [5]:

$$V_+ = V_g \frac{Z_o}{Z_o + Z_G} \cdot \frac{1}{1 - \Gamma_G \Gamma_L e^{-2(\alpha + j\beta)L}} \quad (2.5)$$

$$V_- = \Gamma_L V_+ e^{-2((\alpha + j\beta)L)} \quad (2.6)$$

V_g : Amplitud del voltaje que excita la línea de transmisión.

Γ_G : Coeficiente de reflexión en la fuente (se detalla más adelante).

Γ_L : Coeficiente de reflexión en la carga (se detalla más adelante).

Z_o : Impedancia característica de la línea de transmisión (se detalla más adelante).

Z_G : Impedancia de la fuente (se detalla más adelante).

α : Constante de atenuación medida en neper por unidad de metro.

β : Constante de fase medida en radianes por unidad de metro.

L : Largo de la línea de transmisión.

A partir de las ecuaciones 2.3 y 2.4, se obtiene la representación del voltaje y la corriente en el dominio de espacio y tiempo:

$$V(z, t) = |V_+| e^{-\alpha z} \cos(\omega t + \varphi_{V_+} - \beta z) + |V_-| e^{\alpha z} \cos(\omega t + \varphi_{V_-} + \beta z) \quad (2.7)$$

$$I(z, t) = |I_+| e^{-\alpha z} \cos(\omega t + \varphi_{I_+} - \beta z) + |I_-| e^{\alpha z} \cos(\omega t + \varphi_{I_-} + \beta z) \quad (2.8)$$

ω : Frecuencia de operación medida en radianes por segundo.

Se entiende de las ecuaciones 2.7 y 2.8, que el voltaje y la corriente se comportan como la suma de dos ondas viajeras, que se propagan en sentido opuesto, generando una señal resultante estacionaria $V(z, t)$ e $I(z, t)$.

Impedancia de carga: Corresponde a la carga conectada a la línea de transmisión. Su nomenclatura es Z_L [Ω].

Impedancia de la fuente: Corresponde a la impedancia interna del generador. Su nomenclatura es Z_G [Ω].

Impedancia característica: Es la impedancia que visualiza el generador en los primeros instantes al energizar la línea. Su nomenclatura es Z_o [Ω] y su valor depende de los parámetros distribuidos de la línea y de la frecuencia operacional de la señal que se propague. También se define como el cociente entre los voltajes y corrientes propagándose en una dirección [7].

Coefficiente de reflexión en la carga: Describe la amplitud de una onda reflejada respecto a la onda incidente en la carga. Se calcula en función de la impedancia de carga e impedancia característica o como el cociente entre los fasores de voltaje reflejado e incidente, tal como indica la ecuación 2.9 [5] y su nomenclatura es Γ_L .

$$\Gamma_L = \frac{V_- e^{\gamma L} (\text{Sentido alejándose de la carga})}{V_+ e^{-\gamma L} (\text{sentido hacia la carga})} = \frac{Z_L - Z_o}{Z_L + Z_o} \quad (2.9)$$

Z_o : Impedancia característica de la línea de transmisión.

Z_L : Impedancia de carga de la línea de transmisión.

γ : Constante de propagación.

L : Largo de la línea de transmisión.

Coefficiente de reflexión para un punto “z” de la línea: Describe la amplitud de una onda reflejada respecto a la onda incidente en un punto “z” de la línea. Se calcula como se expresa en la ecuación 2.10 [5].

$$\Gamma(z) = \frac{V_- e^{\gamma z} (\text{Sentido alejándose de la carga})}{V_+ e^{-\gamma z} (\text{sentido hacia la carga})} \quad (2.10)$$

z : Punto de interés de la línea de transmisión.

El coeficiente de reflexión $\Gamma(z)$ posee magnitud constante a lo largo de toda la línea cuando la atenuación es nula y si la atenuación es distinta de cero, la magnitud del coeficiente de reflexión disminuye a lo largo de la línea.

Coefficiente de reflexión en la fuente: Describe la amplitud de una onda reflejada respecto a la onda incidente en la fuente de la línea de transmisión. Se calcula en función de la impedancia de la fuente e impedancia característica (ecuación 2.11). Su nomenclatura es Γ_G .

$$\Gamma_G = \frac{Z_G - Z_o}{Z_G + Z_o} \quad (2.11)$$

Z_o : Impedancia característica de la línea de transmisión.

Z_L : Impedancia de la carga de la línea de transmisión.

Distorsión: Se define como un cambio de la forma de onda de una señal más allá de una atenuación y un retardo, es decir, corresponde a una deformación de ésta.

El comportamiento de líneas de transmisión se modela matemáticamente basándose en que existe el envío de una señal de frecuencia única. Para enviar información, no basta con enviar solo una señal senoidal, sino que se necesita generalmente enviar pulsos.

Un pulso está formado por una suma infinita de funciones senoidales. Cada señal senoidal posee su propia frecuencia y se propaga a su propia velocidad de fase y cuando la impedancia característica, la atenuación y la velocidad de fase de la línea tiene una dependencia de la frecuencia de operación, aparece el fenómeno de distorsión [5].

Si existe o no atenuación y según los valores de los parámetros distribuidos de la línea (L, C, G y R), se podrían tener condiciones de mínima distorsión, en la cual existiría una “deformación” de la señal poco significativa.

Adaptación de impedancia: Se define como la situación óptima para transmitir información debido a que no existen ondas reflejadas en la línea de transmisión. La finalidad de la adaptación de impedancias es conseguir la máxima transferencia de potencia y aminorar las pérdidas de ésta debido a las reflexiones desde la carga.

La adaptación de impedancia permite que no existan reflexiones del voltaje ni corriente y, por lo tanto, que no exista potencia reflejada. De esta manera, toda la potencia del generador termina en la carga y elimina en gran parte la dependencia del voltaje y la corriente del largo que tenga la línea de transmisión.

Existe adaptación de impedancia en la carga cuando el coeficiente de reflexión en la carga es cero, es decir, no existe onda reflejada y toda la potencia va dirigida hacia la carga de la línea.

Existe adaptación de impedancia en la fuente cuando el coeficiente de reflexión en la fuente es cero, es decir, no existe onda reflejada en el generador.

Si la línea no está adaptada, existirá una ineficiencia de transferencia de potencia desde el generador de la línea a la carga, y además, reflexiones múltiples que pueden generar distorsión de la señal transmitida.

Existen varios métodos de adaptación de impedancia, tales como: Elección de parámetros de una línea de tal manera que los coeficientes de reflexión sean cero para una carga y frecuencia en particular y/o usando mallas de adaptación, L, T, π , transformadores $\frac{\lambda}{4}$, stub simple o stub doble.

Cabe destacar que las mallas de adaptación de los tipos L, T y π utilizan componentes discretos que no consumen potencia para adaptar la línea.

Impedancia aparente: Se define como la impedancia que ve el generador en un punto “z” de la línea. Se calcula como el cociente entre el voltaje total y la corriente total en un punto “z” de la línea. Tiene una variación periódica de su magnitud al igual que el coeficiente de reflexión. Su nomenclatura es: $Z(z)$. Se calcula matemáticamente como indica la ecuación 2.12 [5].

$$Z(z) = Z_0 \frac{1 + \Gamma(z)}{1 - \Gamma(z)} \quad (2.12)$$

z: Punto de interés de la línea de transmisión.

$\Gamma(z)$: Coeficiente de reflexión en un punto “z” de la línea.

Relación de onda estacionaria (ROE): Corresponde al cociente entre el punto máximo y mínimo de la envolvente del voltaje o corriente. Puede calcularse también a partir de la magnitud del coeficiente de reflexión en la carga, como indica la ecuación 2.13 [4].

$$ROE = \frac{1 + |\Gamma_L|}{1 - |\Gamma_L|} \quad (2.13)$$

Etapas transiente de excitación de la línea: Correspondiente al reajuste de los voltajes y corrientes según las reflexiones que existan en la línea en el momento inicial de excitación de la línea.

En el primer instante, cuando se alimenta la línea de transmisión, el generador “ve” en los terminales de la línea la impedancia Z_0 como carga Z_L , por lo tanto, entregará una corriente equivalente a la que se obtendría si la impedancia de carga fuese igual a la impedancia característica. Una vez que la corriente alimenta a la impedancia de carga real, comienza un reajuste en los valores del voltaje y la corriente debido a la reflexión ocurrida. En la etapa estacionaria los valores de voltaje y corriente ya están ajustados.

Periodicidad de voltajes y corrientes: Corresponde a la periodicidad que se observa de la magnitud del voltaje y la corriente en la envolvente de la forma de onda de las señales en estado estacionario.

En la figura 2.4 se muestra la evolución de máximos y mínimos de una señal de voltaje en estado estacionario.

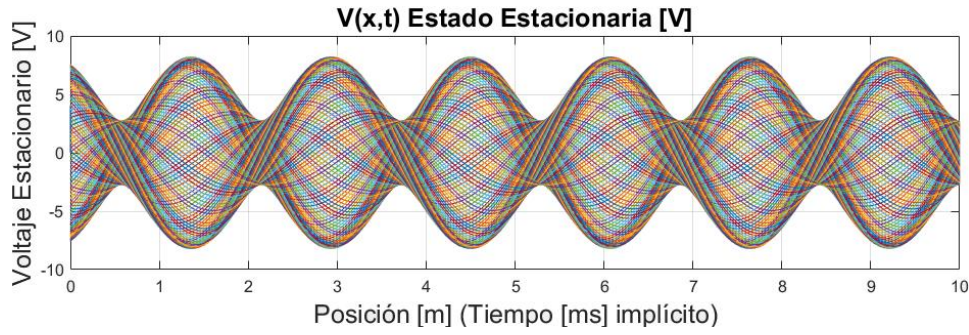


Figura 2.4 Envolvente del voltaje en una línea de transmisión.

La envolvente de la figura 2.4 se representa por la ecuación:

$$V(z) = V_g \frac{Z_o}{Z_o + Z_G} \cdot \frac{e^{-\gamma z} + \Gamma_L e^{-2\gamma l} e^{\gamma z}}{1 - \Gamma_L \Gamma_G e^{-2\gamma l}} [V] \quad (4.1)$$

- V_g : Voltaje de la fuente de la línea de transmisión.
- Z_o : Impedancia característica de la línea de transmisión.
- Z_G : Impedancia de la fuente de la línea de transmisión.
- γ : Constante de propagación.
- Γ_G : Coeficiente de reflexión en la fuente (se detalla más adelante).
- Γ_L : Coeficiente de reflexión en la carga (se detalla más adelante).
- Z : Sentido de propagación de la línea de transmisión.

Fase de voltaje y corriente: Corresponde a la fase que caracteriza al valor complejo del voltaje y la corriente. La expresión que modela la fase de estas señales es: $e^{\pm j\beta z}$.

La fase del voltaje y la corriente en líneas de transmisión varía según como indica la figura 2.5 al evaluar la expresión $e^{-j\beta z}$ para distintos puntos de la línea z en función de λ .

Se evalúa con $z = \lambda, 3\frac{\lambda}{4}, 2\frac{\lambda}{4}$ y $\frac{\lambda}{4}$ y se considera $\beta\lambda = 2\pi$. En la tabla 2.1 se calcula lo mencionado.

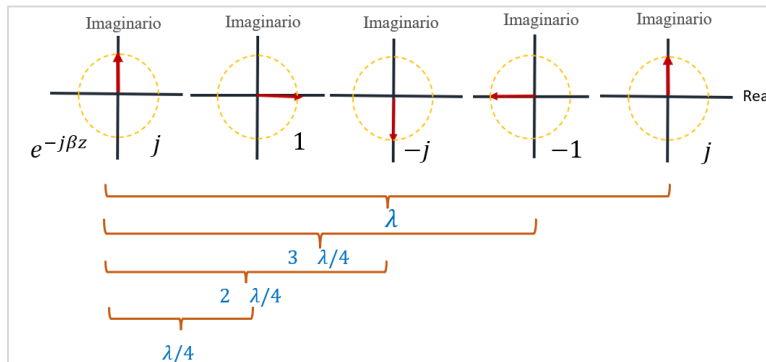


Figura 2.5 Variación de la fase en función de λ (longitud de onda de la señal propagada en la línea)

Tabla 2.1 Cálculo variación de fase según $z = \lambda, 3\frac{\lambda}{4}, 2\frac{\lambda}{4}, \frac{\lambda}{4}$.

Expresión de periodicidad	Ubicación en la línea [m]	Resultado
$e^{-j\beta z}$	$z = \lambda/4$	-j
$e^{-j\beta z}$	$z = 2\lambda/4$	-1
$e^{-j\beta z}$	$z = 3\lambda/4$	j
$e^{-j\beta z}$	$z = 4\lambda/4$	1

Carta de Smith: La carta de Smith es una herramienta gráfica utilizada para analizar el comportamiento de una línea de transmisión. Esta muestra la impedancia aparente normalizada (cociente entre la impedancia aparente y la impedancia característica de la línea) en un plano complejo.

Realizando una serie de operaciones en la carta de Smith, es posible entre otras cosas, analizar las condiciones para conseguir adaptación de impedancia.

Para las mallas de adaptación hechas por transformadores $\lambda/4$ y stubs, se utiliza la carta de Smith de impedancias y para las mallas de adaptación M, L y π se utiliza la carta de Smith de admitancias superpuesta en la carta de Smith de impedancias.

Líneas planares: Corresponden a canales de comunicación en los que los conductores no poseen forma cilíndrica, sino más bien, aplanadas. Permite la propagación de ondas de alta frecuencia con bajas pérdidas, mínima dispersión, a través de una propagación de modos cuasi- transversal electromagnéticos para típicamente frecuencias menores a 5 [GHz].

Existe una gran variedad de diseños, entre ellos: microstrip, línea coplanar, microstrip invertida, microstrip invertida atrapada, stripline suspendida, etc.

Línea microstrip: Es un tipo de línea de transmisión utilizado para transmitir señales de microondas con una estructura compuesta por dos conductores planos separados por un dieléctrico [7]. Su estructura física se observa en la figura 2.6.

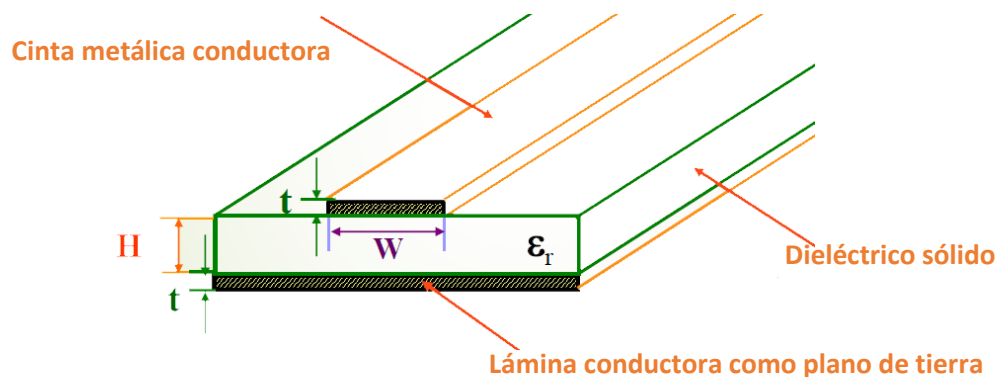


Figura 2.6 Estructura física de una Microstrip.

Las variables de la figura 2.6 son:

H : Espesor del dieléctrico.

t : Espesor del conductor.

W : Ancho de la cinta metálica conductora.

ϵ_r : Constante dieléctrica del sustrato.

En una línea microstrip, existe un cambio abrupto aire-dieléctrico que impide que existan modos transversal electromagnéticos TEM, transversal eléctricos TE y transversal magnéticos TM puros. En la figura 2.7 se puede ver la distribución de campos en la línea microstrip, observando que la mayor parte de la energía se propaga a lo largo de la línea y que la distribución de campos es próxima a la del modo TEM (quasi TEM) [7].

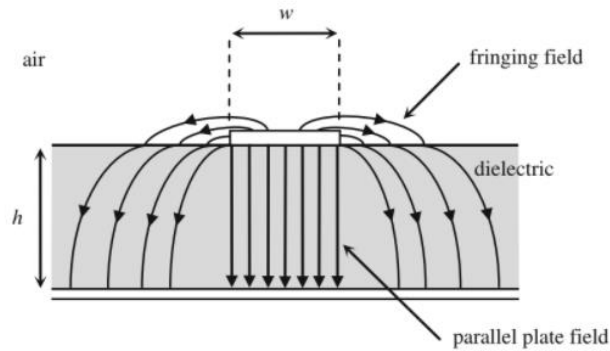


Figura 2.7 Distribución de campos de la línea microstrip [8].

Mientras menor sea la frecuencia de la onda electromagnética (mayor longitud de onda), más tenderá la señal a comportarse como una onda TEM.

Constante dieléctrica efectiva: Permite caracterizar y representar a todo el medio de ambos dieléctricos como un dieléctrico equivalente con una permitividad efectiva uniforme denotado por ϵ_{eff} . El valor de ϵ_{eff} estará entre la permitividad del aire y la permitividad del dieléctrico sólido y dependerá de las dimensiones físicas de la línea, en particular de W y H , ancho del conductor superior delgado y el espesor del dieléctrico (distancia entre las líneas conductoras). Su valor se obtiene a partir de la expresión 2.14 [4].

$$\epsilon_{eff} = q(\epsilon_r - 1) + 1 \quad (2.14)$$

q : Factor de llenado $\rightarrow$ Representa el porcentaje de la señal que se propaga en el dieléctrico sólido entre los conductores y en el aire. A modo de ejemplo, si $q = 1$, toda la señal se propaga en el dieléctrico sólido existente entre las placas.

Al utilizar el concepto de constante dieléctrica efectiva, se obtienen los parámetros que definen la línea a partir de un “material equivalente” uniforme.

Diseño de una microstrip: Para obtener los parámetros ideales de diseño de una línea planar tipo microstrip, se requiere calcular la impedancia característica, el factor de llenado q , las dimensiones de la guía W, H y t y la constante dieléctrica efectiva. Todos los parámetros de diseño tienen una dependencia cruzada, por lo que se obtienen a través de método iterativo con método de síntesis gráfica.

La gráfica de apoyo utilizada para la obtención de los parámetros de diseño de una microstrip es la que se observa en la figura 2.8.

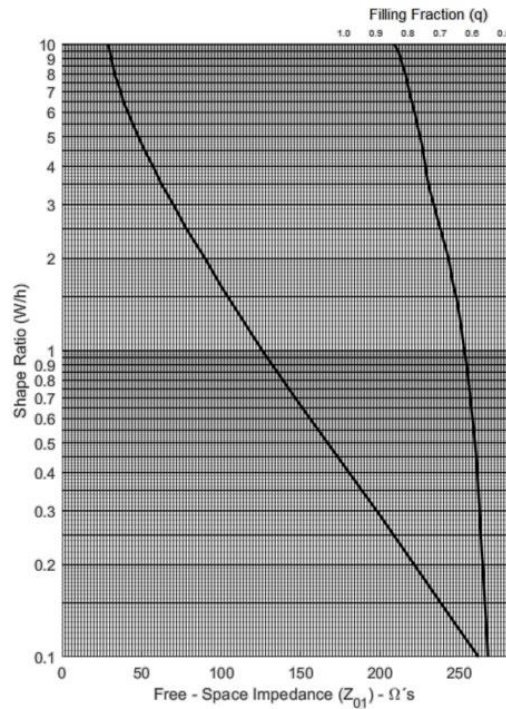


Figura 2.8 Gráfica que permite obtener los parámetros de diseño de una línea planar Microstrip [8].

La gráfica de la figura 2.8 se define por tres variables: el cociente entre el ancho del conductor superior W y el espesor del dieléctrico H , la impedancia característica Z_{0i} (impedancia de espacio abierto) y el factor de llenado q .

La impedancia característica de la iteración $i + 1$ se obtiene como indica la ecuación 2.15 [8].

$$Z_{0(i+1)} = \sqrt{\epsilon_r} Z_{0i} \quad (2.15)$$

Impedancia de espacio abierto: Corresponde a la impedancia característica de una línea microstrip.

2.2 Guías de onda

Guía de onda: Tubo conductor a través del cual se transmite una señal en forma de onda electromagnética [9]. Está formada por paredes metálicas y un dieléctrico en su interior. Se caracteriza por presentar bajas pérdidas, tener un gran ancho de banda y por su capacidad de transmitir altos niveles de potencia. Las guías de onda confinan ondas EM que se propagan a través de ellas por medio de reflexiones. La distribución de las ondas dependerá de la forma transversal de la guía, sus dimensiones y de su frecuencia de operación. Las formas transversales típicas son rectangulares y circulares.

Modos de propagación: Son las distintas distribuciones transversales del campo electromagnético. Para que exista propagación en la guía, una de las componentes longitudinales del campo que se propaga al interior de ésta debe ser distinta de cero, lo cual inmediatamente define que se propaga una onda transversal eléctrica (TE) o transversal magnética (TM).

La propagación de los modos se modela a partir de las ecuaciones de Maxwell más las condiciones de borde (el campo eléctrico tangencial a las paredes de la guía y el campo magnético perpendicular a la guía deben ser cero).

En el caso de una guía de onda rectangular, los modos que se propagan pueden ser transversal eléctrico denotado como TE_{mn} o transversal magnético denotado como TM_{mn} [9].

Para el caso de una guía de onda circular, los modos de propagación pueden ser transversal eléctrico o magnético denotado como TE_{np} y TM_{np} respectivamente.

Según sea la forma transversal de la guía, las dimensiones de la guía y la frecuencia de operación existirán diferentes modos propagándose a través de ésta.

Los subíndices m y n describen el número de medios ciclos de la magnitud del campo en la dirección x e y respectivamente. Según su valor, describirá un tipo de modo. A modo de ejemplo, si $m = 0$ y $n = 1$, se está hablando del modo TE_{01} .

Los subíndices n y p describen la periodicidad azimutal, es decir, el número de ciclos de λ en dirección φ en 2π radianes y el número de nulos del campo eléctrico E_φ que se generen en sentido radial excluyendo el origen, en orden respectivo. Al igual que para las guías de onda rectangulares, según el valor asociado a n y p , se estará haciendo referencia a un modo específico.

Dimensiones físicas transversales de la guía: Determinan la frecuencia de corte de la señal. Para una guía de onda rectangular, corresponden al ancho y alto de la misma; y para una guía de onda circular, corresponde al radio.

Frecuencia de corte: Corresponde a la frecuencia mínima de operación de la señal, para asegurar propagación del modo. Su nomenclatura es $f_c(m,n)$.

Constante de propagación del dieléctrico: Describe la propagación interna del campo dentro de un dieléctrico.

Constante de propagación total de la guía: Define la propagación total del campo dentro de una guía. Corresponde a la proyección resultante en dirección longitudinal de la guía de la constante de propagación del campo en el dieléctrico.

Modo transversal eléctrico: No existe componente de campo eléctrico en el sentido de propagación y si existe campo magnético en sentido longitudinal. La componente del campo magnético en sentido longitudinal H_z permite la propagación a través de la guía [9].

Modo transversal magnético: No existe componente de campo magnético en el sentido de propagación y si existe campo eléctrico en sentido longitudinal. La componente de campo eléctrico en sentido longitudinal E_z permite la propagación a través de la guía [9].

Dispersión de la señal: Corresponde a la deformación de la señal que se propaga a través de una guía de onda. Al enviar un pulso a través de la guía de onda, si se está propagando en banda monomodal, cada componente espectral que conforma dicho pulso tendrá asociado una proporción de energía, es decir, parte de la potencia se dividirá en cada componente espectral del pulso y cada componente espectral tendrá su propia velocidad de fase y velocidad de grupo. En consecuencia, se genera el fenómeno de dispersión de la señal.

Frente de onda: Lugar geométrico que une todos los puntos que, en un instante dado, presentan igual fase.

Velocidad de fase: Tanto para guías de onda rectangulares o circulares, corresponde a la velocidad de propagación de una fase para una frecuencia determinada f . Cada modo tiene su propia velocidad de fase para una determinada frecuencia de operación f y se calcula como indica la ecuación 2.16 [9].

$$V_{pg(m,n)} = \frac{\omega}{\beta_{g(m,n)}} = \frac{V_{pd}}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_c(m,n)}{f}\right)^2}} \quad (2.16)$$

V_{pd} : Velocidad de fase en el dieléctrico abierto, la cual se calcula como indica la ecuación 2.17.

$$V_{pd} = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.17)$$

$f_c(m,n)$: Frecuencia de corte del modo mn .

f : Frecuencia de operación.

Velocidad de grupo: Describe la velocidad a la cual se propaga la información dentro de una señal. Entrega la velocidad de la forma de onda resultante del grupo de componentes espectrales. La velocidad de grupo se calcula como indica la ecuación 2.18 [9].

$$V_{g(m,n)} = \left(\frac{d\beta_g}{d\omega} \right)^{-1} = V_{pd} \sqrt{1 - \left(\frac{f_c(m,n)}{f} \right)^2} = \frac{V_{pd}^2}{V_{pg(m,n)}} \quad (2.18)$$

β_g : Constante de propagación total de la guía.

Ecuaciones de campo en guías de onda rectangulares: Para guías de onda rectangulares, las ecuaciones físicas que modelan la teoría de transmisión de señales son expresadas con coordenadas rectangulares.

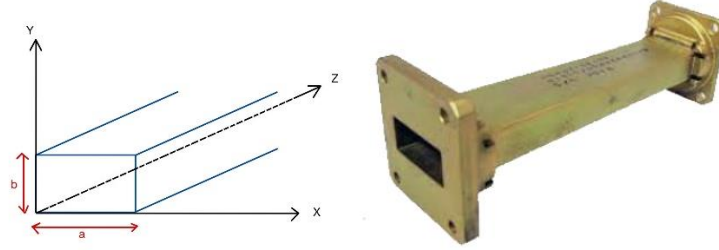


Figura 2.9 Guía de onda rectangular.

Las ecuaciones que modelan la onda propagada al interior de la guía rectangular se explican a continuación:

Vectores de campo:

$$\vec{E}(x, y, z, t) = \text{Re}\{E_x(x, y)\vec{a}_x + E_y(x, y)\vec{a}_y + E_z(x, y)\vec{a}_z\}e^{-\gamma_g z}e^{j\omega t} \quad (2.19)$$

$$\vec{H}(x, y, z, t) = \text{Re}\{H_x(x, y)\vec{a}_x + H_y(x, y)\vec{a}_y + H_z(x, y)\vec{a}_z\}e^{-\gamma_g z}e^{j\omega t} \quad (2.20)$$

El factor $e^{j\omega t}$ indica que tanto el campo eléctrico como magnético tienen oscilación constante en el tiempo. El factor $e^{-\gamma_g z}$ describe la variación del campo electromagnético en la dirección longitudinal de la guía, la cual también es oscilante. En una guía de onda rectangular sin pérdidas se cumple que $\gamma_g = j\beta_g$.

Las expresiones $E_x(x, y)$, $E_y(x, y)$, $E_z(x, y)$, $H_x(x, y)$, $H_y(x, y)$ y $H_z(x, y)$ representan las componentes del campo eléctrico y magnético en el plano transversal de la guía.

Al resolver las ecuaciones de Maxwell y las condiciones de borde del campo eléctrico y magnético, se tienen como resultado las componentes de campo según sea una propagación transversal eléctrica o magnética. La propagación para modos TE_{mn} se modela como expresa la tabla 2.2 y para los modos TM_{mn} como indica la tabla 2.3.

Tabla 2.2 Ecuaciones que modelan la onda existente en una guía con propagación transversal eléctrica [5].

TE_{mn} con $m, n = 0, 1, 2, 3 \dots (m = n \neq 0)$	
Componente del campo	Ecuación
$E_x(x, y)$	$E_{0x} \cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right)$
$E_y(x, y)$	$E_{0y} \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right)$
$E_z(x, y)$	0
$H_x(x, y)$	$H_{0x} \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right)$
$H_y(x, y)$	$H_{0y} \cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right)$
$H_z(x, y)$	$H_{0z} \cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right)$

Tabla 2.3 Ecuaciones que modelan la onda existente en una guía con propagación transversal magnética [5].

TM_{mn} con $m, n = 1, 2, 3 \dots$	
Componente del campo	Ecuación
$H_x(x, y)$	$H_{0x} \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right)$
$H_y(x, y)$	$H_{0y} \cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right)$
$H_z(x, y)$	0
$E_x(x, y)$	$E_{0x} \cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right)$
$E_y(x, y)$	$E_{0y} \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right)$
$E_z(x, y)$	$E_{0z} \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right)$

Frecuencia de corte en guías de onda rectangulares: Según el valor asociado a m y n , las dimensiones de la guía y de la permitividad relativa del dieléctrico ϵ_r , se obtiene la frecuencia mínima de operación para que la señal en el modo TE_{mn} o TM_{mn} se propague. El cálculo de la frecuencia de corte en guías de onda rectangulares se calcula como indica la ecuación 2.21 [9].

$$f_{c(m,n)} = \frac{c}{2\sqrt{\epsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2} \quad (2.21)$$

c : velocidad de la luz.

a : ancho de la guía.

b : alto de la guía.

ϵ_r : permitividad relativa del dieléctrico.

Constante de fase en guías de onda rectangulares: Se calcula como indica la ecuación 2.22 [10].

$$\beta_{g(m,n)} = \frac{\omega}{V_{pd}} \sqrt{1 - \left(\frac{\omega_c(m,n)}{\omega}\right)^2} \quad (2.22)$$

$\omega_c(m,n)$: Frecuencia de corte del modo TE_{mn} o TM_{mn} .

ω : Frecuencia de operación.

Curvas de dispersión: Corresponde a las curvas definidas por la relación entre la frecuencia y la constante de fase de la guía representada en la ecuación 2.22. Las curvas de dispersión permiten visualizar los modos que se propagan en una guía y observar que cada modo tiene una velocidad de fase y de grupo diferente según la frecuencia de operación de la señal, las dimensiones de la guía y de la forma transversal de ésta.

La pendiente local en torno a la frecuencia de operación para cada curva de dispersión representa la velocidad de grupo, y la pendiente determinada por el cociente entre la frecuencia y la constante de fase determina la velocidad de fase en el punto de evaluación del modo que se está analizando. En la figura 2.10 se observa una gráfica típica de curvas de dispersión.

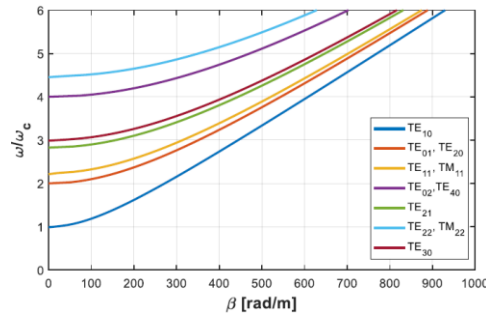


Figura 2.10 Curvas de dispersión.

Ecuaciones de guías de onda circulares: Para guías de onda circulares, las ecuaciones físicas que modelan la teoría de transmisión de señales son expresadas en coordenadas cilíndricas.

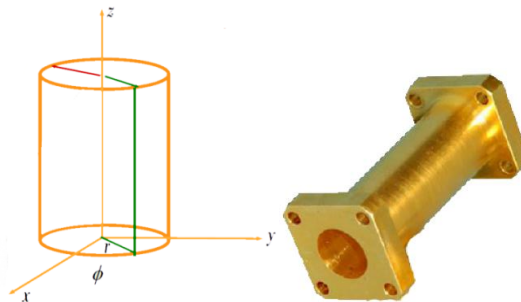


Figura 2.11 Guía de onda circular.

Las ecuaciones que modelan la onda propagada al interior de la guía circular $\vec{E}(r, \varphi, z, t)$ y $\vec{H}(r, \varphi, z, t)$ se componen por tres comportamientos distintos que son: comportamiento radial, comportamiento azimutal y comportamiento longitudinal.

- El comportamiento longitudinal se define como la propagación de dos ondas viajeras en direcciones opuestas generando una onda estacionaria.
- El comportamiento azimutal se define como un valor periódico senoidal para distintos valores del ángulo azimutal.
- Comportamiento radial se define como:

$$R(r) = C_n J_n(k_c r) + D_n N_n(k_c r) \quad (2.23)$$

siendo C_n y D_n valores constantes, J_n la función de Bessel de orden n de primer tipo y N_n la función de Bessel de orden n de segundo tipo.

En la figura 2.12 y 2.13 se observan las funciones de Bessel de primer y segundo tipo.

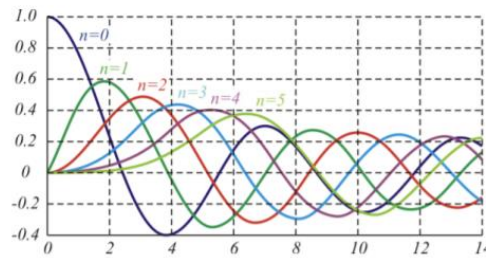


Figura 2.12 Funciones de Bessel de primer tipo [11].

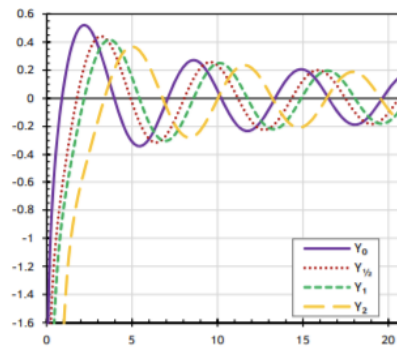


Figura 2.13 Funciones de Bessel de segundo tipo [12].

Al resolver las ecuaciones de Maxwell considerando las condiciones de borde según las dimensiones y el comportamiento esperado del campo en la guía, se tienen como resultado las componentes de campo según sea una propagación transversal eléctrica o magnética. La propagación para modos TE_{np} se modela como expresa la tabla 2.4 y para los modos TM_{np} como indica la tabla 2.5.

Tabla 2.4 Ecuaciones que modelan la onda existente en una guía con propagación transversal eléctrica [5].

TE_{np} con $n = 0,1,2,3,4,5 \dots$ y $p = 1,2,3,4 \dots$	
Componente del campo	Ecuación
$E_r(r, \varphi)$	$E_{0r} J_n \left(\frac{X'_{np} r}{a} \right) \sin(n\varphi)$
$E_\varphi(r, \varphi)$	$E_{0\varphi} J'_n \left(\frac{X'_{np} r}{a} \right) \cos(n\varphi)$
$E_z(r, \varphi)$	0
$H_r(r, \varphi)$	$H_{0r} J'_n \left(\frac{X'_{np} r}{a} \right) \cos(n\varphi)$
$H_\varphi(r, \varphi)$	$\frac{H_{0\varphi}}{Z_g} J_n \left(\frac{X'_{np} r}{a} \right) \sin(n\varphi)$
$H_z(r, \varphi)$	$H_{0z} J_n \left(\frac{X'_{np} r}{a} \right) \cos(n\varphi)$

Tabla 2.5 Ecuaciones que modelan la onda existente en una guía con propagación transversal magnética [5].

TM_{np} con $n = 0,1,2,3,4,5 \dots$ y $p = 1,2,3,4 \dots$	
Componente del campo	Ecuación
$H_r(r, \varphi)$	$H_{0r} J'_n \left(\frac{X_{np} r}{a} \right) \sin(n\varphi)$
$H_\varphi(r, \varphi)$	$H_{0\varphi} J'_n \left(\frac{X_{np} r}{a} \right) \cos(n\varphi)$
$H_z(r, \varphi)$	0
$E_r(r, \varphi)$	$E_{0r} J'_n \left(\frac{X_{np} r}{a} \right) \cos(n\varphi)$
$E_\varphi(r, \varphi)$	$E_{0\varphi} J'_n \left(\frac{X_{np} r}{a} \right) \cos(n\varphi)$
$E_z(r, \varphi)$	$E_{0z} J_n \left(\frac{X_{np} r}{a} \right) \cos(n\varphi)$

Donde X'_{np} corresponde al valor en el cual la derivada de la función de Bessel de primer tipo y de orden n se hace cero, es decir, el punto n -ésimo máximo o mínimo de la función.

Y X_{np} corresponde al valor en el cual la función de Bessel de orden n y de primer tipo se hace cero, es decir, son los ceros de la función de Bessel.

Frecuencia de corte en guías de onda circulares: Según el valor asociado a n y p , las dimensiones de la guía y de la permitividad relativa del dieléctrico ϵ_r , se obtiene la frecuencia mínima de operación para que la señal se propague en el modo TE_{np} o TM_{np} . El cálculo de la frecuencia de corte en guías de onda circulares se calcula como indica la ecuación 2.24 y 2.25 [13].

$$TE_{np} \rightarrow f_{c(n,p)} = \frac{X'_{np} c}{2\pi a \sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.24)$$

$$TM_{np} \rightarrow f_{c(n,p)} = \frac{X_{np} c}{2\pi a \sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.25)$$

c : velocidad de la luz.

a : Radio de la guía de onda circular.

ϵ_r : permitividad relativa del dieléctrico.

Constante de fase en guías de onda circulares: Se calcula como indican las ecuaciones 2.26 y 2.27 [14].

$$TE_{np} \rightarrow \beta_{g(n,p)} = \sqrt{\omega^2 \mu \epsilon - \left(\frac{X'_{np}}{a}\right)^2} \quad (2.26)$$

$$TM_{np} \rightarrow \beta_{g(n,p)} = \sqrt{\omega^2 \mu \epsilon - \left(\frac{X_{np}}{a}\right)^2} \quad (2.27)$$

μ : Permeabilidad magnética del dieléctrico.

ϵ : Permitividad eléctrica del dieléctrico.

a : Radio de la guía de onda circular.

En una guía de onda circular sin pérdidas se cumple que $\gamma_g = j\beta_g$.

2.3 Fibra Óptica

Fibra óptica: Canal de comunicación caracterizado por estar compuesto totalmente de material dieléctrico (principalmente dióxido de silicio), ser inmune a interferencias electromagnéticas, poseer baja atenuación, ser de bajo peso y de bajo costo. Está compuesto por una estructura cilíndrica conformada de un núcleo, revestimiento y recubrimiento. Existe propagación de ondas electromagnéticas en una fibra a través de la reflexión interna total de la luz.

El principio físico que permite la reflexión interna total de la onda al interior de la fibra son las leyes de Snell. El núcleo y el revestimiento son las secciones de la fibra que permiten la propagación de la onda electromagnética.

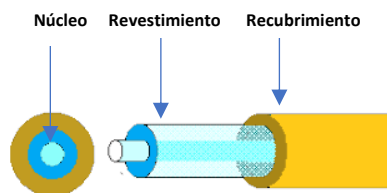


Figura 2.14 Fibra óptica

Existen dos tipos de fibra óptica según el radio del núcleo de una fibra. Cuando se propaga un solo modo, se le denomina fibra óptica monomodal y cuando se propaga más de un modo, se denomina fibra óptica multimodal.

Índice de refracción: Corresponde a la proporción o medida de reducción de la velocidad de propagación de la luz en un medio al compararla con el vacío. Se define como el cociente entre la velocidad de la luz en el vacío c y la velocidad de la luz en el medio v cuyo índice se calcula. Su nomenclatura es n y se calcula como indica la ecuación 2.28.

$$n = \frac{c}{v} = \frac{\text{Velocidad de la luz en el vacío}}{\text{Velocidad de la luz en un medio}} \quad (2.28)$$

El índice de refracción del núcleo de una fibra óptica se denota como n_1 y el del revestimiento como n_2 .

Perfil del índice de refracción: Se define como la forma que toma el índice de refracción en la fibra óptica. Existen distintas fibras ópticas clasificadas según su forma de índice de refracción. Las principales son: fibra óptica de índice escalonado y fibra óptica de índice gradual.

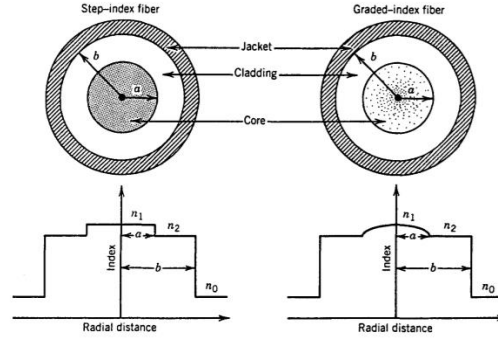


Figura 2.15 Perfiles del índice de refracción más comunes [15].

Fibra óptica de índice escalonado: En este perfil, el núcleo posee un índice de refracción n_1 constante y mayor que el índice de refracción del revestimiento n_2 , tal como se indica en la figura 2.15.

Fibra óptica de índice gradual: En este perfil, el índice de refracción del núcleo n_1 decae gradualmente desde un valor máximo n_1 en el centro del núcleo hasta un valor mínimo n_2 en el límite entre el núcleo y el revestimiento. El índice de refracción del revestimiento n_2 es constante. Lo anteriormente mencionado se observa en la figura 2.15.

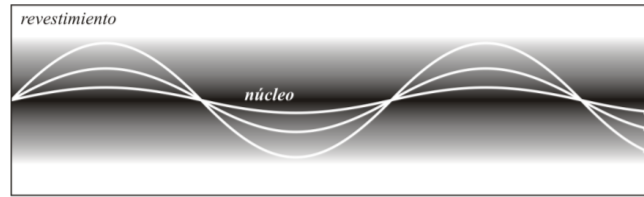


Figura 2.16 Gradiente del índice de refracción y el patrón de los rayos. Las zonas oscuras representan un índice mayor que las claras [16].

El cambio gradual del índice de refracción desvía la trayectoria de la luz, dirigiéndola nuevamente hacia el eje del núcleo. La luz se propaga más rápido en zonas con menor índice de refracción, lo que compensa la trayectoria mayor. En la figura 2.16 se ve el gradiente en el índice de refracción en una fibra óptica multimodo de índice gradual y el patrón de los rayos [16].

Reflexión interna total: Ocurre cuando una onda electromagnética que se propaga por un medio A incide a otro medio B de índice de refracción menor que aquel inicial, con un ángulo de incidencia superior al ángulo crítico definido por los índices de refracción de ambos medios. Es decir, se cumple la ecuación 2.29 y 2.30.

$$n_1 > n_2 \quad (2.29)$$

$$\varphi_{\text{incidente}} > \varphi_{\text{crítico}} = \arcsen\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \quad (2.30)$$

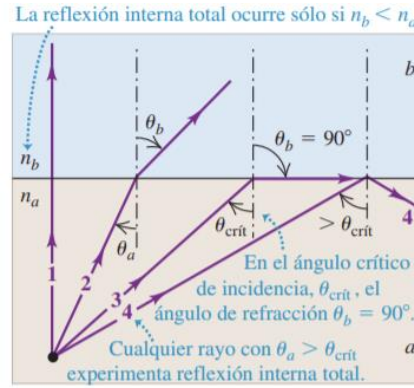


Figura 2.17 Reflexión interna total, rayo N°4 [17].

En la figura 2.17 se muestran cuatro rayos que inciden desde un medio a con índice de refracción n_a a un medio b con índice de refracción n_b , donde se cumple que $n_a > n_b$. El rayo que incide al medio b con un ángulo mayor al ángulo crítico tendrá reflexión interna total, en este caso de la figura en particular, las ecuaciones 2.29 y 2.30 se cumplen con el rayo incidente N°4.

Leyes de Snell: Define el comportamiento de la luz al atravesar de un medio a otro con índice de refracción diferente. Están compuesta por dos leyes diferentes.

Primera ley de Snell: Indica que el ángulo reflejado es igual al ángulo incidente de la señal. En la figura 2.18 se observa dicha definición.

$$\varphi_{\text{incidente}} = \varphi_{\text{reflejado}} \quad (2.31)$$

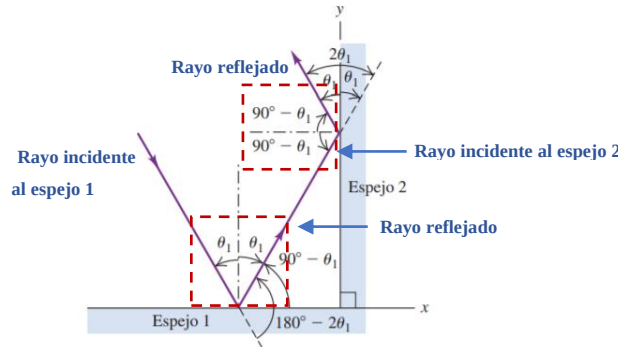


Figura 2.18 Primera ley de Snell [17]

Segunda ley de Snell: Conocida también como ley de refracción, dice que el ángulo refractado se relaciona al incidente, como define la ecuación 2.32.

$$n_1 \sin(\varphi_{\text{incidente}}) = n_2 \sin(\varphi_{\text{reflejado}}) \quad (2.32)$$

siendo n_1 el índice de refracción del medio 1 y n_2 el índice de refracción del medio 2.

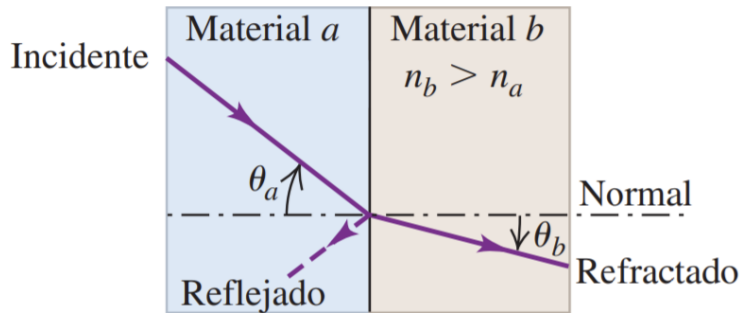


Figura 2.19 Segunda ley de Snell [17].

En la figura 2.3.6 un rayo incide desde un medio b con índice de refracción n_b a un medio a con índice de refracción n_a . La relación entre los ángulos incidente y refractado se dará por la ecuación 2.32:

$$n_a \sin(\theta_a) = n_b \sin(\theta_b)$$

Fibra monomodo: Corresponde a un tipo de fibra óptica que permite según su geometría la propagación de un solo modo. El diámetro de su núcleo es significativamente menor que el de una fibra multimodo y son extensamente utilizadas en enlaces ópticos de larga distancia y alta velocidad [16].

Fibra multimodo: Tienen núcleos de diámetro relativamente grandes que le permiten propagar numerosos modos simultáneamente. Es utilizada mayormente en el ámbito de la comunicación en distancias cortas.

Propagación de ondas en una fibra óptica monomodal: El estudio analítico de la propagación del campo electromagnético se obtiene a través de su análisis matemático de las ecuaciones de onda considerando sistema de coordenadas cilíndricas (ρ, θ, z) en la dirección de propagación z y sujetas a las condiciones de borde correspondientes.

Existen modos transversales eléctricos TE , modos transversales magnéticos TM y modos híbridos HE o EH (si $H_z > E_z$ o $E_z > H_z$ respectivamente).

La propagación de la onda tiene cuatro comportamientos diferentes los cuales son: comportamiento radial, azimutal, longitudinal y temporal.

Radialmente al interior del núcleo, la envolvente de la distribución transversal del campo se describe por una función de Bessel de primer tipo J_v y fuera del núcleo, por una función de Bessel de segundo tipo K_v .

Frecuencia normalizada: Corresponde a una medida de la fibra óptica que indica la capacidad que tiene de soportar un determinado número de modos propagándose a través de ella. Se calcula como indica la ecuación 2.33 [15].

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (2.33)$$

n_1 : Índice de refracción del núcleo.

n_2 : Índice de refracción del revestimiento.

a : Radio del núcleo

λ : Longitud de onda de la señal de propagación.

El cálculo de la frecuencia normalizada implica todas las constantes de diseño de la fibra.

Constante de propagación normalizada: Se denota por “b” y se define como indica la ecuación 2.34 [15].

$$b = \frac{\left(\frac{\beta\lambda}{2\pi}\right)^2 - n_2^2}{n_1^2 - n_2^2} \quad (2.34)$$

n_1 : Índice de refracción del núcleo.

n_2 : Índice de refracción del revestimiento.

λ : Longitud de onda de la señal de propagación.

β : Constante de fase.

Coefficiente de refracción efectivo: Determina el índice de refracción que experimenta un modo de propagación en razón a su velocidad de grupo. Su nomenclatura es $\bar{n}$ o n_{eff} y se describe por la ecuación 2.35.

$$\bar{n} = n_{eff} = \frac{\beta\lambda_0}{2\pi} = n_2 + b(n_1 - n_2) \quad (2.35)$$

λ_0 : Longitud de onda de la señal de propagación.

β : Constante de fase

Ecuación Modal: El modo guiado en una fibra óptica monomodal se define por la solución de la ecuación característica, la cual se visualiza en 2.36 [18].

$$\left(\frac{J'_v(ha)}{h J_v(ha)} + \frac{K'_v(qa)}{q K_v(qa)}\right) \left(\frac{n_1^2 J'_v(ha)}{n_2^2 h J_v(ha)} + \frac{K'_v(qa)}{q K_v(qa)}\right) = V^2 \left(\frac{1}{h^2} + \frac{1}{q^2}\right) \left(\frac{n_1^2}{n_2^2} \frac{1}{h^2} + \frac{1}{q^2}\right) \quad (2.36)$$

La variable h se define como:

$$h^2 = k_1^2 - \beta^2, \text{ con } k_1 = n_1 k_0 = \frac{2\pi n_1}{\lambda_0} \quad (2.37)$$

Y la variable q se define como:

$$q^2 = \beta^2 - k_2^2, \text{ con } k_2 = n_2 k_0 = \frac{2\pi n_2}{\lambda_0} \quad (2.38)$$

n_1 : Índice de refracción del núcleo.
 n_2 : Índice de refracción del revestimiento.
 a : Radio del núcleo
 λ_0 : Longitud de onda de la señal propagada en el vacío.
 V : Frecuencia normalizada.
 β : Constante de fase.

Subíndices de los modos guiados: Los modos guiados poseen una nomenclatura con subíndices vm los cuales significan:

v : Determina la variación del campo en la coordenada azimutal, es decir define el número de periodos que existen en 2π radianes.

m : Determina la variación del campo en la coordenada radial r . Es decir, cuenta las raíces de la función de Bessel en sentido radial sin considerar el origen.

A partir de lo mencionado anteriormente, a modo de ejemplo, se tiene que el modo HE_{22} estará transversalmente descrito su comportamiento azimutal con 2 periodos completos senoidales y radialmente con 2 raíces de la función de Bessel de primer tipo y segundo orden, tal como indica la figura 2.20.

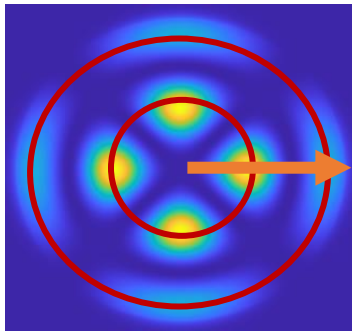


Figura 2.20 Distribución transversal espacial del modo HE_{22}

A partir de la figura 2.20 se observa que azimutalmente (círculos rojos) existen dos periodos completos sinusoidales, y que radialmente (flecha naranja) existen dos nulos de la función de Bessel que define la distribución espacial transversal del modo HE_{22} .

Solución ecuación característica: La solución numérica y graficada obtenida de la ecuación característica (ecuación 2.36) se observa en la figura 2.21.

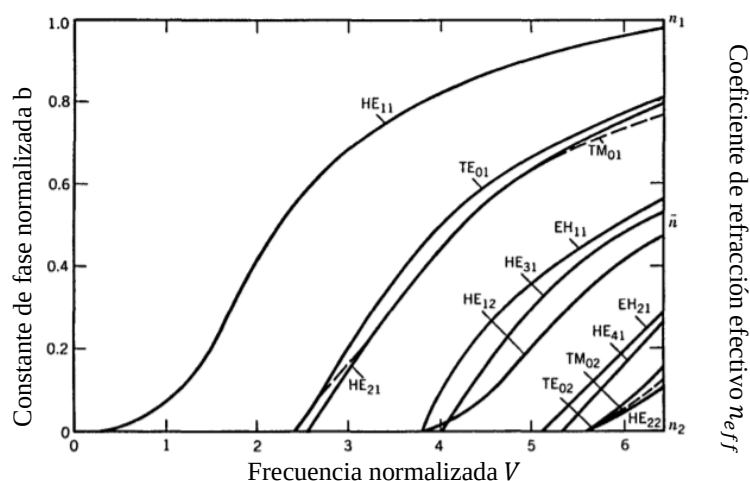


Figura 2.21 Solución de la ecuación característica: Gráfica constante de fase normalizada en función de la frecuencia normalizada y coeficiente de refracción efectivo en función de la frecuencia normalizada [18].

Aproximación de guiado débil: La teoría de guiado débil aparece al aproximar los índices de refracción del núcleo y revestimiento de una fibra óptica. En una fibra real ambos índices son muy similares, por lo que la teoría de guiado débil permite simplificar la ecuación característica de propagación (ecuación 2.36) dentro de la fibra, y poder obtener una aproximación de los modos propagándose en la fibra.

Como consecuencia de esta teoría muchos modos de propagación que en realidad tienen frecuencias de cortes y constantes de fase levemente diferentes, comparten una ecuación característica aproximadamente similar. A partir de esta teoría se definen modos de propagación linealmente polarizados, LP_{lm} , conformados por una combinación lineal de modos reales. Estos modos LP_{lm} , son modos ficticios y aproximados a los modos reales, sin embargo, ayudan a aproximar de modo simplificado el comportamiento modal real, y así poder estimar de modo aproximado parámetros de propagación, como constantes de fase, velocidades de fase y grupo, frecuencias de corte, distribución de potencia óptica dentro de la estructura de la fibra, etc.

La solución gráfica de la ecuación característica que representa los modos LP se muestra en la figura 2.22.

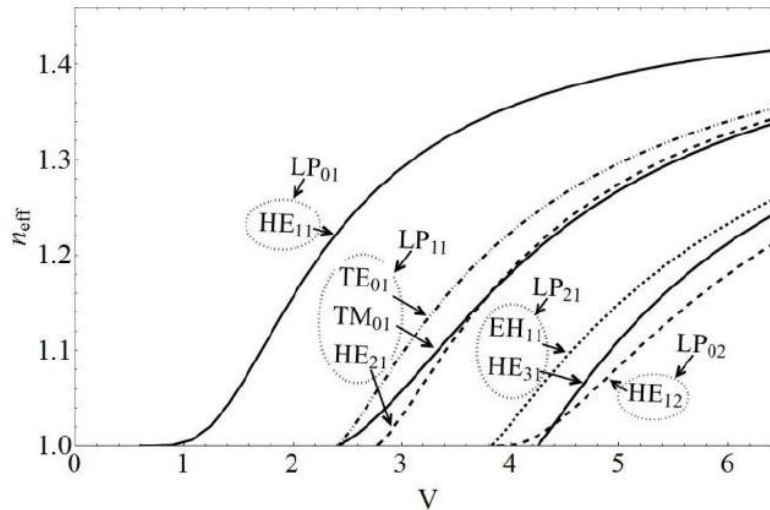


Figura 2.22 Resolución gráfica de la solución de la ecuación característica para modos LP [19].

Ancho temporal de un bit: Se define como $T_B = 1/B$, siendo B la tasa de bits, es decir, el número de bits que se transmiten por unidad de tiempo a través de un sistema de transmisión digital.

Dispersión intermodal: Se define como el ensanchamiento o deformación de los pulsos al propagarse a través de una fibra multimodo debido a la diferencia de trayectorias que recorre cada modo.

La dispersión intermodal es debida a que rayos luminosos que entran a la fibra con diferentes ángulos atravesarán caminos diferentes dentro de la fibra. Así por ejemplo en la figura que se muestra a continuación el rayo 1 (figura 2.23), que es un rayo axial, tiene el camino más corto en el interior de la fibra, el rayo 2 atraviesa un camino más largo y el 3 atraviesa un camino todavía más largo. Debido a las diferentes longitudes de los caminos, el tiempo del trayecto de cada uno de estos rayos es diferente y estos no llegan al final del cable al mismo tiempo. Como consecuencia, cuando se introduce una excitación del tipo de un pulso estrecho, este pulso energético se ensancha, y a la salida del cable es más ancho que a la entrada. Este efecto limita la rapidez del pulso que la fibra puede llegar a manejar y, por tanto, afecta al ancho de banda de la fibra [20].

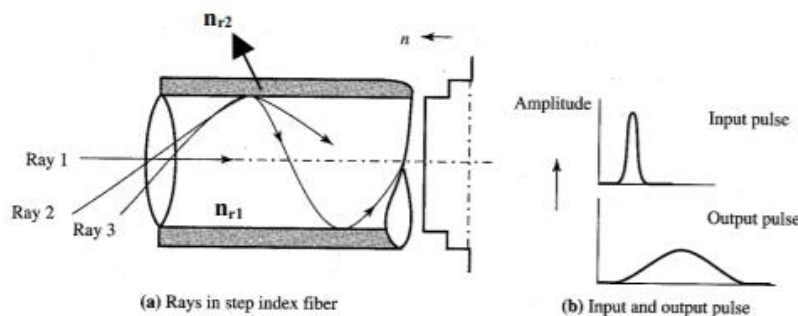


Figura 2.23 (a) Camino de los rayos en una fibra multimodo. (b) Dispersión de pulsos para una fibra de cambio de índice escalón [20].

La dispersión intermodal genera como consecuencia en las comunicaciones errores de transmisión o recepción de bits.

Parámetros de dispersión intermodal en una fibra óptica de índice escalonado:

Ensanchamiento del pulso: Corresponde al ensanchamiento que experimenta un pulso que se propaga a través de la fibra. Se obtiene como indica la ecuación 2.39 [18].

$$\Delta T = \frac{L n_1^2}{c n_2^1} \cdot \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad (2.39)$$

L : Largo de la fibra.

c : Velocidad de la luz en el vacío.

n_1 : Índice de refracción en el núcleo.

n_2 : Índice de refracción en el revestimiento.

Capacidad de la fibra: Se define como el valor del producto de la tasa de bits con la distancia de la fibra óptica que permite que no exista dispersión de la señal. Se describe con la ecuación 2.40 [18].

$$BL < \frac{n_2^1}{n_1^2} \cdot \frac{cn_1}{n_1 - n_2} \quad (2.40)$$

Parámetros de dispersión intermodal fibra óptica gradual:

El índice de refracción se modela como indica la ecuación 2.41 [45].

$$n(r) = \begin{cases} n_1 \left[1 - \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1} \right) \left(\frac{r}{a} \right)^\alpha \right] & ; \quad r < a \\ n_1 \left(1 - \frac{n_1 - n_2}{n_1} \right) = n_2 & ; \quad r \geq a \end{cases} \quad (2.41)$$

siendo α el valor que determina como decae el índice de refracción en la fibra. La variación del índice de refracción en función del radio de la ecuación 2.14, se define como “perfil- α ”.

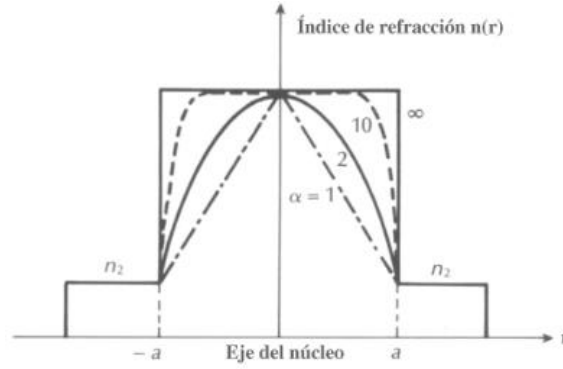


Figura 2.22 Perfil $-\alpha$ en fibra óptica.

Ensanchamiento del pulso: Se describe como indica la ecuación 2.42 [18]

$$\Delta T = \frac{n_1 \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1} \right)^2 L}{8c} \quad (2.42)$$

L: Largo de la fibra.

c: Velocidad de la luz en el vacío.

n_1 : Índice de refracción en el núcleo.

n_2 : Índice de refracción en el revestimiento.

Capacidad de la fibra: Con índice de refracción gradual se describe como indica la ecuación 2.43 [45].

$$BL < \frac{8c}{n_1 \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1} \right)^2} \quad (2.43)$$

En el caso de fibras ópticas con índice de refracción gradual, los rayos que recorren trayectorias más largas (más alejadas al eje de la fibra) lo harán a velocidades mayores que los que siguen trayectos más cortos (cercanos al eje de la fibra), compensando de esta manera la diferencia temporal de llegada a la salida del canal, por lo tanto, la dispersión intermodal se minimiza.

El perfil- α determina el nivel de dispersión intermodal. El valor mínimo de dispersión existirá cuando se cumpla la ecuación 2.44 [18].

$$\alpha = 2 \left(1 - \frac{n_1 - n_2}{n_1} \right) \quad (2.44)$$

Teóricamente, se define que la capacidad de una fibra con índice de refracción gradual será mayor a una fibra de índice de refracción escalonado, ya que minimiza la diferencia de trayectoria que recorre cada modo.

Dispersión cromática: Corresponde al efecto dispersivo (ensanchamiento) que sufren las señales al propagarse dentro de una fibra óptica monomodal. Este tipo de dispersión ocurre debido a la dependencia que tiene la velocidad de grupo de la frecuencia, produciendo ensanchamiento temporal de los pulsos propagados. Los efectos de la dispersión cromática se manifiestan ensanchando temporalmente los pulsos transmitidos, y así limitando la tasa de transmisión máxima.

Al propagarse un pulso a través de una fibra óptica, cada componente espectral adquiere una fase dependiente de la frecuencia $\beta(\omega)$, es decir, cada componente espectral tendrá su propia constante de fase.

La dependencia de la constante de fase con la frecuencia es no lineal. Para el análisis de la dispersión cromática en fibras monomodo, se realiza una aproximación de $\beta(\omega)$ utilizando serie de Taylor, tal como describe la ecuación 2.45 [18].

$$\beta(\omega) = \beta_0 + \beta_1(\omega - \omega_0) + \frac{1}{2}\beta_2(\omega - \omega_0)^2 + \frac{1}{6}\beta_3(\omega - \omega_0)^3 \quad (2.45)$$

β_1 : Valor inverso de la velocidad de grupo.

β_2 : Parámetro GVD.

β_3 : Parámetro de dispersión.

La teoría de la dispersión cromática señala que el factor de ensanchamiento de una señal gaussiana que se propaga a través de la fibra óptica se modela por la gráfica de la figura 2.24.

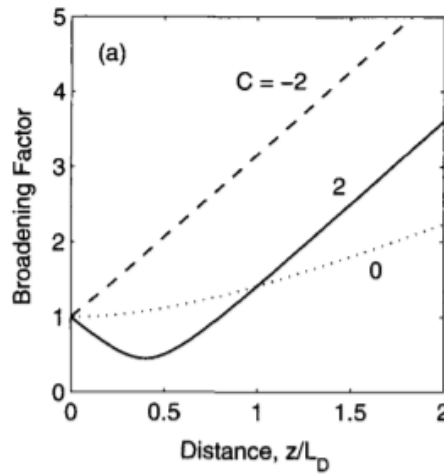


Figura 2.24 Comportamiento del factor de ensanchamiento de un pulso gaussiano en una fibra óptica según los signos del chirp y $\beta_2 < 0$ [18].

De la figura 2.24, se observa que según el signo de β_2 y del chirp, existirá un factor de ensanchamiento variable al propagarse a lo largo de la fibra.

Parámetro de dispersión: Define la dependencia de la velocidad de grupo con respecto a la frecuencia. Indica cuantos picosegundos se ensancha un pulso por cada kilómetro que se avanza considerando cierta longitud de onda. Se denota con la letra “D” y se calcula como indica la ecuación 2.46 [48].

$$D = -\left(\frac{2\pi C}{\lambda^2}\right) \beta_2 \quad (2.46)$$

Pendiente de dispersión: Se denota con la letra “S” y se obtiene a partir de la expresión 2.47 [18].

$$S = \left(\frac{2\pi C}{\lambda^2}\right)^2 \beta_3 + \left(\frac{4\pi C}{\lambda^3}\right) \beta_2 \quad (2.47)$$

Chirp: Indica como varía la frecuencia dentro de un pulso. Se denota con la letra “C”.

Factor de ensanchamiento: Compara el ancho de dos señales distintas y entrega la proporción de ensanchamiento de la señal. La ecuación que describe el factor de ensanchamiento en RMS es la ecuación 2.48 [18].

$$\frac{\sigma}{\sigma_0} = \left[\left(1 + \frac{C\beta_2 L}{2\sigma_0^2}\right)^2 + (1 + V_\omega)^2 \left(\frac{\beta_2 L}{2\sigma_0^2}\right)^2 + (1 + C^2 + V_\omega^2)^2 \left(\frac{\beta_3 L}{4\sqrt{2}\sigma_0^3}\right)^2 \right]^{0.5} \quad (2.48)$$

σ_0 : Ancho RMS de la entrada.

σ_ω : Ancho espectral RMS en frecuencia $\rightarrow \sigma_\omega = \frac{2\pi C}{\lambda^2} \sigma_\lambda$.

σ_λ : Ancho espectral RMS en longitud de onda.

$V_\omega = 2\sigma_\omega \sigma_0$ medida que indica si el pulso inicial se considera como un pulso ancho o angosto.

Si es mucho mayor que uno, se considera pulso inicial de ancho espectral grande, en caso contrario, si es considerablemente menor a uno, se considera pulso inicial de ancho espectral pequeño.

σ : Ancho RMS de la salida.

3 METODOLOGÍA

En este capítulo se presenta la investigación y análisis de los diferentes softwares matemáticos, se hace una comparación entre ellos para la selección del mejor en la implementación de las simulaciones y la metodología aplicada en dicho software para la integración de la teoría matemática. También, se incluye el estado del arte que menciona distintos trabajos realizados por otros autores con un enfoque similar a los objetivos del presente trabajo.

3.1 Estado del arte

Existen diferentes trabajos relacionados con los temas que se tratan en la presente memoria de título. Algunos de estos se mencionan a continuación:

El trabajo realizado en [21] desarrolla una herramienta educativa elaborada a través del software Matlab, en la cual se creó y diseñó una interfaz para interactuar y trabajar con la Carta de Smith. De manera interactiva entre el usuario y el software, se pueden realizar arcos, circunferencias, trazar radios y rectas, obtener las medidas de cada una y lograr la adaptación de impedancia requerida en las Líneas de Transmisión.

El trabajo realizado en [22] desarrolla a través del software “CST Microwave Studio Electromagnetic” simulaciones electromagnéticas para obtener datos que ayuden a entender el comportamiento de las líneas de transmisión de forma lúdica, con el objetivo de obtener líneas optimizadas y sin pérdidas. A través de la simulación, se logra aprender de manera menos abstracta el comportamiento electromagnético existente, pero el objetivo principal es analizar si un software de simulación electromagnética permite estudiar las líneas de transmisión de alta velocidad.

La Carta de Smith en dos dimensiones es muy utilizada para realizar cálculos de adaptación de impedancia con líneas de transmisión usando el método gráfico. Sin embargo, las dificultades de diseño de dicha carta aparecen cuando se quieren analizar dispositivos activos como amplificadores para estudiar su estabilidad, y osciladores. Por esto surgió la Carta de Smith en 3 dimensiones, “3D Smith Chart”, propuesta en el año 2011, la cual está basada en un plano complejo ampliado, con la esfera de Riemann y con una geometría inversa que puede ser utilizada para todo tipo de dispositivos tanto pasivos como activos [26].

En el trabajo [24] se muestra el patrón de radiación generado por antenas tipo microstrip en tejidos humanos como dermis y epidermis. A través del software “Ansys Hfss”, especializado en simulaciones electromagnéticas, se diseña y simula una antena microstrip con el objetivo de mostrar el patrón de radiación generado sobre tejidos humanos. Nuevamente, no estamos frente a un estudio directo para desarrollar una herramienta educativa dirigida al aprendizaje de cómo funcionan las antenas tipo microstrip, pero si corresponde a un trabajo donde se utilizan softwares de simulación para una completa comprensión del comportamiento de estas líneas planares. Además, como complemento permite visualizar el efecto que tendrían sobre lo que rodea a estas líneas, en este caso, tejido humano.

En el trabajo [23] se expone el estudio de modelos de guías de onda realizadas mediante impresión 3D, en el cual a través del software de simulación electromagnética “cst Design Environment” se realiza una adaptación de guías de onda tipo T. Si bien el software se utiliza para diseñar guías de onda, la

simulación describe el comportamiento electromagnético que existe en una guía de onda permitiendo así un entendimiento más claro de ésta.

En [25] se realiza un estudio orientado a la propagación de solitones en una fibra óptica monomodo. Se analiza cómo se logran transportar grandes cantidades de información sobre una onda solitaria, con la cual se pueden transmitir señales a muy altas tasas de transmisión. A través de las matemáticas, se explica la dinámica de los solitones, y además, se simula la propagación de éstos en una fibra óptica monomodo usando un software de simulación. Finalmente, se realiza una comparación de ejemplos planteados teóricamente y se contrastan los resultados con los obtenidos a través del software “OptiSystem”. El trabajo realizado en [25] no está orientado a desarrollar una herramienta educativa de aprendizaje, pero nuevamente se utiliza un software de simulación que permite un mejor entendimiento del comportamiento que existe en una fibra óptica.

El software de simulación utilizado en [25] es un potente software de diseño que permite a los usuarios planificar y simular casi todo tipo de enlace óptico, por lo que corresponde a una herramienta de simulación muy destacada a nivel mundial para diseñar y optimizar sistemas de comunicaciones. Además, puede usarse con fines educativos, simulando casos básicos y simples de enlaces, teniendo como desventaja que es un software pagado, por lo que no es de fácil acceso para los estudiantes.

Con el estudio del estado del arte para esta memoria de titulación, se destaca que existe una gran diversidad de trabajos y proyectos de título realizados en los temas de interés, los cuales verifican sus estudios a través de simulaciones en diferentes softwares, como los ya mencionados: Matlab, “3D Smith Chart”, “CST Microwave Studio electromagnetic”, “Ansys Hfss”, “cst Design Environment” y “OptiSystem”. Dichos softwares son utilizados con el fin de contrastar datos teóricos que respaldan la teoría de sus investigaciones, pero existen muy escasos softwares realizados directamente orientados para complementar el desarrollo de las clases de los profesores y el aprendizaje de los estudiantes.

3.2 Investigación y análisis del Software

Se realiza un exhaustivo estudio y análisis de distintos softwares matemáticos existentes con el fin de compararlos y seleccionar el mejor para cumplir los objetivos planteados en el capítulo 1.

Los softwares y lenguajes que se investigan son MATLAB, GNU Octave, Wólfram Mathematica, Sagemath, Máxima y Python(x,y). Las descripciones de su interfaz, características principales y distribución de sus licencias se resumen y detallan en la tabla 3.1 y 3.2.

Tabla 3.1 Lenguajes y softwares.

Matlab	Descripción: Corresponde a una herramienta de software que permite realizar cálculos científicos y tecnológicos complejos a partir de una representación de valores basada en matrices o ecuaciones. Utiliza un conjunto de librerías y comandos versátiles y completos que lo hacen idóneo para trabajar con simulaciones dentro de múltiples ámbitos. Interfaz: - Utiliza los entornos de programación visual; GUIDE y AppDesigner - Maneja características básicas de los lenguajes Visual Basic y Visual C++ pero de forma más intuitiva. - Permite ejecutar animaciones e interpretaciones gráficas de datos e información dinámica. Características: - Permite modelar sistemas de control utilizando herramientas para diseño de controles avanzados. - Permite realizar simulaciones interactivas mediante su componente Simulink. - Creación de ambientes personalizados para análisis y desarrollo de algoritmos de procesamiento digital de señales (DSP). - Utilizado en una variedad de áreas, las que incluyen el procesamiento de señales e imágenes, diseño de sistemas de control, ingeniería financiera e investigación médica. Distribución: Licencia Comercial/Profesional
GNU Octave	Descripción: Es un software con su propio lenguaje de alto nivel, diseñado principalmente para cálculos numéricos. Proporciona una interfaz de línea de comandos para resolver problemas lineales y no lineales, y para realizar otros experimentos numéricos. También se puede utilizar como un lenguaje orientado a lotes. Interfaz: - A partir de la versión 4, emplea su propia interfaz de usuario. - Utiliza graficas basadas en OpenGL - Integra un editor de código y propiedades de objetos.

	- Manejo de proyectos mediante un menú lateral. - Menús contextuales con controles de alineación y tamaño. Características: - Utiliza un Lenguaje Interpretado. - Dispone de un entorno de desarrollo integrado y existen otros enfocados en el aprendizaje del software. - Está enfocado en el trabajo con matrices y posee muchas funcionalidades para este propósito. - Posibilidad de crear gráficos para impresión o guardado. Distribución: Libre/Gratuito
Wolfram Mathematica	Descripción: Es un programa con su propio lenguaje de programación, utilizado principalmente como un sistema de álgebra computacional. Es utilizado en áreas científicas, de ingeniería, matemática y áreas computacionales. Interfaz: - Similar a un cuaderno de trabajo. - Posee extensas funciones y características. - Seguimiento del flujo de trabajo y animaciones. - Posee asistente de inserción de celdas. - Posee menús contextuales de acceso rápido. - Acceso a archivos recientes mediante pantalla de bienvenida. Características: - Amplia biblioteca de funciones elementales. - Soporte para matrices y manipulación de datos. - Soporte para números complejos - Datos en 2D y 3D. - Animación y renderizado de gráficos. - Cálculos y simulaciones para procesos aleatorios. - Herramientas para la creación de interfaces de usuario para cálculos y gráficas. - Herramientas de procesamiento de imágenes. - Herramientas de minería de datos. - Permite conectarse a sistemas basados en Java/SQL/Fortran. Distribución: Licencia Comercial/Profesional

Tabla 3.2 Lenguajes y software (continuación)

Sagemath	Descripción: Un sistema de software matemático basado en Python y constituido por diversos paquetes de códigos abierto tales como Matplotlib, SciPy o NumPy. Este software tiene características eficientes que utilizan Internet y pueden manejar la mayoría de los problemas matemáticos, incluyendo álgebra lineal, álgebra, combinatoria, matemáticas numéricas y cálculo. Interfaz: - Filtros para importar y exportar datos, imágenes, vídeo, sonido, CAD y GIS. - Permite trabajar con texto mediante un editor de Latex. - Interfaz de tipo cuaderno de trabajo. Características: - Permite realizar gráficas en 2D y 3D tanto de funciones como de datos. - Posee herramientas de manipulación de datos y matrices. - Posee herramientas de procesamiento de imágenes mediante Python. Distribución: Software Libre
Maxima	Descripción: Es un programa distribuido bajo licencia GNU-GPL. Es un potente motor de cálculos simbólico y numéricos, capaz de manipular expresiones algebraicas, manejo de números de coma flotante muy grandes, expansión en series de potencias y de Fourier. Entre otras funcionalidades, encontramos derivar e integrar funciones y realizar diversos tipos de gráficos en 2D y 3D. Interfaz: - No destaca por tener una interfaz gráfica amigable. - Utiliza simple consola de texto, aunque con el tiempo han aparecido distintos entornos de ejecución que intentan facilitar la interacción con los usuarios. Características: - Permite el renderizado de gráficas y texto. - Soporte para Manipulación y cálculos simbólicos y analíticos. - Resolución de sistemas de ecuaciones lineales y no lineales. - Soporte para cálculo diferencial e integral, ecuaciones diferenciales y álgebra matricial. Distribución: Software Libre mediante licencia GNU

Tabla 3.3 Lenguajes y software (continuación)

Python(x,y)	Descripción: Distribución de Python orientada al desarrollo científico que permite realizar simulaciones numéricas, procesamiento de señales, procesamiento de imágenes y experimentos y modelado en física. Interfaz: - Utiliza Spyder, el cual es un potente IDE de desarrollo diseñado para ingenieros, científicos y analistas de datos. - Utiliza Python Qt para el desarrollo de la interfaz de usuario. Características: - Proporciona una guía rápida para el uso de Python, QT y Spyder. - Recopila librerías de orientación científica y cálculo utilizadas en análisis de código estadístico. - Permite realizar computación paralela en computadoras multinúcleo - Permite realizar cálculos que incluyen trazado en 2D y 3D. Distribución: Libre mediante licencia GNU
--------------------	---

De todos los softwares y lenguajes mencionados anteriormente, MATLAB es el elegido para realizar las herramientas educativas, por las siguientes razones:

1. Es un software con amplios métodos de cómputo numérico y soporte matemático.
2. Posee una interfaz gráfica amigable e intuitiva de usar que facilita la interacción con los usuarios.
3. Se encuentra una gran cantidad de información y documentación del uso del software.
4. Trabaja con la complejidad matemática necesaria para ilustrar a través de gráficas y simulaciones los conceptos involucrados en los macro temas del proyecto permitiendo integrarlos en una interfaz diseñada por el programador.

3.3 Metodología aplicada

Para llevar a cabo los diversos algoritmos que se diseñan y crean, se implementan rutinas de programación a través del software Matlab para lograr una visualización dinámica que describa el comportamiento de los diversos conceptos involucrados en líneas de transmisión, guías de onda y fibra óptica.

Además, se realiza una interfaz de usuario con el fin de interactuar con las simulaciones desarrolladas, permitiendo cambiar parámetros claves de la teoría y ver cómo se ve reflejada la variación de éstos en el comportamiento de un fenómeno en particular. Para el desarrollo de las interfaces que vinculan al usuario con el programa computacional, se realiza una programación a través de GUI de Matlab.

Todas las ecuaciones descritas en el capítulo 2 que permiten describir los comportamientos de la transmisión de información a través de los distintos canales de comunicación se integran en los códigos que se realizan en MATLAB.

4 SIMULACIONES DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN Y LÍNEAS PLANARES

En el presente capítulo se detallan las simulaciones diseñadas y creadas como herramientas educativas para líneas de transmisión y líneas microstrip. Se describe el diseño de cada una de las interfaces que se realizan, el software final desarrollado y la realización de la validación de cada una de ellas.

Para líneas de transmisión y líneas planares se diseñan 6 interfaces diferentes relacionadas entre sí que permiten enfocar el impacto de distintas variables en la propagación de la señal. La finalidad de las simulaciones es analizar señales en dominio de espacio y tiempo, señales en dominio fasorial, sus comportamientos estacionarios y sus comportamientos transientes.

Las simulaciones diseñadas se denominan de la siguiente manera:

- Simulación 4.1: Voltaje en función del espacio y tiempo.
- Simulación 4.2: Voltaje, corriente e impedancia aparente fasorial.
- Simulación 4.3: Voltaje transiente para fuente pulsada.
- Simulación 4.4: Voltaje transiente para fuente constante.
- Simulación 4.5: Carta de Smith.
- Simulación 4.6: Parámetros de diseño Microstrip.

La simulación 4.1 permite analizar la propagación del voltaje en una línea de transmisión en el dominio del espacio y tiempo. Se interactúa con la interfaz variando el valor de la impedancia interna de la fuente, impedancia de carga e impedancia característica, con el fin de permitir visualizar cómo según sus valores, existirá o no, reflexiones en la línea. Además, según el valor de los coeficientes de reflexión, se observa cómo varían las amplitudes de las ondas incidentes y reflejadas. Adicionalmente, se podrán variar los parámetros de atenuación α y constante de fase β reflejándose su impacto en la propagación de la señal.

La simulación 4.2 permite analizar la propagación del voltaje y la corriente y el valor de la impedancia aparente en una línea de transmisión en dominio fasorial. La finalidad es observar la periodicidad existente del voltaje, la corriente y la impedancia aparente en estado estacionario y como impactan los parámetros que definen una línea de transmisión en la señal resultante propagada. Los parámetros de interés son la amplitud del voltaje de la fuente sinusoidal, las impedancias de carga, de la fuente y característica, la constante de fase y de atenuación y el largo de la línea. Además, la simulación 4.2 permite obtener los valores de la impedancia aparente, del coeficiente de reflexión, del voltaje y la corriente en un punto determinado de la línea de transmisión elegido por el usuario.

La simulación 4.3 y 4.4 permiten analizar el voltaje transiente para una fuente de voltaje pulsada y constante, observando en ellas, al reajuste del voltaje según las reflexiones que existan en la línea en el momento inicial de excitación de ésta.

La simulación 4.5 corresponde a una digitalización interactiva de la Carta de Smith en la que se realiza un mapeo en coordenadas cartesianas de los arcos y círculos que definen dicha carta. Se puede interactuar a través de ella para resolver ejercicios simples de adaptación de impedancia.

Finalmente, la simulación 4.6 corresponde a una digitalización interactiva de la gráfica utilizada para obtener los parámetros de diseño de una línea planar tipo microstrip. Con ella se podrán obtener los valores de aquellos parámetros ideales de diseño.

A continuación, se detalla en mayor profundidad el diseño de cada una de las interfaces, el software final desarrollado y como se realiza la validación de cada una de ellas.

4.1 Voltaje en función del espacio y tiempo

4.1.1 Descripción de la simulación

La simulación “Voltaje en función del espacio y tiempo” pretende complementar el estudio, análisis y entendimiento de las reflexiones del voltaje en espacio y tiempo que pueden existir en una línea de transmisión considerando una fuente de voltaje senoidal.

Las variables de entrada a la interfaz son: constante de atenuación α , constante de fase β , impedancia de carga Z_L , impedancia interna de la fuente Z_g , impedancia característica Z_o , amplitud de la fuente de voltaje V_g , largo de la línea L y frecuencia operacional f_{op} .

La interfaz de la simulación consiste en un total de 8 gráficas (figura 4.1). Cada una de ellas permite visualizar lo siguiente:

- Gráfica 1: Primera onda de $V(z, t)$ incidente en la línea de transmisión.
- Gráfica 2: Primera onda de $V(z, t)$ reflejada en la línea de transmisión.
- Gráfica 3: Segunda onda de $V(z, t)$ incidente en la línea de transmisión.
- Gráfica 4: Segunda onda de $V(z, t)$ reflejada en la línea de transmisión.
- Gráfica 5: Suma de las primeras 5 ondas incidentes en la línea de transmisión.
- Gráfica 6: Suma de las primeras 5 ondas reflejadas en la línea de transmisión.
- Gráfica 7: Visualización de cada una de las primeras 5 ondas reflejadas e incidentes que coexisten en una línea de transmisión.
- Gráfica 8: Voltaje en estado estacionario, que corresponde aproximadamente a la suma de las 5 primeras ondas incidentes y reflejadas.

Aparte de lo que se visualiza en la interfaz principal de la figura 4.1, se despliega un gráfico que muestra la información del voltaje a lo largo de toda la línea de transmisión en estado estacionario.

Las variables de salida de la interfaz para el caso en que no exista atenuación en la línea son: voltajes máximos, voltajes mínimos, voltaje incidente neto máximo, voltaje reflejado neto máximo, magnitud de los coeficientes de reflexión y el valor de la razón de onda estacionaria (ROE).

Las variables de salida de la interfaz si hay pérdidas en la línea son: magnitud de los coeficientes de reflexión y el voltaje en estado estacionario.

La simulación permite visualizar según los parámetros de entrada, si existen o no reflexiones en la línea, la variación de las amplitudes de las ondas incidentes y reflejadas, la envolvente exponencial que se forma con la presencia de pérdidas del voltaje, las ondas viajeras y estacionarias existentes, la variación de los máximos y mínimos de voltaje a través de la línea y su periodicidad.

4.1.2 Software desarrollado

Se realiza a través de la simulación desarrollado en MATLAB la interfaz de la figura 4.1 en la que se puede observar la descripción entregada en la sección 4.1.1.

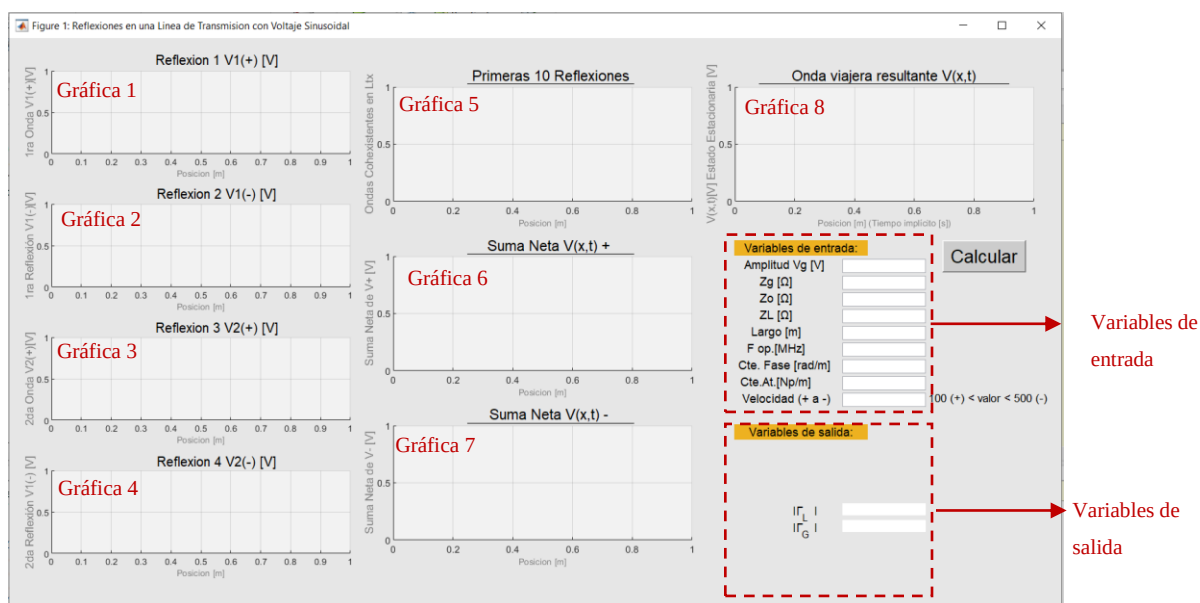


Figura 4.1 Interfaz de la simulación 4.1.

En la figura 4.1, se destaca la enumeración de cada gráfico para simplificar la comprensión de lo que representa cada uno de ellos según la descripción entregada en la sección 4.1.1. Además, se resalta el área donde se ingresan las variables de entrada de la interfaz y el área donde se entregarán las variables de salida calculadas por el código de la simulación.

A modo de ejemplo ilustrativo de la simulación se ingresan algunas variables particulares de entrada para la visualización de los resultados entregados por la interfaz. Los valores asignados a las variables de entrada son:

- Amplitud máxima de la fuente de voltaje V_g : 20 [V]
- Impedancia interna de la fuente Z_g : 500[Ω]
- Impedancia característica Z_o : 150[Ω]

- Impedancia de carga Z_L : 50 [Ω]
- Largo de la línea: 10 [m]
- Frecuencia operacional f_{op} : 12 [MHz]
- Constante de fase: 2 [rad/m]
- Constante de atenuación: 0 [Np/m]
- Velocidad de la simulación: 200

La velocidad de la simulación es el valor exacto de la cantidad de puntos de muestreo de las señales representadas en la simulación. Es un valor que se deja libre al usuario para que elija según las capacidades de su computador, un número tal que el código se compile de manera continua y sin exigir de sobremanera al equipo.

Los resultados entregados por la simulación se observan en la figura 4.2. En ella se muestra tanto la interfaz principal que representa a la simulación 4.1 junto a la gráfica externa que se despliega al finalizar la primera etapa de compilación del código que se puede observar en mayor detalle en la figura 4.3. Esta gráfica externa representa el voltaje en estado estacionario en toda la línea de transmisión.

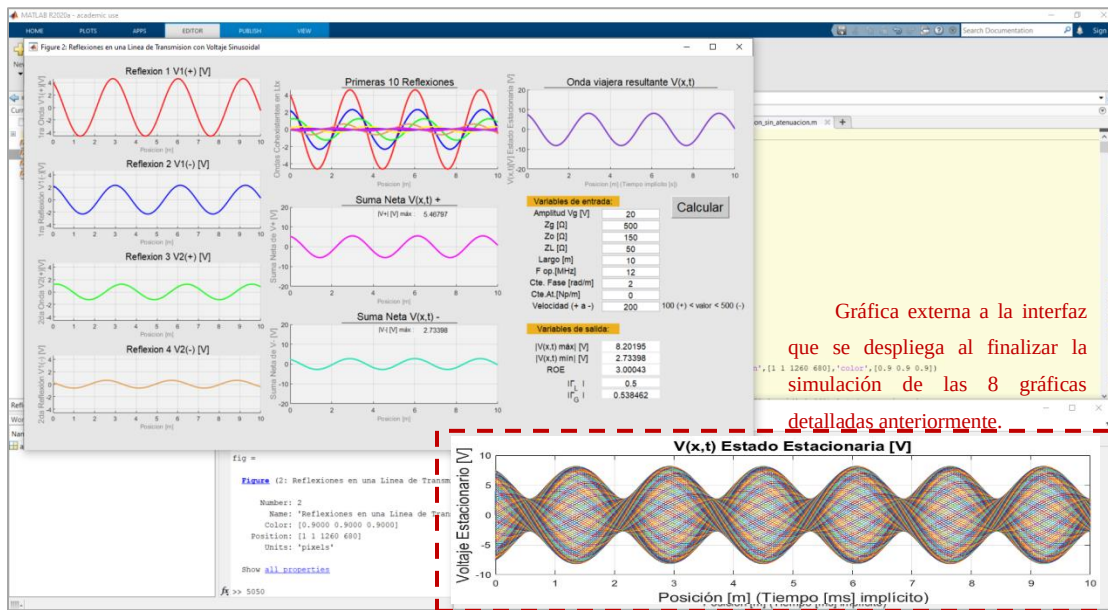


Figura 4.2 “Voltaje en función del espacio y tiempo”.

La interfaz entrega como variables de salida los valores siguientes:

- Magnitud del voltaje máximo $|V(x, t)_{max}|$: 8.2 [V]
- Magnitud del voltaje mínimo $|V(x, t)_{min}|$: 2.73 [V]
- Voltaje incidente neto máximo $|V_+|$: 5.47 [V]
- Voltaje reflejado neto máximo $|V_-|$: 2.7 [V]
- Razón de onda estacionaria ROE: 3
- Coeficiente de reflexión en la carga Γ_L : 0.5

- Coeficiente de reflexión en la fuente Γ_G : 0.54

En la figura 4.2 en el gráfico 1, 2, 3 y 4 se observan las primeras dos señales incidentes y las primeras dos señales reflejadas en la carga respectivamente. En la gráfica 5 se visualizan las diez primeras señales que coexisten en la línea de transmisión. En la gráfica 6 se plasma la sumatoria de las cinco primeras ondas incidentes en la carga y en la gráfica 7 la suma de las cinco primeras ondas reflejadas en la carga. Finalmente, en la gráfica 8 se observa la suma de las primeras diez señales ilustradas en la gráfica 4.

La gráfica externa a la interfaz que se despliega una vez finalizada la simulación de la interfaz principal de la figura 4.1, indica el voltaje en estado estacionario en el dominio del espacio y tiempo (figura 4.3). A partir de esta gráfica se puede extraer el valor del voltaje en cualquier punto de interés de la línea de transmisión.

La gráfica de la figura 4.3 permite además visualizar claramente la periodicidad del voltaje que existe en las líneas de transmisión.

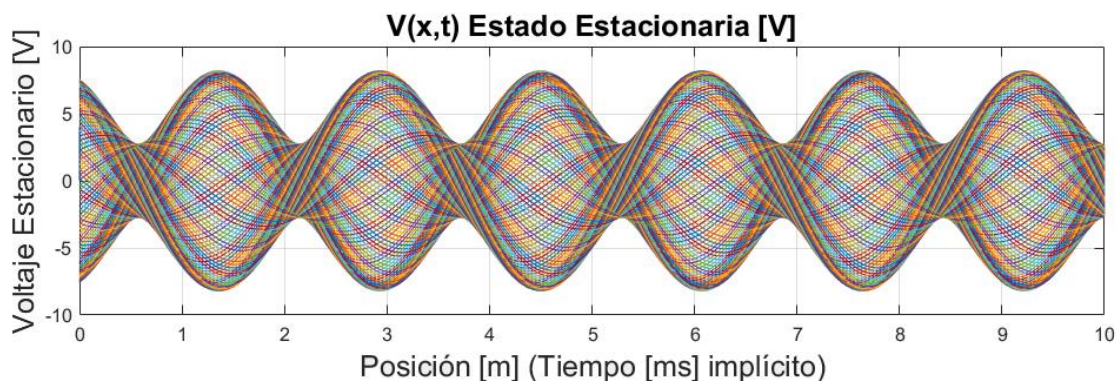


Figura 4.3 Voltaje estacionario.

Una vez detallada e ilustrada la interfaz diseñada, se procede a realizar la validación de los datos numéricos entregados por la simulación.

4.1.3 Validación de la simulación

La validación de la simulación 4.1 se realiza evaluando 3 casos típicos de análisis que se desarrollan en el estudio de líneas de transmisión, para posteriormente finalizar con el desarrollo de un ejercicio teórico.

Caso 1 “Análisis para impedancias de carga $Z_L = 0$ y $Z_L = \infty$ ”: Se prueba la interfaz ingresando como variable de entrada una impedancia de carga infinita, y luego una impedancia de carga 0 con el fin de visualizar los efectos de reflexión total de la señal de voltaje y de su inversión de fase cuando corresponda.

Caso 2 “Valores de voltaje en estado estacionario”: Se analiza los datos entregados por la interfaz ingresando el valor de la variable de entrada de impedancia de carga infinita, y luego de impedancia de carga cero y en paralelo se evalúan distintos valores de la impedancia característica. La finalidad es comparar los resultados del voltaje estacionario obtenido en la simulación con respecto a lo que predice la teoría (las demás variables de entrada permanecen fijas).

Caso 3 “Máximos y mínimos de voltaje”: Se prueba la interfaz ingresando distintos valores a la variable de entrada *Largo*. Los valores ingresados son múltiplos de $\frac{\lambda}{4}$, siendo λ la longitud de onda de la señal que se propaga, con el fin de visualizar que la ubicación de los máximos y mínimos de voltaje en la línea reflejen lo esperado teóricamente. Se realiza el análisis considerando circuito abierto y cerrado en los terminales de la línea.

Ejercicio teórico: Se resuelve un ejercicio teórico y se contrasta lo obtenido teóricamente con los resultados entregados por la interfaz.

Caso 1: Análisis para impedancias de carga $Z_L = 0$ y $Z_L = \infty$

Para la validación del caso 1, se simula una línea de transmisión cuyos terminales son un circuito cerrado y un circuito abierto con el fin de visualizar los efectos de reflexión total de la señal de voltaje y de su inversión de fase cuando corresponda.

La teoría de líneas de transmisión dice que cuando la impedancia de carga es cero $Z_L = 0$, existen ondas reflejadas en su totalidad, es decir, con igual amplitud, pero con inversión de fase.

Cuando la impedancia de carga es infinita, la teoría dice de igual manera que la situación anterior, que existen ondas reflejadas en su totalidad, es decir con igual amplitud, pero diferenciándose en que se conserva el valor de la fase.

El respaldo de la teoría mencionada se obtiene resolviendo la ecuación 2.9 que permite obtener el valor del coeficiente de reflexión en la carga.

$$Z_L = 0 \rightarrow \Gamma_L = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \rightarrow \Gamma_L = -1 \rightarrow \text{Reflexión total e inversión de fase}$$

$$Z_L = \infty \rightarrow \Gamma_L = \frac{1 - \frac{Z_0}{Z_L}}{1 + \frac{Z_0}{Z_L}} \rightarrow \Gamma_L = 1 \rightarrow \text{Reflexión total y misma fase}$$

Se ingresan a la interfaz los parámetros de entrada que se indican en la figura 4.4 para $Z_L = 0$ y $Z_L \approx \infty$.

En el caso de $Z_L \approx \infty$, se ingresa una impedancia de carga de 100 [MΩ], este valor se considera una impedancia de carga infinita. Los demás parámetros para ambas simulaciones son exactamente los mismos.

Variables de entrada:		Variables de entrada:	
Amplitud Vg [V]	20	Amplitud Vg [V]	20
Zg [Ω]	300	Zg [Ω]	300
Zo [Ω]	50	Zo [Ω]	50
ZL [Ω]	0	ZL [Ω]	100000000
Largo [m]	5	Largo [m]	5
F op.[MHz]	100	F op.[MHz]	100
Cte. Fase [rad/m]	4	Cte. Fase [rad/m]	4
Cte.At.[Np/m]	0	Cte.At.[Np/m]	0
Velocidad (+ a -)	300	Velocidad (+ a -)	300

Figura 4.4 Variables de entrada ingresados a la simulación para $Z_L = 0$ y $Z_L \approx \infty$ respectivamente.

Los resultados obtenidos de la simulación al analizar la primera onda de voltaje incidente y reflejada se muestran en la figura 4.5

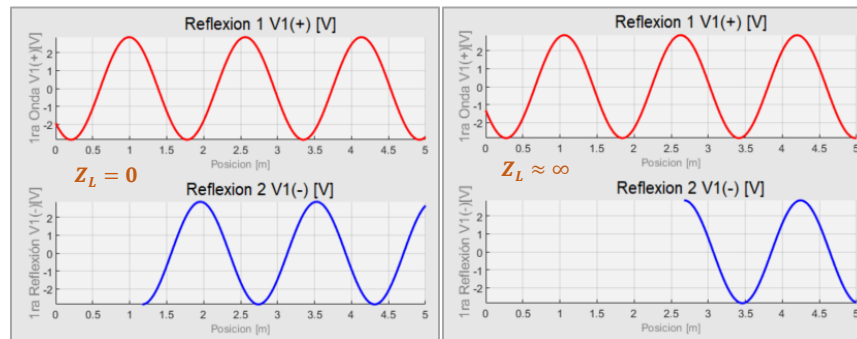


Figura 4.5 Primera señal incidente y reflejada de voltaje para $Z_L = 0$ y $Z_L \approx \infty$.

Se observa en la figura 4.5 que la primera reflexión del voltaje conserva el valor de su magnitud corroborando la reflexión absoluta de la señal debido al coeficiente de reflexión unitario para $Z_L = 0$ y $Z_L \approx \infty$.

Además, se ve claramente que para impedancia de carga cero $Z_L = 0$ existe una inversión de fase de 180° y en el caso de impedancia de carga infinita $Z_L \approx \infty$ la fase sigue siendo la misma.

A partir de lo anterior, se concluye que lo esperado a partir del análisis teórico efectivamente se cumple por la simulación diseñada.

Caso 2: Valores de voltaje en estado estacionario.

Se analiza los datos entregados por la interfaz al ingresar el valor de la variable de entrada de impedancia de carga infinita y cero. La finalidad es comparar los resultados del voltaje estacionario obtenido en la simulación con respecto a lo que predice la teoría para los casos en que los terminales de la línea de transmisión sean equivalentes a un circuito abierto y a un circuito cerrado para distintos valores de la impedancia característica de la línea de transmisión.

Para el desarrollo del caso 2, se resuelven las ecuaciones 2.9, 2.11 y 4.1 que permiten obtener el valor del coeficiente de reflexión en la carga, en la fuente y el valor del voltaje estacionario respectivamente. Los parámetros de entrada a la interfaz son los mismos de la figura 4.4, con la diferencia de que se ingresan distintos valores de impedancia característica.

$$V(z) = V_g \frac{Z_o}{Z_o + Z_G} \cdot \frac{e^{-\gamma z} + \Gamma_L e^{-2\gamma l} e^{\gamma z}}{1 - \Gamma_L \Gamma_G e^{-2\gamma l}} [V] \quad (4.1)$$

Recordar que γ corresponde a la constante de propagación $\gamma = \alpha + j\beta$, siendo α la constante de atenuación y β la constante de fase de la señal. La variable z representa el sentido de propagación del voltaje a través de la línea de transmisión.

Los valores obtenidos con $Z_L \approx \infty$ se detallan en la tabla 4.1 y para $Z_L = 0$, en la tabla 4.2 con impedancias características de la línea $Z_o = 50, 150, 200, 250$ y 300 $[\Omega]$. Además, se agregan a ambas tablas los resultados obtenidos a partir de la simulación del voltaje en estado estacionario y el porcentaje de error al comparar lo entregado por la simulación con lo calculado teóricamente.

Cabe destacar que el cálculo realizado por la simulación en MATLAB considera en sus variables de salida, solo las primeras 10 reflexiones, por lo que el voltaje que obtiene tenderá al valor obtenido de la ecuación 4.1, pero no serán absolutamente iguales (voltaje en estado estacionario).

Tabla 4.1 Voltajes estacionarios obtenidos con ecuación 4.1 versus la suma de las primeras 10 reflexiones entregada por la simulación con $Z_L = \infty$.

$Z_o [\Omega]$	Γ_G	Voltaje estacionario. (Ecuación 4.1) [V]	Voltaje estacionario (simulación) [V]	% Error
50	0.714	3.64	3.364	7.6
100	0.5	7.11523	7.221	1.49
150	0.333	10.6676	10.686	0.17
200	0.2	13.9922	13.9893	0.02
250	0.091	17.1026	17.0963	0.04
300	0	19.994	19.984	0.05

Tabla 4.2 Voltajes estacionarios obtenidos con ecuación 4.1 versus la suma de las primeras 10 reflexiones entregada por la simulación con $Z_L = 0$.

$Z_o [\Omega]$	Γ_G	Voltaje estacionario. (Ecuación 4.1) [V]	Voltaje estacionario (simulación) [V]	% Error
50	0.714	7.601	8.4386	11.2
100	0.5	13.01	13.3	2.23
150	0.333	16.29	16.3644	0.46
200	0.2	18.15	18.2	0.28
250	0.091	19.28	19.305	0.13
300	0	20	20	0

Considerando que la simulación calcula los datos a partir de las primeras 10 reflexiones, la tendencia a que el porcentaje de error obtenido y plasmado en las tablas 4.1 y 4.2 aumente a medida que el coeficiente de reflexión en la fuente sea mayor es lógico, debido a que se tiene una mayor cantidad de reflexiones que concentran un aporte significativo del resultado final del voltaje, por lo que entre menor sea el coeficiente de reflexión, menor será la diferencia con los resultados teóricos que se obtienen abordando la suma infinita de reflexiones.

Debido a lo anteriormente mencionado es que para una impedancia $Z_0 = 50 [\Omega]$ tanto para $Z_L = \infty$ como $Z_L = 0$, el % de error es mayor y para un $\Gamma_G = 0$ el % de error es 0.

Se observa de todas maneras que el porcentaje de error es mínimo, este tiende muy cercanamente al valor teórico y que el mayor valor de porcentaje de error obtenido se debe netamente al número de reflexiones que son consideradas en el cálculo del código creado para la simulación.

Caso 3: Máximos y mínimos de voltaje

En la validación del caso 3 se analiza la forma de onda del voltaje para distintos valores del largo de la línea múltiplos de $\frac{\lambda}{4}$. Se eligen estos valores debido a que distancias múltiplos de $\frac{\lambda}{4}$ según como se detalla en el capítulo 2, se obtienen máximos y mínimos de voltaje.

La finalidad de este caso de validación es observar la distribución de los máximos y mínimos del voltaje en estado estacionario a través de la línea de transmisión al simular con sus terminales en circuito abierto y circuito cerrado, para posteriormente comparar la teoría de como debiese ser esta distribución.

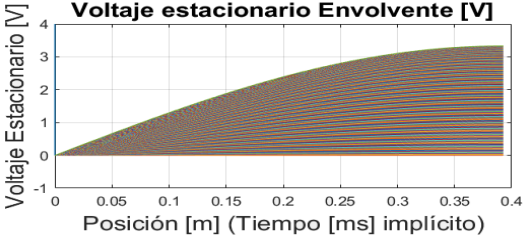
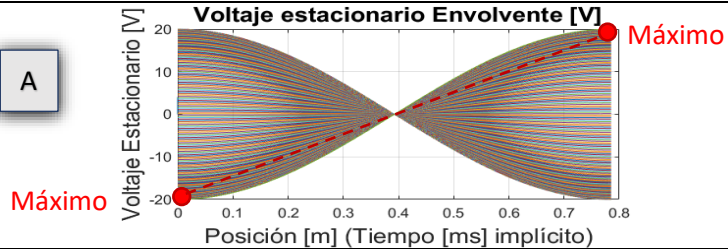
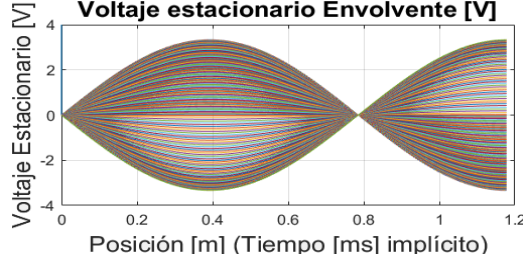
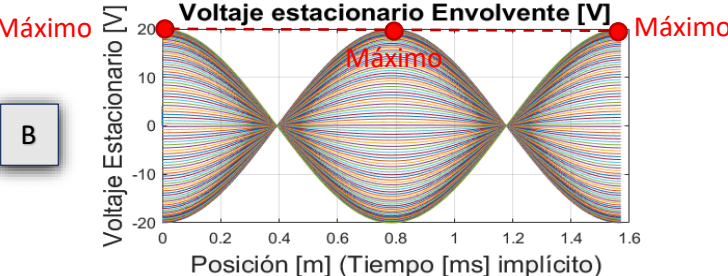
$Z_L \approx \infty$ (Circuito abierto):

Se ingresan en el software de simulación desarrollado las mismas las variables de entrada a la interfaz de la figura 4.4 pero con una impedancia de carga $Z_L \approx \infty$ ($100 [M\Omega]$) y distintos largos de línea iguales a $L = \frac{\lambda}{4}, 2\frac{\lambda}{4}, 3\frac{\lambda}{4}$ y $4\frac{\lambda}{4}$. Se extraen los resultados obtenidos a la tabla 4.3.

Para obtener los valores de L se necesita el valor de la longitud de onda de la señal. Esta se obtiene como indica la ecuación 4.2.

$$\lambda = \frac{2\pi[\text{rad}] \cdot f[\text{Hz}]}{\beta \left[\frac{\text{rad}}{\text{m}} \right] \cdot f[\text{Hz}]} = 2 \cdot \frac{\pi [\text{rad}]}{\beta \left[\frac{\text{rad}}{\text{m}} \right]} = 1.5708 [\text{m}] \quad (4.2)$$

Tabla 4.3 Voltaje estacionario obtenido con la simulación con $Z_L \approx \infty$ y $L = \frac{\lambda}{4}, L = 2\frac{\lambda}{4}, L = 3\frac{\lambda}{4}$ y $L = 4\frac{\lambda}{4}$.

Impedancia de carga $[\Omega]$	Largo línea λ [m]	Voltaje estacionario en la línea de transmisión.
$Z_L \approx \infty$	$\frac{\lambda}{4} = 0.3927$	
	$2\frac{\lambda}{4} = 0.7854$	
	$3\frac{\lambda}{4} = 1.1781$	
	$4\frac{\lambda}{4} = 1.5708$	

La teoría de líneas de transmisión dice que existe una distancia λ entre máximo y máximo de voltaje con igual fase y una distancia de $\lambda/2$ entre un máximo y un máximo de voltaje en contra fase, lo cual evidentemente se puede visualizar en los resultados obtenidos por la simulación en la tabla 4.3 señalados en “B” y “A” (filas 4 y 2 columna 3 de la tabla 4.3).

Además, la teoría dice que los mínimos y máximos se distribuyen de manera tal que, al simular un circuito abierto en los terminales de la carga, siempre existirá un máximo de voltaje en los terminales de la carga debido a que existe reflexión total del voltaje y con igual fase:

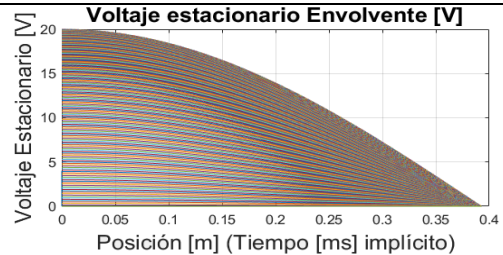
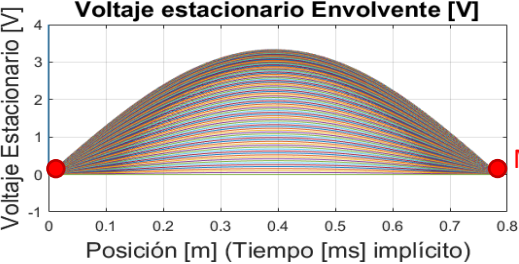
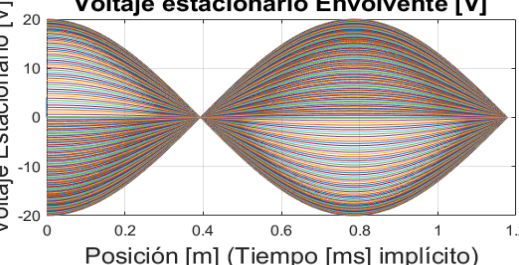
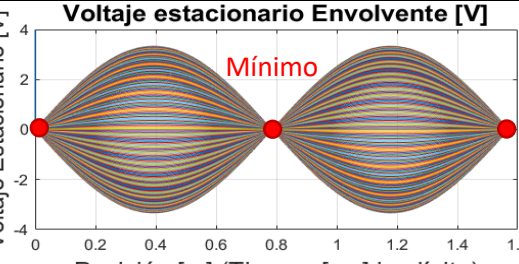
$$Z_L = \infty \rightarrow \Gamma_L = \frac{1 - \frac{Z_0}{Z_L}}{1 + \frac{Z_0}{Z_L}} \rightarrow \Gamma_L = 1 \rightarrow \text{Reflexión total y misma fase}$$

Esto se aprecia claramente en las gráficas que se obtienen de la simulación (figuras de la tabla 4.3).

$Z_L = 0$ (Circuito cerrado):

Se ingresan las mismas las variables de entrada a la interfaz de la figura 4.4 pero con impedancia de carga $Z_L = 0$ para distintos largos de línea iguales a $L = \frac{\lambda}{4}, 2\frac{\lambda}{4}, 3\frac{\lambda}{4}$ y $4\frac{\lambda}{4}$ y se extraen los resultados obtenidos a la tabla 4.4.

Tabla 4.4 Voltaje estacionario obtenida con la simulación con $Z_L = 0$ y $L = \frac{\lambda}{4}, L = 2\frac{\lambda}{4}, L = 3\frac{\lambda}{4}$ y $L = 4\frac{\lambda}{4}$

Impedancia de carga $[\Omega]$	Largo línea λ [m]	Voltaje estacionario en la línea de transmisión.
$Z_L = 0$	$\frac{\lambda}{4} = 0.3927$	
	$2\frac{\lambda}{4} = 0.7854$	
	$3\frac{\lambda}{4} = 1.1781$	
	$4\frac{\lambda}{4} = 1.5708$	

De igual manera que en el caso analizado con impedancia de carga infinita, la teoría de líneas de transmisión dice que existe una distancia λ entre mínimo y mínimo de voltaje con igual fase y una distancia de $\lambda/2$ entre un mínimo y un mínimo de voltaje en contra fase, lo cual evidentemente se puede visualizar también en los resultados obtenidos por la simulación en la tabla 4.4 señalados en “B” y “A” (filas 4 y 2 columna 3 de la tabla 4.4).

Además, la teoría dice que los mínimos y máximos se distribuyen de manera tal, que, al simular un circuito cerrado en los terminales de la carga, siempre existirá un mínimo de voltaje al final de la línea, tal como se puede apreciar en las gráficas que se obtienen de la simulación (figuras de la tabla 4.4).

A partir de las tablas 4.3 y 4.4 se concluye que la distribución de máximos y mínimos de voltaje concuerda con lo que dice la teoría.

Cabe mencionar que en las imágenes de las tablas 4.3 y 4.4 se representa el voltaje en estado estacionario en el dominio del espacio y el tiempo, por ende, en las gráficas se observa el valor del voltaje en función de la posición y además implícitamente en el tiempo.

Caso 4: Ejercicio teórico.

En el caso 4 de validación se resuelve un ejercicio de manera teórica y se compara lo obtenido con los resultados entregados por la simulación al ingresar en las variables de entrada los valores entregados por el ejercicio.

Ejercicio:

Un generador de 100 [MHz] con $V_G = 20 [V_{p-p}]$ y resistencia interna de 50 [Ω] se conecta a una línea sin pérdidas de 50 [Ω] de 3.6 [m] de longitud y se termina en una carga de $25+25j$ [Ω]. La constante de fase es de 2.1 [rad/m].

- a) Obtener la magnitud del voltaje en la entrada de la línea de transmisión y en la carga. **Respuesta:** $V(0) = 7.06 [V]$; $V_L = 4.47 [V]$
 b) Obtener la ROE. **Respuesta:** ROE = 2.62

Desarrollo teórico:

Se calculan las variables de salida que entrega la simulación: ROE, $V(0)$, $V(L)$, $|V|$ máx, $|V|$ mín, $V(x,t)$ máx, $V(x,t)$ mín y $|\Gamma_L|$ y se ingresan a la tabla 4.5.

Cálculo de los coeficientes de reflexión en la carga y en la fuente (ecuaciones 2.9 y 2.11):

$$\Gamma_L = \frac{(Z_L - Z_0)}{(Z_L + Z_0)} = \frac{25+25j-50}{25+25j+50} = 0.447e^{j2.034}$$

$$\Gamma_G = \frac{(Z_G - Z_o)}{(Z_G + Z_o)} = \frac{50 - 50}{50 + 50} = 0$$

Cálculo ROE (ecuación 2.13):

$$ROE = \frac{1 + |\Gamma_L|}{1 - |\Gamma_L|} = \frac{1 + 0.447}{1 - 0.447} = \mathbf{2.617}$$

Cálculo de la magnitud del voltaje propagado hacia la carga y hacia el generador (ecuaciones 2.5 y 2.6):

$$V_+ = V_g \frac{Z_o}{(Z_o + Z_G)} \frac{1}{(1 - \Gamma_G \Gamma_L e^{-2(\alpha + j\beta)L})} = 5 [V]$$

$$V_- = \Gamma_L V_+ e^{-2(\alpha + j\beta)L} = 2.235 [V]$$

Cálculo voltaje estacionario (ecuación 4.1) para $x = 0$ y $x = L$:

$$V(L = 0) = |V_+|(1 + \Gamma_L e^{-(2\beta Lj)}) = \mathbf{7.029}e^{-0.158j}$$

$$V(L = 3.6) = |V_+|(e^{-(j\beta L)} + \Gamma_L e^{-(2\beta Lj)} e^{(j\beta L)}) = \mathbf{4.473}e^{-0.81j}$$

Cálculo de voltajes máximos y mínimos de la onda estacionaria [7]:

$$V_{max} = \widehat{V(x)} = |V_+||1 + \Gamma_L| = 7.235 [V]$$

$$V_{min} = \widehat{V(x)} = |V_+||1 - \Gamma_L| = 2.235 [V]$$

Una vez obtenido los datos teóricos, se procede a resolver el ejercicio con la simulación.

Desarrollo simulación:

Se ingresan los datos del ejercicio a la interfaz interactiva, estos son los siguientes:

- Amplitud máxima de la fuente de voltaje V_g : 10 [V]
- Impedancia interna de la fuente Z_g : 50 [Ω]
- Impedancia característica Z_o : 50 [Ω]
- Impedancia de carga Z_L : 25+25j [Ω]
- Largo de la línea: 3.6 [m]
- Frecuencia operacional f_{op} : 100 [MHz]
- Constante de fase: 2.1 [rad/m]
- Constante de atenuación: 0 [Np/m]
- Velocidad de la simulación: 200

He de recordar que la variable de entrada “Velocidad de la simulación” es el valor exacto de la cantidad de puntos de muestreo de las señales representadas en la simulación. Es un valor que se deja

libre al usuario para que adapte según las capacidades de su computador, un número tal que el código se compile de manera continua y sin exigir de sobremanera al equipo.

En la figura 4.6 y 4.7 se observa la interfaz resultante al ingresar los parámetros de entrada entregados por el ejercicio y la gráfica del voltaje en estado estacionario en función del espacio y tiempo respectivamente. Se destaca en 4.7 el voltaje al inicio y al final de la línea de transmisión.

En la figura 4.8 se hace un “zoom” de los resultados obtenidos por la simulación. Se observan los voltajes máximos y mínimos obtenidos, el valor del ROE, la magnitud de los coeficientes de reflexión en la carga y en la fuente, la magnitud del voltaje máximo neto que se propaga hacia la carga y la magnitud del voltaje máximo neto que se propaga hacia la fuente.

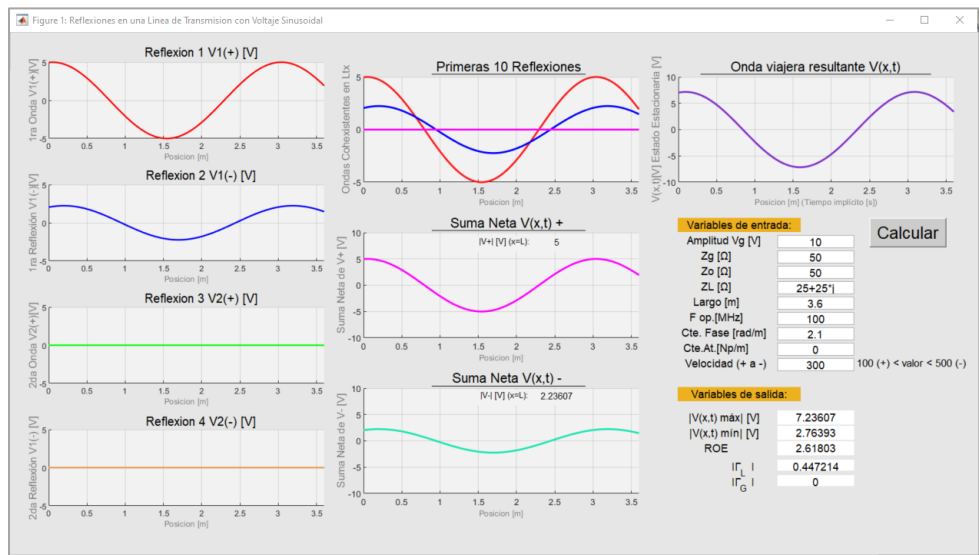


Figura 4.6 Resultados de la interfaz con los parámetros de entrada mencionados del ejercicio.

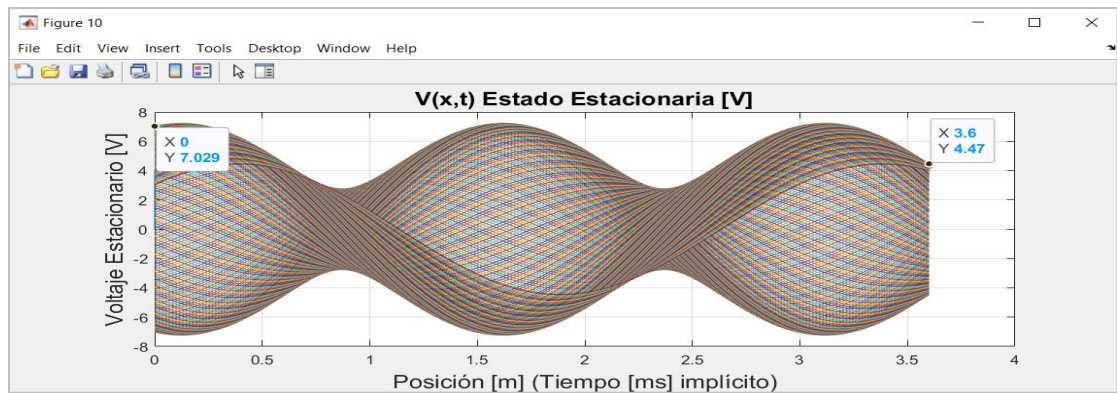


Figura 4.7 Voltaje en estado estacionario que indica $V(0) = 7.049$ y $V(L) = 4.509$.

Los valores entregados por las variables de salida de la interfaz se extraen a la tabla 4.5. Además, se agrega una columna que indica el porcentaje de error entre el valor obtenido a partir de la simulación y el valor obtenido de manera teórica.

Tabla 4.5 Resultados teóricos y de la simulación.

Variable	Valor obtenido desde la simulación	Valor teórico	% Error
ROE	2.618	2.617	0.04
$V(0)$	7.029 [V]	7.029 [V]	0
$V(L)$	4.47 [V]	4.473 [V]	0.01
$ V + $	5 [V]	5 [V]	0
$ V - $	2.236 [V]	2.235 [V]	0.04
V_{max}	7.236 [V]	7.235 [V]	0.01
V_{min}	2.764 [V]	2.765 [V]	0.04
$ \Gamma_L $	0.447	0.447	0
$ \Gamma_G $	0	0	0

De la tabla se puede concluir que los datos obtenidos a partir de la simulación poseen un porcentaje de error despreciable en comparación con la teoría, y además, los datos pedidos por el ejercicio que se obtuvieron a partir de la simulación concuerdan con los valores entregados como respuesta en el enunciado.

Cabe destacar que de la gráfica externa que representa el voltaje en estado estacionario que se despliega al realizar la simulación (Figura 4.7) permite realizar un estudio o análisis más exhaustivo del voltaje en la línea de transmisión en cualquier posición de interés.

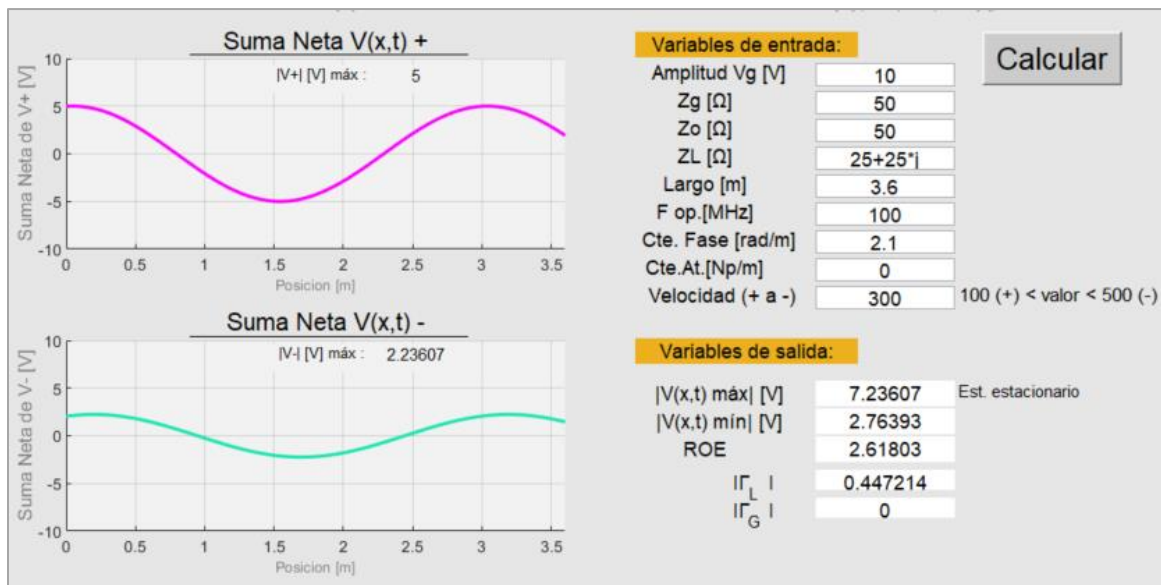


Figura 4.8 “Zoom” de las variables de entrada y salida de la simulación.

Una vez realizado el análisis de los cuatro casos:

- Caso 1 “Análisis para impedancias de carga $Z_L = 0$ y $Z_L = \infty$ ”
- Caso 2 “Valores de voltaje en estado estacionario”

- Caso 3 “Máximos y mínimos de voltaje”
- Caso 4: Resolución de ejercicio.

Podemos concluir que la simulación 4.1: “Voltaje en función del espacio y tiempo” representa el correcto comportamiento de las reflexiones de las señales en la carga y en la fuente de la línea de transmisión, tiene una correcta distribución de máximos y mínimos de voltaje según las impedancias que tenga la línea, entrega un valor correcto del voltaje en estado estacionario y permite resolver de manera confiable ejercicios básicos de líneas de transmisión, por lo que se considera finalmente validada.

4.2 Voltaje, corriente e impedancia aparente fasorial

4.2.1 Descripción de la simulación

La simulación “Voltaje, corriente e impedancia fasorial” busca analizar el valor que tiene el voltaje, la corriente y la impedancia aparente en dominio fasorial considerando una fuente de voltaje senoidal.

Las variables de entrada a la interfaz son: constante de atenuación α , constante de fase β , impedancia de carga Z_L , impedancia interna de la fuente Z_g , impedancia característica Z_o , amplitud de la fuente de voltaje V_g , largo de la línea L y un punto de interés x de la línea.

En esta interfaz de simulación, se muestran 4 gráficas (figura 4.9). Cada una de estas gráficas representa lo siguiente:

- Gráfica 1: Magnitud del voltaje en dominio fasorial a lo largo de la línea.
- Gráfica 2: Magnitud de la corriente en dominio fasorial a lo largo de la línea.
- Gráfica 3: Magnitud de la impedancia aparente a lo largo de la línea.
- Gráfica 4: Parte real versus imaginaria de la impedancia aparente.

Las variables de salida de la interfaz en el caso de que no existan pérdidas en la línea de transmisión son: magnitud del voltaje $V(x)$, la magnitud de la corriente $I(x)$, la impedancia aparente $Z(x)$ y el coeficiente de reflexión $\Gamma(x)$ para una posición $x[m]$ elegida, voltaje máximo V_{max} , voltaje mínimo V_{min} , corriente máxima I_{max} , corriente mínima I_{min} de la señal estacionaria y el valor de la razón de onda estacionaria ROE.

Las variables de salida de la interfaz si existe atenuación son: la impedancia aparente $Z(x)$, el coeficiente de reflexión $\Gamma(x)$, la magnitud de la corriente $I(x)$ y la magnitud del voltaje $V(x)$ para una posición $x[m]$ elegido.

La simulación permite analizar principalmente la periodicidad de los valores de voltaje, corriente e impedancia aparente, además de poder visualizar que la corriente y el voltaje están en contra fase.

En el caso de la presencia de pérdidas en la línea, la simulación permite observar la envolvente exponencial decreciente que se forma con la amplitud de la señal al propagarse y la espiral resultante en el análisis de la impedancia aparente.

4.2.2 Software desarrollado

Se realiza a través de la simulación desarrollado en MATLAB la interfaz de la figura 4.9 en la que se puede observar la descripción entregada en la sección 4.2.1.

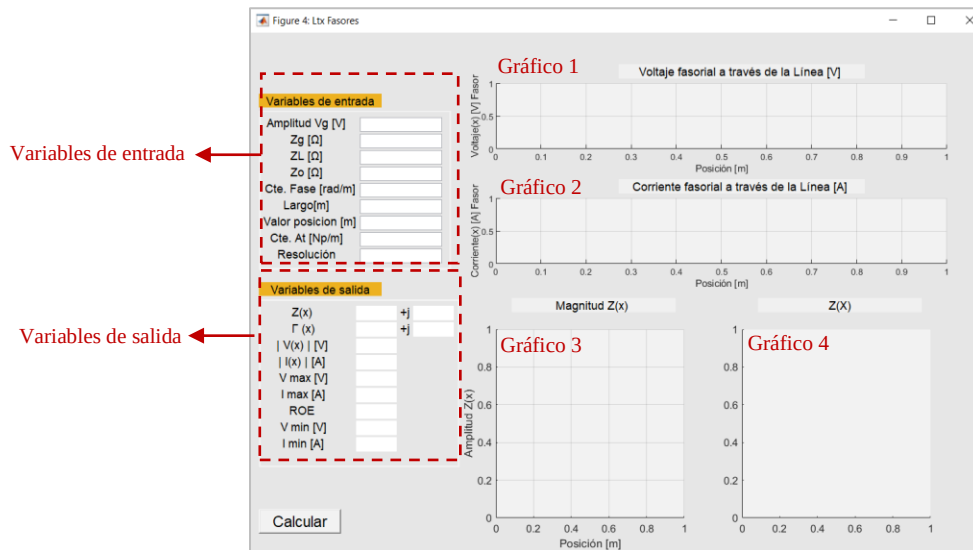


Figura 4.9 Interfaz de la simulación 4.2.

Se destaca en la figura 4.9 la enumeración de cada gráfico para simplificar la comprensión de lo que representa cada uno de ellos según la descripción entregada en la sección 4.2.1. Además, se resalta el área donde se ingresan las variables de entrada en la interfaz y el área donde se entregarán las variables de salida.

A modo de ejemplo ilustrativo de la simulación, se ingresan valores específicos como variables de entrada para la visualización de los resultados entregados por la interfaz. Los valores asignados a las variables de entrada son:

- Amplitud de la fuente de voltaje V_g : 20 [V]
- Impedancia interna de la fuente Z_g : 500 [Ω]
- Impedancia característica Z_o : 150 [Ω]
- Impedancia de carga Z_L : 50 [Ω]
- Largo de la línea: 10 [m]
- Valor de posición en la línea: 10 [m]
- Constante de fase: 2 [rad/m]
- Constante de atenuación: 0 [Np/m]
- Resolución: 3000

La variable de entrada “Resolución” corresponde, al igual que la variable de entrada “Velocidad de la simulación” en la simulación 4.1, al valor exacto de la cantidad de puntos de muestreo de las señales representadas en la simulación. A mayor sea el valor ingresado, más suaves serán las curvas graficadas y más lenta será la respuesta final de la compilación del código. Debido a que la simulación representa gráficas estáticas, se sugiere ingresar valores entre 1000 a 5000 según la capacidad de respuesta del equipo en que se esté compilando el código.

Los resultados entregados por la simulación se observan en la figura 4.10.

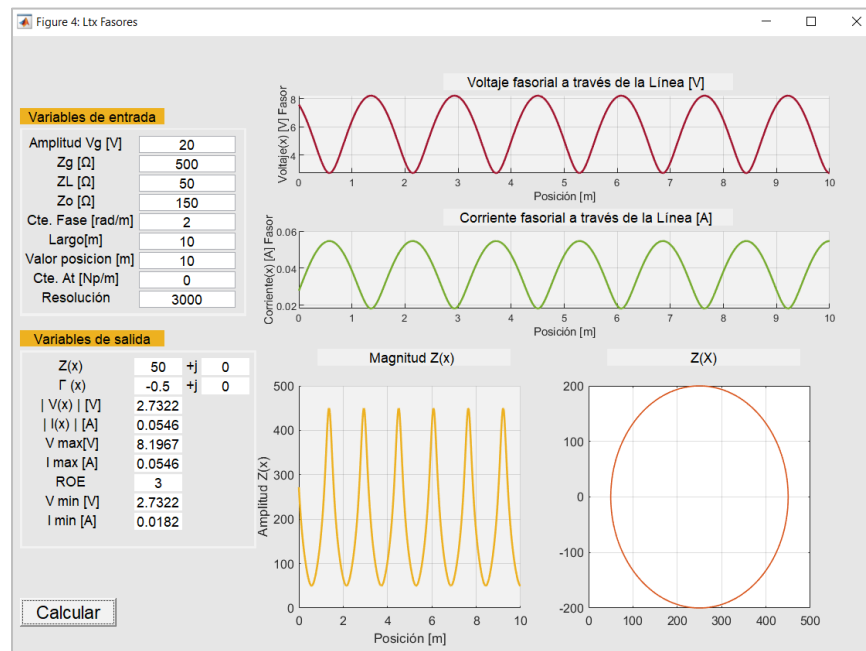


Figura 4.10 “Voltaje, corriente e impedancia aparente fasorial”

De la figura 4.10 se observan las gráficas de voltaje, corriente e impedancia aparente en dominio fasorial. Se observa claramente la periodicidad del valor que tiene cada una a través de la línea de transmisión.

En la gráfica 1 se representa el voltaje en estado estacionario, en la gráfica 2 se ilustra la corriente en estado estacionario. Se puede apreciar claramente que ambas señales están en contra fase, es decir, cuando existe un máximo de voltaje, existe un mínimo de corriente.

En el gráfico 3 se observa la magnitud de la impedancia aparente a lo largo de la línea de transmisión y en la gráfica 4 se representa específicamente la relación entre la parte real y la parte imaginaria de la impedancia aparente, es decir, se grafica $(x, y) = (real(Z_{Aparente}), imag(Z_{Aparente}))$.

Debido a que no existen pérdidas en la línea de transmisión, los datos entregados por la simulación son: la magnitud del voltaje $V(x)$, la magnitud de la corriente $I(x)$, la impedancia aparente $Z(x)$ y el coeficiente de reflexión $\Gamma(x)$ para una posición $x[m]$ elegida, voltaje máximo V_{max} , voltaje mínimo

V_{min} , corriente máxima I_{max} , corriente mínima I_{min} de la señal estacionaria y el valor de la razón de onda estacionaria ROE.

Los valores de las variables de salida entregados por la simulación son los siguientes:

- Impedancia aparente $Z(x)$: 50 [Ω]
- Coeficiente de reflexión $\Gamma(x)$: -0.5
- Magnitud del voltaje en x $|V(x)|$: 2.73 [V]
- Magnitud de corriente en x $|I(x)|$: 0.055 [A]
- Razón de onda estacionaria ROE: 3
- Voltaje máximo en estado estacionario V_{max} : 8.2 [V]
- Voltaje mínimo en estado estacionario V_{min} : 2.73 [V]
- Corriente máxima en estado estacionario I_{max} : 0.55 [A]
- Corriente mínima en estado estacionario I_{min} : 0.019 [A]

Los primeros cuatro valores entregados como variable de salida indican el valor de la impedancia, el coeficiente de reflexión, la magnitud del voltaje y de la corriente en el punto $x = 10$ de la línea, es decir, en la carga de la línea de transmisión.

Los últimos cuatro valores de voltaje y corriente máximo y mínimo que alcanzan en estado estacionario corresponden a los máximos y mínimos observados en las gráficas 1 y 2.

Una vez detallada e ilustrada la interfaz diseñada se procede a realizar la validación de los datos numéricos entregados por la simulación.

4.2.3 Validación de la simulación

La simulación “Voltaje, corriente e impedancia fasorial” se valida resolviendo el mismo ejercicio realizado para validar la simulación 4.1 (Caso 4).

Ejercicio: Un generador de 100 [MHz] con $V_G = 20$ [V_{p-p}] y resistencia interna de 50 [Ω] se conecta a una línea sin pérdidas de 50 [Ω] de 3.6 [m] de longitud y se termina en una carga de $25+25j$ [Ω]. La constante de fase es de 2.1 [rad/m].

- a) Obtener la magnitud del voltaje en la entrada de la línea de transmisión y en la carga. **Respuesta:** $V(0) = 7.06$ [V] ; $V_L = 4.47$ [V]
- b) Obtener la ROE. **Respuesta:** ROE = 2.62

Desarrollo teórico:

Se calculan todos los valores de las variables de salida de la simulación: La magnitud del voltaje $V(x)$, la magnitud de la corriente $I(x)$, la impedancia aparente $Z(x)$ y el coeficiente de reflexión $\Gamma(x)$ para una posición $x[m]$ elegida, voltaje máximo V_{max} , voltaje mínimo V_{min} , corriente máxima I_{max} , corriente mínima I_{min} de la señal estacionaria y el valor de la razón de onda estacionaria ROE.

Los resultados teóricos previamente calculados en la sección 4.1.3 se extraen de la tabla 4.5 a la tabla 4.6 y los faltantes se calculan a continuación:

Impedancia aparente al comienzo de la línea de transmisión $x = 0$ (ecuación 2.12):

$$Z(0) = Z_o \cdot \frac{1 + (\Gamma(0) = \Gamma_L e^{-2\beta l})}{1 - (\Gamma(0) = \Gamma_L e^{-2\beta l})} = 94.4 - 52.37j$$

Corriente al inicio y al final de la línea de transmisión, $x = 0$ y $x = L$ respectivamente:

$$I(0) = \frac{V(0)}{Z(0)} = 0.0651e^{0.345j} [A]$$
$$I(L) = \frac{V(L)}{Z(L)} = 0.1265e^{-1.5954j} [A]$$

Corriente máxima y mínima de la onda estacionaria [5]:

$$I_{max} = I(\widehat{x}) = \frac{V_{max}}{Z_o} = 0.14472 [A]$$
$$I_{min} = I(\widetilde{x}) = \frac{V_{min}}{Z_o} = 0.05529 [A]$$

Los resultados obtenidos se consolidan en la tabla 4.6.

Resolución con la simulación:

Los variables de entrada ingresadas a la interfaz y las variables de salida entregadas por la interfaz se observan en las figuras 4.11 y 4.12 respectivamente. La diferencia entre ambos casos de la figura 4.11 corresponde al valor asociado a la variable de entrada “valor posición” la cual indica el punto de evaluación de la línea de transmisión.

Se tendrá la información para $x = 0 [m]$ (figura 4.12 izquierda) y $x = L = 3.6 [m]$ (figura 4.12 derecha) de las siguientes variables de salida:

- Impedancia aparente $Z(x)$
- Coeficiente de reflexión $\Gamma(x)$
- Magnitud del voltaje en x $|V(x)|$

- Magnitud de corriente en x $|I(x)|$

Las demás variables de salida son:

- Voltaje máximo en estado estacionario V_{max}
- Voltaje mínimo en estado estacionario V_{min}
- Corriente máxima en estado estacionario I_{max}
- Corriente mínima en estado estacionario I_{min}
- ROE

Deben ser exactamente iguales para cualquier valor asignado a la variable “Valor posición” ya que son independientes de este parámetro.

Variables de entrada		Variables de entrada	
Amplitud Vg [V]	10	Amplitud Vg [V]	10
Zg [Ω]	50	Zg [Ω]	50
ZL [Ω]	25+25*j	ZL [Ω]	25+25*j
Zo [Ω]	50	Zo [Ω]	50
Cte. Fase [rad/m]	2.1	Cte. Fase [rad/m]	2.1
Largo[m]	3.6	Largo[m]	3.6
Valor posicion [m]	0	Valor posicion [m]	3.6
Cte. At [Np/m]	0	Cte. At [Np/m]	0
Resolución	300	Resolución	300

Figura 4.11 Variables de entrada de la simulación 4.2 con $x = 0$ [m] y $x = 3.6$ [m].

Tal como se menciona anteriormente, en la figura 4.11 se muestra que todos los valores de las variables de entrada son exactamente los mismos, a excepción del valor de la posición donde se necesita saber cuánto es la impedancia aparente, el coeficiente de reflexión, la magnitud del voltaje y la magnitud de la corriente. En la figura 4.12, se muestran los valores entregados por la simulación en la posición inicial de la línea de transmisión y en la carga. Además, se entrega el valor de los voltajes y corrientes máximas y mínimas y el valor del ROE en la línea de transmisión.

Variables de salida		Variables de salida	
Z(x)	94.465 +j -52.40	Z(x)	25 +j 25
Γ (x)	0.3882 +j -0.221	Γ (x)	-0.2 +j 0.4
V(x) [V]	7.0295	V(x) [V]	4.4721
I(x) [A]	0.0650	I(x) [A]	0.1264
V max[V]	7.2359	V max[V]	7.2359
I max [A]	0.1447	I max [A]	0.1447
ROE	2.6173	ROE	2.6173
V min [V]	2.7645	V min [V]	2.7645
I min [A]	0.0552	I min [A]	0.0552

Figura 4.12 Variables de salida de la simulación 4.2 con $x = 0$ [m] y $x = 3.6$ [m].

Se puede apreciar de la figura 4.12 que los datos del voltaje máximo y mínimo y de la corriente máxima y mínima junto con el valor del ROE coincide tal como debería. Los valores que si cambian entre ambos casos simulados son los que dependen de la posición x de análisis ingresada.

Se extraen a la tabla 4.6 los datos obtenidos en las variables de salida que se observan en la figura 4.12. Además, se agrega una columna que indica los porcentajes de error entre lo obtenido a partir de la simulación con lo obtenido de manera teórica.

Tabla 4.6 Datos teóricos versus datos obtenidos por la simulación.

Variable	Valor obtenido desde la simulación	Valor teórico	% Error
ROE	2.617	2.617	0.00
$ V(0) $	7.029 [V]	7.029 [V]	0.00
$ V(L) $	4.472 [V]	4.473 [V]	0.02
$ I(0) $	0.065 [A]	0.065 [A]	0.00
$ I(L) $	0.126 [A]	0.127 [A]	0.79
V_{max}	7.236 [V]	7.235 [V]	0.01
V_{min}	2.765 [V]	2.765 [V]	0.00
I_{max}	0.145 [A]	0.145 [A]	0.00
I_{min}	0.055 [A]	0.055 [A]	0.00
$ \Gamma_L $	0.447	0.447	0.00
$ \Gamma_G $	0.000	0.000	0.00
$Z(0)$	$94.5 - 52j$	$94.4 - 52.37j$	0.21
$Z(L)$	$25 + 25j$	Es dato y coincide	0.00

A partir de la tabla 4.6 se puede concluir que los datos obtenidos de la simulación poseen un porcentaje de error despreciable en comparación con la teoría.

Como apoyo a la validación de la simulación 4.2 se analiza el resultado obtenido del voltaje y la corriente en el espacio al ingresar las variables de entrada de la figura 4.11, pero con impedancia de carga $Z_L = 0$ e impedancia de carga $Z_L \approx \infty$ ($100 [M\Omega]$). Los resultados obtenidos se observan en la figura 4.13.

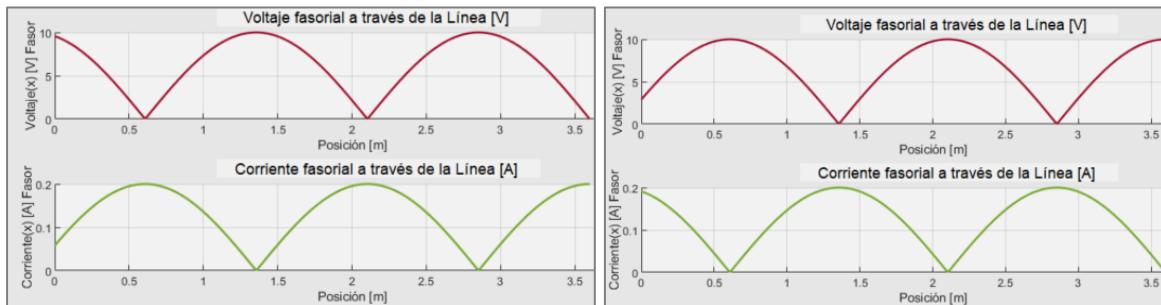


Figura 4.13 Voltaje y corriente para $Z_L = 0$ y $Z_L \approx \infty$ respectivamente.

El análisis se realiza con la finalidad de corroborar la teoría de máximos y mínimos ubicados a lo largo de la línea. En la figura 4.13 se observa que efectivamente se cumple que en la carga existe un mínimo de voltaje y un máximo de corriente en el caso de que la impedancia de carga simule un circuito cerrado con $Z_L = 0$, y además, que se tiene un máximo de voltaje y un mínimo de corriente en el caso de que la impedancia de carga simule un circuito abierto con $Z_L \approx \infty$ ($100 [M\Omega]$), tal como indica la teoría.

Además, se observa a partir de la figura 4.13 que cuando existe un máximo de voltaje existe un mínimo de corriente y viceversa.

Se puede concluir posteriormente a los resultados obtenidos que la simulación “Voltajes, corrientes e impedancia aparente fasorial” concuerda con la teoría y se considera validada.

4.3 Voltaje transiente con fuente de voltaje pulsada

4.3.1 Descripción de la simulación

La simulación “Voltaje para fuente pulsada” pretende complementar visualmente el proceso de reajuste del voltaje en una línea de transmisión al comienzo de la excitación de la línea considerando una fuente de voltaje pulsada.

Las variables de entrada de esta interfaz son: la amplitud del pulso, la velocidad de fase de la señal, la impedancia característica de la línea Z_o , el largo de la línea, los coeficientes de reflexión Γ_L y Γ_G , el ancho del pulso en términos del largo de la línea y un valor de posición en la línea $x[m]$ en el que se quiera graficar el voltaje en el punto x de la línea constante en función del tiempo $V(x = \text{constante}, t)$.

La simulación tiene un total de 7 gráficas (figura 4.14) y cada una de ellas representa lo siguiente:

- Gráfica 1: Señal de voltaje incidente 1 en la carga.
- Gráfica 2: Señal de voltaje reflejada 1 en la carga.
- Gráfica 3: Señal de voltaje incidente 2 en la carga.
- Gráfica 4: Señal de voltaje reflejada 2 en la carga.
- Gráfica 5: Señal de voltaje incidente 3 en la carga.
- Gráfica 6: Voltaje incidente y reflejado por separado en el tiempo para un $x [m]$ constante, para un periodo equivalente a 5 reflexiones.
- Gráfica 7: Voltaje en el tiempo neto para un $x[m]$ constante, para un periodo equivalente a 5 reflexiones.

Además de las gráficas programadas en la interfaz se despliega una gráfica aparte en la que se observa lo mismo de la gráfica 7, con la diferencia de que se puede obtener toda la data de interés punto a punto del voltaje neto y del tiempo.

La simulación permite dar a entender de mejor manera el comportamiento del voltaje en su etapa transiente inicial en una línea de transmisión. El objetivo es comprender cómo se tiende finalmente al valor entregado por la ecuación 4.1 de líneas de transmisión.

4.3.2 Software desarrollado

Se realiza a través de la simulación desarrollado en MATLAB, la interfaz de la figura 4.14 en la que se puede observar la descripción entregada en la sección 4.3.1.

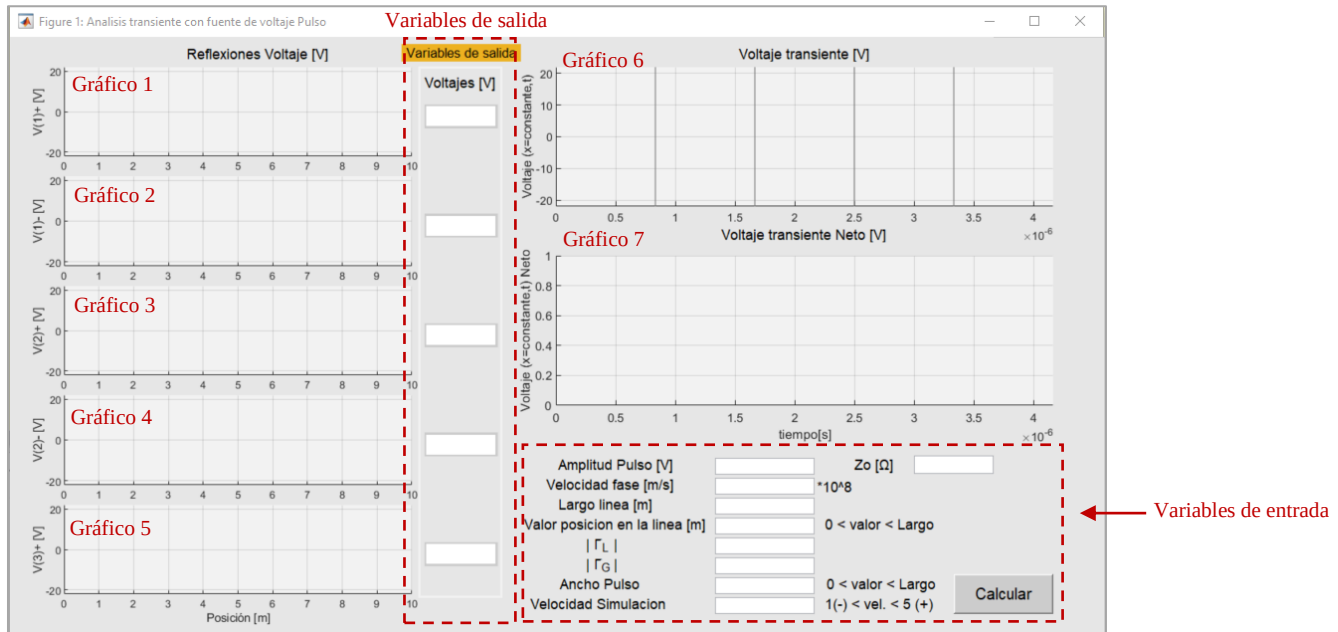


Figura 4.14 Interfaz de la simulación 4.3

En la figura 4.14 se destaca la enumeración de cada gráfico para simplificar la comprensión de lo que representa cada uno de ellos según la descripción entregada en la sección 4.3.1. Además, se resalta el área donde se ingresan las variables de entrada en la interfaz y el área donde se entregarán las variables de salida.

A modo de ejemplo ilustrativo de la simulación, se ingresan valores específicos a las variables aleatorias de entrada para la visualización de los resultados entregados por la interfaz. Los valores asignados a las variables de entrada son:

- Amplitud del pulso: 20 [V]
- Velocidad de fase: $3 \cdot 10^8 \left[\frac{m}{s} \right]$
- Largo de la línea: 10 [m]
- Valor posición en la línea: 5 [m]
- Magnitud coeficiente de reflexión en la carga $|\Gamma_L|$: 0.5

- Magnitud coeficiente de reflexión en la fuente $|\Gamma_G|$: 0.5
- Ancho del pulso: 3 (Indica un ancho $3/Largo$ de la línea)
- Velocidad simulación: 1
- Impedancia característica Z_o : 50 $[\Omega]$

La velocidad de la simulación tiene relación directa con el número de puntos que componen las curvas de las gráficas en el código. En el caso de la simulación 4.3, a menor valor, más lenta será la respuesta final de la compilación del código. Se sugiere usar un valor entre 1 a 5, siendo 1 la velocidad más lenta y 5 la velocidad más rápida.

La variable de entrada “Ancho del pulso” representa una proporción de acuerdo con el largo de la línea, es decir el valor L ingresado indicará que el ancho del pulso corresponderá a una L parte del largo total de la línea. A modo de ejemplo: Si la línea mide 10 metros y la variable “Ancho del pulso” es 5, entonces el ancho del pulso será de un 50% del largo de la línea.

Los resultados entregados por la simulación se observan en la figura 4.15. En ella se muestra tanto la interfaz principal que representa a la simulación 4.3 señalada en la figura 4.14 junto a la gráfica externa que se despliega al finalizar la primera etapa de compilación del código. Esta gráfica externa representa el voltaje transiente en el tiempo de simulación correspondiente a 5 reflexiones. Se puede ver con mayor detalle en la figura 4.16.

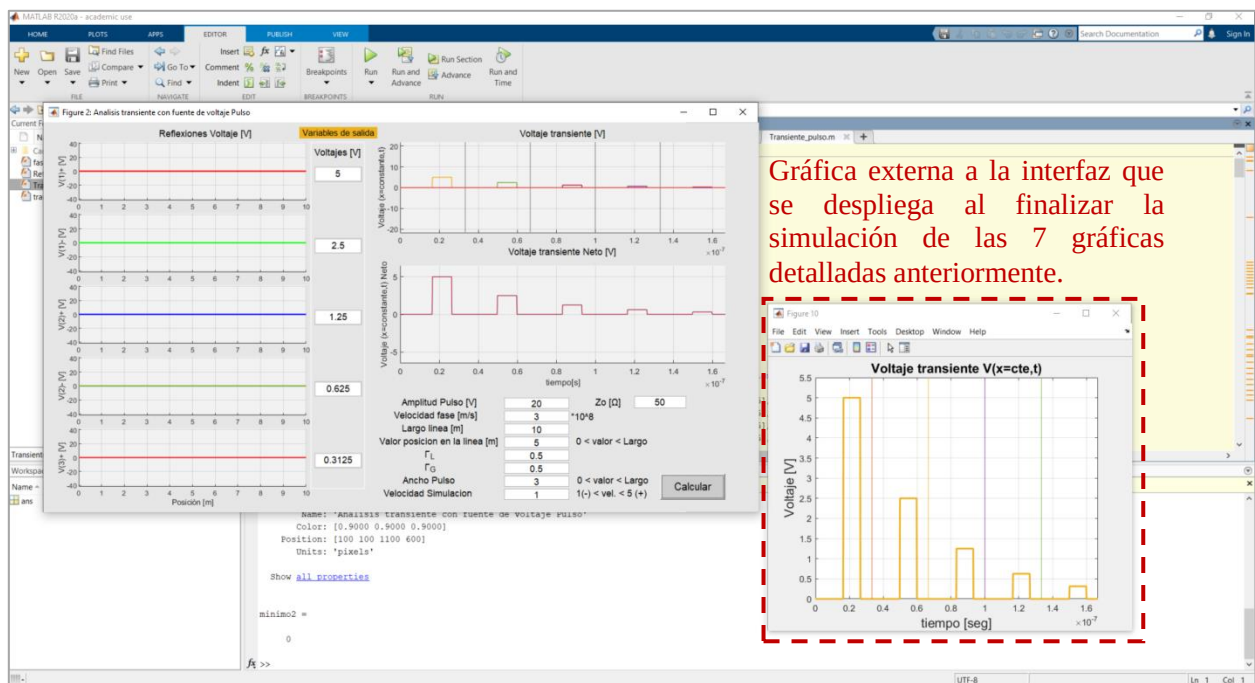


Figura 4.15 “Voltaje transiente con fuente de voltaje pulsada”

La interfaz entrega como variables de salida los valores siguientes:

- Amplitud de la señal de voltaje incidente 1 en la carga: 5 [V]
- Amplitud de la señal de voltaje reflejada 1 en la carga: 2.5 [V]

- Amplitud de la señal de voltaje incidente 2 en la carga: 1.25 [V]
- Amplitud de la señal de voltaje reflejada 2 en la carga: 0.625 [V]
- Amplitud de la señal de voltaje incidente 3 en la carga: 0.3125 [V]

La gráfica externa a la interfaz que se despliega una vez finalizada la simulación de la interfaz principal de la figura 4.14, indica el comportamiento transiente del voltaje existente en una línea de transmisión al excitarla con una fuente de voltaje pulsada en un punto específico de la línea.

En este ejemplo ilustrativo, se visualiza en la figura 4.16 el voltaje en función del tiempo en el punto medio de la línea para un periodo equivalente a 5 reflexiones.

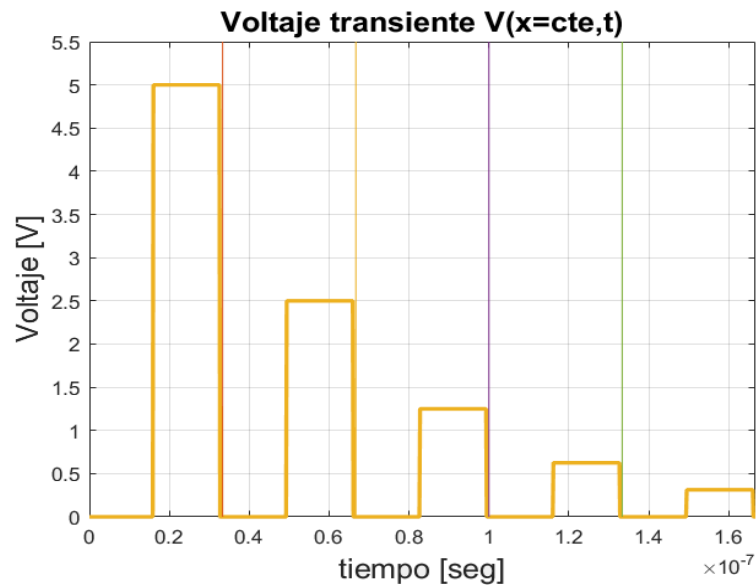


Figura 4.16 Voltaje transiente $V(x = 5, t)$.

A partir de la figura 4.16 se observa como al momento de excitar esta línea de transmisión el pulso a medida que se refleja tanto en la carga como en la fuente va disminuyendo su magnitud según el valor de los coeficientes de reflexión. En este caso específico disminuye su magnitud a la mitad cada vez que el pulso se refleja en la carga y en la fuente.

Las líneas de colores verticales indican un periodo completo de tiempo de lo que demora en propagarse el pulso desde la fuente a la carga o viceversa. Al observar detenidamente la figura 4.16 se ve claramente que existen 5 periodos completos de propagación del pulso.

Una vez detallada e ilustrada la interfaz diseñada, se procede a realizar la validación de los datos numéricos entregados por la simulación.

4.3.3 Validación de la simulación

La simulación “Voltaje transiente con fuente de voltaje pulsada” se valida resolviendo un ejercicio teórico.

Ejercicio teórico:

Un generador de pulsos alimenta una línea de transmisión con un voltaje de 15 [V]. La línea es de longitud $L = 10$ [m], tiene una impedancia característica de $Z_o = 50$ [Ω], el coeficiente de reflexión en la carga es de $\Gamma_L = 0.5$ y en la fuente de $\Gamma_G: -1/3$. Además, se sabe que la velocidad de fase es de $V_p = 2.12134 \times 10^8 \left[\frac{m}{s} \right]$ y que es una línea sin pérdidas.

Con los datos entregados, graficar la distribución de voltaje en el centro de la línea de transmisión (es decir, a una distancia de 5 [m]) en función del tiempo entre $t = 0$ y $t = 5T$ [s], siendo $t = 0$ el momento en que se enciende el generador. Considere, además, que la duración del pulso tiene una duración de T segundos e intervalos de repetición de $10T$ [s], siendo T el tiempo que tarda el pulso en propagarse por la línea de transmisión desde $Z = 0$ [m] a $Z = L$ [m].

Desarrollo teórico:

En primer lugar, se deben obtener las amplitudes de los 3 primeros pulsos incidente y los primeros dos pulsos reflejados en la carga que existe en la línea de transmisión. Se calculan en la tabla 4.7 la amplitud del voltaje de cada una.

Tabla 4.7 Resultados teóricos de la amplitud de las reflexiones de voltaje.

Reflexión	Voltajes incidentes y reflejados en la carga	Valores teóricos [V]
1	$V_{1\text{ incidente}}$	$V1(+) = V_G \cdot \frac{Z_o}{Z_G + Z_o} = 10$
2	$V_{1\text{ reflejado}}$	$V1(-) = 10\Gamma_L \approx 5$
3	$V_{2\text{ incidente}}$	$V2(+) = 10\Gamma_L\Gamma_G \approx -1.667$
4	$V_{2\text{ reflejado}}$	$V2(-) = 10\Gamma_L^2\Gamma_G \approx -0.83$
5	$V_{3\text{ incidente}}$	$V3(+) = 10\Gamma_L^2\Gamma_G^2 \approx 0.278$

A continuación, se calcula el tiempo total en propagarse el pulso a través de la línea de transmisión T . Se obtiene de la siguiente manera:

$$T = \frac{\text{distancia [m]}}{V_p \left[\frac{m}{s} \right]} = \frac{10}{2.12134 \times 10^8} = 4.714^{-8} \text{ [s]}$$

Una vez obtenido el valor del tiempo de propagación del pulso T , se calcula el tiempo exacto en que la señal pasa por el punto de interés $z = 5$ [m] y el instante en el que termina de pasar por $z = 5$ [m].

Los valores obtenidos se consolidan en la tabla 4.8.

Tabla 4.8 Resultado de los tiempos en que el pulso pasa por $z = 5 [m]$.

Reflexión	Instante al que pasa por $z = 5 [m]$	Instante al que pasa por $z = 5 [m]$ en $[ns]$	Instante al que termina de pasar por $z = 5 [m]$	Instante en el que termina de pasar por $z = 5 [m]$ en $[ns]$
1	$T/2$	0.2357	$\frac{T}{2} + T$	0.7071
2	$3 T/2$	0.7071	$3\frac{T}{2} + T$	0.011785
3	$5 T/2$	0.011785	$5\frac{T}{2} + T$	0.016499
4	$7 T/2$	0.016499	$7\frac{T}{2} + T$	0.021213
5	$9 T/2$	0.021213	$9\frac{T}{2} + T$	0.025927

Se puede interpretar a través de lo obtenido en las tablas 4.7 y 4.8 que apenas el primer pulso termine de pasar por $z = 5 [m]$, comienza inmediatamente a pasar el pulso de la señal de voltaje reflejada.

Posteriormente, terminando de pasar el pulso reflejado por $z = 5 [m]$, vuelve a pasar el segundo pulso de voltaje incidente y así sucesivamente.

Finalmente, se obtiene una gráfica en que cada valor de voltaje obtenido de la tabla 4.7 con duración de tiempo T (ancho del pulso), estarán distribuidos secuencialmente, un pulso al lado del otro en los $5T$ de interés.

Resolución con la simulación:

Se introducen los valores del ejercicio en las variables de entrada de la simulación 4.3 y los resultados se visualizan en la figura 4.19. Las variables de entrada ingresadas a la interfaz se observan en la figura 4.18.

The screenshot shows a simulation input interface with the following parameters and values:

- Amplitud Pulso [V]: 15
- Velocidad fase [m/s]: 2.12134 *10^8
- Largo línea [m]: 10
- Valor posicion en la línea [m]: 5 (with a note: 0 < valor < Largo)
- Γ_L : 0.5
- Γ_G : -0.333333
- Ancho Pulso: 10 (with a note: 0 < valor < Largo)
- Velocidad Simulación: 1 (with a note: 1(-) < vel. < 5 (+))
- $Z_0 [\Omega]$: 50
- A "Calcular" button is located at the bottom right.

Figura 4.18 Valores ingresados a las variables de entrada de la simulación 4.3.

En la figura 4.18 se observa que se ingresan con exactitud los valores entregados por el ejercicio a la simulación 4.3. La simulación permite hasta 7 números decimales.

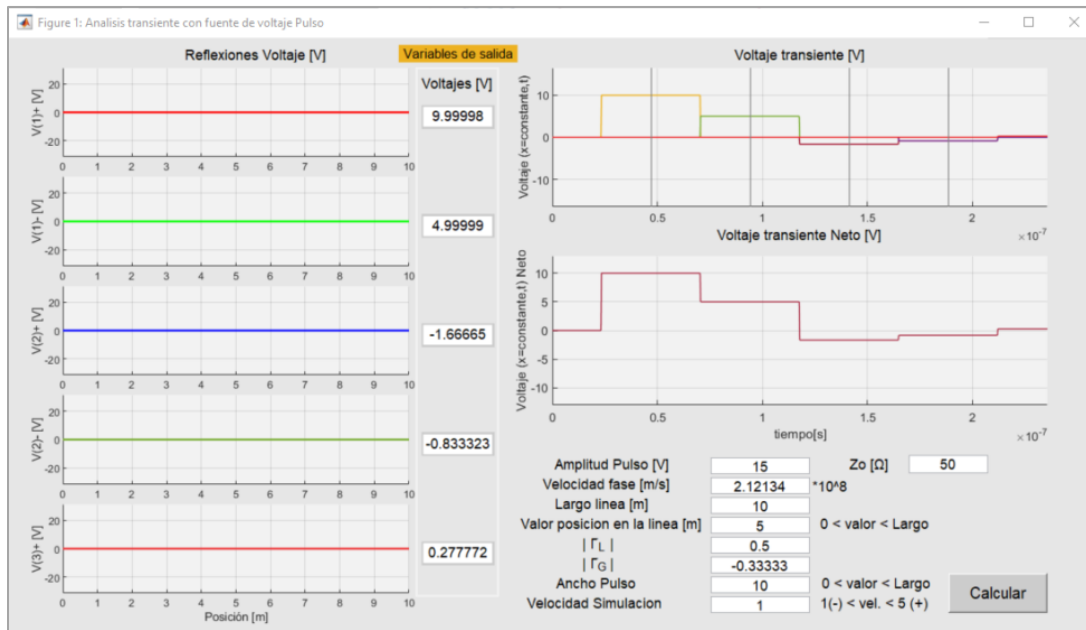


Figura 4.19 Resultados al ingresar las variables de la figura 4.18.

Se extraen los valores de las variables de salida correspondiente a los primeros 3 voltajes incidentes y los primeros 2 voltajes reflejados en la carga entregados por la simulación 4.3 a la tabla 4.9 para posteriormente realizar la comparación correspondiente con los cálculos obtenidos de manera teórica.

Tabla 4.9 Data extraída de la figura 4.19.

Voltajes incidentes y reflejados en la carga	Valores obtenidos por la simulación [V]
$V_{1\text{ incidente}}$	10
$V_{1\text{ reflejado}}$	5
$V_{2\text{ incidente}}$	-1.667
$V_{2\text{ reflejado}}$	-0.833
$V_{3\text{ incidente}}$	0.278

Se puede apreciar de las tablas 4.7 y 4.9 que los voltajes teóricos son prácticamente iguales a los voltajes obtenidos por la simulación, siendo el porcentaje de error máximo de un 0.4%.

Aparte de los resultados visualizados en la interfaz, se despliega una gráfica externa con la señal de voltaje en el tiempo para el punto específico de interés de la línea, que en este caso es al medio de la línea de transmisión. Dicha gráfica externa permite al usuario obtener la información del valor de voltaje y tiempo en cualquier instante de tiempo que se necesite analizar.

La gráfica externa desplegada (figura 4.20) entrega los valores de la amplitud de los voltajes reflejados e incidentes y de los instantes de tiempo en el que el pulso se propaga a través de la posición media de la línea de transmisión. Estos valores de la gráfica se destacan en cuadros con números celestes.

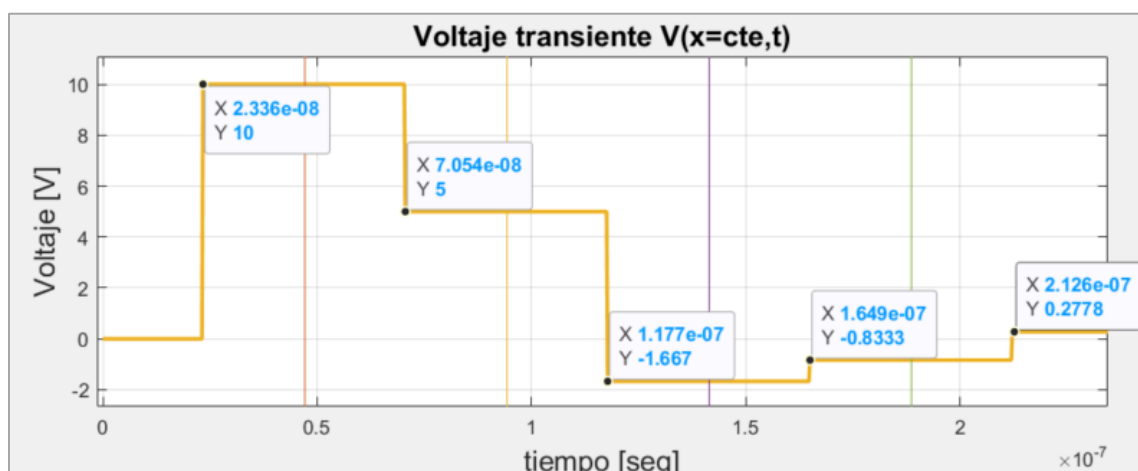


Figura 4.20 Voltaje transiente $V(x = cte, t)$ [V].

De la figura 4.20 se observa una gráfica con pulsos distribuidos secuencialmente, un pulso al lado del otro en los 5T de interés sin interceptarse entre ellos y variando sus amplitudes según los valores obtenidos en la tabla 4.7, tal como se concluyó al resolver el ejercicio de manera teórica.

Se extraen a la tabla 4.10 los resultados de la gráfica de la figura 4.20. Además, se agrega a la tabla 4.10 dos columnas que representan el porcentaje de diferencia entre el valor teórico versus el entregado por la simulación 4.3 de la amplitud de los voltajes reflejados e incidentes y de los instantes de tiempo en el que el pulso se propaga a través de la posición media de la línea de transmisión.

Tabla 4.10 Datos extraídos de los resultados de la simulación 4.3

Reflexión	Instante al que pasa por $z = 5 [m]$ en [ns]	Voltaje[V]	% Diferencia voltaje teórico vs simulación	% Diferencia instante al que pasa por $z = 5[m]$ teórico vs simulación
1	0.2336	10	0	0.9
2	0.7054	5	0	0.24
3	0.0118	-1.667	0	0
4	0.0165	-0.833	0	0
5	0.0213	0.278	0	0.47

Los resultados obtenidos por la simulación 4.3 tienen un despreciable porcentaje de error al comparar con los datos calculados numéricamente de manera teórica, tanto para la magnitud de los voltajes incidentes y reflejados como para los instantes en los que varía la amplitud del voltaje en el punto medio de la línea de transmisión. Por esta razón, se concluye que se considera la simulación 4.3 validada.

4.4 Voltaje transiente con fuente de voltaje constante

4.4.1 Descripción de la simulación

La simulación “Voltaje transiente con fuente de voltaje constante” busca de igual manera que la simulación “Voltaje transiente con fuente de voltaje pulsada”, complementar visualmente el reajuste del voltaje en una línea de transmisión que existe en la etapa inicial de excitación de la línea, pero con la diferencia de que la fuente de voltaje es constante.

Las variables de entrada hacia esta interfaz serán la amplitud de la señal V_g , la velocidad de fase de la señal V_p , la impedancia de carga Z_L , la impedancia de la fuente Z_G , la impedancia característica Z_o , el largo de la línea y un valor $x[m]$ en el que se desee graficar el voltaje para $x [m]$ constante en función del tiempo.

La simulación tiene un total de 7 gráficas (figura 4.21):

- Gráfica 1: Señal de voltaje incidente 1 en la carga.
- Gráfica 2: Señal de voltaje reflejada 1 en la carga.
- Gráfica 3: Señal de voltaje incidente 2 en la carga.
- Gráfica 4: Señal de voltaje reflejada 2 en la carga.
- Gráfica 5: Señal de voltaje incidente 3 en la carga.
- Gráfica 6: Voltaje incidente y reflejado por separado en el tiempo para un $x [m]$ constante, para un periodo equivalente a 5 reflexiones.
- Gráfica 7: Voltaje neto en el tiempo para una posición $x[m]$ constante, para un periodo equivalente a 5 reflexiones.

Además de las gráficas programadas en la interfaz se despliega una gráfica externa en la que se observa lo mismo de la gráfica 7, con la diferencia de que se puede obtener toda la data de interés punto a punto del voltaje neto y en el tiempo.

Las variables de salida de la simulación son: El voltaje de cada señal incidente y reflejada, el voltaje neto sumando las 5 primeras reflexiones, la magnitud del coeficiente de reflexión en la carga Γ_L y de la fuente Γ_G y el voltaje en estado estacionario.

La simulación permite dar a entender de mejor manera el comportamiento del voltaje en su etapa transiente inicial en una línea de transmisión. Al tener como variables de salida la suma neta de las 5 primeras reflexiones y el voltaje estacionario obtenido con la ecuación 4.1, permite comprender que al sumar las reflexiones infinitas que existen en una línea de transmisión no adaptada, la suma neta de las primeras 5 reflexiones tiende al valor obtenido por la ecuación 4.1 (Voltaje estacionario).

4.4.2 Software desarrollado

Se realiza a través de la simulación desarrollado en MATLAB, la interfaz de la figura 4.21 en la que se puede observar la descripción entregada en la sección 4.4.1.

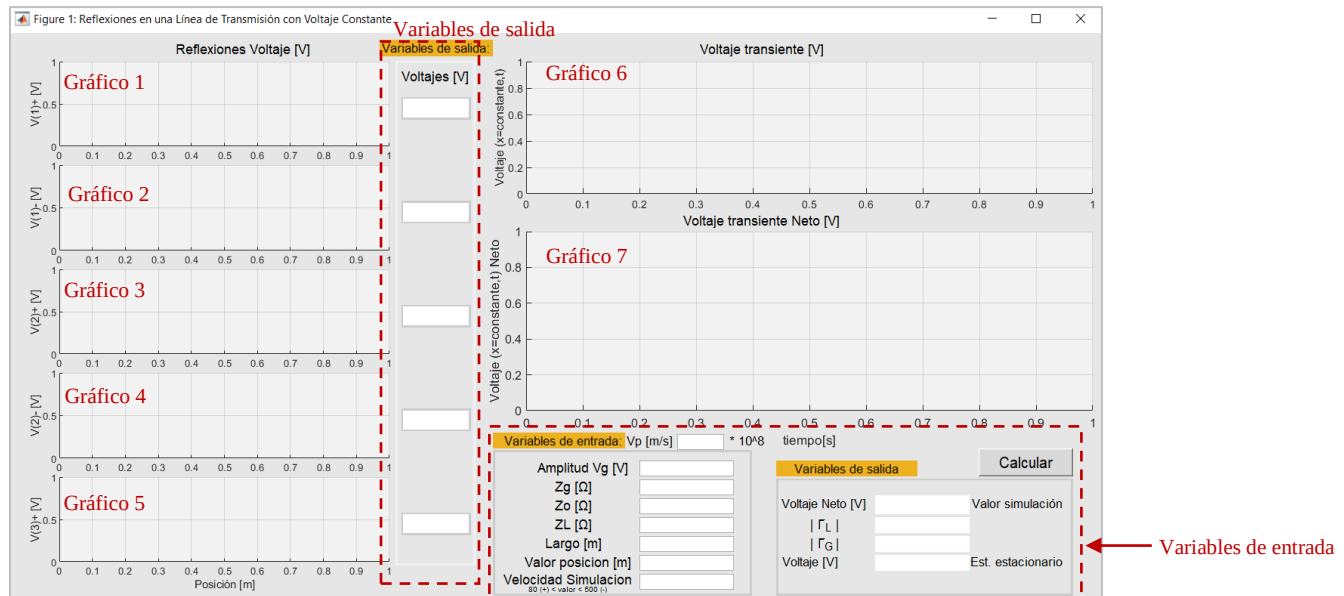


Figura 4.21 Interfaz de la simulación 4.4.

En la figura 4.21 se destaca la enumeración de cada gráfico para simplificar la comprensión de lo que representa cada uno de ellos según la descripción entregada en la sección 4.4.1. Además, se resalta el área donde se ingresan las variables de entrada en la interfaz y el área donde se entregarán las variables de salida.

A modo de ejemplo ilustrativo de la simulación, se ingresan valores específicos a las variables de entrada para la visualización de los resultados entregados por la interfaz. Los valores asignados a las variables de entrada son:

- Amplitud V_g : 20 [V]
- Velocidad de fase V_p : $3 \cdot 10^8 \left[\frac{m}{s} \right]$
- Impedancia de carga Z_L : 400 [Ω]
- Impedancia de la fuente Z_G : 300 [Ω]
- Impedancia característica Z_o : 50 [Ω]
- Largo de la línea: 5 [m]
- Valor posición en la línea: 2 [m]
- Velocidad simulación: 250

La velocidad de la simulación tiene relación directa con el número de muestras que componen las curvas de las gráficas. En el caso de la simulación 4.4, a menor valor, más rápida será la respuesta de la compilación del código. Se sugiere ingresar valores entre 80 a 500.

La velocidad de la simulación dependerá de la capacidad del equipo en el que se compile el código.

Los resultados entregados por la simulación para este ejemplo ilustrativo se observan en la figura 4.22.

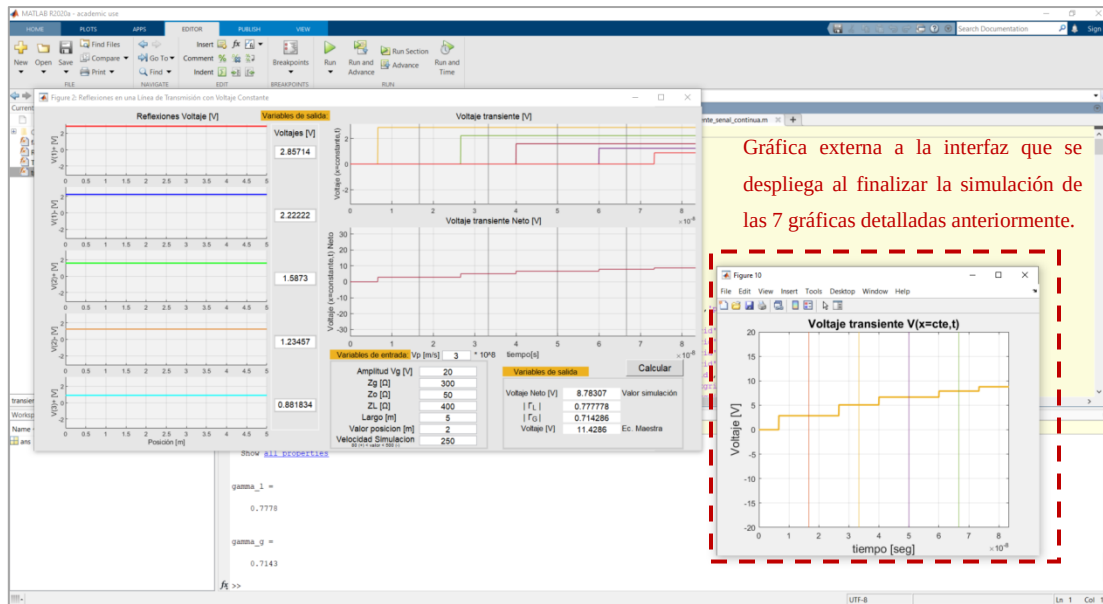


Figura 4.22 “Voltaje transiente con fuente de voltaje constante”

La interfaz entrega como variables de salida los valores siguientes:

- Amplitud de la señal de voltaje incidente 1 en la carga: 2.857 [V]
- Amplitud de la señal de voltaje reflejada 1 en la carga: 2.222 [V]
- Amplitud de la señal de voltaje incidente 2 en la carga: 1.587 [V]
- Amplitud de la señal de voltaje reflejada 2 en la carga: 1.235 [V]
- Amplitud de la señal de voltaje incidente 3 en la carga: 0.882 [V]
- Voltaje neto (Suma de las 5 primeras reflexiones): 8.7831 [V]
- Magnitud del coeficiente de reflexión en la carga Γ_L : 0.778
- Magnitud del coeficiente de reflexión en la fuente Γ_C : 0.714
- Voltaje en estado estacionario: 11.429 [V]

La gráfica externa a la interfaz que se despliega una vez finalizada la simulación de la interfaz principal de la figura 4.21 indica el voltaje en el tiempo en el punto medio de la línea, para un periodo equivalente a 5 reflexiones. Dicha gráfica se observa en mayor detalle en la figura 4.23.

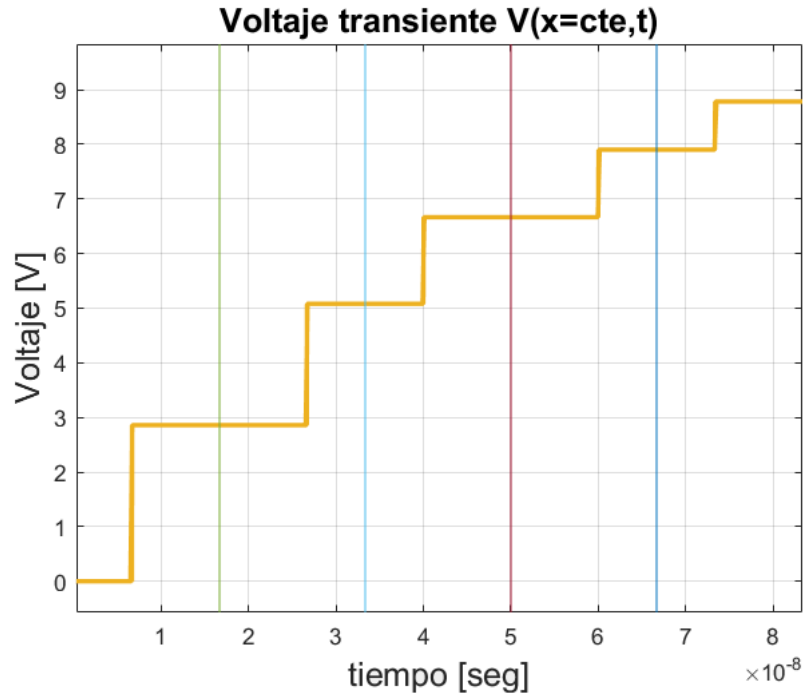


Figura 4.23 Voltaje transiente $V(x = 2, t)$.

En la figura 4.23 se observa, como a medida que se generan las reflexiones en la línea de transmisión se genera una suma positiva constante de voltajes, debido a que los coeficientes de reflexión tanto en la carga como en la fuente son positivos. La suma de estas 5 reflexiones del voltaje que existe en la etapa transiente de excitación de la línea de transmisión tenderá al valor del voltaje en estado estacionario.

En este caso ilustrado a modo de ejemplo, el voltaje en estado estacionario calculado con la ecuación 4.1 es de 11.43 [V] y con una cantidad de 5 reflexiones en la línea de transmisión, el voltaje alcanza un valor aproximado de 9 [V]. Si la simulación hubiese permitido realizar una evaluación del transiente con una cantidad mayor de reflexiones, el valor del voltaje final obtenido sería aún más cercano a 11.43 [V].

Las líneas de colores verticales indican un periodo completo de tiempo de lo que demora en propagarse la señal desde la fuente a la carga o viceversa. Al observar detenidamente la figura 4.23 se ve claramente que existen 5 periodos completos de propagación. Se observa además como a la mitad del tiempo de propagación de cada reflexión (equivalente al punto medio de la línea de transmisión) se va sumando la amplitud de la siguiente reflexión que existe en la línea.

Una vez detallada e ilustrada la interfaz diseñada, se realiza la validación de los datos numéricos entregados por la simulación.

4.4.3 Validación de la simulación

Para la validación de la simulación “Voltaje transiente para fuente de voltaje constante” se resuelven dos ejercicios de manera teórica para posteriormente comparar con los resultados entregados por la simulación.

Ejercicio teórico 1:

Una batería de $20 [V_{DC}]$, con resistencia interna de $300 [\Omega]$, se conecta en $t = 0 [s]$ a una línea de transmisión sin pérdidas. La línea tiene una longitud de $l = 10 [m]$, una impedancia de carga $Z_L = 50 [\Omega]$, una impedancia característica $Z_o = 150 [\Omega]$, una capacitancia $C = 800 [pF]$ y una inductancia $L = 18 [\mu H]$.

Graficar la distribución temporal del voltaje en el punto central de la línea (es decir, a $5 [m]$ desde la batería), para $0 \leq t \leq 5T$.

Desarrollo teórico del ejercicio 1:

En primer lugar, se resuelve el ejercicio calculando los voltajes incidentes y reflejados en la línea de transmisión. En la tabla 4.11 se obtienen los resultados de la amplitud del voltaje de las 5 primeras reflexiones que coexisten en el periodo de tiempo solicitado.

Tabla 4.11 Resultado de la amplitud del voltaje de las 5 primeras reflexiones.

Reflexión	Voltajes incidentes y reflejados en la carga	Valores teóricos [V]
1	$V_{1\text{ incidente}}$	$V_G \cdot \frac{Z_o}{Z_G + Z_o} = 6.67$
2	$V_{1\text{ reflejado}}$	$10\Gamma_L \approx -3.33$
3	$V_{2\text{ incidente}}$	$10\Gamma_L \Gamma_G \approx -1.11$
4	$V_{2\text{ reflejado}}$	$10\Gamma_L^2 \Gamma_G \approx 0.55$
5	$V_{3\text{ incidente}}$	$10\Gamma_L^2 \Gamma_G^2 \approx 0.185$

En segundo lugar, para obtener los instantes de tiempo en que el voltaje varía en el punto central de la línea de transmisión, se debe calcular el tiempo total de propagación de la señal en la línea.

El tiempo total en propagarse el pulso en la línea de transmisión se obtiene de la siguiente manera:

$$T = \frac{\text{distancia } [m]}{v_p \left[\frac{m}{s} \right]} = \frac{L}{\frac{1}{\sqrt{LC}}} = \frac{10}{8.33 \cdot 10^7} \approx 120[ns]$$

Obtenido el valor de T, se calcula el tiempo exacto en el que se suma la siguiente reflexión que pasa por el punto $z = 5 [m]$. Los valores calculados de estos instantes de tiempo, junto con el valor del voltaje neto, se pueden observar en la tabla 4.12.

Tabla 4.12 Data teórica obtenida de los instantes en el que se superpone una reflexión más en $z = 5 \text{ [m]}$ para el intervalo de tiempo $5T$.

Reflexión	Instante al que pasa por $z = 5 \text{ [m]}$	Instante al que pasa por $z = 5 \text{ [m]}$ en $[\text{ns}]$	Voltajes que coexisten en la etapa transiente	Voltajes que coexisten en la etapa transiente $[\text{V}]$
1	$T/2$	60	$V_{1 \text{ incidente}}$	6.67
2	$3 T/2$	180	$V_{1 \text{ incidente}} + V_{1 \text{ reflejado}}$	3.34
3	$5 T/2$	300	$V_{1 \text{ incidente}} + V_{1 \text{ reflejado}} + V_{2 \text{ incidente}}$	2.23
4	$7 T/2$	420	$V_{1 \text{ incidente}} + V_{1 \text{ reflejado}} + V_{2 \text{ incidente}} + V_{2 \text{ reflejado}}$	2.78
5	$9 T/2$	540	$V_{1 \text{ incidente}} + V_{1 \text{ reflejado}} + V_{2 \text{ incidente}} + V_{2 \text{ reflejado}} + V_{3 \text{ incidente}}$	2.97

En teoría, el voltaje neto obtenido en estado estacionario usando la ecuación 4.1 es de 2.86 [V], valor al cual efectivamente está tendiendo el cálculo teórico de la superposición de las reflexiones.

Se visualiza a través de los cálculos realizados que cada 120 [ns] existe un reajuste del voltaje en el punto de interés de la línea de transmisión, y que debido a que el coeficiente de reflexión $\Gamma_L = -0.5$ y $\Gamma_G = 1/3$, el voltaje transiente en la línea no será siempre creciente, pero terminará tendiendo al valor del voltaje en estado estacionario.

Resolución con la simulación:

Se ingresan los valores entregados por el ejercicio en las variables de entrada de la simulación 4.4. Los valores ingresados a la interfaz se observan en la figura 4.24.

Variables de entrada: Vp [m/s] * 10⁸

Amplitud Vg [V]

Zg [Ω]

Zo [Ω]

ZL [Ω]

Largo [m]

Valor posicion [m]

Velocidad Simulacion

80 (+) < valor < 500 (-)

Figura 4.24 Valores ingresados a las variables de entrada de la simulación 4.4.

Los resultados se visualizan en la figura 4.25.

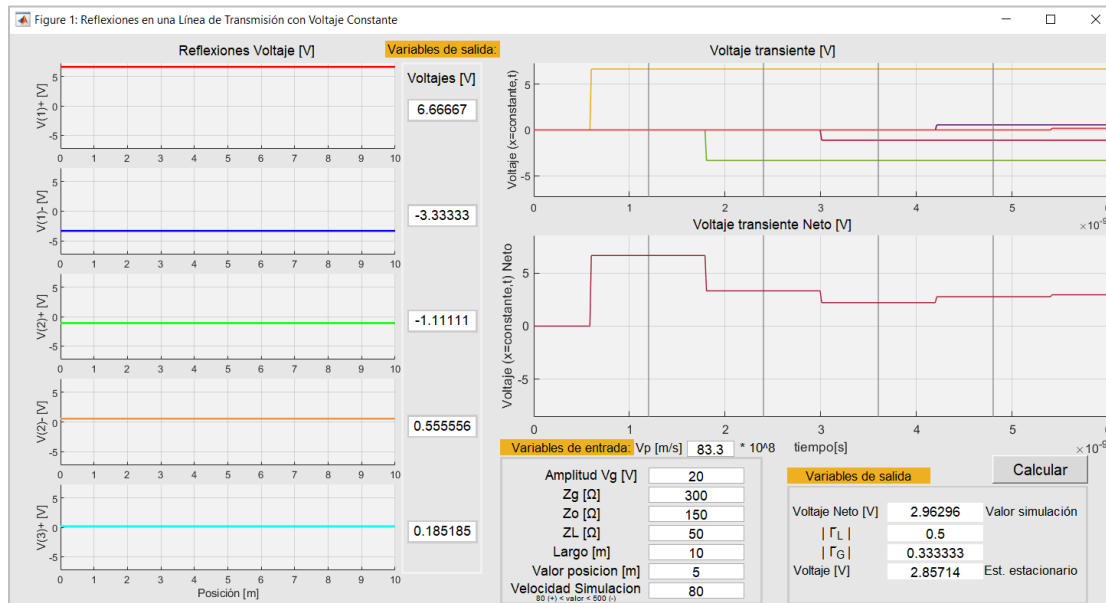


Figura 4.25 Resultados al ingresar los parámetros del ejercicio en la simulación 4.4.

Se extraen los valores de las variables de salida entregados por la simulación 4.4 de la figura 4.25 a la tabla 4.13.

Tabla 4.13 Data extraída de la figura 4.25.

Reflexión	Voltajes incidentes y reflejados en la carga	Valores obtenidos por la simulación[V]
1	$V_{1\text{ incidente}}$	6.667
2	$V_{1\text{ reflejado}}$	-3.333
3	$V_{2\text{ incidente}}$	-1.111
4	$V_{2\text{ reflejado}}$	0.556
5	$V_{3\text{ incidente}}$	0.185

Las variables de salida entregadas por la simulación permiten una cantidad hasta de 6 decimales para mejorar la exactitud de la información entregada.

Aparte de los resultados entregados por la simulación de la figura 4.25, se despliega una gráfica externa (figura 4.26) con la señal de voltaje en el tiempo en el punto específico de interés en la cual se puede obtener el valor de voltaje neto en función del tiempo en cualquier punto deseado de la línea durante un intervalo de tiempo equivalente a 5 reflexiones de la señal.

La figura 4.26 representa el voltaje transiente existente en el periodo de excitación de una línea de transmisión. Se visualiza en ella como se va realizando el ajuste del voltaje en el punto de análisis de la línea y como este valor neto va tendiendo al valor de voltaje estacionario.

La gráfica externa desplegada (figura 4.26) entrega los valores de la amplitud de los voltajes reflejados e incidentes y de los instantes de tiempo en el que el pulso se propaga a través de la posición media de la línea de transmisión. Estos valores de la gráfica se destacan en cuadros con números celestes.

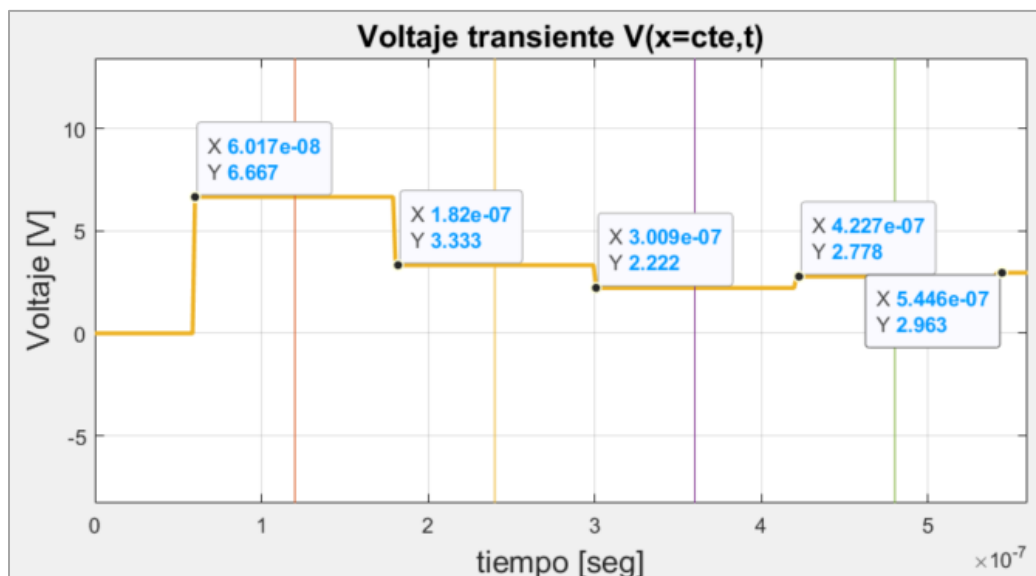


Figura 4.26 Voltaje transiente $V(x = 5, t)$ [V] para $0 < t < 5T$.

En la figura 4.26 se observa como debido a que los coeficientes de reflexión en la carga y en la fuente tienen signos contrarios existe una iteración en la magnitud final del voltaje, es decir, el voltaje transiente no es constantemente creciente si no que aumenta y disminuye de manera iterativa para tender finalmente en estado estacionario a un valor fijo igual al que se obtiene al resolver la ecuación 4.1, tal como se comentó al momento de resolver el ejercicio de manera teórica.

En la tabla 4.14 se detallan los resultados extraídos de la gráfica de la figura 4.26.

Tabla 4.14 Datos extraídos de los resultados de la simulación 4.4.

Reflexión	Instante al que pasa por $z = 5 [m]$ en $[ns]$	Voltajes que coexisten en la etapa transiente $[V]$	% Diferencia voltaje teórico vs simulación	% Diferencia instante al que pasa por $z = 5 [m]$
1	60.17	6.667	0.000	0.28
2	182.00	3.333	0.300	1.11
3	300.90	2.222	0.360	0.30
4	422.70	2.778	0.072	0.64
5	544.60	2.963	0.067	0.85

Se aprecia como evidentemente el voltaje neto obtenido al final del periodo de simulación de 2.963 [V] tiende al valor del voltaje estacionario calculado con la ecuación 4.1 igual a 2.86 [V].

Como se puede ver, los resultados de la simulación coinciden con un despreciable porcentaje de diferencia al comparar con los datos calculados numéricamente, tanto para voltajes como para los tiempos en los que varía la amplitud del voltaje en el punto medio de la línea de transmisión.

Ejercicio teórico 2: Resolver el mismo ejercicio 1 para impedancias de carga $Z_L = 0$ y $Z_L = \infty$.

Resolución teórica:

Realizando el mismo procedimiento hecho para resolver el ejercicio teórico 1 se obtienen las amplitudes de cada reflexión de voltaje con $Z_L = 0$ y $Z_L = \infty$ y se extraen los datos a las tablas 4.15 y 4.16 respectivamente.

Tabla 4.15 Voltaje de cada reflexión para $Z_L = 0$.

Impedancia de carga [Ω]	Reflexión	Voltajes incidentes y reflejados en la carga	Valores teóricos [V]	Voltaje acumulado [V]
$Z_L = 0$	1	$V_{1\text{ incidente}}$	2.857	2.857
	2	$V_{1\text{ reflejado}}$	-2.857	0
	3	$V_{2\text{ incidente}}$	-2.04	-2.04
	4	$V_{2\text{ reflejado}}$	2.04	0
	5	$V_{3\text{ incidente}}$	1.457	1.457

Para el caso de $Z_L = 0$, la teoría dice que la reflexión será absoluta, pero en contra fase de la señal incidente en la carga, por lo que la gráfica resultante debería cada dos reflexiones sumar cero, tal como indica el voltaje acumulado en la tabla 4.15.

Tabla 4.15 Voltaje de cada reflexión para $Z_L \approx \infty$.

Impedancia de carga [Ω]	Reflexión	Voltajes incidentes y reflejados en la carga	Valores teóricos [V]	Voltaje acumulado [V]
$Z_L \approx \infty$	1	$V_{1\text{ incidente}}$	2.857	2.857
	2	$V_{1\text{ reflejado}}$	2.857	5.714
	3	$V_{2\text{ incidente}}$	2.04	7.754
	4	$V_{2\text{ reflejado}}$	2.04	9.794
	5	$V_{3\text{ incidente}}$	1.457	11.251

Para el caso de $Z_L \approx \infty$ (100 [$M\Omega$]), la teoría dice que la reflexión será absoluta, pero con igual fase de la señal incidente en la carga, por lo que la gráfica resultante de voltaje neto transiente será una suma acumulativa creciente tal como se indica en la columna de voltaje neto obtenido en la tabla 4.15.

Resolución con la simulación:

Ingresando los valores correspondientes a las variables de entrada de la simulación, para el caso de $Z_L = 0$, se obtiene la gráfica de la figura 4.27, y para el caso de $Z_L \approx \infty$ (100 [M Ω]), se obtiene la gráfica de la figura 4.28.

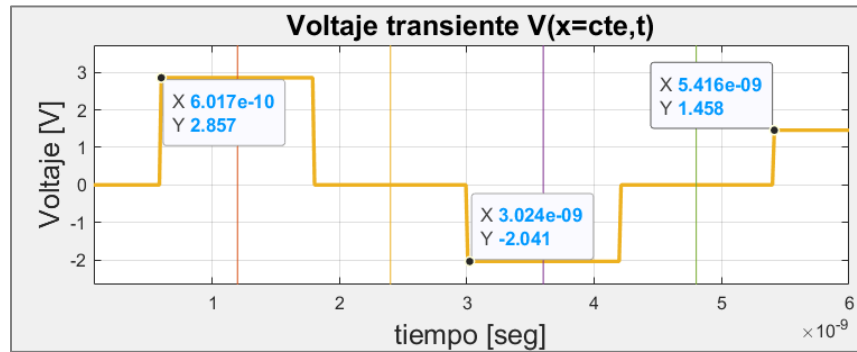


Figura 4.27 Voltaje medido en $z = 5[m]$ para todo instante de tiempo t , con $0 < t < 5T$ y $Z_L = 0$.

En la figura 4.27 se observa el ajuste del voltaje en la etapa transiente de excitación en un periodo equivalente a 5 reflexiones en el punto central de la línea de transmisión. Se aprecia claramente que al momento de sumarse cada voltaje reflejado en la carga con cada voltaje incidente la suma neta es cero debido a que la señal incidente a la carga tiene igual magnitud que la señal reflejada, pero en contra fase.

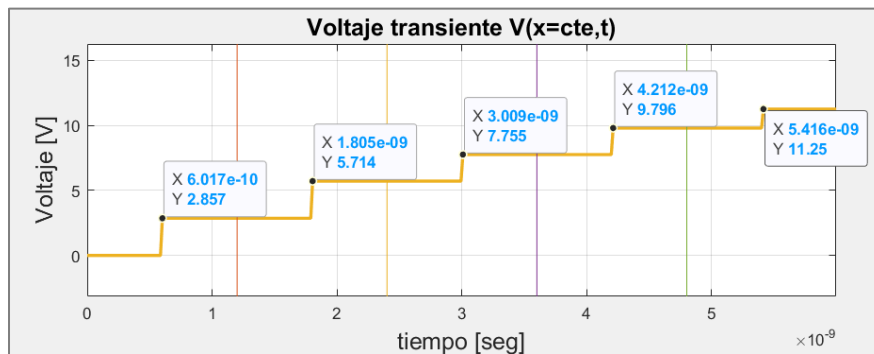


Figura 4.28 Voltaje medido en $z = 5[m]$ para todo instante de tiempo t , con $0 < t < 5T$ y $Z_L \approx \infty$.

En la figura 4.28 se observa de igual manera que en la figura 4.27, el ajuste del voltaje en un periodo equivalente a 5 reflexiones en el punto medio de la línea de transmisión y se observa además en ella el aumento creciente del valor del voltaje debido a que existe reflexión absoluta y en fase.

En la tabla 4.16 se plasman los porcentajes de error calculados entre lo obtenido teóricamente versus lo obtenido a través de la simulación de la amplitud del voltaje acumulado y del instante de tiempo en el que la señal reflejada pasa por el punto medio de la línea de transmisión para $Z_L = 0$ y $Z_L \approx \infty$.

Tabla 4.16 Porcentajes de error entre cálculos teóricos y entregados por la simulación.

Reflexión	% Error instante al que pasa por $z = 5 [m]$ en $[ns]$ $Z_L = 0$	% Error instante al que pasa por $z = 5 [m]$ en $[ns]$ $Z_L \approx \infty$	% Error voltaje acumulado $Z_L = 0$	% Error voltaje acumulado $Z_L \approx \infty$
1	0.28	0.28	0	0.00
2	0.28	0.28	0	0.00
3	0.80	0.30	0.05	0.01
4	0.64	0.29	0	0.02
5	0.30	0.30	0.07	0

Se puede ver que los porcentajes de error obtenidos en la tabla 4.16 son menores al 1% y que los resultados obtenidos al analizar las gráficas de las figuras 4.27 y 4.28 reflejan lo que dice la teoría.

Una vez resuelto los ejercicios 1 y 2 y contrastando lo obtenido teóricamente versus los valores entregados por la simulación se concluye que la simulación 4.4 está validada.

4.5 Carta de Smith

4.5.1 Descripción de la simulación

La simulación “Carta de Smith” permite trabajar con la carta de Smith de igual manera como se hace con papel, compás y regla, pero a través de un software.

La simulación consiste en una interfaz principal que tiene como variables de entrada los siguientes parámetros (figura 4.30):

- ROE constante: Se forman círculos de ROE constante.
- $z_L [\Omega]$: Se grafica la coordenada correspondiente a la impedancia normalizada.
- Resistencia $[\Omega]$: Se grafican círculos de resistencia.
- Reactancia $[\Omega]$: Se grafican arcos de reactancia.
- Punto P1: Se marca en la circunferencia externa de la Carta de Smith correspondiente a las medidas en λ , el punto P1 ingresado.
- Punto P2: Se marca en la circunferencia externa de la Carta de Smith correspondiente a las medidas en λ , el punto P2 ingresado.
- Recta: Se grafica una recta en la Carta de Smith desde el origen del plano hasta el punto ingresado en esta variable de entrada, correspondiente a las medidas en λ .

Las variables de salida son: magnitud del coeficiente de reflexión en la carga, el ROE y la diferencia en términos de λ de los puntos P2 y P1.

Además, la interfaz posee un botón llamado “Gráfica” que al presionarlo se despliega aparte de la interfaz principal la Carta de Smith digitalizada (figura 4.29).

La simulación fue diseñada de forma tal que se asigne colores aleatorios a todas las curvas o puntos realizados en la Carta de Smith.

A continuación, se detalla brevemente como se lleva a cabo la Carta de Smith digitalizada:

El mapeo de la carta de Smith a nivel de código se realiza en función del coeficiente de reflexión representado como:

$$\Gamma = \Gamma_r + j \cdot \Gamma_i \quad (4.51)$$

Al expresar la impedancia aparente normalizada $z = r + j \cdot x$ en función del coeficiente de reflexión Γ y reorganizando las ecuaciones obtenidas, se tiene como resultado las ecuaciones que representan las circunferencias y arcos plasmados en la Carta de Smith.

Dichas ecuaciones son:

$$\left(\Gamma_r - \frac{r}{1+r}\right)^2 + \Gamma_i^2 = \left(\frac{1}{1+r}\right)^2 \quad (4.52)$$

$$(\Gamma_r - 1)^2 + \left(\Gamma_i - \frac{1}{x}\right)^2 = \left(\frac{1}{x}\right)^2 \quad (4.53)$$

Siendo:

Γ_r : Parte real del coeficiente de reflexión.

Γ_i : Parte imaginaria del coeficiente de reflexión.

r : Parte real de la impedancia normalizada aparente (resistencia).

x : Parte compleja de la impedancia normalizada aparente (reactancia).

A nivel de código, se grafican para distintos valores de resistencia r y reactancia x círculos de resistencia constante y arcos de reactancia constante (ecuaciones 4.52. y 4.53) considerando un cierto número de puntos $(x, y) = (\Gamma_r, \Gamma_i)$. Se limita la magnitud máxima del radio de los círculos de resistencia constante a 1.

El resultado obtenido es el que se observa en la figura 4.29.

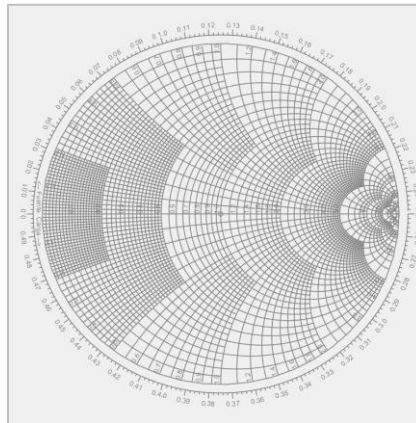


Figura 4.29 Gráfico Carta de Smith digitalizada.

A continuación, se detalla cómo se extrae información de la Carta de Smith digitalizada:

Al ubicar el cursor sobre cualquier punto de la gráfica de la figura 4.29, la simulación entrega el valor de dicho punto en función de Γ_r y Γ_i (x, y).

Debido a la necesidad de obtener los puntos en función de la resistencia y reactancia normalizada aparente que conforman la impedancia normalizada aparente, es que a nivel de código se convierten las variables entregadas por la simulación en términos de resistencia r y reactancia x . La conversión realizada se expresa en las ecuaciones 4.54 y 4.55.

$$r = \frac{1 - \Gamma_r^2 - \Gamma_i^2}{(1 - \Gamma_r)^2 - \Gamma_i^2} \quad (4.54)$$

$$x = \frac{2\Gamma_i^2}{(1 - \Gamma_r)^2 + \Gamma_i^2} \quad (4.55)$$

Por lo tanto, la conversión de obtener el punto de interés entregado por el gráfico de la figura 4.29, en función del coeficiente de reflexión a un punto en función de la impedancia aparente normalizada que se extrae de la Carta de Smith (Arcos y circunferencias) es:

$$\Gamma = \Gamma_r + j\Gamma_i \text{ (entregado por la gráfica 4.29)} \rightarrow z = r \text{ (círculos)} + j \cdot x \text{ (arcos)} \text{ (Calculado con las ecuaciones 4.54 y 4.55)}$$

Una vez detallada la interfaz de la simulación 4.5 y la manera en que se realiza el mapeo de las curvas que componen la Carta de Smith y como se extrae la información de los puntos de interés de esta, se muestra a continuación el resultado final del software.

4.5.2 Software desarrollado

Se realiza a través de la simulación desarrollado en MATLAB, la interfaz de la figura 4.30 en la que se puede observar la descripción entregada en la sección 4.5.1.

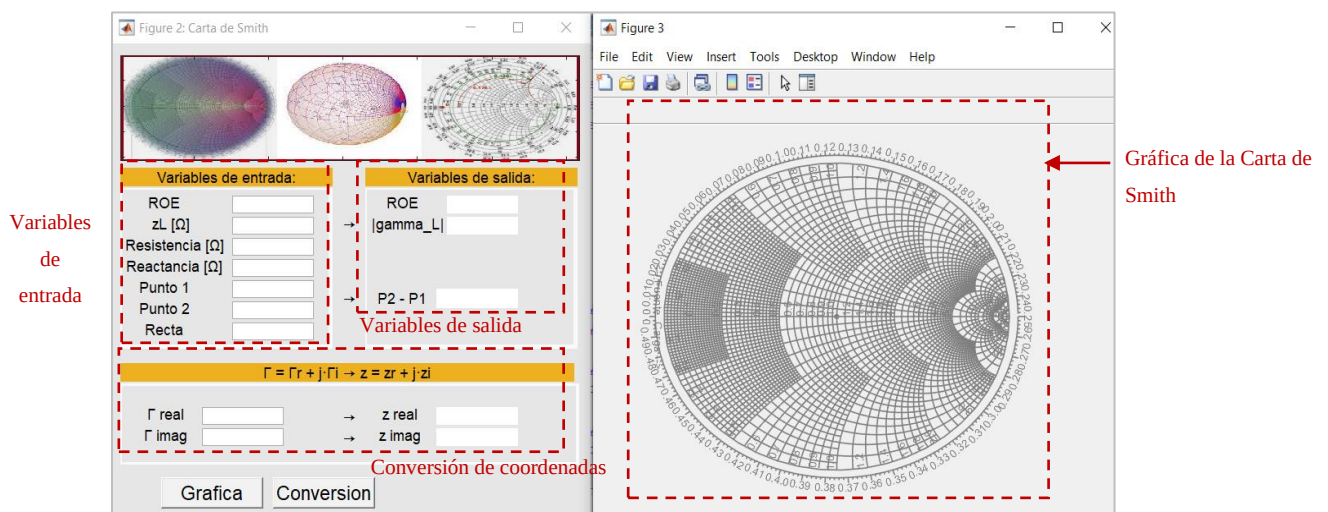


Figura 4.30 Interfaz de la simulación 4.5.

En la figura 4.30 en el extremo izquierdo se visualiza la interfaz principal de la simulación, la cual al presionar el botón denominado “Gráfica” se despliega la figura de la derecha correspondiente a la Carta de Smith digitalizada.

En la figura 4.30 se destaca el área donde se ingresan las variables de entrada en la interfaz, el área donde se entregarán las variables de salida y el área donde se realiza la conversión de coordenadas para obtener el valor en términos de impedancia aparente normalizada:

$$\Gamma = \Gamma_r + j\Gamma_i \rightarrow z = r \text{ (círculos)} + j \cdot x \text{ (arcos)}$$

Una vez detallada e ilustrada la interfaz diseñada, se procede a realizar la validación de los datos numéricos entregados por la simulación.

4.5.3 Validación de la simulación

Para la validación de la simulación 4.5 se ingresan diferentes datos a las variables de entrada de la interfaz con el fin de comparar si la Carta de Smith refleja la información ingresada. Los datos ingresados se muestran en la tabla 4.17

Tabla 4.17 Datos ingresados en las variables de entrada de la interfaz.

Variables de entrada	Valores ingresados
A ROE: Círculos de ROE constante	2
	15
	100
B zL: Impedancias normalizadas de carga	1
	$0.3 + 1.1j$
	$1 - 0.8j$
C Resistencia: Círculos de resistencia	1
	0.3
	4
D Reactancia: Arcos de reactancia	1.1
	-0.2
	0.6
E Punto 1 y punto 2 de interés de distancia en términos de λ	$P1 = 0.18 \ P2 = 0.31$
	$P1 = 0.04 \ P2 = 0.08$
	$P1 = 0.43 \ P2 = 0.46$
F Recta: Puntos de ubicación en términos de λ donde se traza una recta desde el origen.	0
	0.1275
	0.36

Los resultados obtenidos se muestran en la figura 4.31, 4.32, 4.33 y 4.34.

Caso “A” tabla 4.17: Se ingresan los valores de ROE de la tabla 4.17 como variable de entrada “ROE” a la simulación y se obtiene la gráfica de la Carta de Smith digitalizada de la figura 4.31.

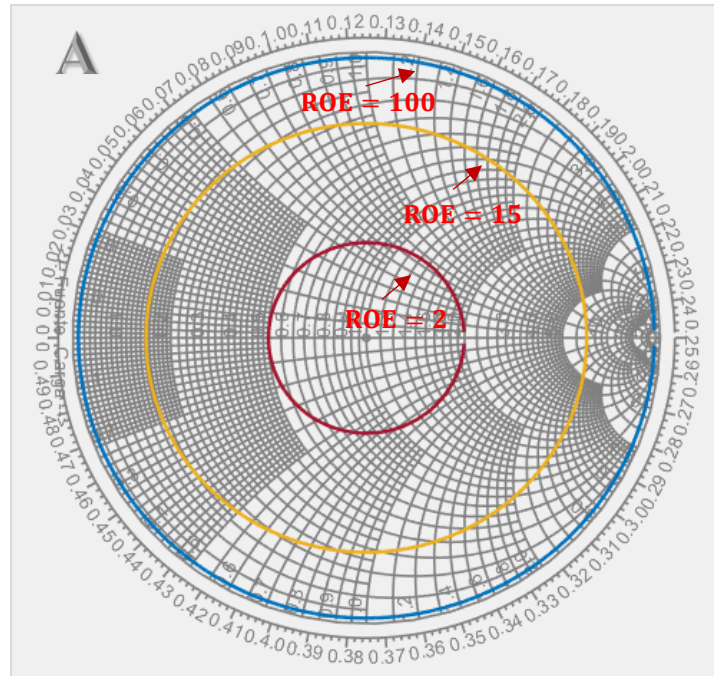


Figura 4.31 Círculos de ROE constante.

Caso “B” tabla 4.17: Se ingresan los valores de z_L de la tabla 4.17 como variable de entrada “ z_L ” a la simulación (figura 4.30) y se obtiene la gráfica de la Carta de Smith digitalizada de la figura 4.32.

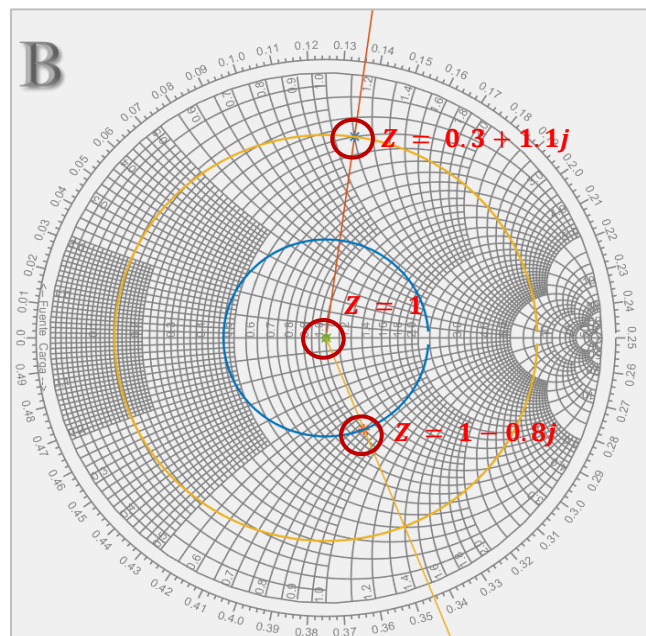


Figura 4.32 Puntos de prueba de impedancia normalizada aparente en la Carta de Smith digitalizada.

En la figura 4.32 se encierran con círculos rojos, los puntos donde se ubican las impedancias aparentes normalizadas ingresadas como entrada. La Carta de Smith grafica de manera automática por la

simulación el círculo de ROE constante correspondiente al valor de esa impedancia, y además, se traza de manera automática una recta desde el origen de la Carta de Smith al extremo de la circunferencia más externa para obtener el valor que entrega al círculo exterior en términos de λ .

Caso “C” y “D” tabla 4.17: Se ingresan los valores de resistencia y reactancia de la tabla 4.17 como variables de entrada “Resistencia” y “Reactancia” a la simulación respectivamente (figura 4.30) y se obtiene la gráfica de la Carta de Smith digitalizada de la figura 4.33.

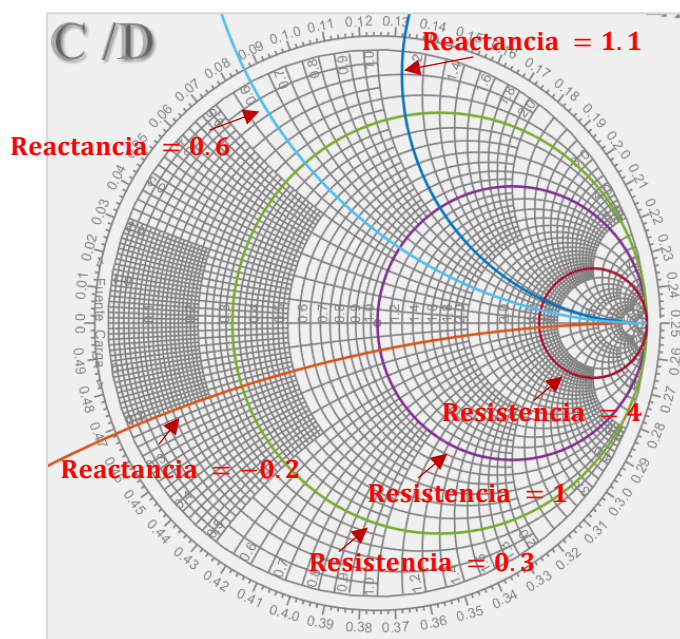


Figura 4.33 Círculos de resistencia constante y arcos de reactancia constante.

En la figura 4.33 se señalan en los círculos de resistencia constante y los arcos de reactancia constante graficados en la Carta de Smith.

Caso “E” y “F” tabla 4.17: Se ingresan los valores de punto 1, punto 2 y recta de la tabla 4.17 a las variables de entrada “Punto 1”, “Punto 2” y “Recta” de la simulación respectivamente (figura 4.30) y se obtiene la gráfica de la Carta de Smith digitalizada de la figura 4.34.

En el lado izquierdo de la figura 4.34 se encuentran los puntos ingresados en el círculo exterior a la Carta de Smith en función de λ (“Punto 1” y “Punto 2”), y en el lado derecho, se observan las rectas trazadas desde el origen de la Carta de Smith al punto ingresado a la simulación “Recta”.

Se encierran en color burdeo cada uno de los puntos graficados en la Carta de Smith.

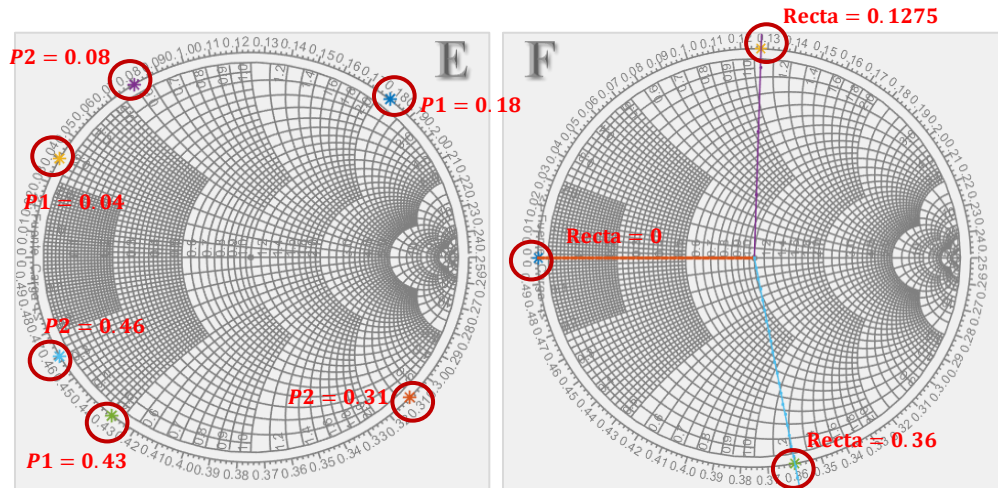


Figura 4.34 Puntos y rectas en la Carta de Smith en el círculo exterior (Lambda).

Al observar en detalle que toda la información ingresada como variables de entrada a la simulación se ve correctamente reflejada en la Carta de Smith generada por la simulación, se considera la interfaz interactiva 4.5, validada.

4.6 Parámetros de diseño para microstrip

4.6.1 Descripción de la simulación

La simulación “Parámetros de diseño para microstrip” es una recreación de la gráfica de la figura 2.8 que permite obtener los parámetros de diseño de una línea planar tipo microstrip de manera digital sin el uso de lápiz y regla.

La interfaz posee una gráfica w/H versus $Z0i$ y factor de ensanchamiento q versus $Z0i$ (figura 4.35). Los ejes de la gráfica son: w/H el cociente entre el ancho de la cinta metálica conductora y el espesor del dieléctrico, $Z0i$ la impedancia característica de la línea Microstrip obtenida en la iteración i y q el factor de llenado que representa el porcentaje de propagación de la señal que se propaga en el dieléctrico sólido existente entre las placas.

Las variables de entrada de la interfaz son las siguientes:

Variable de ingreso “Ingreso 1 ó 2”: Se ingresa “1” ó “2” si se desea que la variable de entrada sea la impedancia característica $Z0i$ o el cociente w/H respectivamente.

“Ingreso 1 ó 2 = 1”: Si se ingresa a la variable de ingreso el valor 1, aparece como variable de entrada la impedancia característica de la línea microstrip y aparecen como variables de salida el valor del cociente w/H y valor del factor de llenado q entregado por la gráfica de la simulación.

“Ingrese 1 ó 2 = 2”: Si se ingresa a la variable de ingreso el valor 2, aparece como variable de entrada w/H el cociente entre el ancho de la cinta metálica conductora y el espesor del dieléctrico y aparecen como variables de salida el valor de la impedancia característica y el valor del factor de llenado q .

Una vez ingresado el valor a todas las variables de entrada, se presiona el botón “Calcular” e internamente el código de la simulación buscará según el mapeo de las curvas realizada en la gráfica el punto en cuestión que corresponde y se observará en ella las rectas que entregan el valor de las variables de salida necesitadas.

La finalidad de la simulación es interactuar a través de ella con el fin de obtener los parámetros de diseño de una línea Microstrip de manera simplificada disminuyendo el trabajo minucioso que se realiza al buscar los datos de interés que se extraen de esta gráfica iteración tras iteración.

4.6.2 Software desarrollado

Se realiza a través de la simulación desarrollado en MATLAB, la interfaz de la figura 4.35 en la que se puede observar la descripción entregada en la sección 4.6.1.

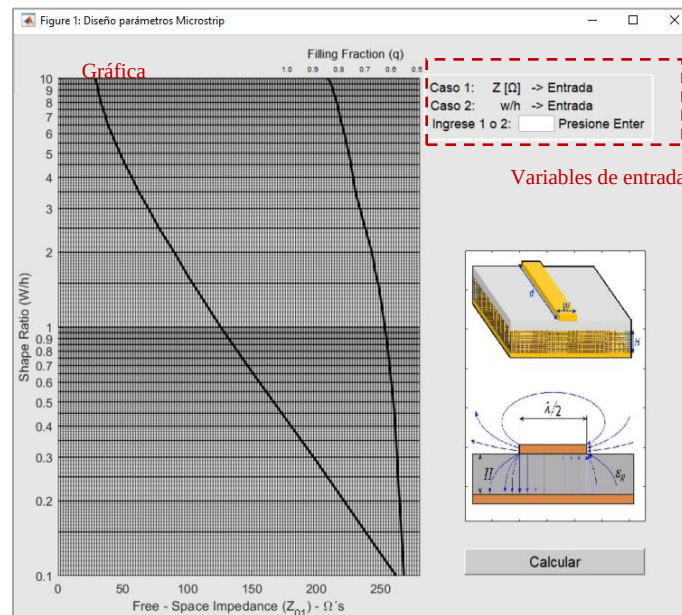


Figura 4.35 Interfaz de la simulación 4.6.

En la figura 4.35 se destaca el área donde se ingresan las variables de entrada en la interfaz. En el caso de que el valor ingresado a la variable “Ingrese 1 o 2” sea 1, se visualizará lo que aparece en el extremo izquierdo de la figura 4.36, y en el caso de que el valor ingresado a la variable de entrada “Ingrese 2” sea 2, se visualizará lo que aparece en el extremo derecho de la figura 4.36.

Caso 1: $Z [\Omega]$ -> Entrada Caso 2: w/h -> Entrada Ingrese 1 o 2: 1 Presione Enter	Caso 1: $Z [\Omega]$ -> Entrada Caso 2: w/h -> Entrada Ingrese 1 o 2: 2 Presione Enter
Caso 1: $Z [\Omega]$ Calcular Variables de salida: w/h q	Caso 2: w/h Calcular Variables de salida: Z q

Figura 4.36 Variables de entrada y salida de la simulación 4.6.

A modo de ejemplo ilustrativo de la simulación se ingresan valores específicos a las variables de entrada para la visualización de los resultados entregados por la interfaz. Los valores asignados a las variables de entrada son:

- Ingrese 1 o 2: 2
- Valor del cociente w/H : 1

El resultado entregado por la simulación se observa en la figura 4.37.

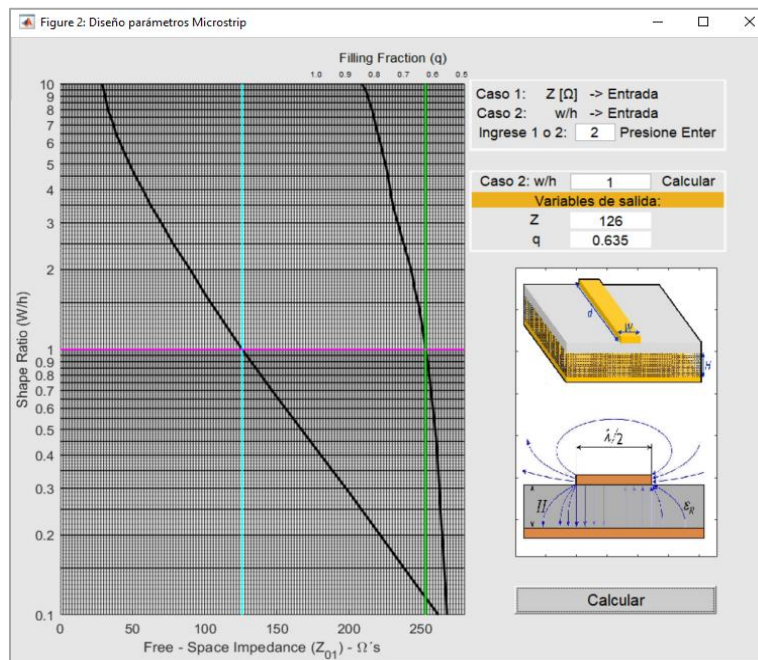


Figura 4.37 “Parámetros de diseño para microstrip”.

Las variables de salida son:

- Impedancia característica Z_{01} : 126 $[\Omega]$.
- Factor de llenado q : 0.635.

Se observa que para el valor de entrada $w/H = 1$ se traza una recta horizontal rosada en la gráfica y a la vez se trazan dos rectas verticales donde las curvas negras de la gráfica se interceptan con la recta vertical $w/H = 1$ (rectas celeste y verde). A partir de la recta celeste se obtiene que el valor de la impedancia característica es de $126 [\Omega]$ y a partir de la recta verde se obtiene que el valor del factor de llenado es de 0.635.

Como se puede ver del ejemplo ilustrativo, se obtienen de manera rápida y sencilla los valores de la gráfica que se necesitan extraer al momento de calcular los parámetros ideales de diseño de una línea planar tipo microstrip.

Una vez detallada e ilustrada la interfaz diseñada se procede a realizar la validación de los datos numéricos entregados por la simulación.

4.6.3 Validación de la simulación

La validación de la simulación “Parámetros de diseño para microstrip” se realiza resolviendo un ejercicio de manera teórica utilizando el método gráfico, para posteriormente, comparar los resultados con los valores entregados por la simulación 4.6.

Ejercicio:

Una antena microstrip, sintonizada para operar a una frecuencia de 10 GHz, presenta en sus terminales una impedancia $Z_A = 100 [\Omega]$. La antena debe ser conectada al transmisor a través de una línea microstrip de impedancia característica $z_0 = 50 [\Omega]$ y largo $1 [m]$, construida con una lámina de cobre de espesor $t = 0.2 [mm]$, junto con un sustrato de espesor $H = 2 [mm]$ y constante dieléctrica relativa $\epsilon_r = 3.8$.

Determine las dimensiones físicas (largo y ancho) de un transformador $\frac{\lambda}{4}$ construido en tecnología microstrip que adapte la antena a la línea microstrip principal de $z_0 = 50 [\Omega]$. Use método gráfico.

Desarrollo teórico:

Para la implementación de un transformador $\frac{\lambda}{4}$ construido en tecnología microstrip que adapte la antena a la línea microstrip principal, calculamos en primer lugar la impedancia característica Z_T que necesita. La impedancia característica se calcula como la media geométrica entre la impedancia característica Z_0 y Z_A :

$$Z_T = \sqrt{Z_0 \cdot Z_A} \approx 70.71 [\Omega]$$

Con el valor Z_T obtenido, se tiene el punto de partida de las iteraciones a realizar utilizando el método gráfico para obtener las dimensiones físicas del transformador solicitadas por el ejercicio de manera tal que tenga una impedancia característica $Z_T = 70.71 [\Omega]$.

El foco de la resolución del ejercicio para efectos de la validación es obtener los distintos valores iterativos entregados gráficamente a mano por la gráfica de la figura 2.8 para luego contrastarlos con los valores obtenidos por la simulación.

Se obtienen los datos de la tabla 4.18 a partir de las ecuaciones 2.14: $\varepsilon_{eff} = q(\varepsilon_r - 1) + 1$ y 2.15: $Z_{0(i+1)} = \sqrt{\varepsilon_r} Z_{0i}$.

El procedimiento realizado para la obtención de las dimensiones de la línea es:

- 1) Con el valor entregado por el enunciado de la permitividad relativa y Z_T , se obtiene $Z_{T01}^{(1)}$.
- 2) Con el valor de la permitividad relativa calcular la permitividad efectiva $\varepsilon_{eff}^{(1)}$ usando $q^{(1)}$.
- 3) Se calcula el valor de $Z_{T01}^{(2)} = \sqrt{\varepsilon_{eff}^{(1)}} \cdot Z_T$.
- 4) Se usa el gráfico (figura 4.38), se identifica $Z_{T01}^{(2)}$ y se obtiene $q^{(2)}$.
- 5) Con el valor de la permitividad relativa calcular la permitividad efectiva $\varepsilon_{eff}^{(2)}$ usando $q^{(2)}$.
- 6) Se calcula el valor de $Z_{T01}^{(3)} = \sqrt{\varepsilon_{eff}^{(2)}} \cdot Z_T$.
- 7) Se usa el gráfico (figura 4.38), se identifica $Z_{T01}^{(3)}$ y se obtiene $q^{(3)}$.
- 8) Se repiten la misma secuencia de pasos hasta que la diferencia entre las permitividades efectivas sea prácticamente despreciable.

Tabla 4.18 Resultados obtenidos a través de iteraciones realizadas con el método gráfico.

Variable iterativa	Valor de la variable	$\frac{W}{H}$
$Z_{T01}^{(1)}$	137.84 [Ω]	0.83
$q^{(1)}$	0.62	
$\varepsilon_{eff}^{(1)}$	2.74	
$Z_{T01}^{(2)}$	116.94 [Ω]	1.15
$q^{(2)}$	0.645	
$\varepsilon_{eff}^{(2)}$	2.806	
$Z_{T01}^{(3)}$	118.43	1.1
$q^{(3)}$	0.64	
$\varepsilon_{eff}^{(3)}$	2.792	
$Z_{T01}^{(4)}$	118.13 [Ω]	1.15
$q^{(4)}$	0.64	
$\varepsilon_{eff}^{(4)}$	2.792	

Se observa claramente de la tabla 4.18 que al comparar los valores de la permitividad efectiva correspondiente a la iteración 4 y 3, estos son exactamente iguales, por lo que se finaliza el cálculo a la cuarta iteración.

Se utiliza tres veces la gráfica para encontrar el valor del factor de llenado $q^{(2)}$, $q^{(3)}$ y $q^{(4)}$. En la figura 4.38 se observa la gráfica utilizada junto a las rectas trazadas para obtener los valores necesitados en las diferentes iteraciones.

Se decide no avanzar con la resolución del ejercicio debido a que el foco de la resolución es visualizar y comparar los valores obtenidos a partir de la gráfica al buscar en ella el valor de los parámetros necesitados para el diseño de la línea en cuestión.

En de la figura 4.38 se puede observar como las rectas horizontales cada vez tienden a estar más juntas, esto es debido a que en cada iteración que se realiza, tiende cada vez más, a los parámetros de diseño ideales para obtener en este caso específico, las dimensiones de la línea que permitan tener la impedancia característica necesitada.

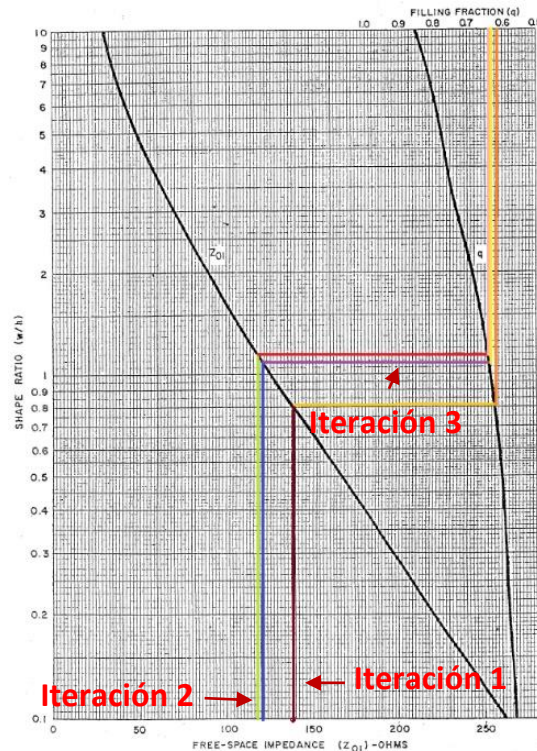


Figura 4.38 Iteraciones realizadas para obtener los parámetros de diseño de una línea microstrip.

Resolución con la simulación:

Se realiza la siguiente secuencia de pasos para resolver el ejercicio con la simulación 4.6:

- 1) Con el valor entregado por el enunciado de la permitividad relativa y Z_T , se obtiene $Z_{T01}^{(1)}$.

- 2) Con el valor de la permitividad relativa calcular la permitividad efectiva $\varepsilon_{eff}^{(1)}$ usando $q^{(1)}$.
- 3) Se calcula el valor de $Z_{T01}^{(2)} = \sqrt{\varepsilon_{eff}^{(1)}} \cdot Z_T$.
- 4) Se entra a la interfaz de la simulación 4.6, se ingresa la opción 1 como variable de entrada y luego se ingresa el valor de $Z_{T01}^{(2)}$. La simulación entrega como variable de salida el valor $q^{(2)}$ y $\frac{W}{H}$.
- 5) Con el valor de la permitividad relativa calcular la permitividad efectiva $\varepsilon_{eff}^{(2)}$ usando $q^{(2)}$.
- 6) Se calcula el valor de $Z_{T01}^{(3)} = \sqrt{\varepsilon_{eff}^{(2)}} \cdot Z_T$.
- 7) Se entra a la interfaz de la simulación 4.6, se ingresa la opción 1 como variable de entrada y luego se ingresa el valor de $Z_{T01}^{(3)}$. La simulación entrega como variable de salida el valor $q^{(3)}$ y $\frac{W}{H}$.
- 8) Se repiten la misma secuencia de pasos hasta que la diferencia entre las permitividades efectivas sea prácticamente despreciable.

Los resultados entregados por la simulación se indican en la tabla 4.19.

Tabla 4.19 Resultados obtenidos con la simulación 4.6 usando método gráfico.

Variable iterativa	Valor de la variable	$\frac{W}{H}$
$Z_{T01}^{(1)}$	138[Ω]	0.83125
$q^{(1)}$	0.6235	
$\varepsilon_{eff}^{(1)}$	2.7458	
$Z_{T01}^{(2)}$	117[Ω]	1.21635
$q^{(2)}$	0.646	
$\varepsilon_{eff}^{(2)}$	2.8088	
$Z_{T01}^{(3)}$	118	1.19231
$q^{(3)}$	0.6435	
$\varepsilon_{eff}^{(3)}$	2.8018	
$Z_{T01}^{(4)}$	118[Ω]	1.19231
$q^{(4)}$	0.6435	
$\varepsilon_{eff}^{(4)}$	2.8018	

Realizando la comparación entre los resultados obtenidos a partir de la simulación y la teoría, se tiene que el valor teórico obtenido del cociente $\frac{W}{H}$ versus el obtenido a partir de la simulación en la cuarta y última iteración realizada, difieren en un 3.6%. Este valor corresponde a un porcentaje de diferencia despreciable ante el uso en particular de este método gráfico. Es por esto que se concluye que se considera la simulación 4.6 validada.

Cabe destacar que las variables de entrada de impedancias características a la interfaz deben ser enteras, lo cual genera un grado menor de exactitud al no considerar los decimales.

5 SIMULACIONES DE GUÍAS DE ONDA

En el presente capítulo, se describen las simulaciones diseñadas y creadas como herramientas educativas para guías de onda. Se realiza una descripción del diseño de cada interfaz, el software resultante desarrollado y la manera en que se valida cada una de las simulaciones.

Se diseñan 4 interfaces diferentes enfocadas a mejorar la comprensión de la propagación de una onda electromagnética confinada al interior de una guía de onda.

Las simulaciones diseñadas se denominan de la siguiente manera:

- Simulación 5.1: Distribución espacial del campo EM para GGOO rectangular.
- Simulación 5.2: Distribución espacial del campo EM para GGOO circular.
- Simulación 5.3: Curvas de dispersión.
- Simulación 5.4: Velocidad de fase versus velocidad de grupo.

La simulación 5.1 y 5.2 “Distribución espacial del campo EM para GGOO rectangular” y “Distribución espacial del campo EM para GGOO circular” permiten visualizar la distribución transversal de la magnitud del campo eléctrico para un Modo Transversal Eléctrico TE_{mn} y la distribución transversal de la magnitud del campo magnético del Modo Transversal Magnético TM_{mn} para guías de onda rectangulares y circulares. Además, permite interactuar con los parámetros característicos de la guía, frecuencia de operación, dimensiones físicas de la guía, largo de la guía, etc. con la finalidad de analizar como su valor impacta en la propagación de la señal. Otra información relevante que entregan ambas simulaciones es la distribución del campo electromagnético longitudinal según sea el caso de análisis para cada uno de los tipos de guías de onda.

La simulación 5.3 “Curvas de dispersión” permite según los valores que se ingresen en la interfaz, visualizar los modos que se propagan en una guía de onda rectangular y los valores de los parámetros que caracterizan a cada uno de ellos. Esta simulación tiene como finalidad demostrar el importante rol que tiene las dimensiones de la guía y la frecuencia de operación elegida en la definición de los modos que se propagan a través de este tipo de guía de onda.

La simulación 5.4 “Velocidad de fase versus velocidad de grupo” permite interactuar con los parámetros de amplitud, frecuencia y fase de dos señales senoidales que se propagan en el espacio y tiempo con el fin de analizar la suma de ambas señales y visualizar a través de esta la diferencia entre la velocidad de fase y la velocidad de grupo.

A continuación, se realiza una descripción detallada del diseño de cada interfaz, el software resultante desarrollado y la validación de cada una de las simulaciones.

5.1 Distribución espacial del campo para GGOO rectangular

5.1.1 Descripción de la simulación

La simulación “Distribución espacial del campo para guías de onda rectangulares” busca ilustrar la distribución transversal y longitudinal de las componentes del campo electromagnético en una guía de onda rectangular, implementando a nivel de código la matemática que modela dichas distribuciones.

Las variables de entrada a la interfaz son: las dimensiones de la guía, ancho a y alto b en centímetros (Figura 2.9), los valores de m y n , el largo de la guía a analizar L , la resolución de la simulación y la frecuencia operacional f .

La resolución de la simulación permite ingresar un valor de 100 a 1000 que corresponde al número de puntos que tiene cada señal calculada, por lo que mientras mayor sea el valor, más suave son las curvas graficadas. Es un valor que se deja libre al usuario para que adapte según las capacidades de su computador, un número tal que el código se compile de manera continua y sin exigir de sobremanera al equipo.

La simulación 5.1 está compuesta por 10 botones (figura 5.1), los cuales son:

- Botón 1 “TE”: Una vez ingresadas las variables de entrada, al presionar el botón 1, le indica al programa que se desea ver los resultados para una propagación de modo transversal eléctrico.
- Botón 2 “TM”: Una vez ingresadas las variables de entrada, al presionar el botón 2, le indica al programa que se desea ver los resultados para una propagación de modo transversal magnético.
- Botón 3 “Gráficas”: Desglosa, aparte de la interfaz que ya se visualiza, una ventana con 4 gráficas diferentes:
 - Gráfica 1: Distribución transversal de la magnitud del campo electromagnético.
 - Gráfica 2: Contorno de la distribución transversal de la magnitud del campo electromagnético.
 - Gráfica 3: Distribución longitudinal del campo electromagnético.
 - Gráfica 4: Contorno de la distribución longitudinal del campo electromagnético.
- Botón 4 “Gráfica 1”: Desglosa en una ventana aparte la misma gráfica 1 que se desglosa al seleccionar el botón 3, con la diferencia de que esta opción permite trabajar con el tamaño de la gráfica.
- Botón 5 “Gráfica 2”: Desglosa en una ventana aparte la misma gráfica 2 visualizada al seleccionar el botón 3, con la diferencia de que esta opción permite trabajar con el tamaño de la gráfica.

- Botón 6 “Gráfica 3”: Desglosa en una ventana aparte la misma gráfica 3 visualizada al seleccionar el botón 3, con la diferencia de que esta opción permite trabajar con el tamaño de la gráfica.
- Botón 7 “Gráfica 4”: Desglosa en una ventana aparte la misma gráfica 4 que se desglosa al seleccionar el botón 3, con la diferencia de que esta opción permite trabajar con el tamaño de la gráfica.
- Botón 8 “Girar gráfico 1”: Permite visualizar la misma gráfica tridimensional que al oprimir el botón 4, con la diferencia de que gira alrededor del eje y.
- Botón 9 “Girar gráfico 2”: Permite visualizar la misma gráfica tridimensional que al oprimir el botón 6, con la diferencia de que gira alrededor del eje y.
- Botón 10 “fc [GHz]”: Entrega el resultado de la frecuencia de corte para el modo que se quiere analizar.

Además, en la interfaz se incluye un recuadro de cuenta regresiva, el cual comienza el conteo al oprimir los botones 8 y 9. Mientras el conteo no llegue a cero, la gráfica se mantendrá girando. Se debe esperar que la cuenta regresiva en pantalla llegue a cero para seguir trabajando con la interfaz, de lo contrario, existirá un error en la compilación del código.

La simulación 5.1 pretende ilustrar y enseñar como son las distribuciones de campo electromagnético, tanto transversal como longitudinal para cualquier dimensión de la guía, frecuencia operacional y modo que se necesite analizar para una guía de onda rectangular.

5.1.2 Software desarrollado

Se realiza a través de la simulación desarrollado en MATLAB la interfaz de la figura 5.1 en la que se puede observar la descripción entregada en la sección 5.1.1.



Figura 5.1 Interfaz de la simulación 5.1.

En la figura 5.1 se destaca la enumeración de cada botón para simplificar la comprensión de lo que entrega cada uno de ellos según la descripción detallada en la sección 5.1.1. Además, se resalta el área donde se ingresan las variables de entrada en la interfaz.

A modo de ejemplo ilustrativo de la simulación, se ingresan valores específicos a las variables de entrada para la visualización de los resultados entregados por la interfaz. Los valores asignados a las variables de entrada son:

- Frecuencia operacional f : 11.7155 [GHz]
- Ancho de la guía a : 5 [cm]
- Alto de la guía b : 4 [cm]
- Número de semiciclos eje X “ m ”: 3
- Número de semiciclos eje Y “ n ”: 2
- Resolución: 300
- Largo z : 15 [cm]
- Modo: TE

Los resultados entregados por la simulación se observan en la figura 5.2.

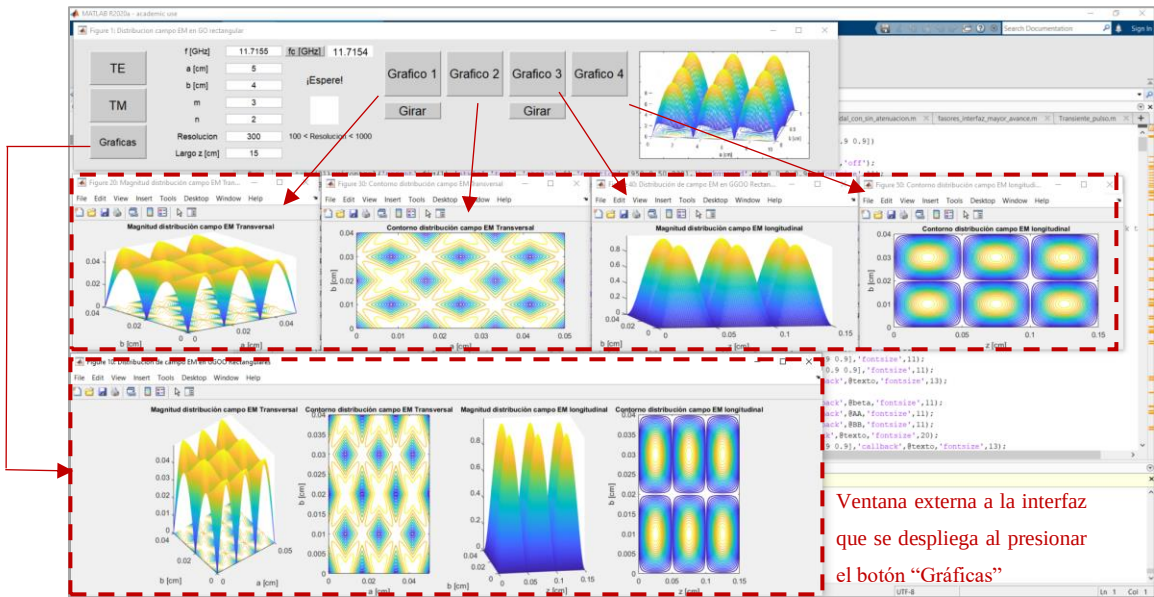


Figura 5.2 “Distribución espacial de la magnitud del campo eléctrico para guías de onda rectangulares”

La interfaz entrega como variable de salida el valor siguiente:

- Frecuencia de corte f_c : 11.7154 [GHz]

Las gráficas 1, 2 que se despliegan al presionar los botones 4 y 5 muestran la distribución transversal de la magnitud del campo eléctrico y su gráfica de contorno respectivamente.

Específicamente se grafica en el caso de propagación de un modo TE la distribución transversal de la magnitud del campo eléctrico $|E_x(x, y)| + |E_y(x, y)|$ y en el caso de que se propague un modo TM se grafica la distribución transversal de la magnitud del campo magnético $|H_x(x, y)| + |H_y(x, y)|$.

Se decide graficar solo uno de los campos para cada modo propagado con el fin de simplificar en el gráfico la visual de la distribución transversal de un campo eléctrico o un campo magnético en una

guía de onda rectangular. Permite identificar de mejor manera la diferencia entre como es cada tipo de distribución de campo.

Las gráficas 3 y 4 que se despliegan al oprimir los botones 6 y 7 muestran la distribución longitudinal de la magnitud del campo eléctrico E_z en el caso de que se propague un modo TM, y la distribución longitudinal de la magnitud del campo magnético H_z en el caso de que se propague un modo TE, y sus respectivas gráficas de contorno.

Se observa en mayor detalle las gráficas 1, 2, 3 y 4 en la figura 5.3.

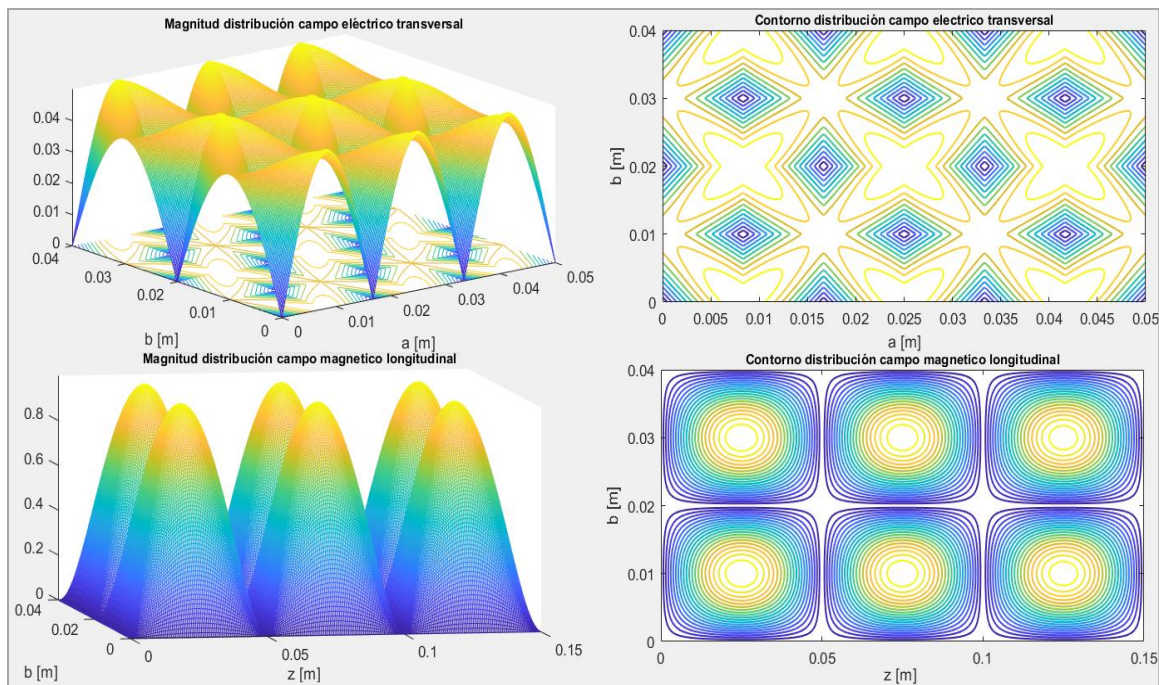


Figura 5.3 Magnitud de la distribución del campo eléctrico transversal y del campo magnético longitudinal junto a sus respectivas gráficas de contorno.

De la figura 5.3 se observa claramente al complementar un análisis entre la magnitud de la distribución del campo eléctrico transversal con la gráfica del respectivo contorno, que existen 2 máximos en el eje Y de la guía y 3 máximos en el eje X de la guía rectangular, valor que coincide con los parámetros de entrada m y n . Además, se observa que existe propagación de la señal longitudinal debido a que la frecuencia de operación es mayor a la frecuencia de corte del modo TE_{32} .

Una vez detallada e ilustrada el resultado final de la interfaz diseñada se procede a realizar la validación las gráficas obtenidas por la simulación.

5.1.3 Validación de la simulación

Para la validación de la simulación 5.1, se contrastan los resultados obtenidos por las gráficas entregadas por la simulación con las gráficas que se observan en las figuras 5.4 y 5.5

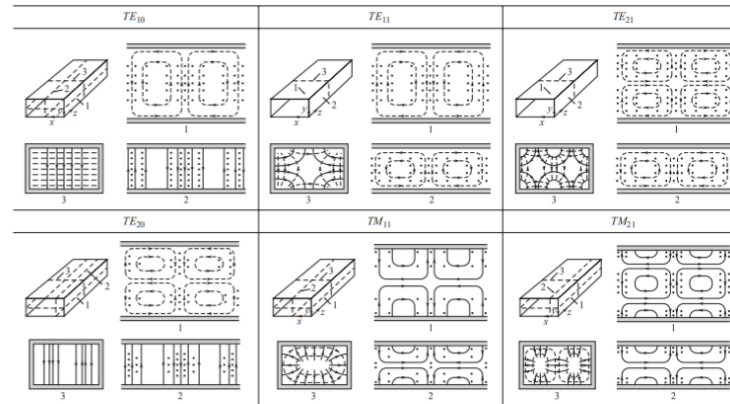


FIGURE 3.9 Field lines for some of the lower order modes of a rectangular waveguide.

Reprinted with permission from S. Ramo, J. R. Whinnery, and T. Van Duzer, *Fields and Waves in Communication Electronics*. Copyright © 1965 by John Wiley & Sons, Inc. Table 8.02.

Figura 5.4 Líneas de campo para modos de orden inferior en guía de onda rectangular [14].

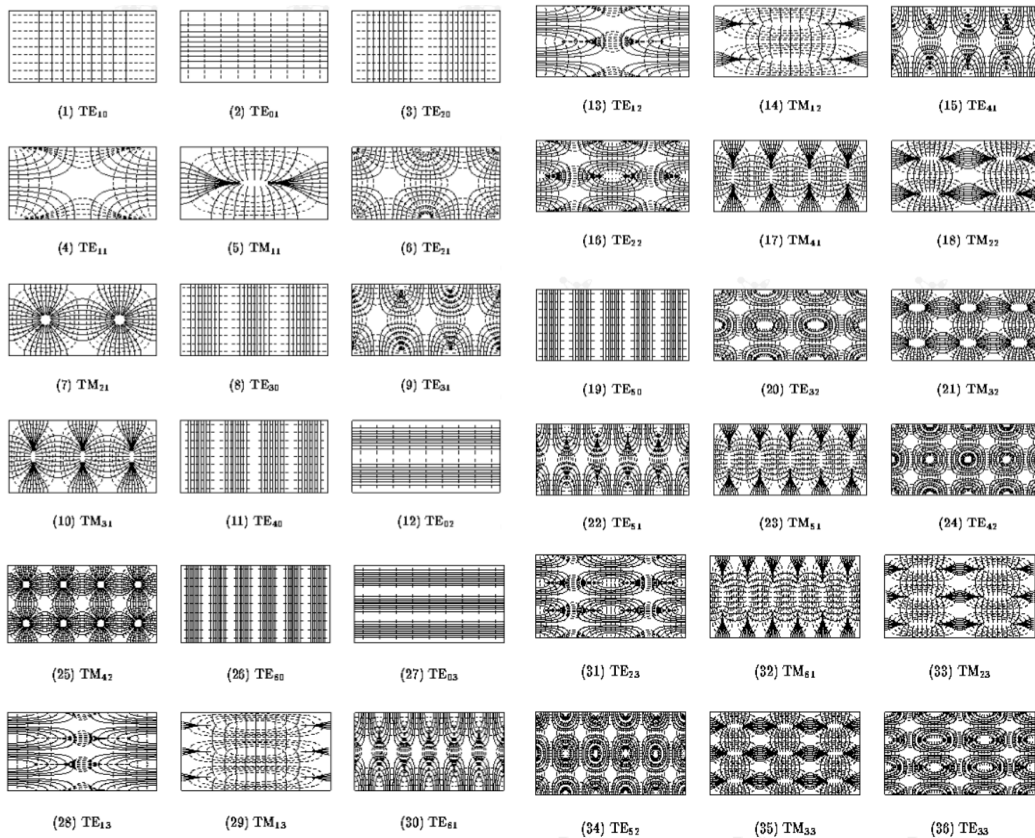
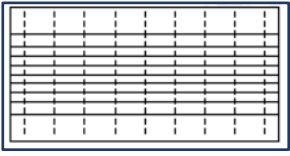
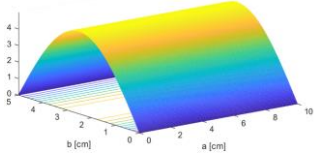
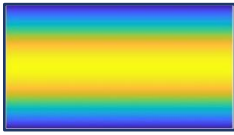
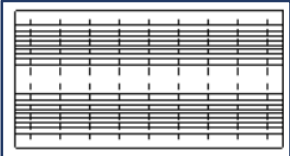
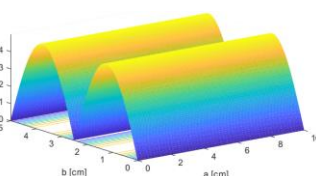
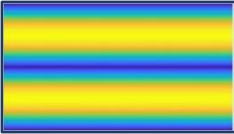
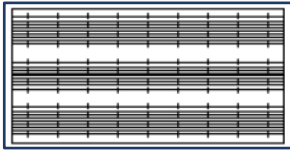
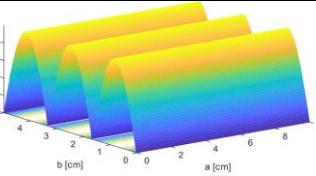
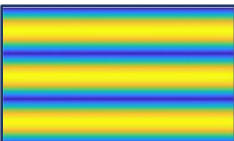


Figura 5.5 Distribución transversal de líneas de campo electromagnético donde la relación entre lados es 2 a 1 [15].

En primer lugar, se comienza validando las gráficas entregadas por la simulación de la propagación de los modos TE representados en la figura 5.5.

Se extrae de la figura 5.5 la distribución transversal de las líneas de campo de los modos TE_{01} , TE_{02} , TE_{03} a la tabla 5.1 y se agregan las distribuciones transversales de la magnitud del campo eléctrico de los mismos modos entregados por la simulación con el fin de comparar ambas distribuciones.

Tabla 5.1 Comparación de distribución de modos TE_{01} , TE_{02} y TE_{03} .

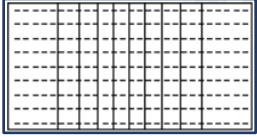
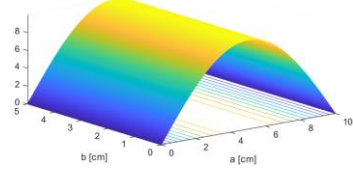
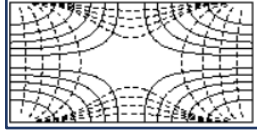
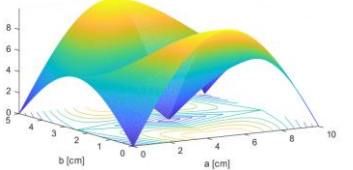
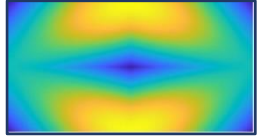
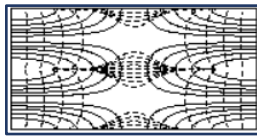
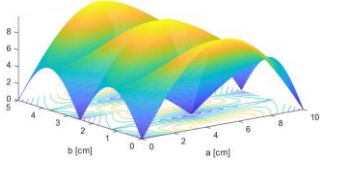
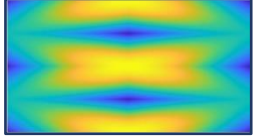
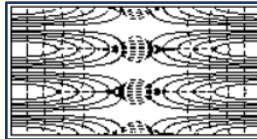
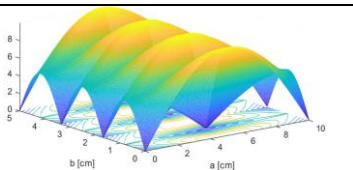
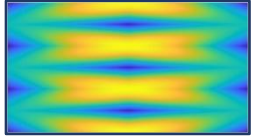
Modo	Teoría	Distribución 3D de la magnitud del campo eléctrico transversal	Distribución 2D de la magnitud del campo eléctrico transversal
TE_{01}			
TE_{02}			
TE_{03}			

Tal como se describe en el capítulo de fundamentos teóricos, los subíndices m y n describen el número de medios ciclos existentes de la magnitud del campo en la dirección X e Y respectivamente. Por lo que si $m = 0$, se entiende que no existen medios ciclos de campo (eléctrico o magnético, según sea el caso) en el eje X , y si $n = c$ se entiende que existen c medios ciclos en el eje Y . Lo anteriormente mencionado se refleja en las gráficas entregadas por la simulación de la tabla 5.1.

Se observa claramente que para los tres modos no existen máximos de campo eléctrico en el eje X , pero si existen máximos de campo eléctrico en el eje Y . En el caso de los modos TE_{01} , TE_{02} y TE_{03} existe 1, 2 y 3 máximos en el eje Y respectivamente.

Se extrae de igual manera de la figura 5.5 la distribución transversal de las líneas de campo de los modos TE_{10} , TE_{11} , TE_{12} y TE_{13} a la tabla 5.2 y, además, se agregan las distribuciones transversales de la magnitud del campo eléctrico de los mismos modos entregados por la simulación con el fin de comparar ambas distribuciones.

Tabla 5.2 Comparación de distribución de modos TE_{10} , TE_{11} , TE_{12} y TE_{13} .

Modo	Teoría	Distribución 3D de la magnitud del campo eléctrico transversal	Distribución 2D de la magnitud del campo eléctrico transversal
TE_{10}			
TE_{11}			
TE_{12}			
TE_{13}			

Cabe destacar que todas las imágenes extraídas de la figura 5.5 corresponden a líneas de campo eléctricas y magnéticas superpuestas, por lo que, es importante mencionar que las líneas continuas de estas representan la distribución de las líneas de campo eléctrico transversal y las líneas segmentadas representan la distribución de las líneas de campo magnético transversal.

Como se mencionó en la sección 5.1.1, la simulación 5.1 entrega gráficas que representan en el caso de la propagación de un modo TE la distribución de la magnitud transversal del campo eléctrico, por lo que para realizar la correcta comparación con lo que detalla la teoría, se debe comparar los resultados obtenidos con el análisis de las imágenes extraídas de la figura 5.5 según la densidad de líneas de campo eléctrico, es decir, según la magnitud de campo eléctrico que representa cada una de ellas.

Nuevamente se extrae de la figura 5.5 la distribución transversal de las líneas de campo de los modos TE_{20} , TE_{21} , TE_{22} y TE_{23} a la tabla 5.3. De los modos TE_{30} , TE_{31} , TE_{32} y TE_{33} a la tabla 5.4. De los modos TE_{40} , TE_{41} y TE_{42} a la tabla 5.5, y finalmente, de los modos TE_{50} , TE_{51} , TE_{52} , TE_{60} y TE_{61} a la tabla 5.6. Además, se agregan las distribuciones transversales de las magnitudes de campo eléctrico de los mismos modos entregados por la simulación con el fin de comparar ambas distribuciones en cada una de las tablas.

Tabla 5.3 Comparación de distribución de modos TE_{20} , TE_{21} , TE_{22} y TE_{23} .

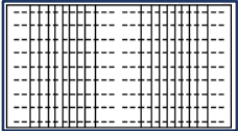
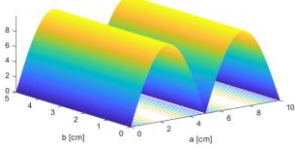
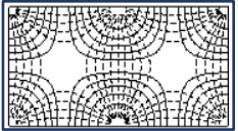
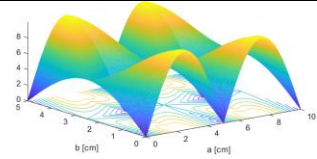
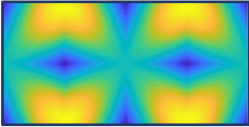
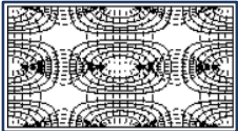
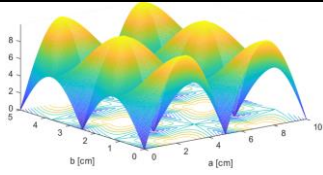
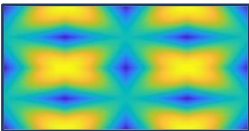
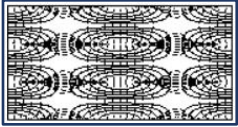
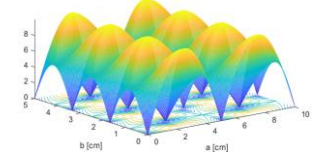
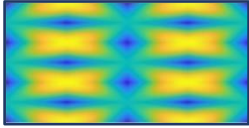
Modo	Teoría	Distribución 3D de la magnitud del campo eléctrico transversal	Distribución 2D de la magnitud del campo eléctrico transversal
TE_{20}			
TE_{21}			
TE_{22}			
TE_{23}			

Tabla 5.4 Comparación de distribución de modos TE_{30} , TE_{31} , TE_{32} y TE_{33} .

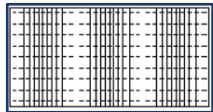
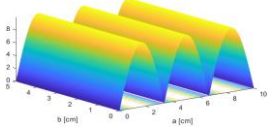
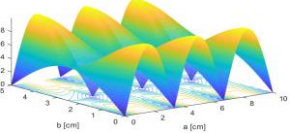
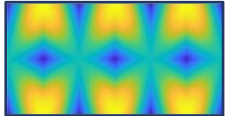
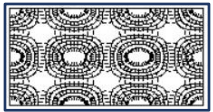
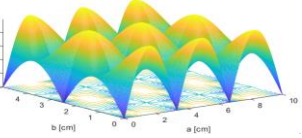
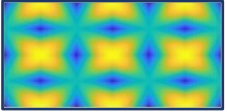
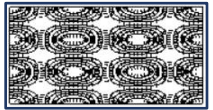
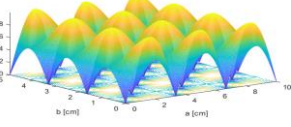
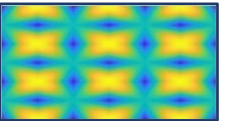
Modo	Teoría	Distribución 3D de la magnitud del campo eléctrico transversal	Distribución 2D de la magnitud del campo eléctrico transversal
TE_{30}			
TE_{31}			
TE_{32}			
TE_{33}			

Tabla 5.5 Comparación de distribución de modos TE_{40} , TE_{41} y TE_{42} .

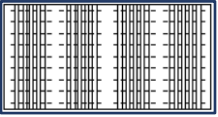
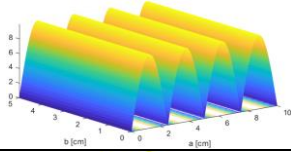
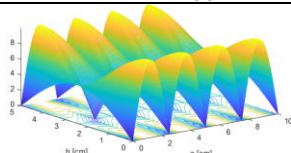
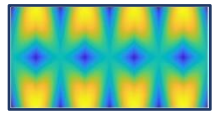
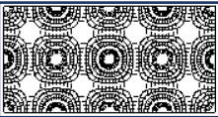
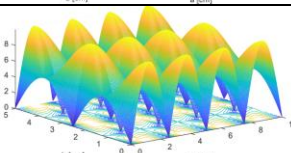
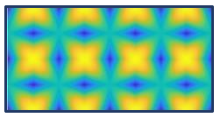
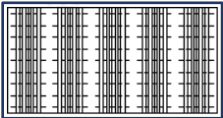
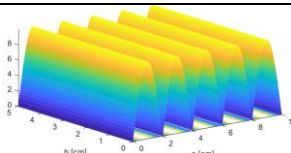
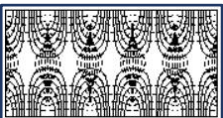
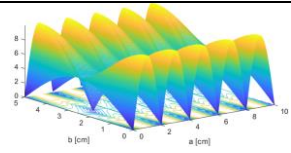
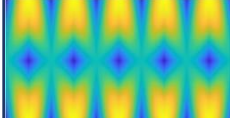
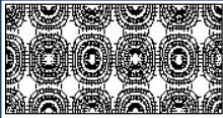
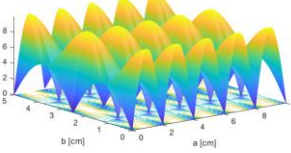
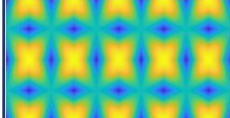
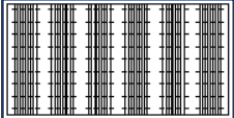
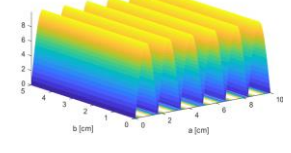
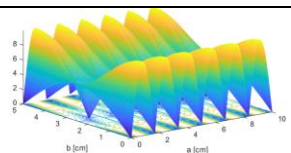
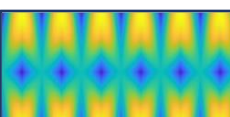
Modo	Teoría	Distribución 3D de la magnitud del campo eléctrico transversal	Distribución 2D de la magnitud del campo eléctrico transversal
TE_{40}			
TE_{41}			
TE_{42}			

Tabla 5.6 Comparación de distribución de modos TE_{50} , TE_{51} , TE_{52} , TE_{60} y TE_{61} .

Modo	Teoría	Distribución 3D de la magnitud del campo eléctrico transversal	Distribución 2D de la magnitud del campo eléctrico transversal
TE_{50}			
TE_{51}			
TE_{52}			
TE_{60}			
TE_{61}			

Al realizar un análisis de lo obtenido en las tablas 5.2, 5.3, 5.4, 5.5 y 5.6, se observa claramente que las gráficas entregadas por la simulación de la distribución en tres dimensiones y en dos dimensiones de la magnitud del campo eléctrico, efectivamente concuerdan con la distribución de máximos de campo eléctrico en cada eje observadas según la densidad de las líneas de campo eléctricos de los modos representados en la figura 5.5.

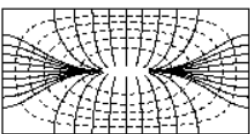
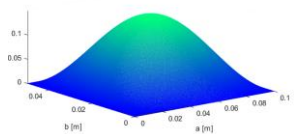
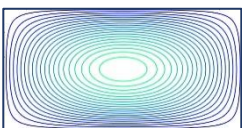
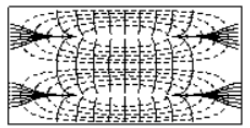
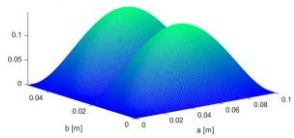
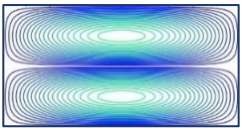
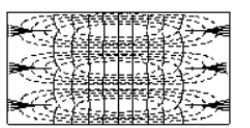
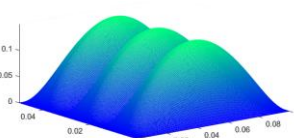
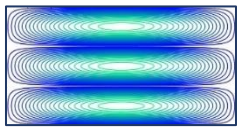
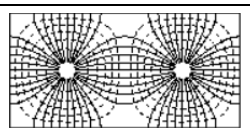
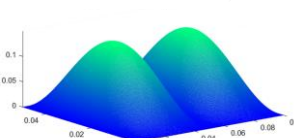
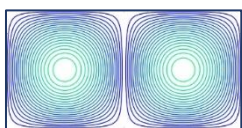
Se puede concluir al comparar la distribución transversal de la magnitud de los campos eléctricos para los modos TE de las tablas 5.1, 5.2, 5.3, 5.4, 5.5 y 5.6, que la simulación 5.1 concuerdan con la teoría.

En segundo lugar, se validan las gráficas entregadas por la simulación 5.1 de la propagación de los modos TM representados en la figura 5.5.

Se realiza a continuación el mismo análisis comparativo realizado para los modos TE para los modos transversales magnéticos TM.

Se extraen de la figura 5.5 la distribución transversal de las líneas de campo electromagnéticos a las tablas 5.7 y 5.8, de los modos $TM_{11}, TM_{12}, TM_{13}, TM_{21}, TM_{22}, TM_{23}$ y de los modos $TM_{31}, TM_{32}, TM_{33}, TM_{41}, TM_{42}, TM_{51}$ y TM_{61} respectivamente.

Tabla 5.7 Comparación de distribución de modos $TM_{11}, TM_{12}, TM_{13}, TM_{21}, TM_{22}$ y TM_{23} .

Modo	Teoría	Distribución 3D de la magnitud del campo magnético transversal	Distribución 2D de la magnitud del campo magnético transversal
TM_{11}			
TM_{12}			
TM_{13}			
TM_{21}			

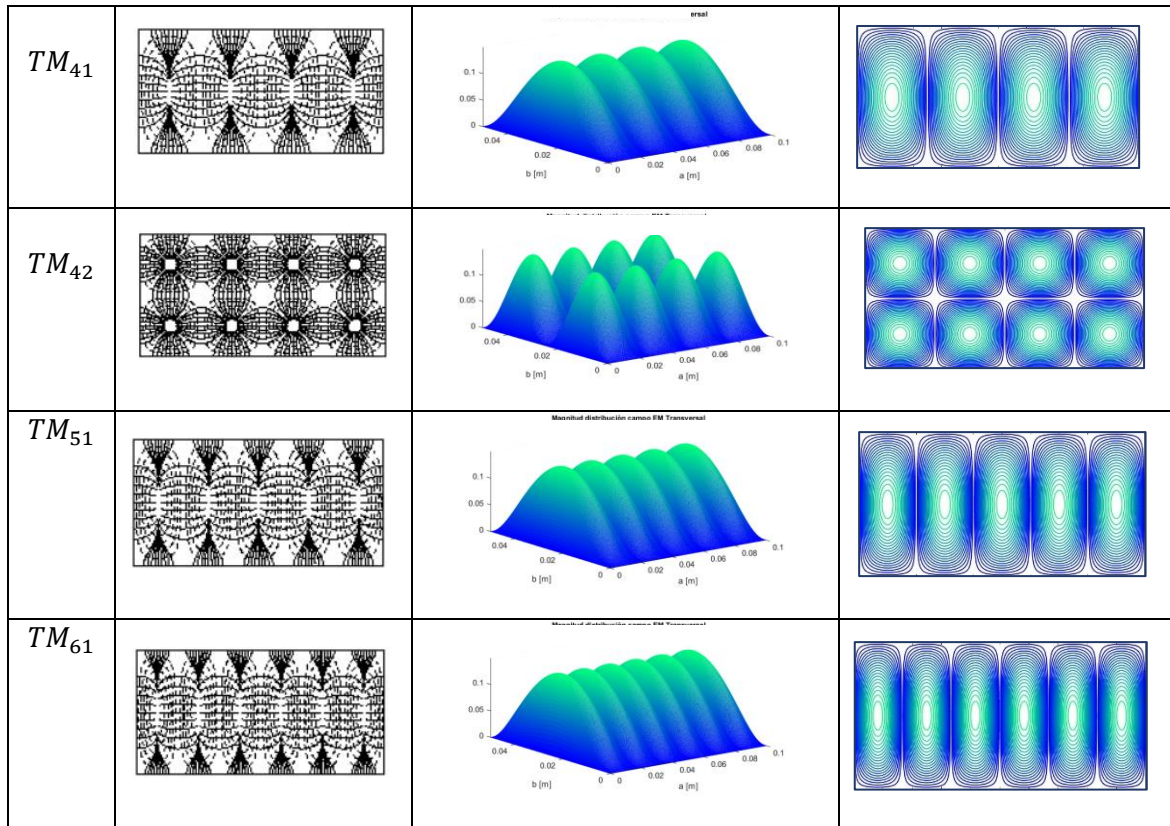
TM_{22}			
TM_{23}			

Como se mencionó en la sección 5.1.1, la simulación 5.1 entrega gráficas que representan en el caso de la propagación de un modo TM la distribución transversal de la magnitud del campo magnético $|H_x(x, y)| + |H_y(x, y)|$, por lo que para realizar la correcta comparación con lo que detalla la teoría, se debe comparar los resultados obtenidos con el análisis de las imágenes extraídas de la figura 5.5 según la densidad de líneas de campo magnético, es decir, según la magnitud de campo magnético que representa cada una de ellas.

He de recordar que todas las imágenes extraídas de la figura 5.5 corresponden a líneas de campo eléctrico y magnéticas superpuestas. Las líneas continuas de estas representan la distribución de las líneas de campo eléctrico transversal y las líneas segmentadas representan la distribución de las líneas de campo magnético transversal.

Tabla 5.8 Comparación de distribución de modos $TM_{31}, TM_{32}, TM_{33}, TM_{41}, TM_{42}, TM_{51}$ y TM_{61} .

Modo	Teoría	Distribución 3D de la magnitud del campo magnético transversal	Distribución 2D de la magnitud del campo magnético transversal
TM_{31}			
TM_{32}			
TM_{33}			



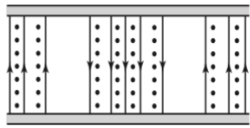
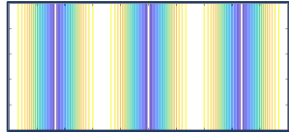
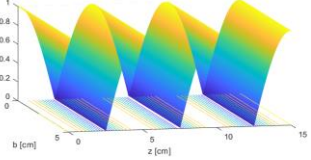
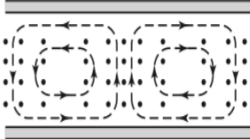
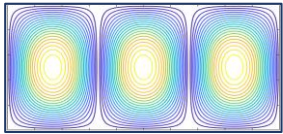
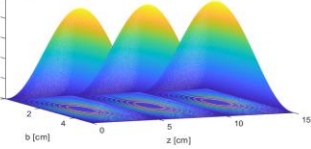
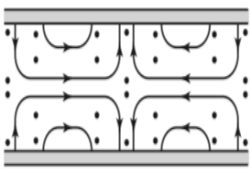
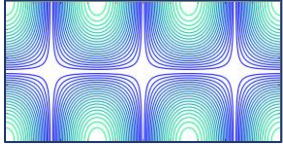
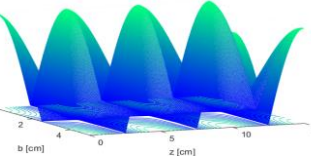
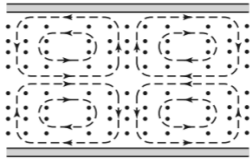
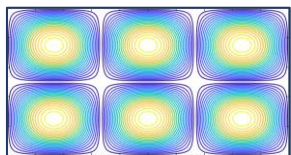
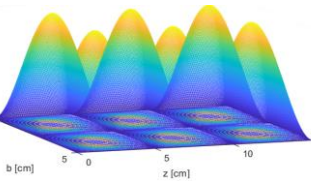
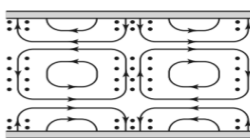
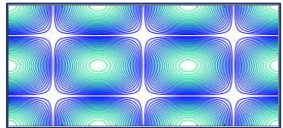
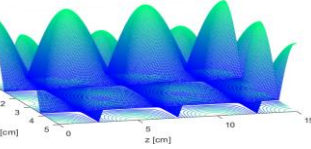
Al realizar un análisis de lo obtenido en las tablas 5.7 y 5.8, se observa claramente al visualizar las gráficas entregadas por la simulación de la distribución en tres dimensiones y en dos dimensiones, que efectivamente la distribución de máximos de campo magnético en cada eje refleja lo que representa cada densidad de líneas de campo magnético (magnitud del campo magnético) entregadas por la figura 5.5. Por lo tanto se puede concluir, al comparar la distribución transversal de los campos magnéticos para los modos TM, que la simulación diseñada entrega gráficas que reflejan la teoría.

Finalmente, se realiza la validación de la distribución longitudinal de la magnitud del campo eléctrico E_z en el caso de que se propague un modo TM y la distribución longitudinal de la magnitud del campo magnético H_z en el caso de que se propague un modo TE.

Se extrae de la figura 5.4 la distribución del campo longitudinal de los modos TE_{10} , TE_{11} , TM_{11} , TE_{12} y TM_{12} a la tabla 5.9 y se agrega, además, la distribución del campo longitudinal de los mismos modos entregado por la simulación.

Es importante destacar que en la figura 5.4, las líneas continuas de cada imagen representan la distribución de las líneas de campo eléctrico longitudinal y las líneas segmentadas representan la distribución de las líneas de campo magnético longitudinal.

Tabla 5.9 Distribución del campo longitudinal de los modos TE_{10} , TE_{11} , TM_{11} , TE_{12} y TM_{12} .

Modo	Teoría	Distribución longitudinal en 3D y 2D del campo eléctrico o magnético según sea el caso.	
TE_{10}		$H_z: y \text{ vs } z$ 	
TE_{11}		$H_z: y \text{ vs } z$ 	
TM_{11}		$E_z: y \text{ vs } z$ 	
TE_{12}		$H_z: y \text{ vs } z$ 	
TM_{12}		$E_z: y \text{ vs } z$ 	

Al comparar la representación de la magnitud del campo longitudinal eléctrico o magnético respectivo para el modo de análisis TM o TE teórica con la entregada por la simulación, se observa que son idénticas. Se puede concluir una vez analizada la distribución transversal y longitudinal de los campos electromagnéticos para modos transversales eléctricos TE y magnéticos TM, que la simulación diseñada entrega gráficas que reflejan la teoría, por lo que se considera finalmente, validada.

He de recordar que la simulación no entrega la intensidad de las líneas, si no que la magnitud de los campos.

5.2 Distribución espacial del campo para GGOO circular

5.2.1 Descripción de la simulación

La simulación “Distribución espacial del campo para guías de onda circular” busca ilustrar de igual manera que la simulación 5.1, la distribución transversal y longitudinal de las componentes de campo electromagnético en una guía de onda, con la diferencia de que la geometría de la guía ahora es circular y no rectangular.

Las variables de entrada a la interfaz son: las dimensiones de la guía, radio de la guía r y largo longitudinal del tramo en centímetros de la guía (figura 2.11), los valores de n y p (subíndice de los modos) y la frecuencia operacional f en Giga Hertz.

La simulación 5.2 está compuesta por 10 botones (figura 5.6), los cuales son:

- Botón 1 “TE”: Una vez ingresadas las variables de entrada, al presionar el botón 1, le indica al programa que se desean ver los resultados para una propagación de modo transversal eléctrico.
- Botón 2 “TM”: Una vez ingresadas las variables de entrada, al presionar el botón 2, le indica al programa que se desean ver los resultados para una propagación de modo transversal magnético.
- Botón 3 “Gráfica 1”: Desglosa en una ventana aparte la distribución transversal de la magnitud del campo electromagnético.
- Botón 4 “Gráfica 2”: Desglosa en una ventana aparte el contorno de la distribución transversal de la magnitud del campo electromagnético.
- Botón 5 “Gráfica 3”: Desglosa en una ventana aparte la distribución longitudinal de la magnitud del campo electromagnético.
- Botón 6 “Gráfica 4”: Desglosa en una ventana aparte el contorno de la distribución longitudinal de la magnitud del campo electromagnético.
- Botón 7 “Girar gráfica 1”: Desglosa en una ventana aparte la misma gráfica tridimensional al oprimir el botón 3, con la diferencia de que gira alrededor del eje y .
- Botón 8 “Girar gráfica 2”: Desglosa en una ventana aparte la misma gráfica tridimensional al oprimir el botón 5, con la diferencia de que gira alrededor del eje y .
- Botón 9 “ f_c [GHz]”: Entrega el resultado de la frecuencia de corte para el modo que se desea analizar.
- Botón 10 “ β_g [rad/m]”: Entrega el resultado de constante de fase del modo que se desea analizar.

Además, en la interfaz se incluye un recuadro de cuenta regresiva, el cual comienza el conteo al oprimir los botones 7 y 8. Mientras el conteo no llegue a cero, la gráfica se mantendrá girando. Se debe esperar que la cuenta regresiva en pantalla llegue a cero para seguir trabajando con la interfaz. De lo contrario, existirá error de compilación del código al seguir interactuando con la interfaz.

La simulación 5.2 pretende ilustrar las distribuciones de la magnitud del campo electromagnético, tanto transversal como longitudinal, para cualquier dimensión de la guía de onda circular, para cada frecuencia operacional y para cada modo que se necesite analizar.

5.2.2 Software desarrollado

Se realiza a través de la simulación desarrollado en MATLAB la interfaz de la figura 5.6 en la que se puede observar la descripción entregada en la sección 5.2.1.

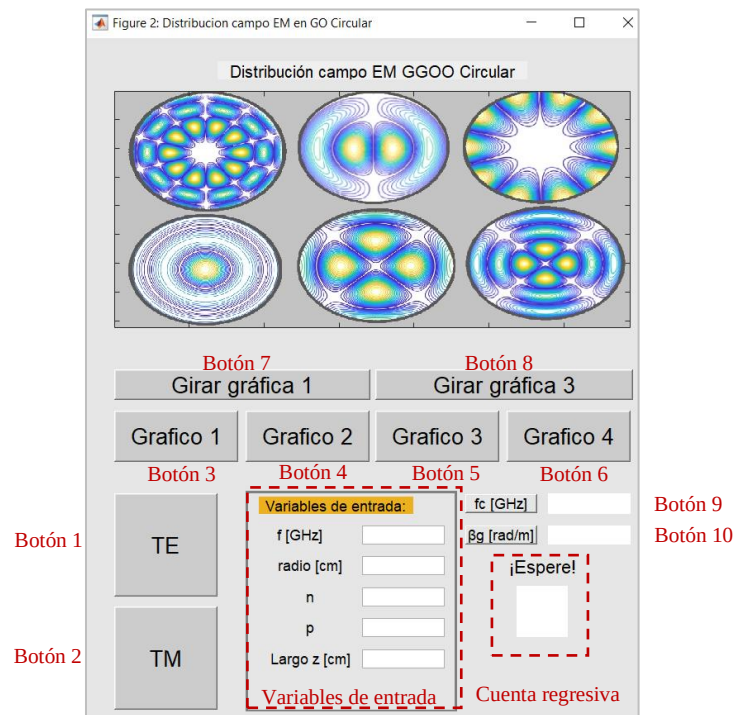


Figura 5.6 Interfaz de la simulación 5.2

En la figura 5.6 se destaca la enumeración de cada botón para simplificar la comprensión de lo que entrega cada uno de ellos según la descripción detallada en la sección 5.2.1. Además, se resalta el área donde se ingresan las variables de entrada en la interfaz.

A modo de ejemplo ilustrativo de la simulación, se ingresan valores específicos a las variables de entrada para la visualización de los resultados entregados por la interfaz. Los valores asignados a las variables de entrada son:

Seleccionando el modo **TE** las variables de entrada son:

- Frecuencia de operación f : 8.51 [GHz]
- Radio: 4.5 [cm]
- n : 3

- p : 2
- Largo de la guía: 15 [cm]

Y las variables de salida son:

- Frecuencia de corte f_c : 8.504 [GHz]
- Constante de fase β_g : 6.591 [rad/m].

Seleccionando el modo **TM** las variables de entrada son:

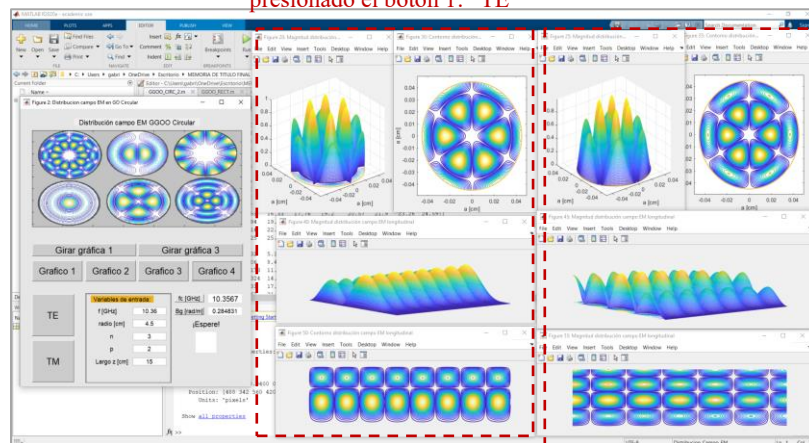
- Frecuencia de operación f : 10.36 [GHz]
- Radio: 4.5 [cm]
- n : 3
- p : 2
- Largo de la guía: 15 [cm]

Y las variables de salida son:

- Frecuencia de corte f_c : 10.357 [GHz]
- Constante de fase β_g : 5.441 [rad/m].

Los resultados entregados por la simulación se observan en la figura 5.7.

Gráficas desplegadas seleccionando
los botones 3, 4, 5 y 6 previamente
presionado el botón 1: “TE”



Gráficas
desplegadas
seleccionando los
botones 3, 4, 5 y
6 previamente
presionado el
botón 1: “TM”

Figura 5.7 “Distribución transversal y longitudinal de la magnitud del campo eléctrico o magnético según sea el caso para guías de onda circulares”

En la figura 5.8 se ilustra lo obtenido al presionar el botón 4. Se representa de manera más detallada la distribución transversal del campo eléctrico y magnético graficada por la simulación 5.2 con las variables de entrada señaladas para el modo transversal eléctrico TE y transversal magnético TM respectivamente.

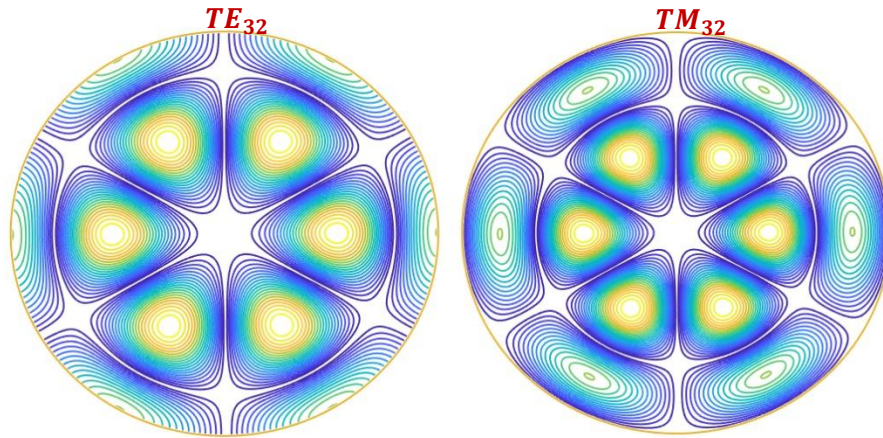


Figura 5.8 Distribución transversal del campo eléctrico para el modo TE_{32} y magnético para el modo TM_{32} respectivamente.

La simulación 5.2 grafica, en el caso de propagación de un modo TE, la distribución transversal de la magnitud del campo eléctrico. En el caso de que se propague un modo TM se grafica la distribución transversal de la magnitud del campo magnético.

Se decide, además, graficar solo uno de los campos para cada modo propagado con el fin de simplificar en el gráfico la visual de la distribución transversal de un campo eléctrico o un campo magnético en una guía de onda circular. Esto permite identificar de mejor manera la diferencia entre cada tipo de distribución de campo.

Las gráficas que se despliegan al oprimir los botones 5 y 6 muestran la distribución longitudinal de la magnitud del campo eléctrico E_z en el caso de que se propague un modo TM, y la distribución longitudinal de la magnitud del campo magnético H_z en el caso de que se propague un modo TE y sus respectivas gráficas de contorno.

Una vez detallada e ilustrada el resultado final de la interfaz diseñada se procede a realizar la validación las gráficas obtenidas por la simulación.

5.2.3 Validación de la simulación

Se valida la simulación 5.2 contrastando los resultados obtenidos por la simulación versus los que señala la teoría.

En la figura 5.9 se visualizan los diagramas de campo electromagnético de los primeros 30 modos de una guía de onda circular [16].

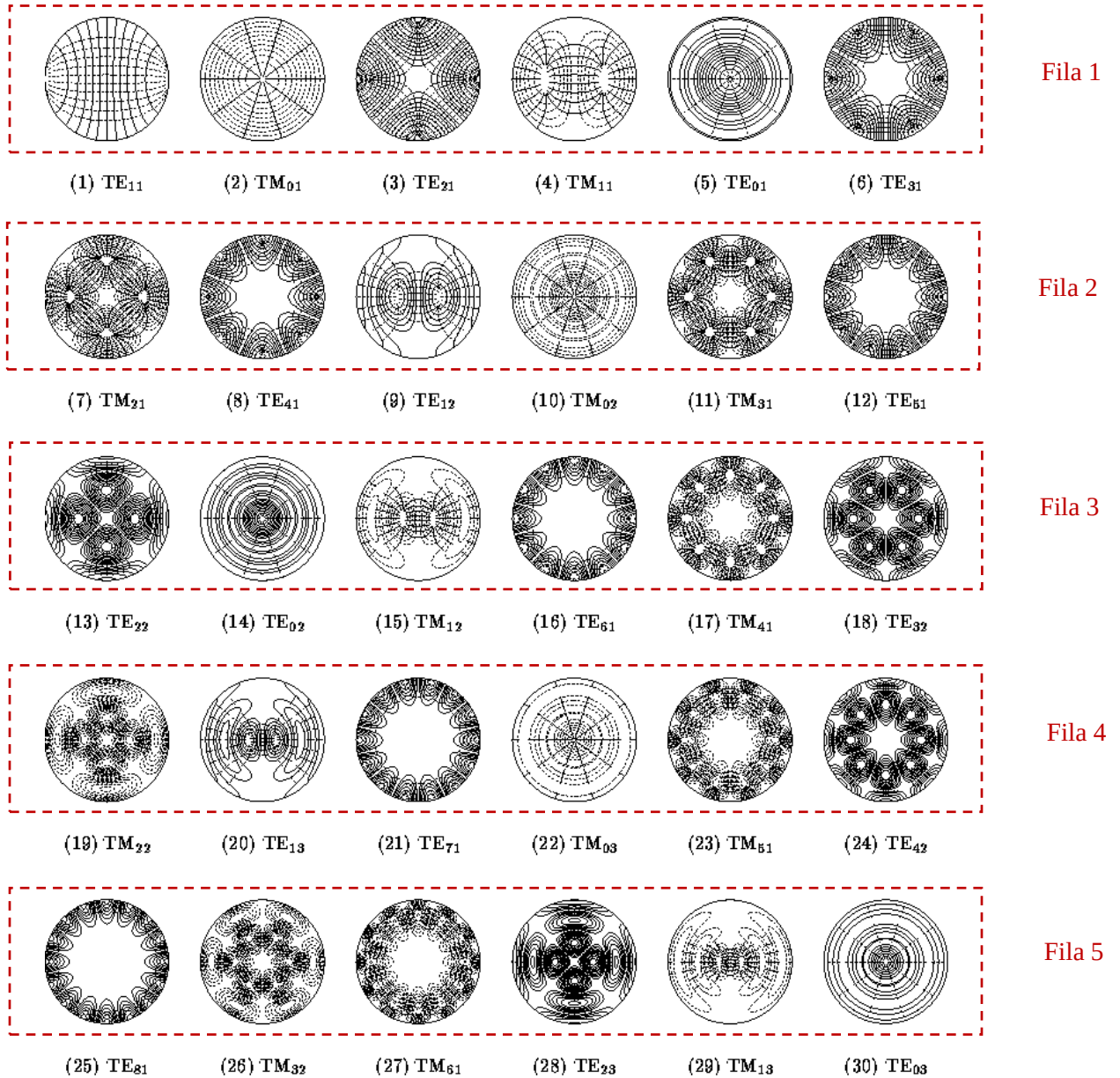


Figura 5.9 Distribución transversal de 30 modos que se propagan en una guía de onda circular.

Cabe destacar que todas las imágenes de la figura 5.9 corresponden a líneas de campo eléctricas y magnéticas superpuestas, por lo que, es importante mencionar que las líneas continuas de estas representan la distribución de las líneas de campo eléctrico transversal y las líneas segmentadas representan la distribución de las líneas de campo magnético transversal.

A la figura 5.9 se le marcan filas enumeradas del 1 al 5, con el fin de extraer las distribuciones de los distintos modos pertenecientes a cada fila a las tablas 5.10, 5.11, 5.12, 5.13 y 5.14. Además, a cada una de esas tablas se les agrega la distribución de los modos correspondientes entregados por la simulación 5.2.

He de recordar que en el caso de propagación de un modo TE, la simulación grafica la distribución transversal de la magnitud del campo eléctrico, y en el caso de que se propague un modo TM, la simulación grafica la distribución transversal de la magnitud del campo magnético.

Por lo tanto, para realizar la comparación entre la representación teórica y la obtenida por la simulación 5.1, se debe realizar el siguiente análisis: Si se propaga un modo TE, comparar con las líneas continuas y si se propaga un modo TM comparar con las líneas segmentadas.

Tabla 5.10 Gráficas de campo de los modos TE_{11} , TM_{01} , TE_{21} , TM_{11} , TE_{01} y TE_{31} .

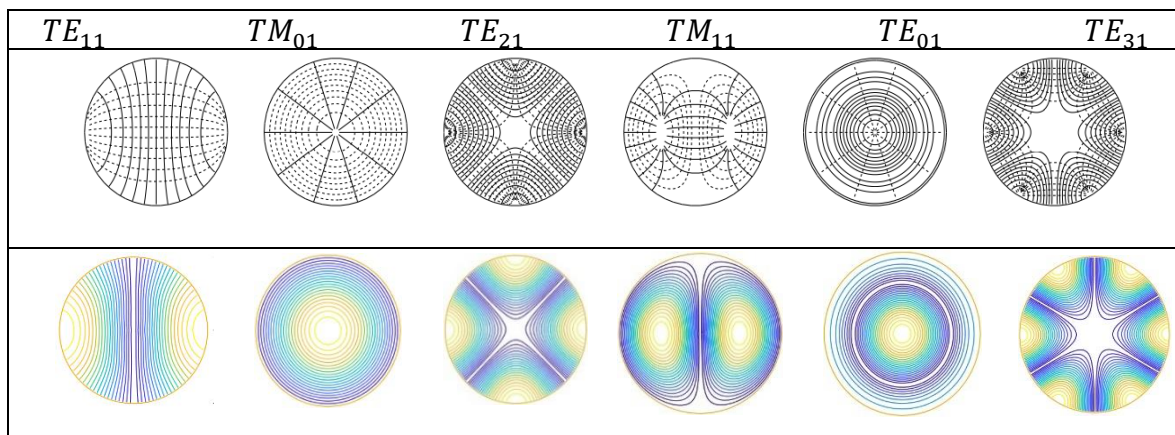


Tabla 5.11 Gráficas de campo de los modos TM_{21} , TE_{41} , TE_{12} , TM_{02} , TM_{31} y TE_{51} .

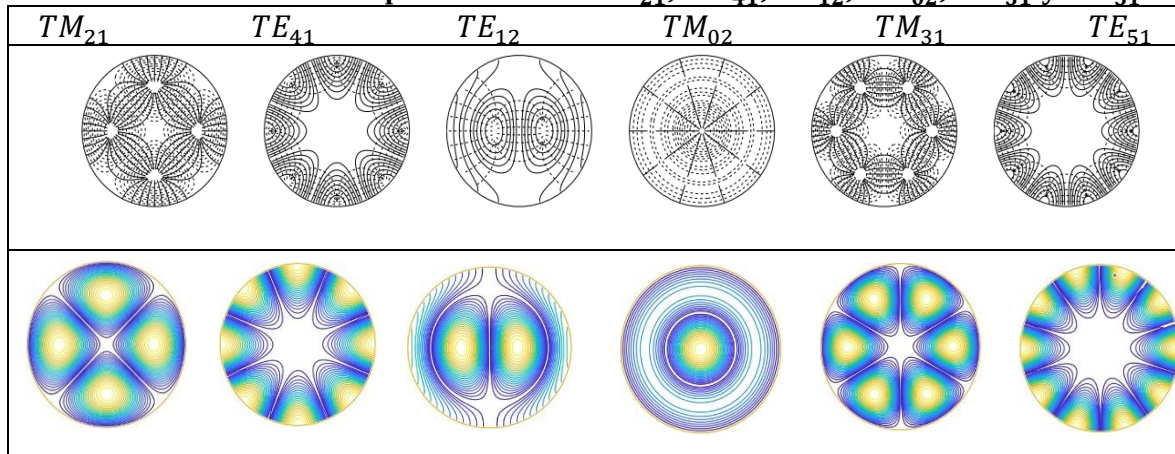


Tabla 5.12 Gráficas de campo de los modos TE_{22} , TE_{02} , TM_{12} , TE_{61} , TM_{41} y TE_{32} .

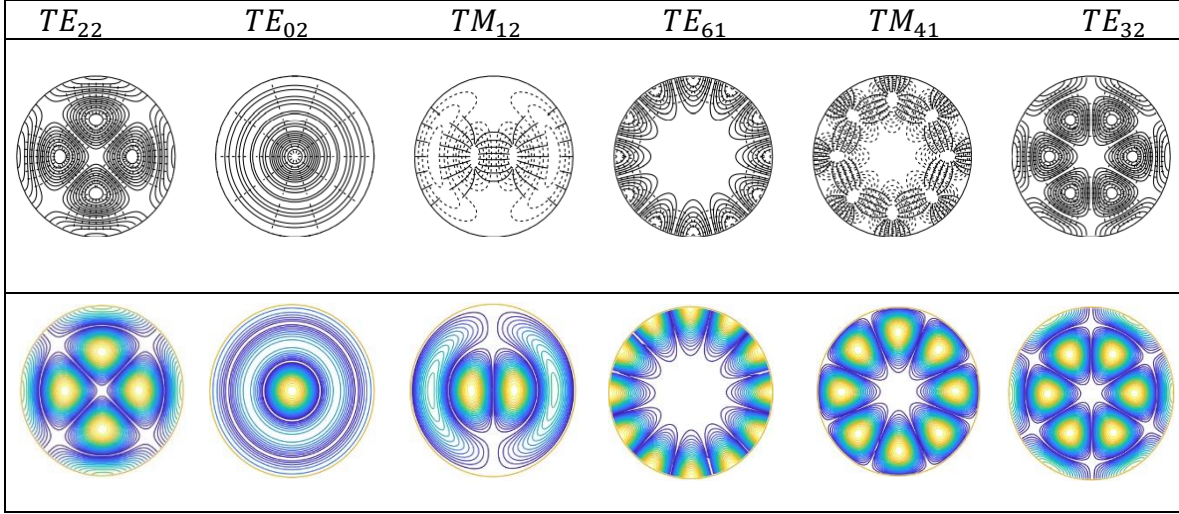


Tabla 5.13 Gráficas de campo de los modos TM_{22} , TE_{13} , TE_{71} , TM_{03} , TM_{51} y TE_{42} .

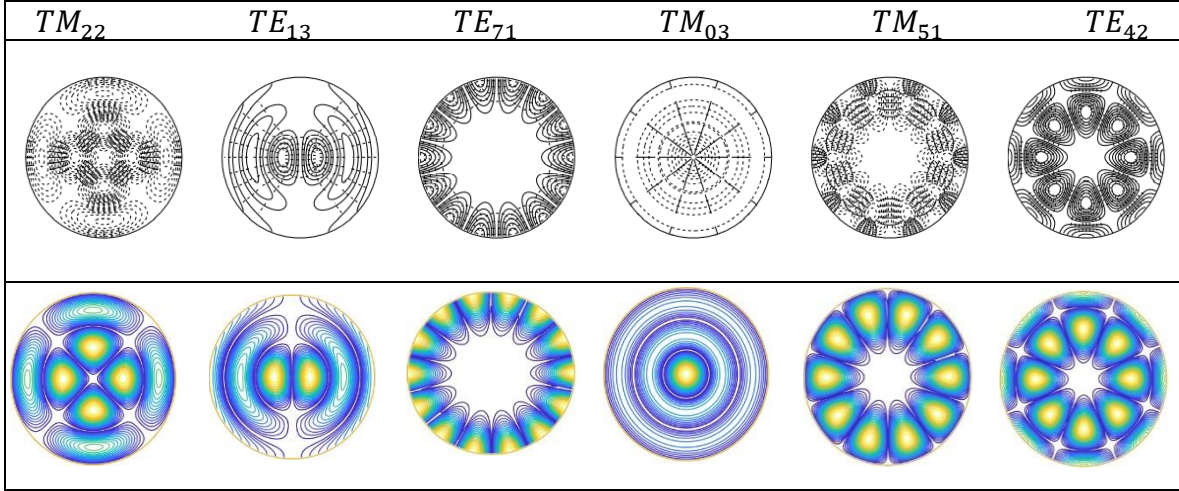
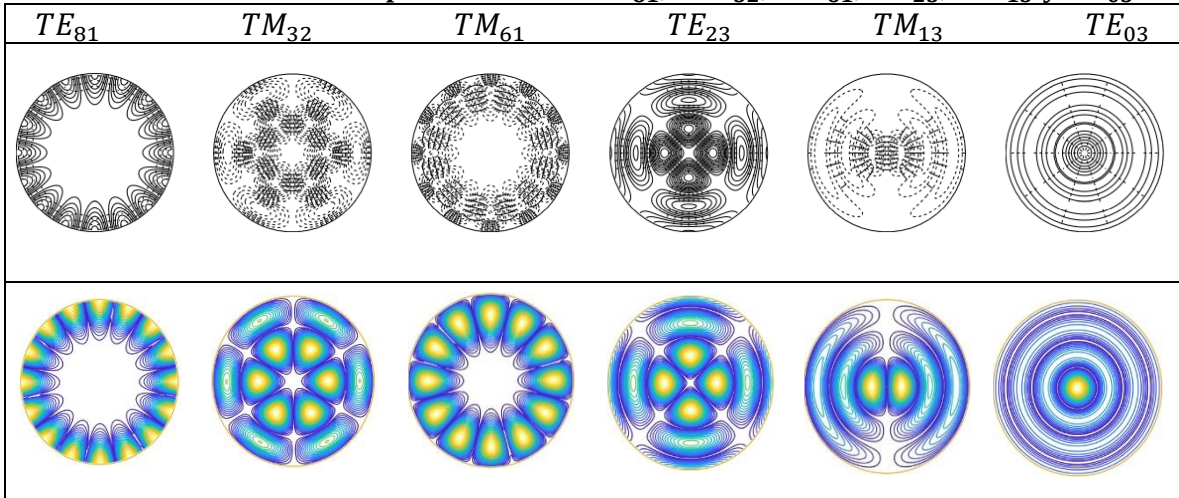


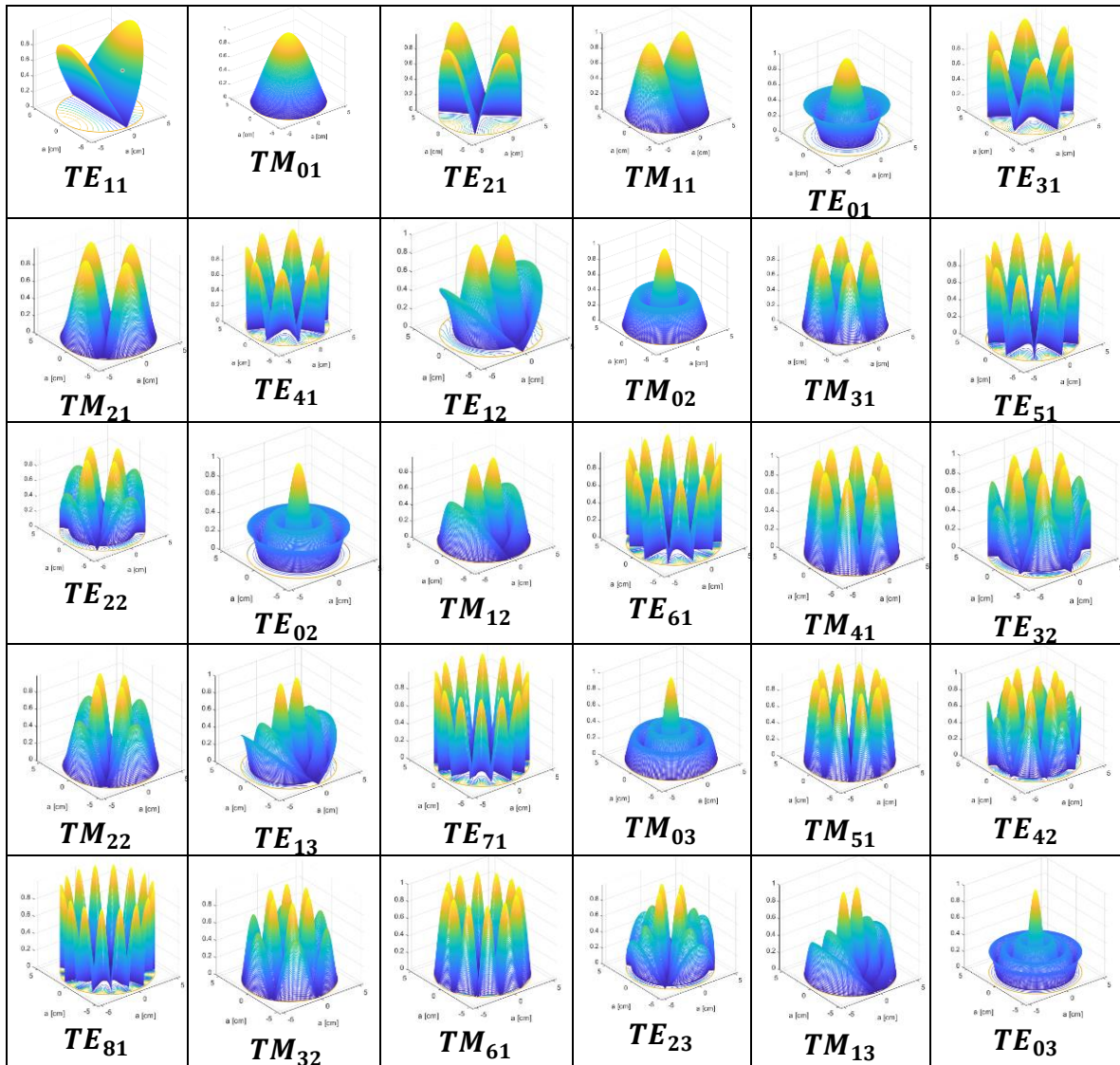
Tabla 5.14 Gráficas de campo de los modos TE_{81} , TM_{32} , TM_{61} , TE_{23} , TM_{13} y TE_{03} .



De las tablas 5.10, 5.11, 5.12, 5.13 y 5.14, se puede concluir que para los modos TE, al comparar las gráficas obtenidas por la simulación con las líneas continuas y para los modos TM con las líneas segmentadas, la distribución de los campos correspondientes es idéntica.

En la tabla 5.15, se ilustran las distribuciones transversales 3D de los mismos 30 modos de la figura 5.9 en exactamente el mismo orden entregadas por la simulación 5.2. Las gráficas con las distribuciones transversales en 3D permiten visualizar de mejor manera el número de ciclos en dirección φ , en 2π radianes y el número de ceros existentes del campo magnético o eléctrico, según sea el caso, en dirección radial.

Tabla 5.15 Distribución transversal 3D de los modos representados en la figura 5.9.



En la tabla 5.15, en el caso de propagación de un modo TE, la simulación grafica en 3D la distribución transversal de la magnitud del campo eléctrico. En el caso de que se propague un modo TM, la simulación grafica en 3D la distribución transversal de la magnitud del campo magnético.

A continuación, se elige el modo TM_{32} para realizar un análisis de su distribución transversal de la magnitud del campo magnético. Específicamente, se analizarán los significados de los subíndices np explicados en el capítulo 2.

La teoría dice que el subíndice n representa el número de ciclos existentes en dirección φ , en 2π radianes y que el subíndice p representa el número de ceros del campo magnético existente en dirección radial, excluyendo el origen.

En las figuras 5.10 y 5.11, se observa claramente la existencia de 3 ciclos de longitud de onda existentes en dirección φ , en 2π radianes y el número de 2 ceros existentes del campo magnético en dirección radial.

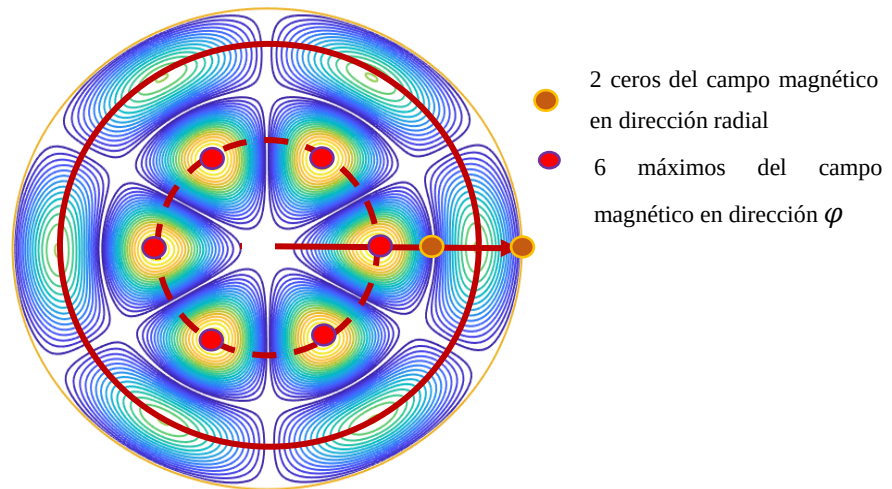


Figura 5.10 Distribución transversal del campo magnético del modo TM_{32} .

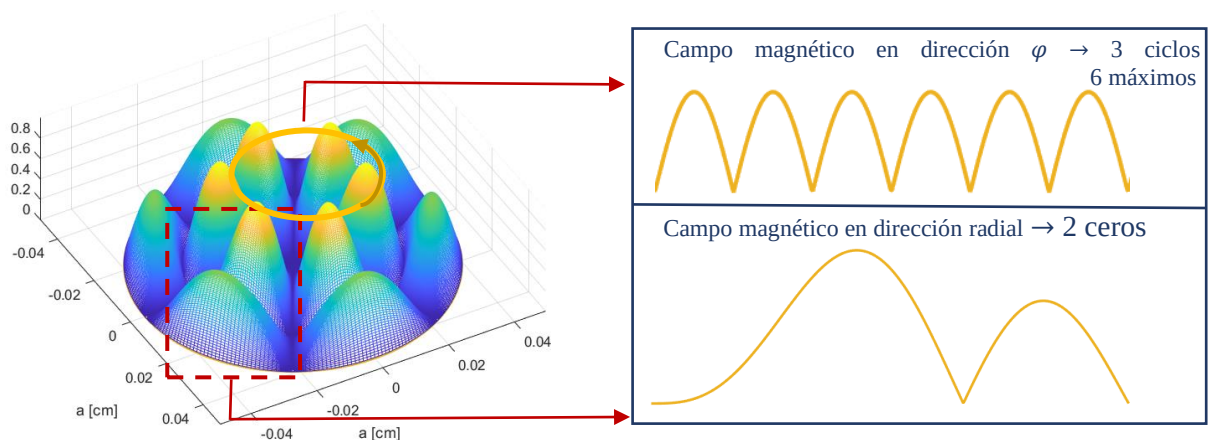


Figura 5.11 Distribución transversal 3D del campo magnético del modo TM_{32} .

Una vez analizada y validada las distribuciones transversales de las magnitudes de los campos eléctricos y magnéticos entregados por la simulación 5.2, se procede a validar la distribución de la magnitud del campo longitudinal de los mismos.

En la figura 5.12, se representa la distribución del campo electromagnético transversal y longitudinal en guías de onda circulares para los modos TM_{01} , TM_{02} , TM_{11} , TE_{01} y TE_{11} [17]. Las líneas continuas de estas representan campo eléctrico y las líneas segmentadas representan campo magnético.

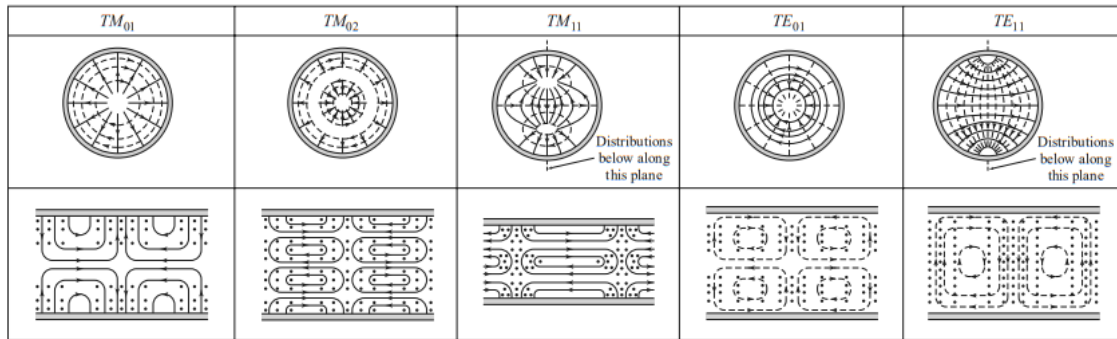
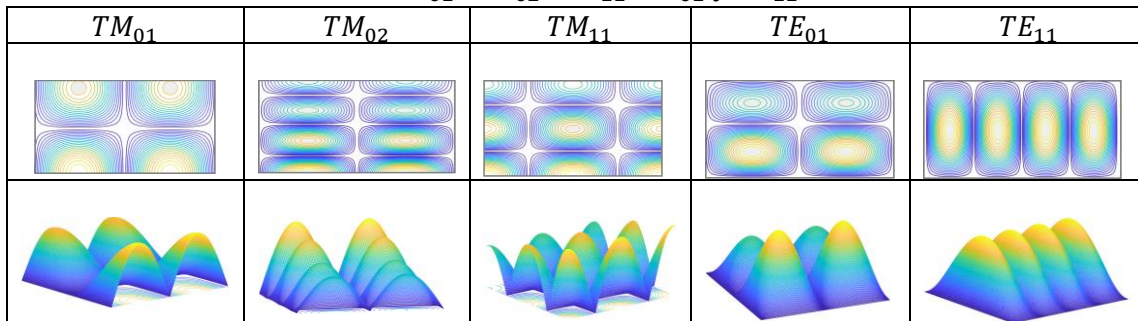


Figura 5.12 Distribución transversal y longitudinal del campo electromagnético en una guía de onda circular de los modos TM_{01} , TM_{02} , TM_{11} , TE_{01} y TE_{11} .

En la tabla 5.16 se agregan las distribuciones longitudinales obtenidas por la simulación de los modos representados en la figura 5.12. La simulación entrega la distribución longitudinal de la magnitud del campo eléctrico E_z en el caso de que se propague un modo TM, y la distribución longitudinal de la magnitud del campo magnético H_z , en el caso de que se propague un modo TE.

Tabla 5.16 Distribución del campo longitudinal en una guía de onda circular de los modos TM_{01} , TM_{02} , TM_{11} , TE_{01} y TE_{11} .



Se puede concluir a partir de la tabla 5.16, que al contrastar los resultados obtenidos a partir de la simulación 5.2 de las distribuciones longitudinales del campo eléctrico y magnético con las distribuciones longitudinales de la figura 5.12, específicamente las líneas continuas que representan el campo eléctrico y las líneas segmentadas que representan el campo magnético, que efectivamente la simulación refleja la teoría debido a que son idénticas.

Debido a lo anteriormente mencionado se considera la simulación 5.2 validada.

5.3 Curvas de dispersión

5.3.1 Descripción de la simulación

La simulación “Curvas de dispersión” tiene como objetivo visualizar, según los valores ingresados a las variables de entrada, los modos que se propagan a una cierta frecuencia operacional en una guía de onda rectangular, y a la par, saber el valor de los parámetros que caracterizan a cada uno de esos modos.

Las variables de entrada de la simulación 5.3 (figura 5.13) son: ancho a y alto b de la guía, permitividad relativa ϵ_r y la frecuencia de operación (portadora).

La simulación 5.3 posee una gráfica en la cual se muestran las curvas de dispersión que se forman al elegir las variables de entrada dadas a la interfaz.

Además, la interfaz tiene un botón “Espectro pulso ON”, el cual al ser presionado se añade sobreponiendo a la gráfica junto con las curvas de dispersión, el espectro de una señal pulso centrada en la frecuencia portadora.

Como variable de entrada complementaria al botón “Espectro pulso ON” está la llamada “BW”. La variable de entrada “BW” tiene un rango permisible de 0.1 a 5 y entrega una proporción inversa cualitativa del ancho de banda espectral que tiene el espectro de una señal pulso. Mientras mayor sea el valor ingresado a la variable de entrada BW, menor será el ancho de banda del pulso ilustrado.

Como variables de salida de la interfaz se entrega: Frecuencia de corte de los primeros dos modos que se propagan, constante de fase β_g , velocidad de fase V_{pg} y velocidad de grupo de cada modo V_g que se propague y la banda monomodal.

Además, se añade en el diseño de la interfaz una variable de entrada llamada “Rango de frecuencia”, la cual grafica las curvas de dispersión existentes para una frecuencia operacional igual al valor de esta variable.

La variable de entrada de “frecuencia portadora” entrega las variables de salida de los modos que se propagan a la frecuencia operacional dada por esta variable.

La finalidad de esta simulación es ver el importante rol que tienen las dimensiones de la guía y cómo según sus dimensiones y según la frecuencia de operación elegida existen diferentes grupos de modos propagándose a través de ésta.

5.3.2 Software desarrollado

Se realiza a través de la simulación desarrollado en MATLAB la interfaz de la figura 5.13 en la que se puede observar la descripción entregada en la sección 5.3.1.

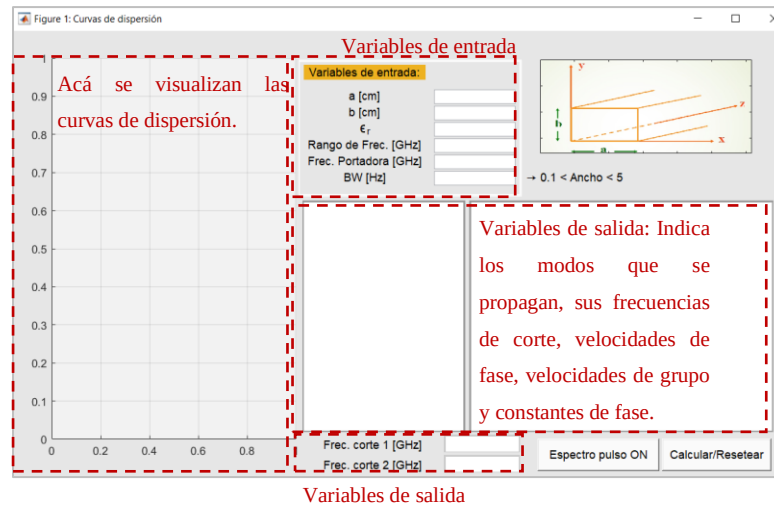


Figura 5.13 Interfaz de la simulación 5.3

Se destaca en la figura 5.13 el área donde se ingresan las variables de entrada de la interfaz y el área donde se entregan las variables de salida calculadas por la simulación. Además, se resalta el área donde se grafican las curvas de dispersión.

A modo de ejemplo ilustrativo de la simulación, se ingresan valores particulares a las variables de entrada para la visualización de los resultados entregados por la interfaz. Los valores asignados a las variables de entrada son:

- Ancho de la guía a : 5 [cm]
- Alto de la guía b : 4 [cm]
- ϵ_r permitividad relativa del dieléctrico: 1
- Rango de frecuencia: 10 [GHz]
- Frecuencia portadora: 5 [GHz]
- BW: 5

Los resultados entregados por la simulación se observan en la figura 5.14.

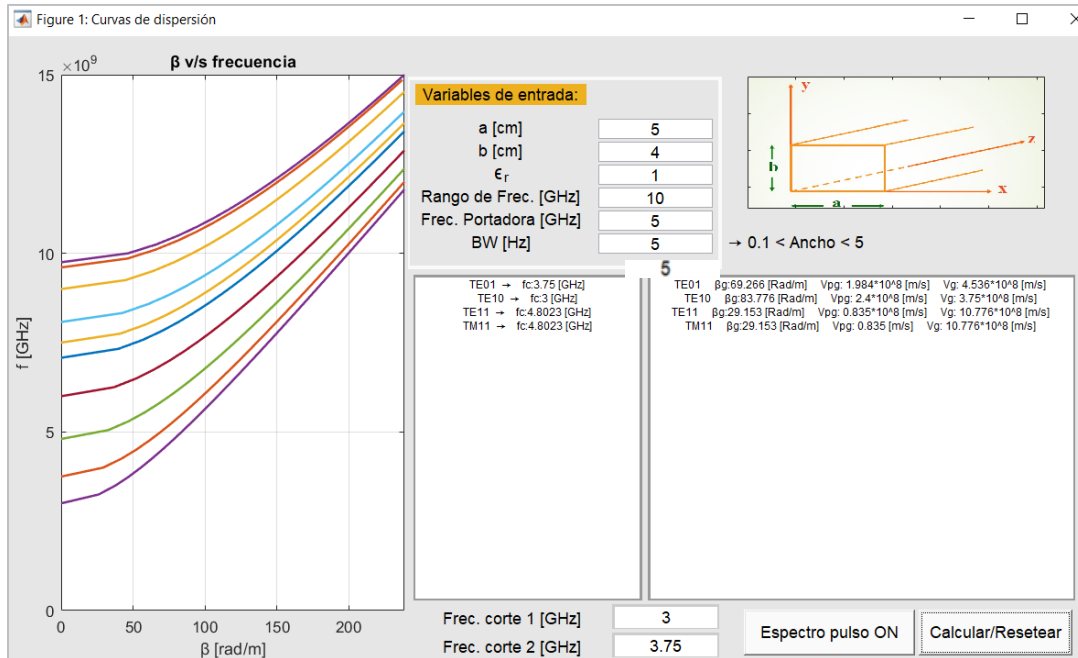


Figura 5.14 “Curvas de dispersión”

Como variables de salida, la interfaz nos entrega la siguiente información:

- Indica que se propagan 4 modos: TE_{01} , TE_{10} , TE_{11} y TM_{11} .
- Curvas de dispersión de los modos que se propagan en un rango de frecuencias hasta: 10 [GHz] → “Rango de Frecuencia”: 10 [GHz] (Aparecen 10 curvas).
- Información parámetros característicos de los modos propagados en un rango de frecuencias hasta el valor de la frecuencia operacional: 5 [GHz] → “Frecuencia Portadora”: 5 [GHz] (Aparecen 5 curvas).

Se extraen los datos de salida de la figura 5.14 a la tabla 5.17.

Tabla 5.17 Datos extraídos de la figura 5.14

Modos que se propagan	Frecuencia de corte f_c [GHz]	Constante de fase β_g $\left[\frac{rad}{m}\right]$	Velocidad de fase V_g $\left[\frac{m}{s}\right] \cdot 10^8$	Velocidad de grupo V_{pg} $\left[\frac{m}{s}\right] \cdot 10^8$
TE_{01}	3.75	69.27	1.65	4.54
TE_{10}	3	83.78	2.4	3.75
TE_{11}	4.8	29.15	0.84	10.78
TM_{11}	4.8	29.15	0.84	10.78

Una vez detallada e ilustrada la interfaz diseñada se procede a realizar la validación de los datos numéricos entregados por la simulación.

5.3.3 Validación de la simulación

Para validar la simulación 5.3 se resuelve un ejercicio de manera teórica y luego los resultados se comparan con los resultados entregados por el software de simulación.

Ejercicio:

Considere una guía de ondas rectangular de dimensiones $5\text{ [cm]} \times 3\text{ [cm]}$, con permitividad relativa $\epsilon_r = 1.2$. Grafique las curvas de dispersión si la frecuencia operacional es: 12 [GHz] . Calcule las frecuencias de corte, constantes de fase, velocidades de fase y velocidades de grupo de cada modo que se propaga.

Desarrollo teórico:

En primer lugar, se determinan los modos que se propagan en la guía de onda con las características mencionadas en el ejercicio. Para esto se calcula la frecuencia de corte de los modos TE y TM para los subíndices mn : 01, 02, 03, 04, 11, 12, 13, 14, 21, 22, 23, 24, 31, 32, 33, 34, 41, 42, 43 y 44. Los resultados obtenidos usando la ecuación 2.21 se agregan a la tabla 5.18.

Tabla 5.18 Frecuencias de corte obtenidas para los modos TE y TM.

Cálculo frecuencias de corte [GHz]					
m/n	0	1	2	3	4
0	0	4.56	9.12	13.69	18.26
1	2.74	5.32	9.53	13.96	18.46
2	5.48	7.13	10.65	14.75	19.06
3	8.22	9.4	12.28	15.97	20.02
4	10.95	11.87	14.26	17.54	21.29

En la tabla 5.18 se resaltan en gris todos los modos que tienen frecuencia de corte menor a la frecuencia de operación indicando que son los modos que efectivamente se propagan a través de la guía.

A partir del cálculo realizado, se obtiene que los modos que se propagan a través de la guía son: TE_{01} , TE_{02} , TE_{10} , TE_{11} , TM_{11} , TE_{12} , TM_{12} , TE_{20} , TE_{21} , TM_{21} , TE_{22} , TM_{22} , TE_{30} , TE_{31} , TM_{31} , TE_{40} , TE_{41} y TM_{41} . En total se propagan 18 modos.

Los parámetros característicos de los 18 modos se calculan con las ecuaciones 2.16, 2.18 y 2.22, las cuales permiten obtener la velocidad de fase, la velocidad de grupo y la constante de fase respectivamente. Se agregan los resultados teóricos a la tabla 5.19.

Desarrollo con la simulación:

Se agregan las variables de entrada indicadas por el ejercicio a la simulación 5.3. Los resultados entregados por la interfaz se observan en las figuras 5.15 y 5.16.

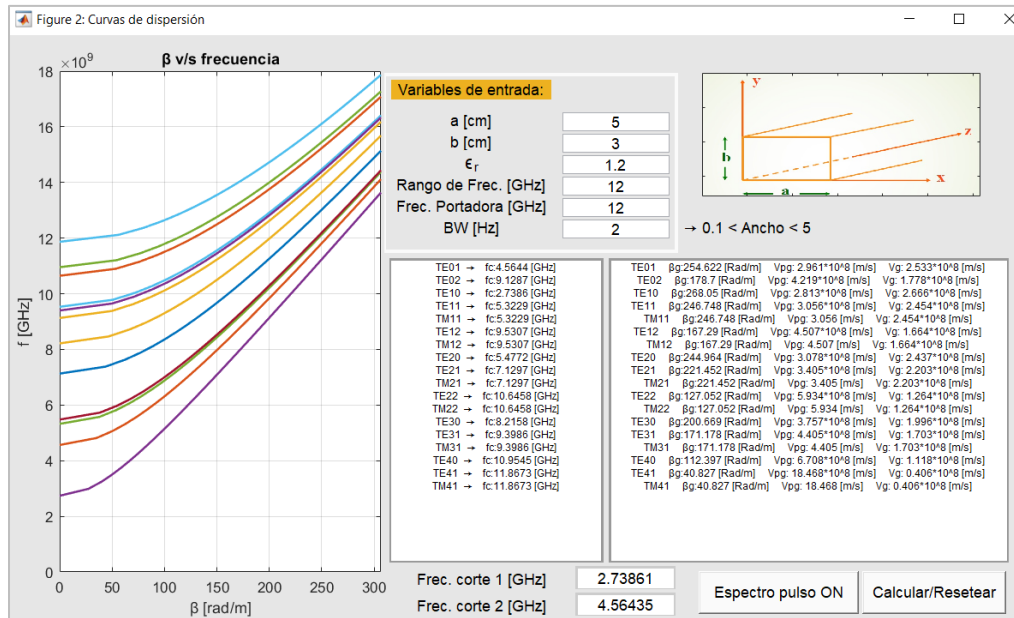


Figura 5.15 Resultado del ejercicio realizado en la interfaz.

TE01 → fc:4.5644 [GHz]	TE01 βg:254.622 [Rad/m] Vpg: 2.961*10 ⁸ [m/s] Vg: 2.533*10 ⁸ [m/s]
TE02 → fc:9.1287 [GHz]	TE02 βg:178.7 [Rad/m] Vpg: 4.219*10 ⁸ [m/s] Vg: 1.778*10 ⁸ [m/s]
TE10 → fc:2.7386 [GHz]	TE10 βg:268.05 [Rad/m] Vpg: 2.813*10 ⁸ [m/s] Vg: 2.666*10 ⁸ [m/s]
TE11 → fc:5.3229 [GHz]	TE11 βg:246.748 [Rad/m] Vpg: 3.056*10 ⁸ [m/s] Vg: 2.454*10 ⁸ [m/s]
TM11 → fc:5.3229 [GHz]	TM11 βg:246.748 [Rad/m] Vpg: 3.056 [m/s] Vg: 2.454*10 ⁸ [m/s]
TE12 → fc:9.5307 [GHz]	TE12 βg:167.29 [Rad/m] Vpg: 4.507*10 ⁸ [m/s] Vg: 1.664*10 ⁸ [m/s]
TM12 → fc:9.5307 [GHz]	TM12 βg:167.29 [Rad/m] Vpg: 4.507 [m/s] Vg: 1.664*10 ⁸ [m/s]
TE20 → fc:5.4772 [GHz]	TE20 βg:244.964 [Rad/m] Vpg: 3.078*10 ⁸ [m/s] Vg: 2.437*10 ⁸ [m/s]
TE21 → fc:7.1297 [GHz]	TE21 βg:221.452 [Rad/m] Vpg: 3.405*10 ⁸ [m/s] Vg: 2.203*10 ⁸ [m/s]
TM21 → fc:7.1297 [GHz]	TM21 βg:221.452 [Rad/m] Vpg: 3.405 [m/s] Vg: 2.203*10 ⁸ [m/s]
TE22 → fc:10.6458 [GHz]	TE22 βg:127.052 [Rad/m] Vpg: 5.934*10 ⁸ [m/s] Vg: 1.264*10 ⁸ [m/s]
TM22 → fc:10.6458 [GHz]	TM22 βg:127.052 [Rad/m] Vpg: 5.934 [m/s] Vg: 1.264*10 ⁸ [m/s]
TE30 → fc:8.2158 [GHz]	TE30 βg:200.669 [Rad/m] Vpg: 3.757*10 ⁸ [m/s] Vg: 1.996*10 ⁸ [m/s]
TE31 → fc:9.3986 [GHz]	TE31 βg:171.178 [Rad/m] Vpg: 4.405*10 ⁸ [m/s] Vg: 1.703*10 ⁸ [m/s]
TM31 → fc:9.3986 [GHz]	TM31 βg:171.178 [Rad/m] Vpg: 4.405 [m/s] Vg: 1.703*10 ⁸ [m/s]
TE40 → fc:10.9545 [GHz]	TE40 βg:112.397 [Rad/m] Vpg: 6.708*10 ⁸ [m/s] Vg: 1.118*10 ⁸ [m/s]
TE41 → fc:11.8673 [GHz]	TE41 βg:40.827 [Rad/m] Vpg: 18.468*10 ⁸ [m/s] Vg: 0.406*10 ⁸ [m/s]
TM41 → fc:11.8673 [GHz]	TM41 βg:40.827 [Rad/m] Vpg: 18.468 [m/s] Vg: 0.406*10 ⁸ [m/s]

Figura 5.16 “Zoom” de los resultados entregados por la interfaz.

La interfaz indica que se propagan 18 modos y entrega los parámetros característicos de cada uno de ellos. Se extraen los resultados obtenidos por la interfaz a la tabla 5.19. En la tabla 5.20 se detalla el porcentaje de error calculado entre los valores exactos entregados por la simulación 5.3 y el cálculo teórico obtenido considerando 18 decimales.

Tabla 5.19 Resultados teóricos versus resultados de la simulación 5.3.

Modo	Frecuencia de corte [GHz]		$\beta_g \left[\frac{rad}{m} \right]$		$V_g \left[\frac{m}{s} \right] \cdot 10^8$		$V_{pg} \left[\frac{m}{s} \right] \cdot 10^8$	
	Simulación	Teórico	Simulación	Teórico	Simulación	Teórico	Simulación	Teórico
TE_{01}	4.57	4.57	254.62	254.62	2.53	2.53	2.96	2.96
TE_{02}	9.13	9.13	178.70	178.70	1.78	1.78	4.22	4.22
TE_{10}	2.74	2.74	268.05	268.05	2.67	2.67	2.81	2.81
TE_{11}	5.32	5.32	246.75	246.75	2.45	2.45	3.06	3.06
TM_{11}	5.32	5.32	246.75	246.75	2.45	2.45	3.06	3.06
TE_{12}	9.53	9.53	167.29	167.29	1.66	1.66	4.51	4.51
TM_{12}	9.53	9.53	167.29	167.29	1.66	1.66	4.51	4.51
TE_{20}	5.48	5.48	244.96	244.96	2.44	2.44	3.08	3.08
TE_{21}	7.13	7.13	221.45	221.45	2.20	2.20	3.41	3.41
TM_{21}	7.13	7.13	221.45	221.45	2.20	2.20	3.41	3.41
TE_{22}	10.65	10.65	127.05	127.05	1.26	1.26	5.93	5.93
TM_{22}	10.65	10.65	127.05	127.05	1.26	1.26	5.93	5.93
TE_{30}	8.22	8.22	200.67	200.67	2	2	3.78	3.78
TE_{31}	9.40	9.40	171.18	171.18	1.70	1.70	4.41	4.41
TM_{31}	9.40	9.40	171.18	171.18	1.70	1.70	4.41	4.41
TE_{40}	10.95	10.95	112.40	112.39	1.12	1.12	6.71	6.71
TE_{41}	11.87	11.87	40.83	40.83	0.41	0.41	18.47	18.47
TM_{41}	11.87	11.87	40.83	40.83	0.41	0.41	18.47	18.47

Tabla 5.20 % Error de los datos obtenidos recopilados en la tabla 5.19.

Modo	% Error Frecuencia de corte [GHz]	% Error $\beta_g \left[\frac{rad}{m} \right]$	% Error $V_g \left[\frac{m}{s} \right] \cdot 10^8$	% Error $V_{pg} \left[\frac{m}{s} \right] \cdot 10^8$
TE_{01}	0.00099	0.00021	0.00903	0.00619
TE_{02}	0.00010	0.00018	0.02471	0.00628
TE_{10}	0.00047	0.00018	0.01279	0.00557
TE_{11}	0.00012	0.00017	0.01817	0.01050
TM_{11}	0.00012	0.00017	0.01817	0.01050
TE_{12}	0.00050	0.00000	0.00363	0.00106
TM_{12}	0.00050	0.00000	0.00363	0.00106
TE_{20}	0.00047	0.00010	0.01237	0.00211
TE_{21}	0.00070	0.00021	0.00802	0.00818
TM_{21}	0.00070	0.00021	0.00802	0.00818
TE_{22}	0.00012	0.00047	0.01483	0.00715
TM_{22}	0.00012	0.00047	0.01483	0.00715
TE_{30}	0.00047	0.00016	0.00451	0.00920
TE_{31}	0.00020	0.00002	0.01558	0.00729
TM_{31}	0.00020	0.00002	0.01558	0.00729
TE_{40}	0.00045	0.00027	0.00304	0.00304
TE_{41}	0.00019	0.00091	0.02867	0.00211
TM_{41}	0.00019	0.00091	0.02867	0.00211

El cálculo de la frecuencia de corte a nivel de código contempla una cantidad de 4 números decimales y el cálculo de la velocidad de fase, la velocidad de grupo y la constante de fase contemplan una cantidad de 3 decimales.

Debido a que las ecuaciones 2.16, 2.18 y 2.22 están programadas en el código de la simulación 5.3, el error entre el cálculo teórico versus el obtenido a través de la simulación, dependerá de la cantidad de decimales que se usen en los cálculos. El porcentaje de error hasta 3 decimales del cálculo teórico de la velocidad de fase, la velocidad de grupo y la constante de fase tenderá a cero y el porcentaje de error hasta 4 decimales del cálculo teórico de la frecuencia de corte, también tenderá a cero.

Se puede observar de la tabla 5.20, que la diferencia obtenida a través del cálculo teórico versus lo obtenido por la interfaz es prácticamente despreciable, en todos los casos menor al 1%, por lo que se concluye que la simulación 5.3 refleja la teoría como corresponde y se considera validada.

5.4 Velocidad de grupo versus velocidad de fase

5.4.1 Descripción de la simulación

La simulación “Velocidad de grupo versus velocidad de fase” tiene como objetivo permitir que el usuario al variar distintos parámetros de dos senoidales observe la variación de la señal resultante de la suma de ellas, específicamente de las velocidades de fase y grupo.

Las variables de entrada (figura 5.17) son: amplitud de las señales $A1$ y $A2$, sus frecuencias $f1$, $f2$ y sus constantes de fase $k1$ y $k2$.

Se diseña una interfaz que muestra tres gráficas en las que se visualiza en cada una de ellas lo siguiente:

- Gráfica 1: Senoidal animada con amplitud $A1$, frecuencia $f1$ y constante de fase $k1$ (Señal 1).
- Gráfica 2: Señal senoidal animada con amplitud $A2$, frecuencia $f2$ y constante de fase $k2$ (Señal 2).
- Gráfica 3: Señal de la gráfica 1 sumada con la señal de la gráfica 2 (Señal 3).

Las variables de salida son las velocidades de fase de las señales 1 y 2.

Cuando las amplitudes de la señal 1 y 2 son iguales se agrega como variable de salida la velocidad de grupo de la señal 3.

La finalidad de la simulación 5.4 es visualizar claramente a través de la gráfica 3 la velocidad de fase de la señal neta resultante y el cambio de la velocidad con la que se mueve la envolvente de dicha señal, y de esta manera, entender la diferencia entre la velocidad de grupo y la velocidad de fase.

5.4.2 Software desarrollado

Se realiza a través de la simulación desarrollado en MATLAB la interfaz de la figura 5.17 en la que se puede observar la descripción entregada en la sección 5.4.1.

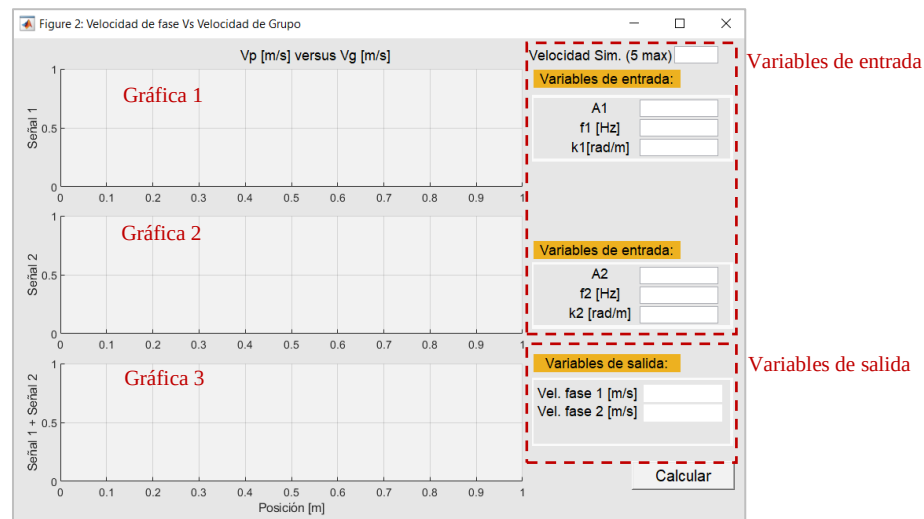


Figura 5.17 Interfaz de la simulación 5.4

Se destaca en la figura 5.17 la enumeración de cada gráfico para simplificar la comprensión de lo que representa cada uno de ellos según la descripción entregada en la sección 5.4.1. Además, se resalta el área donde se ingresan las variables de entrada de la interfaz y el área donde se entregan las variables de salida calculadas por la simulación.

A modo de ejemplo ilustrativo de la simulación, se ingresan valores específicos a las variables de entrada para la visualización de los resultados entregados por la interfaz. Los valores asignados a las variables de entrada son:

- Amplitud señal 1 $A1$: 5
- Frecuencia señal 1 $f1$: 0.2 [Hz]
- Constante de fase señal 1 $k1$: 10 [rad/m]
- Amplitud señal 2 $A2$: 5
- Frecuencia señal 2 $f2$: 0.5 [Hz]
- Constante de fase señal 2 $k2$: 1 [rad/m]
- Velocidad Sim: 1 (A mayor sea el valor, más tiempo durará la simulación)

La variable de entrada “velocidad Sim” es un valor proporcional de la cantidad de puntos de muestreo de las señales representadas en la simulación. Es un valor que se deja libre al usuario para que adapte según las capacidades de su computador, un número tal que el código se compile de manera continua y sin exigir de sobremanera al equipo. Se elije un valor entre 1 a 5.

Los resultados entregados por la simulación se observan en la figura 5.18.

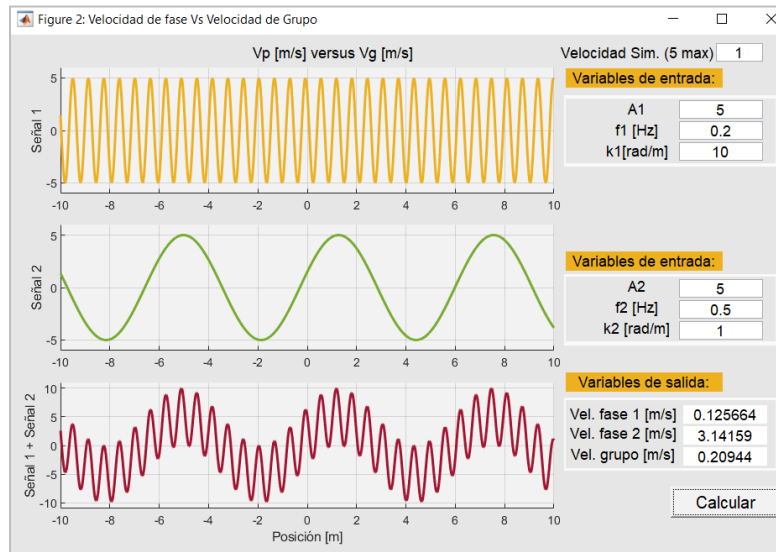


Figura 5.18 “Velocidad de fase versus velocidad de grupo”

Los datos entregados por las variables de salida son:

- Velocidad de fase de la señal 1: 0.126 [m/s]
- Velocidad de fase de la señal 2: 3.14 [m/s]
- Velocidad de grupo: 0.21 [m/s]

A partir de la figura 5.18 no se puede concluir u obtener un análisis significativo de la diferencia entre la velocidad de fase versus la velocidad de grupo debido a que esto se visualiza al ver la imagen en movimiento en vez de estática, por lo que al interactuar con la simulación 5.4 e ingresar los parámetros del ejemplo ilustrativo, se visualizará claramente como la velocidad de fase difiere de la velocidad de grupo.

Una vez detallada e ilustrada la interfaz diseñada se procede a realizar la validación de los datos numéricos entregados por la simulación.

5.4.3 Validación de la simulación

La simulación 5.4 realiza la suma aritmética de dos ecuaciones sinusoidales:

Ecuación 1: Representada en la gráfica número 1 ubicada en el extremo superior de la interfaz (figura 5.17). Se expresa matemáticamente de la siguiente manera: $y_1 = A1\cos(2\pi f_1 t - k_1 x)$.

Ecuación 2: Representada en la gráfica número 2 ubicada en el medio de la interfaz (figura 5.17). Se expresa matemáticamente de la siguiente manera: $y_2 = A2\cos(2\pi f_2 t - k_2 x)$.

Ecuación 3: Representada en la gráfica número 3 ubicada en el extremo inferior de la interfaz de la simulación 5.4 (figura 5.17) y es la resultante de sumar las ecuaciones 1 y 2. Se expresa matemáticamente de la siguiente manera.

$$y_3 = y_1 + y_2 = A_1 \cdot \cos(2\pi f_1 t - k_1 x) + A_2 \cdot \cos(2\pi f_2 t - k_2 x)$$

Para validar la simulación 5.4 se ingresan distintos valores a las variables de entrada A_1 , A_2 , f_1 , f_2 , k_1 y k_2 y se comparan las velocidades de fase de las señales 1 y 2 y la velocidad de grupo de la señal 3 obtenidas teóricamente con la entregada por la simulación.

En primer lugar, se indican 3 casos en los que se ingresan diferentes valores a las variables de entrada a la simulación 5.4 para mostrar los resultados estáticos, y posteriormente, realizar una interpretación de los resultados obtenidos y compararlos con los resultados teóricos calculados de las respectivas velocidades de grupo de cada uno de los casos.

Caso 1:

Se ingresan las variables de entrada $A_1 = 5$, $A_2 = 5$, $f_1 = 1.6$, $f_2 = 0.16$, $k_1 = 10$ y $k_2 = 8.8$.

El resultado de la gráfica 3 esperado es un senoidal producto de la suma de las ecuaciones 1 y 2. Se describe matemáticamente de la siguiente manera:

$$y_3 = y_1 + y_2 = A_1 \cdot \cos(2\pi f_1 t - k_1 x) + A_2 \cdot \cos(2\pi f_2 t - k_2 x)$$

$$y_3 = y_1 + y_2 = 5\cos(3.2\pi t + 10x) + 5\cos(0.32\pi t - 8.8x)$$

En la figura 5.20 se observa el resultado obtenido por la simulación 5.4.

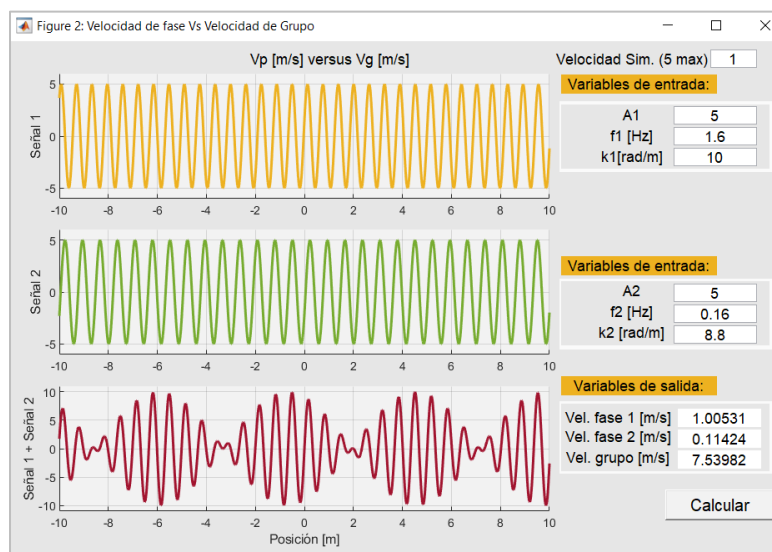


Figura 5.20 Resultado entregado por la simulación 5.4.

La gráfica 3 de la figura 5.20 representa la ecuación:

$$y_3 = y_1 + y_2 = 5\cos(3.2\pi t + 10x) + 5\cos(0.32\pi t - 8.8x)$$

$$y_3 = 10\cos(1.76\pi t + 0.6x)\cos(1.44\pi t + 9.4x)$$

Las variables de salida indican que la velocidad de grupo de la señal resultante es de 7.54 [m/s] . Al observar la simulación con los valores ingresados a las variables de entrada de la figura 5.20, se observa como la señal resultante corresponde a una amplitud modulada y se visualiza claramente la diferencia entre la velocidad con la que se mueve la envolvente de la señal en comparación con la velocidad de un punto específico de la misma.

Para efectos de esta simulación, se rescata más información al visualizar en movimiento las gráficas que al ver una imagen estática como en la figura 5.20.

Caso 2:

Se ingresan las variables de entrada $A1 = 10$, $A2 = 10$, $f1 = 5$, $f2 = 5$, $k1 = 8$ y $k2 = 7.5$. El resultado de la gráfica 3 esperado es:

$$y_3 = y_1 + y_2 = A1 \cdot \cos(2\pi f_1 t - k_1 x) + A2 \cdot \cos(2\pi f_2 t - k_2 x)$$

$$y_3 = y_1 + y_2 = 10\cos(10\pi t - 8x) + 10\cos(10\pi t - 7.5x)$$

En la figura 5.21 se muestra el resultado obtenido de la simulación.

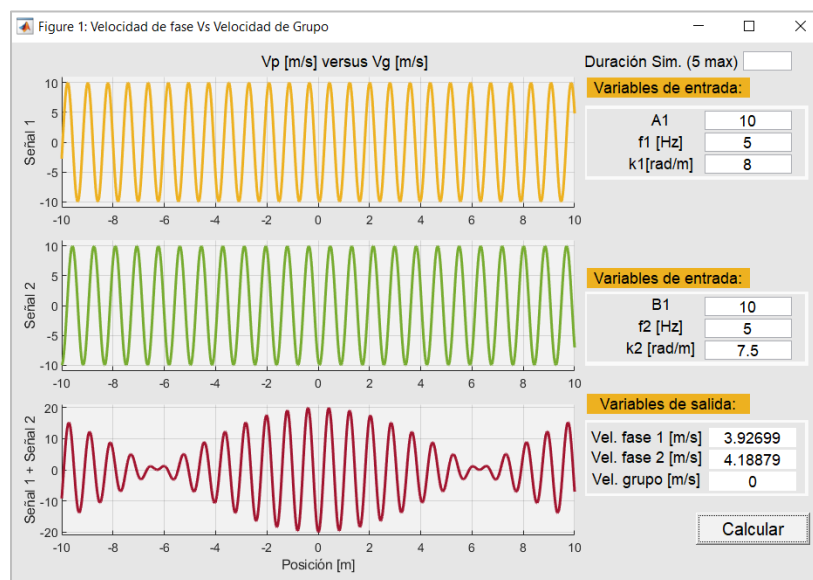


Figura 5.21 Resultado entregado por la simulación 5.4

La gráfica 3 de la figura 5.20 representa la ecuación:

$$y_3 = y_1 + y_2 = 10\cos(10\pi t - 8x) + 10\cos(10\pi t - 7.5x)$$

Las variables de salida indican que la velocidad de grupo de la señal resultante es de 0 [m/s]. Al observar la simulación 5.4 en movimiento, se aprecia claramente que la envolvente de la señal permanece estática, corroborando el dato de salida entregado por la simulación de la velocidad de grupo igual a cero.

Se menciona nuevamente que para efectos de esta simulación, se rescata más información al visualizar en movimiento las gráficas que al ver una imagen estática como en la figura 5.21.

Caso 3:

Se ingresan las variables de entrada $A1 = 3$, $A2 = 3$, $f1 = 5$, $f2 = 0.5$, $k1 = 2$ y $k2 = 20$. El resultado de la gráfica 3 esperado es:

$$y_3 = y_1 + y_2 = A1\cos(2\pi f_1 t - k_1 x) + A2\cos(2\pi f_2 t - k_2 x)$$

$$y_3 = y_1 + y_2 = 3\cos(10\pi t - 2x) + 3\cos(1\pi t - 20x)$$

En la figura 5.22 se muestra el resultado obtenido de la simulación.

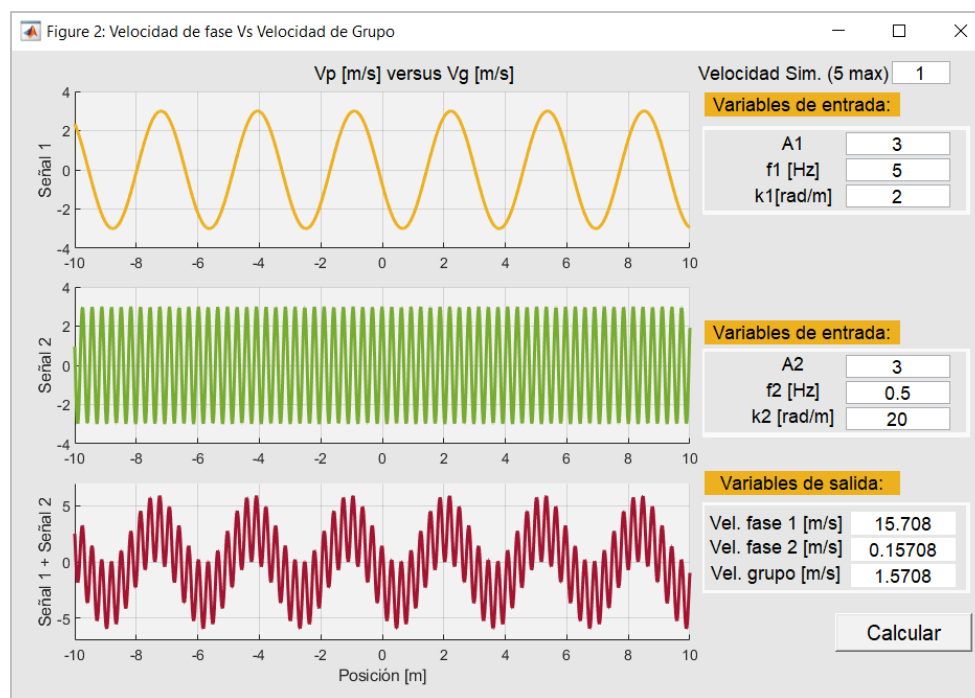


Figura 5.22 Resultado entregado por la simulación 5.4

La gráfica 3 de la figura 5.20 representa la ecuación:

$$y_3 = y_1 + y_2 = 3\cos(10\pi t - 2x) + 3\cos(1\pi t - 20x)$$

Y las variables de salida indican que la velocidad de grupo de la señal resultante es de $1.57 \left[\frac{m}{s} \right]$.

A continuación, se validan las variables de salida de la interfaz: Velocidades de fase y velocidad de grupo para cada uno de los casos. Las variables de salida de los casos 1, 2 y 3 entregados por la interfaz se extraen a la tabla 5.20.

En la figura 5.24 se capturan las variables de salida entregadas por la interfaz de la simulación 5.4 para los tres casos.

Caso 1	Caso 2	Caso 3
Variables de salida:	Variables de salida:	Variables de salida:
Vel. fase 1 [m/s] 1.00531	Vel. fase 1 [m/s] 3.92699	Vel. fase 1 [m/s] 15.708
Vel. fase 2 [m/s] 0.11424	Vel. fase 2 [m/s] 4.18879	Vel. fase 2 [m/s] 0.15708
Vel. grupo [m/s] 7.53982	Vel. grupo [m/s] 0	Vel. grupo [m/s] 1.5708

Figura 5.24 Velocidades de fase y de grupo obtenidas por la simulación 5.4.

Tabla 5.20 Comparación de resultados.

Caso	Variable	Valor teórico $\left[\frac{m}{s}\right]$	Valor entregado por la simulación $\left[\frac{m}{s}\right]$	% Error
Caso 1	V_p señal 1	$\frac{2\pi f_1}{k_1} = 1$	1	0
	V_p señal 2	$\frac{2\pi f_2}{k_2} = 0.11$	0.11	0
	V_g señal 3	$\frac{2\pi(f_1 - f_2)}{k_1 - k_2} = 7.5$	7.5	0
Caso 2	V_p señal 1	$\frac{2\pi f_1}{k_1} = 3.9$	3.9	0
	V_p señal 2	$\frac{2\pi f_2}{k_2} = 4.2$	4.2	0
	V_g señal 3	$\frac{2\pi(f_1 - f_2)}{k_1 - k_2} = 0$	0	0
Caso 3	V_p señal 1	$\frac{2\pi f_1}{k_1} = 15.71$	15.71	0
	V_p señal 2	$\frac{2\pi f_2}{k_2} = 0.1571$	0.1571	0
	V_g señal 3	$\frac{2\pi(f_1 - f_2)}{k_1 - k_2} = 1.571$	1.571	0

A partir de los porcentajes de error expresados en la tabla 5.20 y los resultados obtenidos en los casos 1 y 2, se considera la simulación 5.4 validada.

6 SIMULACIONES DE FIBRA ÓPTICA

Se diseñan 4 interfaces diferentes cada una de ellas está enfocada al estudio de la propagación de un haz de luz al interior de una fibra óptica. El objetivo de las simulaciones es permitir entender el concepto de fibra óptica monomodal y multimodal, el significado de la definición matemática de un modo linealmente polarizado y además analizar y entender los diferentes efectos de dispersión que existen en fibras ópticas multimodales y monomodales.

Las simulaciones diseñadas se denominan de la siguiente manera:

- Simulación 6.1: Fibras multimodo versus monomodo.
- Simulación 6.2: Modos linealmente polarizados.
- Simulación 6.3: Dispersión cromática.
- Simulación 6.4: Dispersión intermodal.

En la simulación 6.1 se digitaliza el gráfico de la figura 2.21 que representa la relación entre la constante de propagación normalizada b en función de la frecuencia normalizada V , y se resalta según los parámetros de entrada, los modos que se propagan en la fibra óptica. Con la simulación 6.1 se espera dar a entender la dependencia que existe del número de modos que se propagan a través de la fibra óptica, según los parámetros con los que se interactúa. Adicionalmente, se espera dar a entender fácilmente como se trabaja con la gráfica de b vs V y saber que datos se pueden obtener y extraer de ella.

La simulación 6.2 permite visualizar la distribución transversal de la intensidad óptica en una fibra óptica de los modos linealmente polarizados en dos dimensiones y en tres dimensiones. Además, da la posibilidad de mover la gráfica en 3D para observar la distribución de la luz desde la perspectiva que se necesite. La finalidad de la simulación 6.2 es visualizar la teoría matemática abstracta y compleja que representa la distribución transversal de un modo linealmente polarizado en una fibra óptica y entender como es el comportamiento radial y azimutal de dicha distribución.

La simulación 6.3 y 6.4 permite observar los diferentes fenómenos de dispersión que existen o predominan en una fibra óptica ya sea monomodal o multimodal.

En el caso de la simulación 6.3, permite observar la dispersión que existe en una fibra óptica monomodal y según ciertas variables de entrada a la interfaz que serán detalladas más adelante en el capítulo, se podrá ver un pulso gaussiano a la entrada de una fibra óptica y su propagación a través de ella. Mientras se propaga se visualizarán los efectos de ensanchamiento, deformación o atenuación del pulso. En el caso de la simulación 6.4, se observan los fenómenos de dispersión que predominan en una fibra óptica multimodal, se aprecia tanto la atenuación como ensanchamiento de los pulsos que se propagan a través de la fibra óptica.

A continuación, se realiza una descripción del diseño de cada interfaz, el software desarrollado y la validación de la simulación de cada una de ellas.

6.1 Fibras multimodo versus monomodo

6.1.1 Descripción de la simulación

La simulación “Fibras multimodo versus monomodo” pretende visualizar de manera didáctica y simple la cantidad de modos que se propagan a través de una fibra óptica según las características físicas de la fibra y la frecuencia operacional. Además, entrega todos los parámetros característicos de aquellos modos.

La simulación 6.1 recrea la gráfica de la figura 2.21 que representa la relación entre la constante de fase normalizada con la frecuencia normalizada y la relación entre el coeficiente de refracción efectivo con la frecuencia normalizada. En otras palabras, la gráfica de la figura 2.21 es digitalizada con el fin de simplificar su uso y simplificar la extracción de información que se puede obtener de dicha gráfica.

Las variables de entrada a la interfaz son (figura 6.1): los índices de refracción de la fibra óptica, núcleo n_1 y revestimiento n_2 , el radio del núcleo a y la longitud de onda de la luz λ .

La interfaz posee un solo gráfico en el que se analizan las curvas características de los 12 primeros modos existentes en una fibra óptica. Según las dimensiones, los coeficientes de refracción de la fibra y la frecuencia operacional, se obtiene un valor asociado a la frecuencia normalizada el cual se indica en la interfaz como variable de salida, y según lo entregado por la simulación, las curvas de los modos que se propagan a través de la fibra (los modos con frecuencias de corte menores a la frecuencia normalizada) se destacan asignándose color a cada una.

Las variables de salida son la frecuencia normalizada V , los modos que se propagan, el índice de refracción efectivo n_{eff} , la constante de fase normalizada b , la constante de fase β y la velocidad de grupo V_g para cada modo que se propaga.

Con la simulación 6.1 se espera mostrar la dependencia que existe del número de modos que se propagan a través de la fibra óptica, según los parámetros con los que se interactúa. Adicionalmente, se pretende dar a entender cómo se trabaja con la gráfica “Constante de fase normalizada b e índice de refracción efectivo n_{eff} versus frecuencia V ” y saber qué datos se pueden obtener de ella.

6.1.2 Software desarrollado

Se realiza a través de la simulación desarrollado en MATLAB la interfaz de la figura 6.1 en la que se puede observar la descripción entregada la sección 6.1.1.

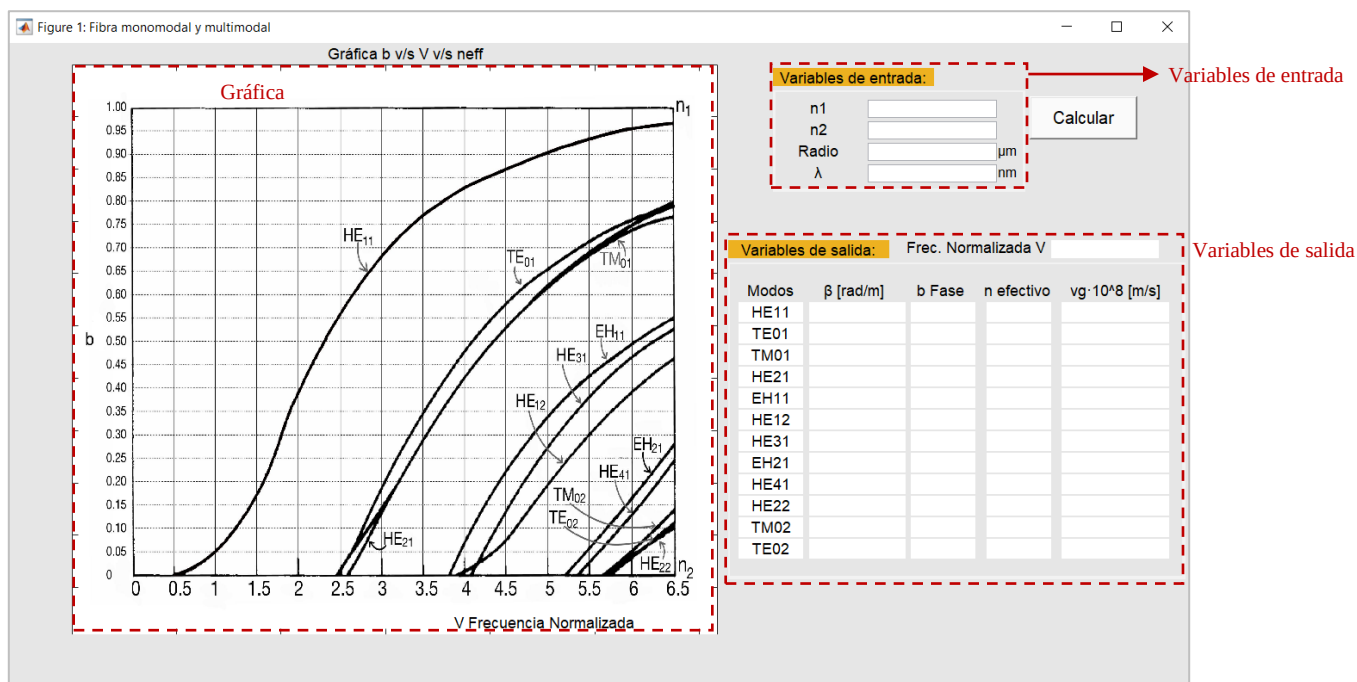


Figura 6.1 Interfaz de la simulación 6.1

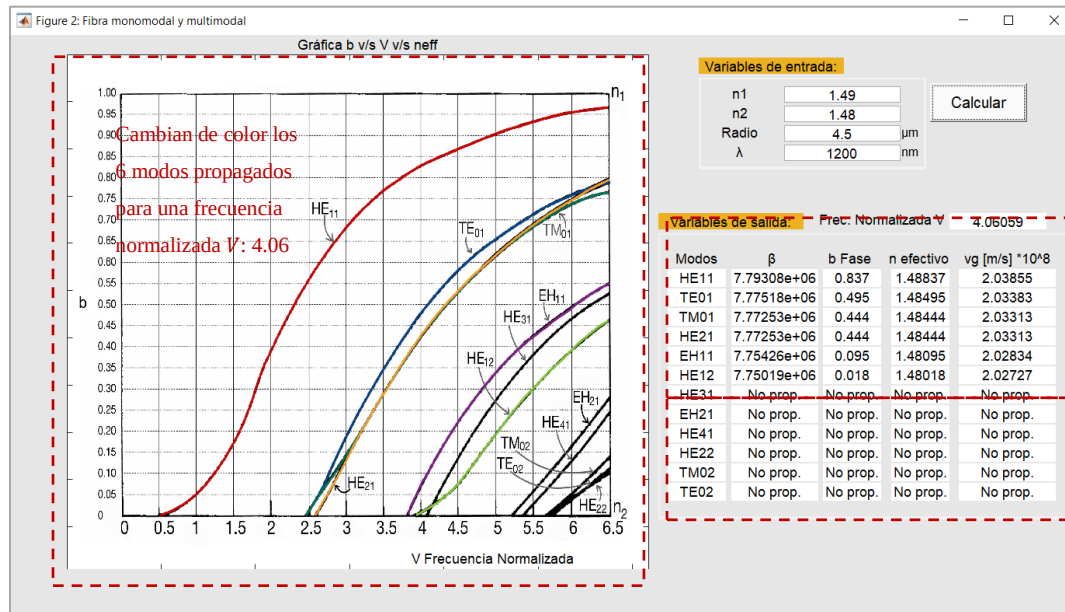
En la figura 6.1 se destaca el área donde se visualiza la única gráfica que representa las curvas características de los 12 primeros modos que existen en una fibra óptica (figura 2.21) y se resalta el área donde se ingresan las variables de entrada de la interfaz y el área donde se entregan las variables de salida calculadas por la simulación.

Una vez que se ingresan el valor de las variables de entrada a la simulación, se presiona el botón “Calcular” y de inmediato se visualiza en la gráfica los modos que se propagan al pasar de color negro a diferentes colores claros. En paralelo, en el área de variables de salida se entregan los valores característicos que representan a cada modo que se propaga: el índice de refracción efectivo n_{eff} , la constante de fase normalizada b , la constante de fase β y la velocidad de grupo V_g para cada modo que se propaga.

A modo de ejemplo ilustrativo de la simulación, se ingresan valores específicos a las variables de entrada para la visualización de los resultados entregados por la interfaz. Los valores asignados a las variables de entrada son:

- Índice de refracción del núcleo n_1 : 1.49.
- Índice de refracción del revestimiento n_2 : 1.48
- Radio de la fibra óptica: 4.5 [μm]
- Longitud de onda λ : 1200 [nm]

Los resultados entregados por la simulación se observan en la figura 6.2.



Información entregada por la interfaz

“No prop.” Indica que no hay propagación de ese modo

Figura 6.2 “Fibras multimodo versus monomodo”

La interfaz entrega como variable de salida la siguiente información:

- En la gráfica de esta simulación, 6 curvas se ilustran con un color diferente de negro, esto indica que se propagan esos 6 modos caracterizados por esas 6 curvas.
- Frecuencia normalizada V : 4.061.
- Modos propagados: HE_{11} , TE_{01} , TM_{01} , HE_{21} , EH_{11} y HE_{12} .
- El valor de la constante de fase, la constante de fase normalizada, el coeficiente de refracción efectivo y la velocidad de grupo de cada modo. Se extraen los valores a la tabla 6.1.

Tabla 6.1 Data extraída de la figura 6.2

Modo	$\beta \cdot 10^6 \left[\frac{rad}{m} \right]$	b	n_{eff}	$V_g \cdot 10^8 \left[\frac{m}{s} \right]$
HE_{11}	7.793	0.837	1.488	2.039
TE_{01}	7.775	0.795	1.485	2.034
TM_{01}	7.773	0.444	1.484	2.033
HE_{21}	7.773	0.444	1.484	2.033
EH_{11}	7.754	0.095	1.481	2.028
HE_{12}	7.750	0.018	1.480	2.027

Una vez detallada e ilustrada la interfaz diseñada, se procede a realizar la validación de los datos numéricos entregados por la simulación.

6.1.3 Validación de la simulación

Para la validación de la simulación 6.1 se realiza un ejercicio de manera teórica, y posteriormente, se resuelve con la herramienta educativa para realizar una comparación y un análisis de resultados.

Ejercicio 1:

Se tiene una fibra óptica de índice escalonado, con $n_1 = 1.49$ y $n_2 = 1.48537$ y radio $a = 4.56 \mu m$. Calcular la frecuencia normalizada, indicar los modos que se propagan al operar con una longitud de onda de $720 nm$ y obtener la velocidad de grupo, constante de fase y la constante de fase normalizada de cada modo que se propaga junto al índice de refracción efectivo.

Desarrollo teórico:

Para obtener los modos que se propagan con una fibra óptica de esas características se obtiene en primer lugar la frecuencia normalizada V (ecuación 2.33).

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} a \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \frac{2\pi}{720 \cdot 10^{-9}} 4.56 \cdot 10^{-6} \sqrt{1.49^2 - 1.48537^2} \approx 4.6706056$$

A partir de la gráfica b vs V de la figura 2.21, utilizando el método gráfico, se traza una línea vertical para una frecuencia normalizada $V \approx 4.67$, y además, se trazan líneas horizontales en los puntos donde se interceptan las curvas características de cada modo con la recta vertical.

La gráfica trabajada se representa en la figura 6.3.

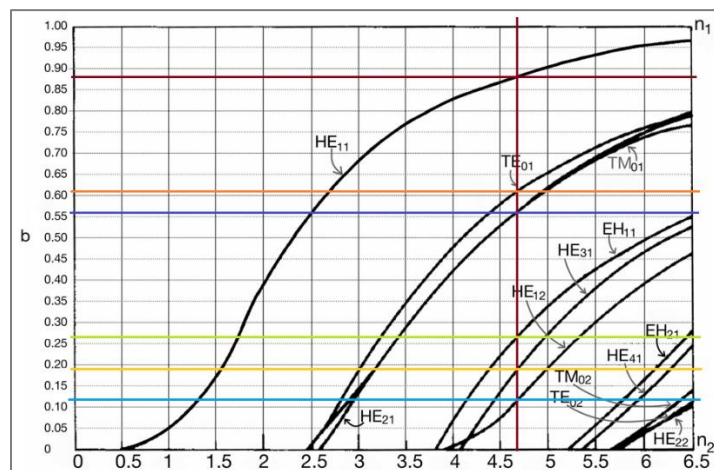


Figura 6.3 Gráfica b vs V Fibra óptica con recta vertical en $V \approx 4.67$

La recta color burdeo vertical representa la referencia de la gráfica de cuando la frecuencia normalizada obtenida con los valores ingresados a las variables de entrada es 4.67. Esta recta indica que todas las curvas que comiencen a tener valores diferentes de cero de la constante de fase normalizada hacia la izquierda de la recta serán las curvas que se propagan en la fibra óptica.

A partir de la figura 6.3 se observa que para la frecuencia normalizada obtenida se propagan 7 modos correspondientes a: HE_{11} , TE_{01} , TM_{01} , HE_{21} , EH_{11} , HE_{31} y HE_{12} .

Las líneas horizontales que se trazan en los puntos donde se interceptan las curvas características de cada modo con la recta vertical color burdeo es para extraer la información de la gráfica de cuando la frecuencia normalizada es 4.67. Ese modo en específico tendrá una constante de fase normalizada y un índice de refracción efectivo entregado por la gráfica donde traza la recta horizontal de cada modo con los ejes.

Se realiza un análisis de la gráfica y se extrae la información de la figura 6.3 a la tabla 6.2.

Tabla 6.2 Data extraída a partir del método gráfico.

Modo	Constante de fase normalizada b
HE_{11}	0.888
TE_{01}	0.605
TM_{01}	0.555
HE_{21}	0.555
EH_{11}	0.257
HE_{31}	0.190
HE_{12}	0.125

Con las constantes de fase normalizada extraídas, se calcula el índice de refracción efectivo, la constante de fase y la velocidad de grupo de cada modo con las ecuaciones 2.34 y 2.35.

Los datos solicitados por el ejercicio obtenidos se visualizan en la tabla 6.3.

Tabla 6.3 Resultados teóricos del ejercicio.

Modo	Índice de refracción efectivo $\bar{n}$	Constante de fase $\beta \cdot 10^7$ [rad/m]	Velocidad de grupo $V_g \cdot 10^8$ [m/s]
HE_{11}	1.4895	1.29982	2.0253
TE_{01}	1.4882	1.29868	2.0235
TM_{01}	1.4879	1.29848	2.0232
HE_{21}	1.4879	1.29848	2.0232
EH_{11}	1.4866	1.29727	2.0213
HE_{31}	1.4862	1.29700	2.0209
HE_{12}	1.4859	1.29674	2.0205

Desarrollo con la simulación:

Se ingresan los valores entregados por el enunciado a las variables de entrada de la simulación 6.1 y se obtiene lo que se observa en las figuras 6.3 y 6.4.

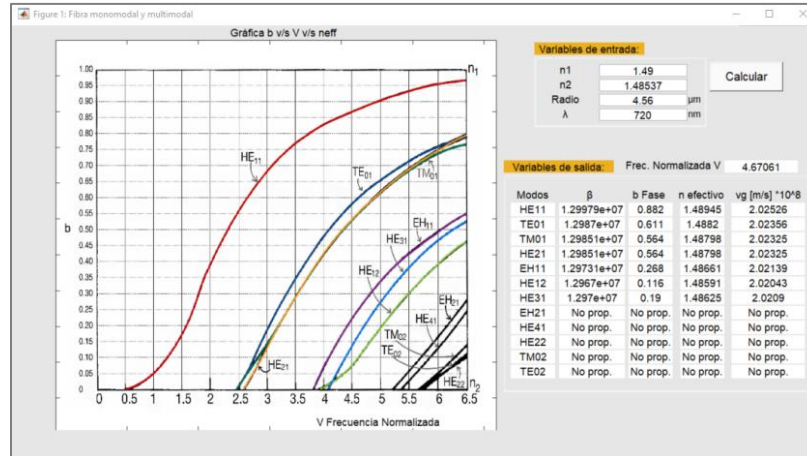


Figura 6.3 Resultados de la simulación 6.4.

Variables de salida: Frec. Normalizada V 4.67061				
Modos	β	b Fase	n efectivo	vg [m/s] *10 ⁸
HE11	1.29979e+07	0.882	1.48945	2.02526
TE01	1.2987e+07	0.611	1.4882	2.02356
TM01	1.29851e+07	0.564	1.48798	2.02325
HE21	1.29851e+07	0.564	1.48798	2.02325
EH11	1.29731e+07	0.268	1.48661	2.02139
HE12	1.2967e+07	0.116	1.48591	2.02043
HE31	1.297e+07	0.19	1.48625	2.0209
EH21	No prop.	No prop.	No prop.	No prop.
HE41	No prop.	No prop.	No prop.	No prop.
HE22	No prop.	No prop.	No prop.	No prop.
TM02	No prop.	No prop.	No prop.	No prop.
TE02	No prop.	No prop.	No prop.	No prop.

Figura 6.4 Acercamiento de los resultados de la simulación: Variables de salida.

En la figura 6.3 se observa que las curvas de los modos HE_{11} , TE_{01} , TM_{01} , HE_{21} , EH_{11} , HE_{31} y HE_{12} son gráficas con color, indicando que son los modos que se propagan para los datos de entrada ingresados (coincide con lo obtenido teóricamente).

Se extraen los datos de la figura 6.4 a la tabla 6.4, y se agrega además el porcentaje de error existente entre la resolución teórica y la entregada por la simulación.

Tabla 6.4 Data variables de salida de la simulación.

Modo	Constante de fase normalizada b	% Error	Índice de refracción efectivo n_{eff}	% Error	Constante de fase $\beta \cdot 10^7$ [rad/m]	% Error	Velocidad de grupo $V_g \cdot 10^8$ [m/s]	% Error
HE_{11}	0.882	0.62	1.4895	0.002	1.29979	0.002	2.02526	0.002
TE_{01}	0.611	0.99	1.4882	0.002	1.2987	0.002	2.02356	0.002
TM_{01}	0.564	1.62	1.48798	0.003	1.29851	0.003	2.02325	0.003
HE_{21}	0.564	1.62	1.48798	0.003	1.29851	0.003	2.02325	0.003
EH_{11}	0.268	4.48	1.48661	0.004	1.29731	0.003	2.02139	0.004
HE_{31}	0.19	0	1.48625	0	1.297	0	2.0209	0
HE_{12}	0.116	7.2	1.48591	0.003	1.2967	0.003	2.02043	0.003

De la figura 6.4 se observa que el valor de la frecuencia normalizada es de $V = 4.67061$, lo que difiere de la obtenida teóricamente en un $9.4 \cdot 10^{-6} \%$, valor prácticamente despreciable.

Una vez resuelto el ejercicio de manera teórica, al realizar una comparación entre lo obtenido teóricamente y lo obtenido a través de la simulación, se puede concluir analizando los porcentajes de error de la tabla 6.4 que la simulación entrega resultados confiables, y por ende, se considera validada.

6.2 Modos linealmente polarizados

6.2.1 Descripción de la simulación

La simulación “Modos linealmente polarizados” permite visualizar la teoría matemática abstracta y compleja que modela la distribución transversal de la intensidad óptica en una fibra óptica de los modos linealmente polarizados, a través de gráficas en dos dimensiones y en tres dimensiones.

En la simulación 6.2, se diseña una interfaz con dos gráficas, cada una de ellas representa (figura 6.5):

- Gráfica 1: Distribución transversal tridimensional de la intensidad de los modos LP_{lm} en dominio fasorial.
- Gráfica 2: Distribución transversal en dos dimensiones de la intensidad de los modos LP_{lm} en dominio fasorial.

Se interactúa con la simulación seleccionando 20 botones diferentes, cada uno de los cuales permite visualizar las gráficas 1 y 2 para distintos modos linealmente polarizados.

Los botones son: “ LP_{01} ”, “ LP_{02} ”, “ LP_{03} ”, “ LP_{11} ”, “ LP_{12} ”, “ LP_{13} ”, “ LP_{21} ”, “ LP_{22} ”, “ LP_{31} ”, “ LP_{41} ”, “ LP_{51} ”, “ LP_{61} ”, “ LP_{71} ”, “ LP_{32} ”, “ LP_{23} ” y “ LP_{43} ”.

Además, se desglosa una gráfica externa a la interfaz en la que se visualiza la misma gráfica 1, con la diferencia que permite una interacción de movimiento de los ejes para poder observar desde distintas perspectivas la distribución de la intensidad óptica.

Con la simulación 6.1, se pretende que el usuario entienda de mejor manera cómo es la distribución de la intensidad de la luz de cada uno de estos tipos de modos en la fibra óptica.

6.2.2 Software desarrollado

Se realiza a través de la simulación desarrollado en MATLAB la interfaz de la figura 6.5 en la que se puede observar la descripción entregada en la sección 6.2.1.

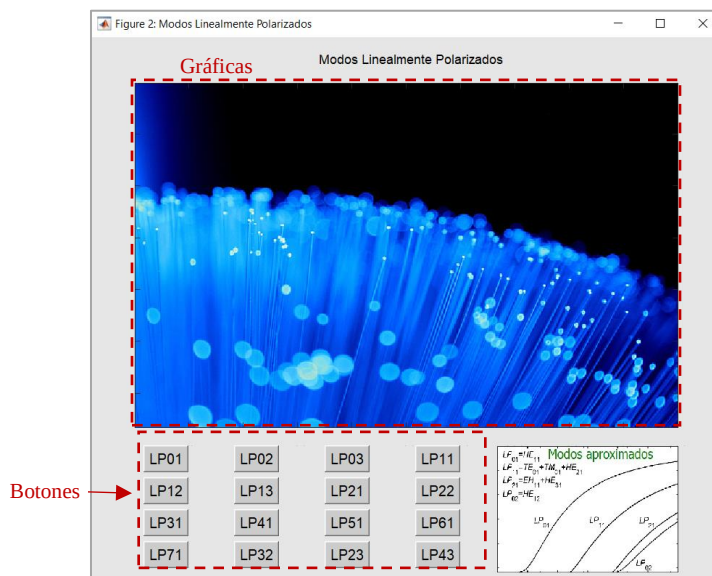


Figura 6.5 Interfaz de la simulación 6.2

En la figura 6.5 se destaca el área donde se visualiza la gráfica principal de la simulación que ilustra las distribuciones transversales de la intensidad de luz de 20 modos linealmente polarizados existentes en una fibra óptica y se resalta el área donde se seleccionan los botones de la interfaz.

Además de la interfaz que se visualiza en la figura 6.5, se despliega una gráfica tridimensional que se puede girar en cualquier dirección con el fin de observar desde cualquier perspectiva la distribución de la intensidad de los modos que se necesite.

A modo de ejemplo ilustrativo de la simulación, se seleccionan 17 botones de la interfaz para la visualización de los resultados entregados por la interfaz.

Los resultados entregados por la simulación se observan en la figura 6.6.

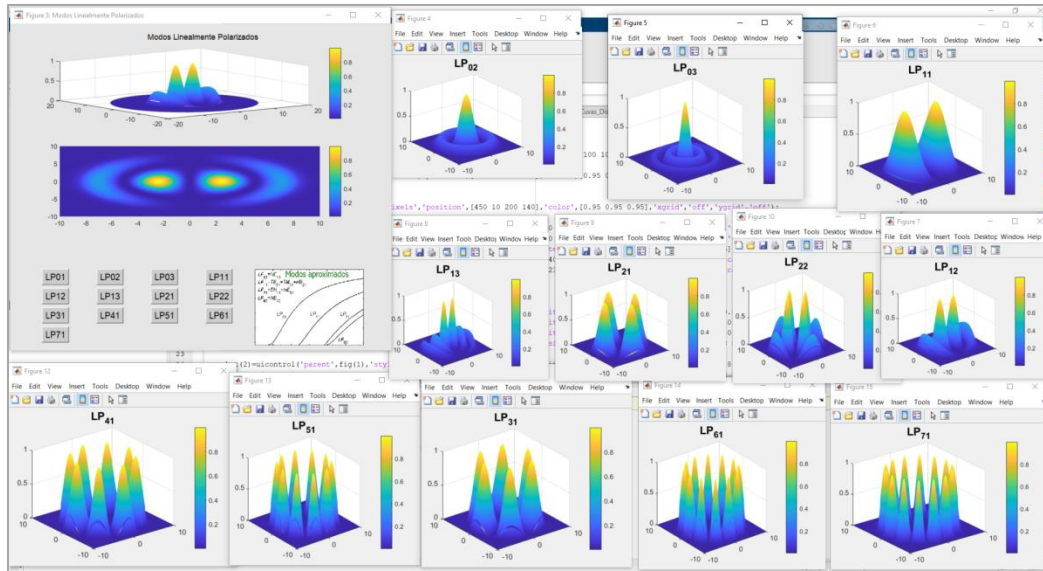


Figura 6.6 “Modos linealmente polarizados”

Con el fin de visualizar los resultados entregados por la interfaz de un solo modo, se selecciona solamente el botón “ LP_{22} ” y se muestra el resultado en la figura 6.7.

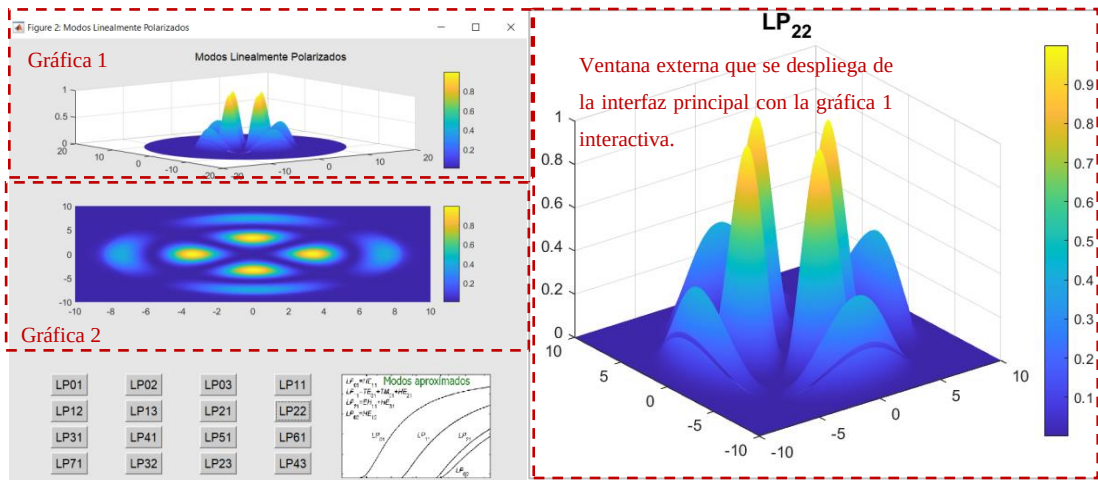


Figura 6.7 Distribución transversal de la intensidad del modo LP_{22} en una fibra óptica.

La gráfica 1 y 2 representan la distribución de la intensidad de los modos linealmente polarizados LP_{lm} en dos dimensiones y en tres dimensiones.

A nivel de código se grafica lo siguiente:

$$I_{lm} = J_l^2\left(\frac{r}{a}\right) \sin^2(m\varphi) \quad r < \text{radio}$$

$$I_{lm} = N_l^2\left(\frac{r}{a}\right) \sin^2(m\varphi) \quad r \geq \text{radio}$$

a : Radio de la fibra óptica.

φ : Ángulo azimutal de la fibra óptica, va entre 0 a 2π radianes.

l : Corresponde a la mitad de los máximos existentes en el patrón de intensidad en el eje azimutal entre 0 a 2π radianes.

m : Corresponde al número de máximos que existen en el patrón de intensidad a lo largo de la línea radial de la fibra óptica, entre el centro de la fibra al infinito.

J_m : Corresponde a la función de Bessel de orden l de primer tipo.

N_m : Corresponde a la función de Bessel de orden l de segundo tipo.

J_m y N_m están representados en las figuras 2.12 y 2.13 respectivamente.

Una vez detallada e ilustrada la interfaz diseñada, se procede a realizar la validación de los datos numéricos entregados por la simulación.

6.2.3 Validación de la simulación

Para la validación de la simulación 6.2, se contrastan los resultados obtenidos por la simulación con las gráficas teóricas de las distribuciones transversales de la intensidad de la luz de los modos linealmente polarizados.

En la figura 6.8 se observa la representación gráfica de la intensidad de la luz de los modos linealmente polarizados LP_{01} , LP_{02} , LP_{11} y LP_{21} .

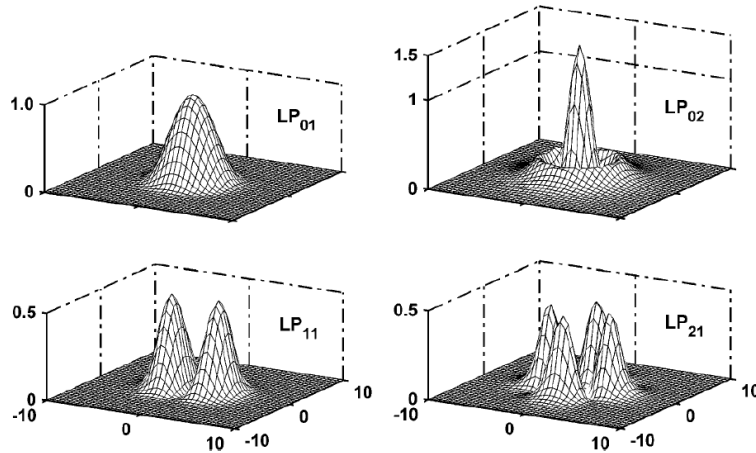


Figura 6.8 Intensidad óptica transversal de los modos linealmente polarizados LP_{01} , LP_{02} , LP_{11} y LP_{21} [10].

En la figura 6.9 se ilustra una mayor variedad de modos LP de sus distribuciones transversales de la intensidad óptica en 2D.

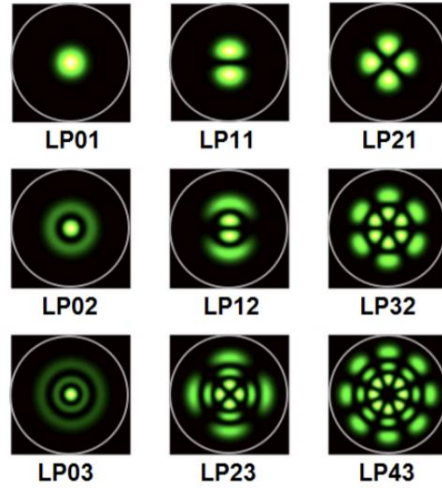


Figura 6.9 Distribución transversal de la intensidad de la luz de los modos LP_{01} , LP_{02} , LP_{03} , LP_{11} , LP_{12} , LP_{23} , LP_{32} , LP_{43} y LP_{21} [17].

A continuación, se comparan las distribuciones transversales de la intensidad de luz de los modos: LP_{01} , LP_{02} , LP_{03} , LP_{11} , LP_{12} , LP_{23} , LP_{21} , LP_{32} y LP_{43} de la figura 6.9 con las representaciones gráficas obtenidas por la simulación 6.2.

Se extraen las imágenes de la figura 6.9 a la tabla 6.5, y además, las entregadas por la simulación 6.2 de los mismos modos con el fin de realizar la comparación.

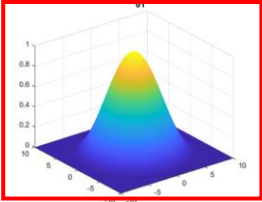
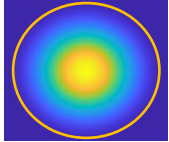
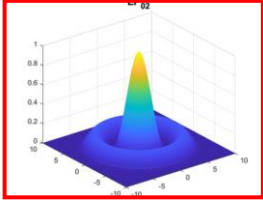
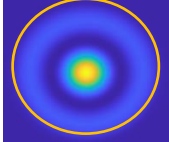
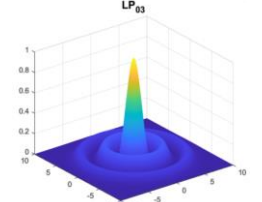
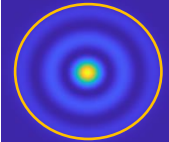
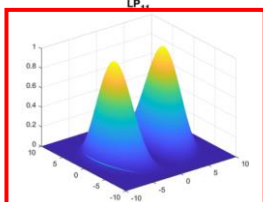
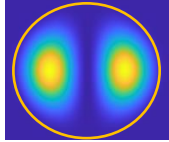
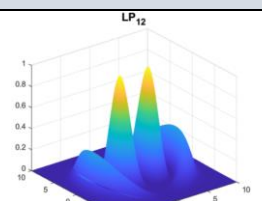
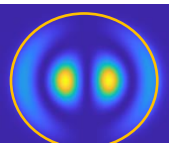
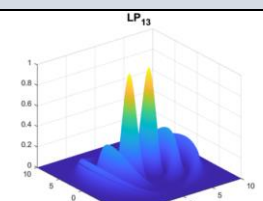
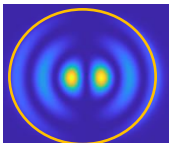
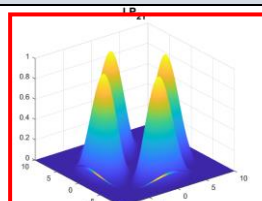
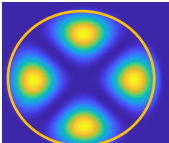
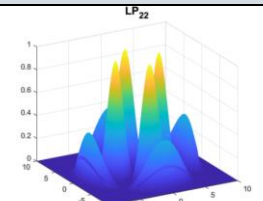
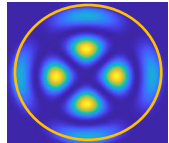
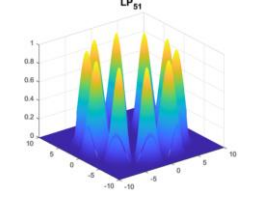
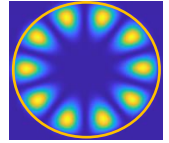
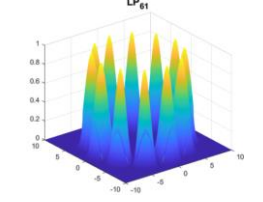
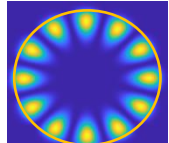
Tabla 6.5 Comparación entre la teoría y lo obtenido por la simulación de la distribución transversal de la intensidad óptica de los modos LP de la figura 6.9.

LP_{01}		LP_{11}		LP_{21}	
LP_{02}		LP_{12}		LP_{32}	
LP_{03}		LP_{23}		LP_{43}	

Se observa, a partir de la tabla 6.5, que las gráficas obtenidas de la simulación 6.4 reflejan la teoría de la distribución transversal en dos dimensiones de la intensidad de luz para los modos linealmente polarizados propagados en una fibra óptica.

Otras gráficas entregadas por la simulación 6.2 se extraen a la tabla 6.6. En esta la tabla se representan distintas imágenes tanto de la distribución transversal de la intensidad de la luz en tres dimensiones como en dos dimensiones para los modos $LP_{01}, LP_{02}, LP_{03}, LP_{11}, LP_{12}, LP_{13}, LP_{21}, LP_{22}, LP_{31}, LP_{41}, LP_{51}$ y LP_{61} .

Tabla 6.6 Resultados obtenidos de la intensidad óptica en una fibra óptica para los modos linealmente polarizados.

LP_{01}		LP_{02}	
			
LP_{03}		LP_{11}	
			
LP_{12}		LP_{13}	
			
LP_{21}		LP_{22}	
			
LP_{51}		LP_{61}	
			

A partir de la tabla 6.6 se realiza otro caso de validación comparando las distribuciones transversales en 3D de la intensidad de la luz de los modos LP_{01} , LP_{02} , LP_{11} y LP_{21} (encerrados en rojo) con los mismos modos de la figura 6.8. A partir de esta comparación, se observa claramente que las representaciones tridimensionales, también refleja la teoría.

Finalmente se concluye que la simulación 6.4 concuerda con la teoría y se considera validada.

6.3 Dispersión cromática

6.3.1 Descripción de la simulación

La simulación “Dispersión cromática” muestra diferentes fenómenos de la dispersión que aparecen en una señal gaussiana que se propaga a través de una fibra óptica monomodo.

Las variables de entrada de la interfaz son: Velocidad de grupo implícita $V_g = \frac{1}{\beta_1}$ (se ingresa el valor de β_1), el parámetro de dispersión o GVD β_2 , el parámetro implicado en la pendiente de dispersión β_3 y el chirp C .

La variable de entrada “Ingrese 1 ó 2” permite seleccionar la simulación de dispersión cromática en ausencia (seleccionando 1) o en presencia (seleccionando 2) de chirp.

La interfaz posee una gráfica que ilustra una señal gaussiana propagándose a través de una fibra óptica monomodo, la cual varía su envolvente o ensanchamiento en función de las variables de entrada ingresadas.

Además, posee 5 botones con valores preseleccionados de C , β_1 , β_2 , β_3 que tienen como finalidad permitir visualizar 5 casos claros de los efectos que tienen cada una de estas variables en la propagación de la señal.

Cuando se analiza el fenómeno de dispersión cromática con existencia de Chirp, se despliega una gráfica externa a la interfaz que ilustra la relación entre el factor de ensanchamiento del pulso Gaussiano con el punto de propagación de este a través de la fibra óptica. Esta gráfica relaciona específicamente el valor del ensanchamiento del pulso con la longitud de dispersión.

La simulación 6.3 busca visualizar la dependencia de las constantes anteriormente mencionadas (C , β_1 , β_2 , β_3) con los distintos fenómenos de dispersión de la señal, apreciando los diferentes efectos de dispersión del pulso propagado en la fibra óptica, ya sea un ensanchamiento mínimo o significativo, pero manteniendo la forma original de su envolvente espectral o que se vea un cambio en su envolvente y aparezcan “colas”.

6.3.2 Software desarrollado

Se realiza a través de la simulación desarrollado en MATLAB la interfaz de la figura 6.10 en la que se puede observar la descripción entregada en la sección 6.3.1.



Figura 6.10 Interfaz de la simulación 6.3

En la figura 6.10 se destaca el área donde se visualiza la única gráfica de la simulación que ilustra un pulso gaussiano propagándose a través de la fibra óptica y se resalta el área donde se ingresan las variables de entrada de la interfaz. Además, se destaca el área donde se agregan 5 botones correspondientes a 5 casos típicos donde existen diferentes fenómenos de dispersión cromática según los valores ingresados a las variables de entrada.

En la figura 6.11 se visualiza un acercamiento de los casos integrados en la simulación 6.3 de la figura 6.10.

Caso 1	Sin chirp, el pulso se ensancha, pero permanece Gaussiano	Chirp = 0	$\beta_1 = 25e5$ [ps/km]	$\beta_2 = 25$ [ps ² /km]	$\beta_3 = 0$ [ps ³ /km]
Caso 2	Sin chirp, el pulso se deforma, deja de ser Gaussiano y aparecen colas	Chirp = 0	$\beta_1 = 25e5$ [ps/km]	$\beta_2 = 0$ [ps ² /km]	$\beta_3 = 0.8e-2$ [ps ³ /km]
Caso 3	Sin chirp, el pulso se ensancha y además cambia de forma	Chirp = 0	$\beta_1 = 25e5$ [ps/km]	$\beta_2 = 25$ [ps ² /km]	$\beta_3 = 0.8e-2$ [ps ³ /km]
Caso 4	Con chirp, los pulsos se ensanchan	C = 10	$\beta_1 = 35e5$ [ps/km]	$\beta_2 = 1.5e-8$ [ps ² /km]	$\beta_3 = 0$ [ps ³ /km]
Caso 5	Con chirp, los pulsos se comprimen y luego se ensanchan	C = 10	$\beta_1 = 35e5$ [ps/km]	$\beta_2 = -1.5e-8$ [ps ² /km]	$\beta_3 = 0$ [ps ³ /km]

Figura 6.11. Descripción de los 5 casos principales en los que se visualizan diferentes fenómenos dispersivos en una fibra óptica monomodo.

A modo de ejemplo ilustrativo de la simulación, se ingresan valores específicos a las variables de entrada para la visualización de los resultados entregados por la interfaz. Los valores asignados a las variables de entrada son:

- Ingrese 1 ó 2: 1
- β_1 : $60 \cdot 10^5 \left[\frac{ps}{km} \right]$
- β_2 : $25 \left[\frac{ps^2}{km} \right]$
- β_3 : $0 \left[\frac{ps^3}{km} \right]$

Los resultados entregados por la simulación se observan en la figura 6.12.

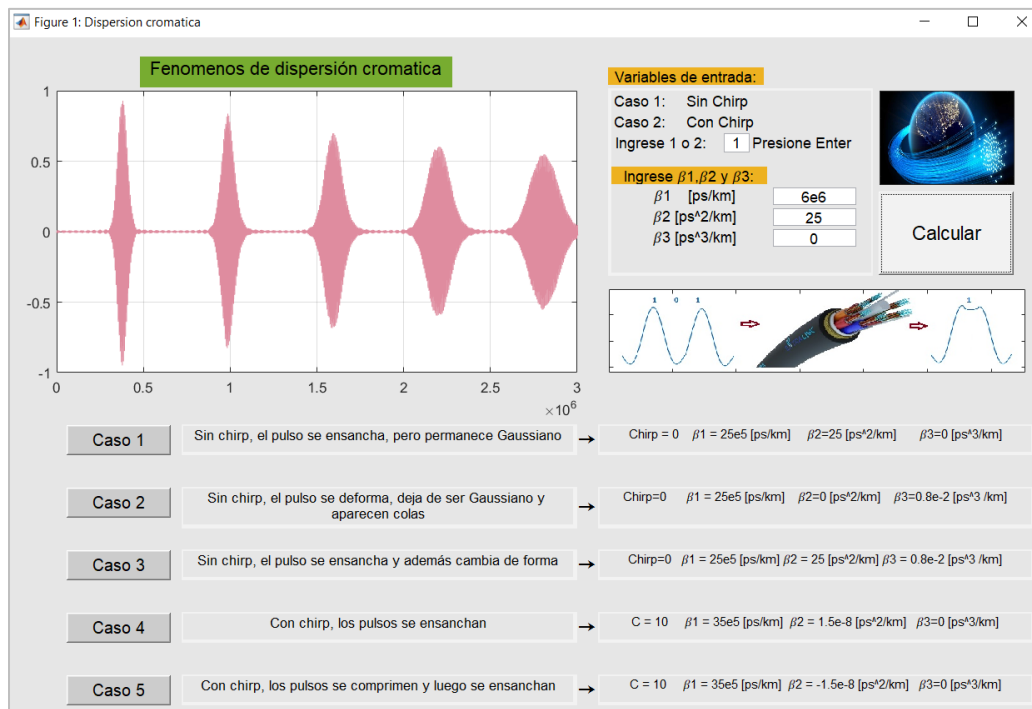


Figura 6.12 “Dispersión cromática”

Se aprecia claramente a partir de la figura 6.12 que la envolvente de la señal sigue siendo gaussiana, pero se genera un ensanchamiento y atenuación de la señal a medida que se propaga a través de la fibra óptica. Debido a que $\beta_3 = 0 \left[\frac{ps^3}{km} \right]$ el pulso sigue manteniéndose Gaussiano.

Una vez detallada e ilustrada la interfaz diseñada se procede a realizar la validación de los datos numéricos entregados por la simulación.

6.3.3 Validación de la simulación

Para la validación de la simulación 6.3, se ingresarán distintos valores a sus variables de entrada Chirp, β_1 , β_2 y β_3 con el fin de analizar la gráfica obtenida y verificar si los resultados concuerdan con lo que señala la teoría.

Caso 1: $C = 0$, $\beta_2 \neq 0$, $\beta_1 \neq 0$ y $\beta_3 = 0$.

Al existir $\beta_2 \neq 0$, indica que la velocidad de grupo tiene dependencia de la frecuencia, lo que genera un ensanchamiento de la señal a medida que se propaga dentro de la fibra óptica.

Ingresando a la interfaz los valores $C = 0$, $\beta_1 = 25 \cdot 10^5 \left[\frac{ps}{km} \right]$, $\beta_2 = 25 \left[\frac{ps^2}{km} \right]$ y $\beta_3 = 0 \left[\frac{ps^3}{km} \right]$, se obtiene la señal gaussiana propagada a través de la fibra que se muestra en la figura 6.13.

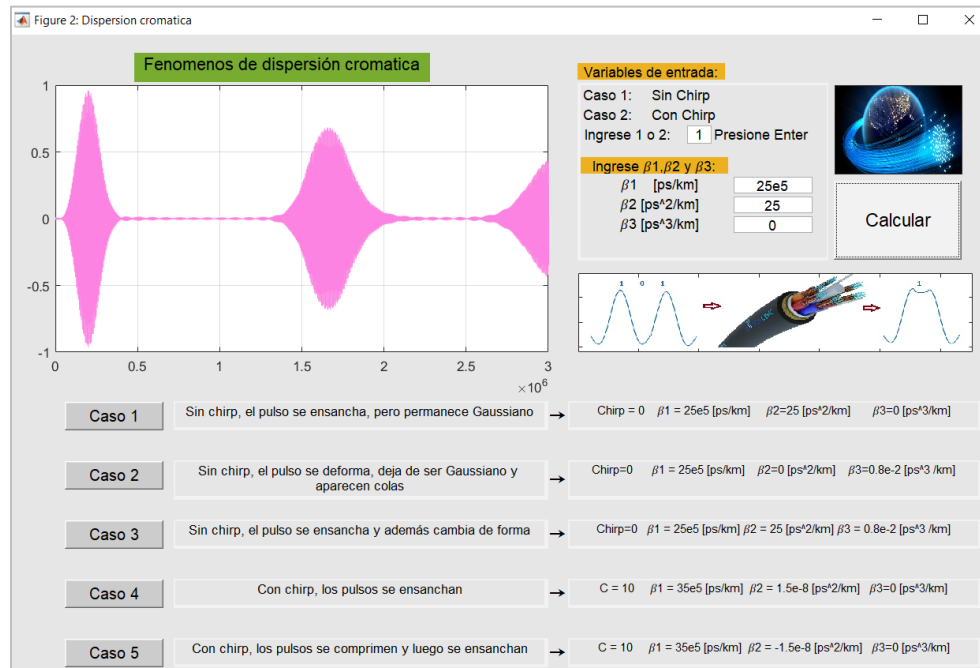


Figura 6.13 Fenómenos de dispersión cromática: Ensanchamiento y atenuación de la señal.

Se puede apreciar claramente que existe un ensanchamiento y una atenuación de la señal y que lo obtenido por la simulación, responde a la teoría descrita. Cabe destacar que debido a que $\beta_3 = 0$ el pulso que se propaga sigue siendo gaussiano.

Caso 2: $C = 0, \beta_1 \neq 0, \beta_2 \neq 0$ y $\beta_3 \neq 0$.

En el caso de que $\beta_2 \neq 0$ y $\beta_3 \neq 0$, la teoría dice que existe una dispersión de orden superior gobernada por β_3 . En este caso, la teoría dice que existe ensanchamiento de la señal y que se presenta una deformación de la señal resultante, el pulso ya no se mantiene gaussiano y presenta lo que se conoce como “colas”.

Ingresando a la interfaz los valores $C = 0, \beta_1 = 25 \cdot 10^5 \left[\frac{ps}{km}\right]$, $\beta_2 = 25 \left[\frac{ps^2}{km}\right]$ y $\beta_3 = 0.008 \left[\frac{ps^3}{km}\right]$, se obtiene la señal gaussiana propagada a través de la fibra que se muestra en la figura 6.15.

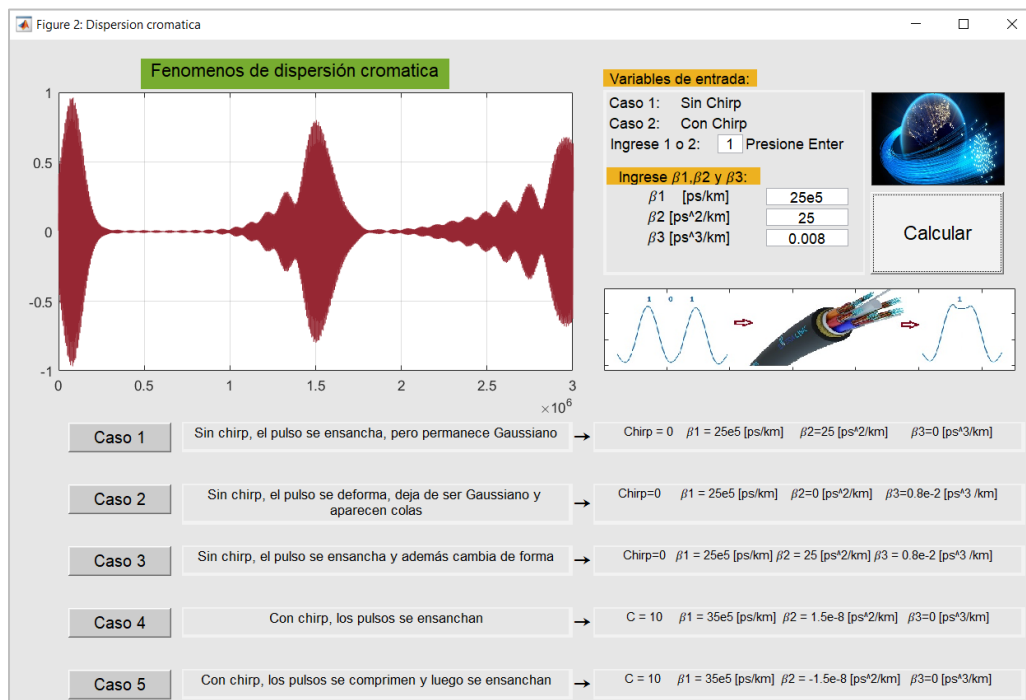


Figura 6.14 Fenómenos de dispersión cromática: Deformación de la señal, ensanchamiento de la señal y aparición de “colas”

Se puede ver claramente que el resultado obtenido por la simulación 6.3 es una señal que presenta un ensanchamiento, deja de ser gaussiana y aparecen “colas”, por lo que lo obtenido concuerda con la teoría.

A continuación, se analizan dos casos de dispersión cromática en señales con presencia de Chirp.

Previamente al estudio de los casos se debe introducir lo siguiente:

Para realizar una validación cuantitativa de la simulación en el caso de existencia de Chirp, se agrega al código de la simulación la ecuación que define el factor de ensanchamiento de los pulsos. Esta corresponde a [18]:

$$\frac{T_1}{T_0} = \sqrt{\left(1 + \frac{C\beta_2 z}{T_0}\right)^2 + \left(\frac{\beta_2 z}{T_0}\right)^2}$$

T_1 : Ancho del pulso al final de la fibra óptica.

T_0 : Ancho del pulso al comienzo de la fibra óptica.

z : Dirección de propagación del pulso (distancia).

Además, se agrega al código de la simulación el cálculo de la longitud de dispersión:

$$L_D = \frac{T_0^2}{|\beta_2|}$$

La finalidad de obtener el valor del ensanchamiento del pulso y la longitud de dispersión es conseguir la gráfica de la figura 6.15 que relaciona ambos parámetros, es decir, se tiene como objetivo graficar $\frac{T_1}{T_0}$ vs $\frac{z}{L_D}$.

Una vez explicado lo anterior, se procede a realizar los siguientes casos de validación:

Caso 3: $C > 0, \beta_1 \neq 0, \beta_2 > 0$ y $\beta_3 = 0$.

La presencia de chirp indica una variabilidad de la frecuencia portadora en el tiempo. Según lo que indica la gráfica de la figura 6.15 explicada en el capítulo 2, al existir $\beta_2 > 0$ y $C > 0$, se tendrá un comportamiento de la señal gaussiana a través de la fibra como indica la recta coloreada.

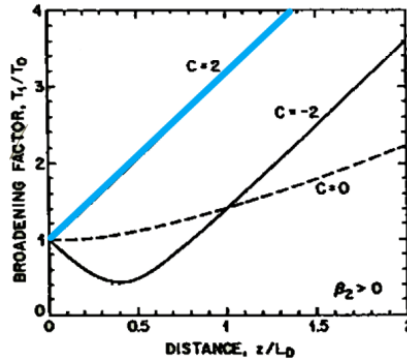


Figura 6.15 Comportamiento del ensanchamiento de la señal.

Se puede apreciar claramente que la señal presentará un rápido ensanchamiento al propagarse a través de la fibra.

Ingresando a la interfaz los valores $C = 2, \beta_1 = 35 \cdot 10^5 \left[\frac{ps}{km} \right], \beta_2 = 1.5 \cdot 10^{-8} \left[\frac{ps^2}{km} \right]$ y $\beta_3 = 0 \left[\frac{ps^3}{km} \right]$, se obtiene la señal gaussiana propagada a través de la fibra que se muestra en la figura 6.16.

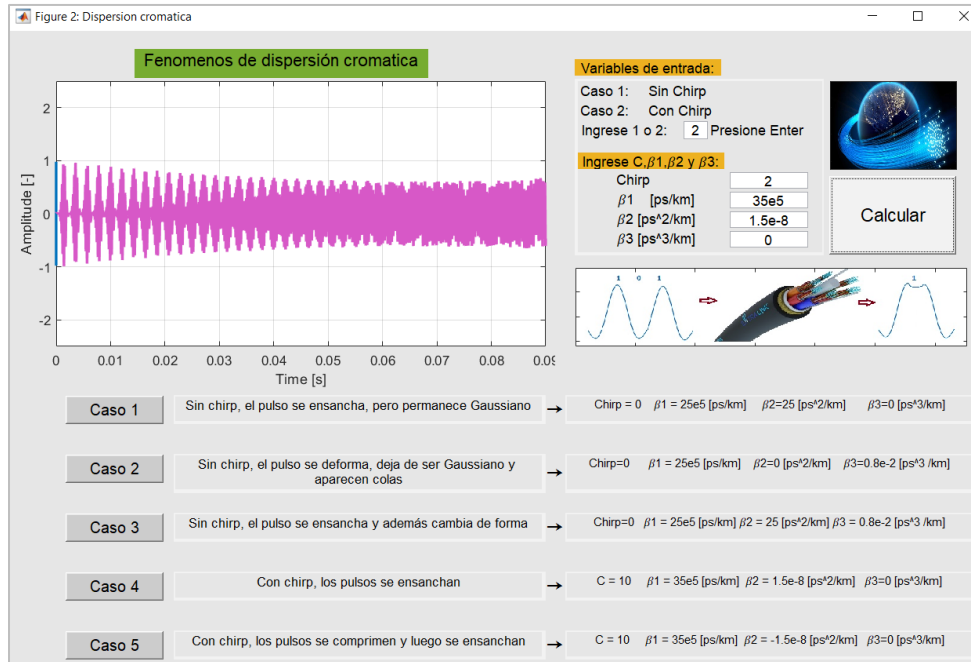


Figura 6.16 Fenómenos de dispersión cromática: Ensanchamiento y atenuación de la señal.

La gráfica que se despliega externa a la interfaz que relaciona el ensanchamiento del pulso y la longitud representando $\frac{T_1}{T_0}$ vs $\frac{z}{L_D}$ se observa en la figura 6.17.

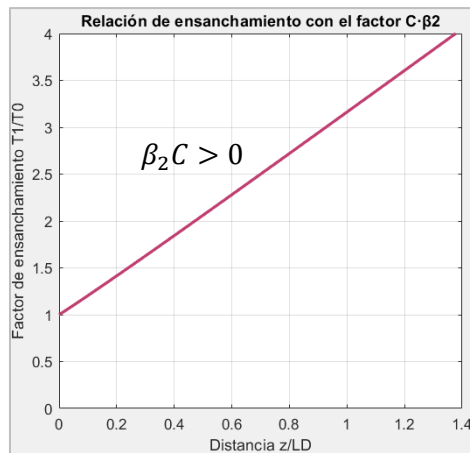


Figura 6.17 Ensanchamiento del pulso según el factor $C \cdot \beta_2$

Se observa claramente un ensanchamiento rápido de la señal gaussiana de tal manera que al final de la fibra óptica ya existe una dispersión considerable, lo que lleva a errores de transmisión y recepción de la información. Además, se observa que la recta obtenida en la figura 6.17 coincide con la ilustrada en la figura 6.15.

Caso 4: $C\beta_2 < 0$, $\beta_1 \neq 0$ y $\beta_3 = 0$.

Según lo que indica la gráfica de la figura 6.18, al existir $\beta_2 C < 0$, se tendrá un comportamiento de la señal gaussiana a través de la fibra como indica la recta coloreada.

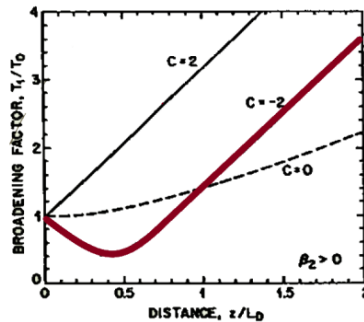


Figura 6.18 Comportamiento del ensanchamiento de la señal.

Se puede apreciar claramente que la señal se enangosta y luego presenta un ensanchamiento considerable al propagarse a través de la fibra.

Ingresando a la interfaz los valores $C = 2$, $\beta_1 = 35 \cdot 10^5 \left[\frac{ps}{km} \right]$, $\beta_2 = -1.5 \cdot 10^{-8} \left[\frac{ps^2}{km} \right]$ y $\beta_3 = 0 \left[\frac{ps^3}{km} \right]$, se obtiene la señal gaussiana propagada a través de la fibra que se muestra en la figura 6.19.

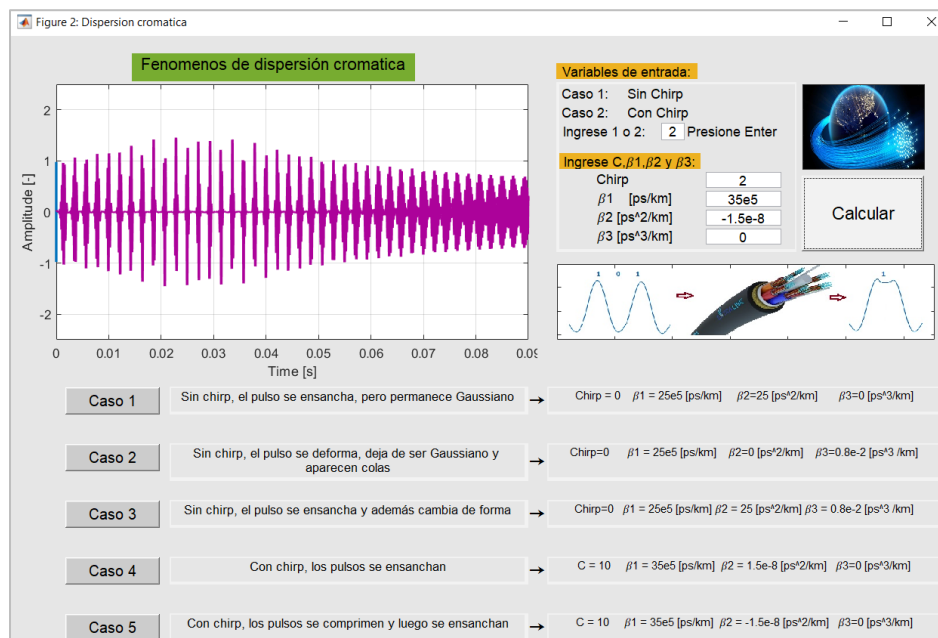


Figura 6.19 Fenómenos de dispersión cromática: Variabilidad del ancho de la señal.

Se observa claramente como se enangosta la señal y luego se ensancha tal como indica la teoría.

La gráfica obtenida que se despliega externa a la interfaz que representa la relación $\frac{T_1}{T_0}$ vs $\frac{z}{L_D}$ se observa en la figura 6.20.

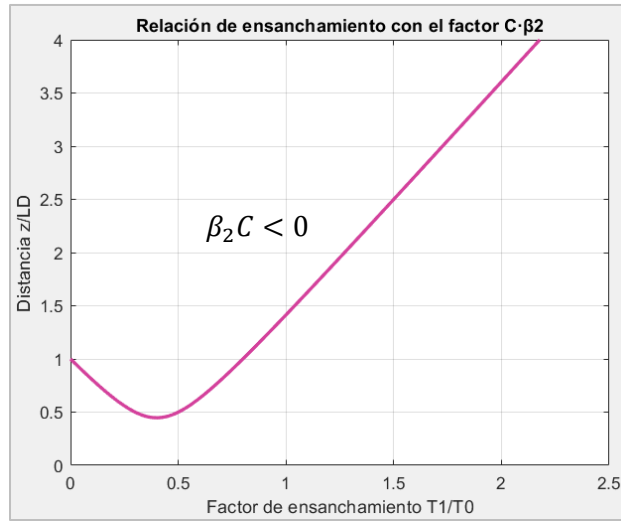


Figura 6.20 Ensanchamiento del pulso según el factor $C \cdot \beta_2$

Se observa que la curva obtenida en la figura 6.20 coincide con la ilustrada en la figura 6.18.

Para realizar una validación aún más ilustrativa, se realiza la comparación entre la teoría y lo obtenido a través de la simulación para los 2 casos de la figura 6.15 y 6.18, es decir, para los casos $\beta_2 C < 0$, $\beta_2 C > 0$ y además para el caso $\beta_2 C = 0$. El resultado al sobreponer las curvas se ve en la figura 6.21.

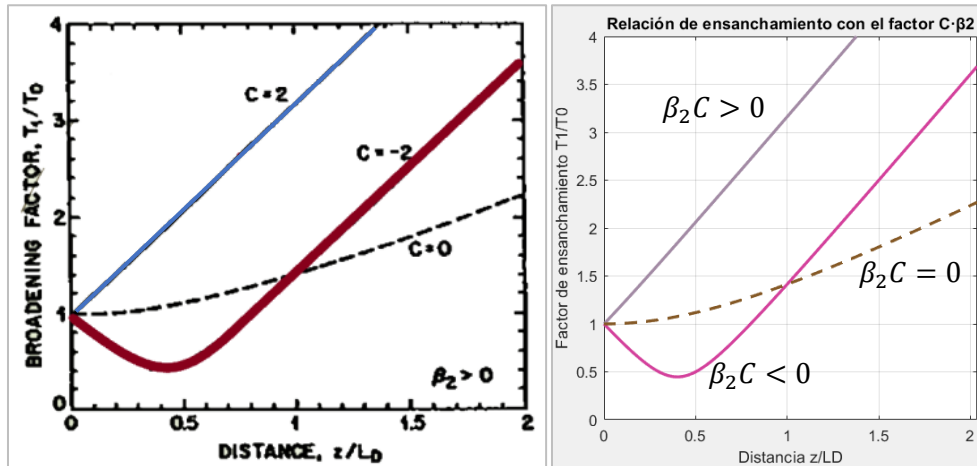


Figura 6.21 Ensanchamiento del pulso según el factor $C\beta_2$ para los casos $\beta_2 C < 0$, $\beta_2 C > 0$ y $\beta_2 C = 0$.

Una vez analizados los 4 casos de mayor interés de la teoría de la dispersión cromática en fibras ópticas monomodales, se concluye que para cada uno de ellos, los resultados obtenidos por la simulación 6.3 se adhieren en su totalidad a lo que indica la teoría, por lo que se considera finalmente validada.

6.4 Dispersión intermodal

6.4.1 Descripción de la simulación

La simulación “Dispersión intermodal” pretende demostrar visualmente los fenómenos de dispersión predominantes en una fibra multimodal. Además, se espera que permita visualizar los beneficios de transmitir información a través de fibras ópticas con índice de refracción gradual con respecto a fibras ópticas con índice de refracción escalonado.

Las variables de entrada son: T_0 (ancho en el dominio del tiempo en el que la señal decae 1/e veces su amplitud) de la señal de entrada, la constante α que permite representar el perfil- α de la fibra óptica, índices de refracción del núcleo n_1 y el revestimiento n_2 , largo L y radio de la fibra óptica.

La simulación 6.4 diseñada tiene 3 gráficas (figura 6.22), cada una de ellas representa:

- Gráfica 1: Señal gaussiana de ancho T_0 y superpuesta a dicha señal, se observa la misma señal gaussiana con un ensanchamiento ΔT , es decir, se grafica la señal al comienzo y al final de la fibra óptica.
- Gráfica 2: Perfil de refracción de la fibra según el valor del radio y del valor de α (perfil- α).
- Gráfica 3: Señal gaussiana propagándose en una fibra óptica.

Las variables de salida son: el ensanchamiento de la señal gaussiana en segundos ΔT [s], la capacidad máxima de transmisión de información $BL \left[\frac{Gb}{s} \cdot km \right]$, la tasa de bits máxima permitida por la fibra óptica $B \left[\frac{Gb}{s} \right]$ y el número de veces que se ensancha la señal al final de la fibra.

La simulación 6.4 busca comparar la señal gaussiana de entrada a la fibra óptica con la señal gaussiana que aparece al final de la fibra, con el fin de analizar el efecto de dispersión intermodal según el perfil del índice de refracción, la diferencia que exista entre el valor máximo y mínimo de los índices de refracción del núcleo y el revestimiento y el largo que tenga la fibra.

6.4.2 Software desarrollado

Se realiza a través de la simulación desarrollado en MATLAB la interfaz de la figura 6.22 en la que se puede observar la descripción entregada en la sección 6.4.1.

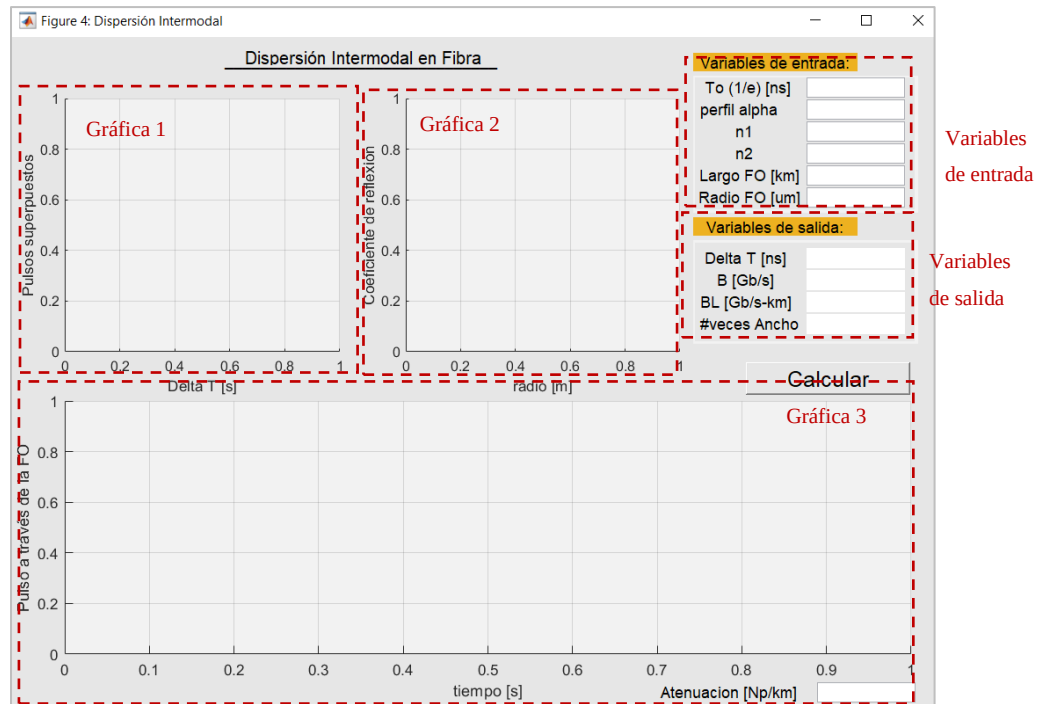


Figura 6.22 Interfaz de la simulación 6.4.

En la figura 6.22 se destaca la enumeración de cada gráfico para simplificar la comprensión de lo que representa cada uno de ellos según la descripción entregada en la sección 6.4.1. Además, se resalta el área donde se ingresan las variables de entrada y las variables de salida.

A modo de ejemplo ilustrativo de la simulación, se ingresan valores específicos a las variables de entrada para la visualización de los resultados entregados por la interfaz. Los valores asignados a las variables de entrada son:

- Ancho del pulso en el tiempo T_0 : 12 [ns]
- Perfil – α : 0 (Perfil de refracción escalonado)
- Índice de refracción del núcleo n_1 : 1.49
- Índice de refracción del revestimiento n_2 : 1.4895
- Largo de la fibra óptica: 10 [km]
- Radio del núcleo de la fibra óptica: 50 [μm]

Los resultados entregados por la simulación se observan en la figura 6.23.

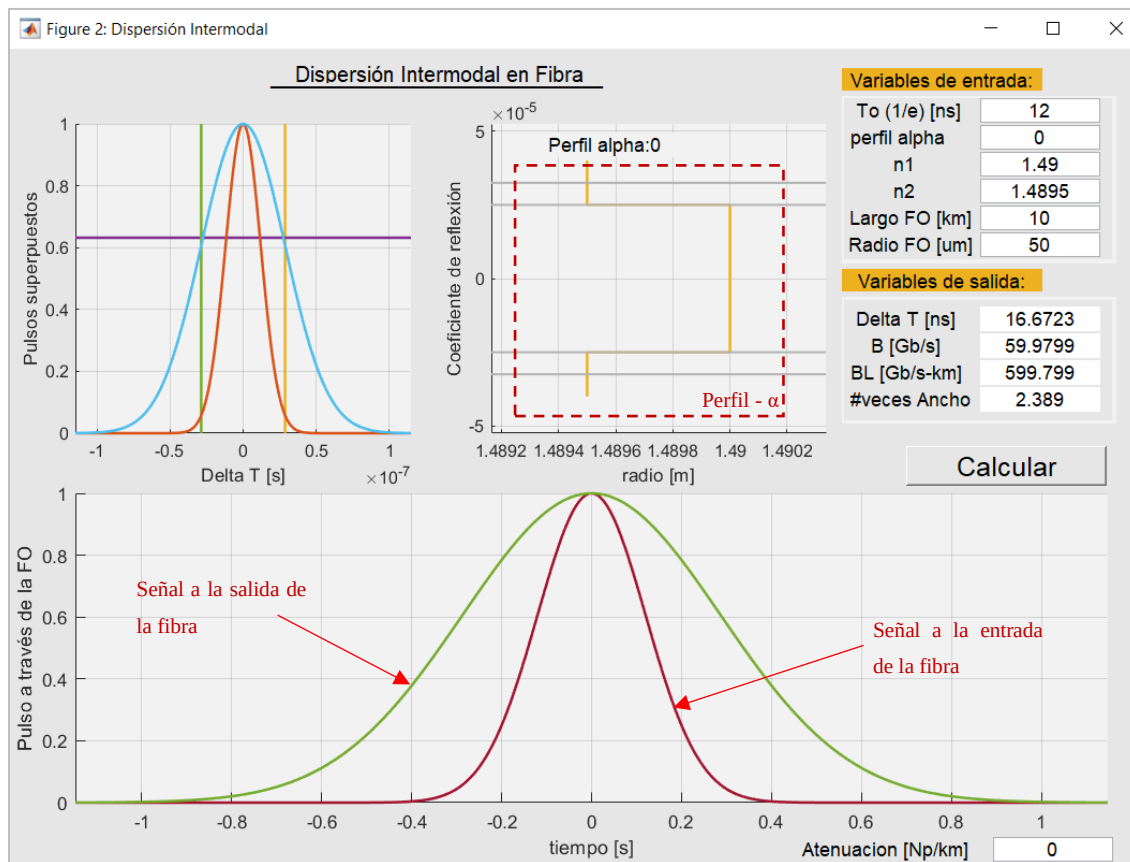


Figura 6.23 “Dispersión intermodal”

La interfaz entrega como variable de salida el valor siguiente:

- Ensanchamiento del pulso ΔT : 16.67 [ns]
- Tasa máxima de bits B : 59.98 $\left[\frac{Gb}{s}\right]$
- Capacidad máxima de transmisión de la fibra óptica: 599.8 $[Gb \cdot km/s]$
- N° de veces el ancho final con respecto al T_0 : 2.39 veces.

Una vez detallada e ilustrada la interfaz diseñada, se procede a realizar la validación de los datos numéricos entregados por la simulación.

6.4.3 Validación de la simulación

La simulación 6.4 se valida resolviendo un ejercicio teórico, y contrastando posteriormente, los resultados calculados con los obtenidos por la simulación.

Ejercicio:

Se tiene una fibra óptica de perfil escalonado con un índice de refracción de núcleo $n_1 = 1.5$ e índice de refracción de revestimiento $n_2 = 1.497$, el largo de la fibra es $L = 10 \text{ km}$ y radio del núcleo de $50 \mu\text{m}$. Se propaga a través de ella una señal gaussiana con un ancho en el tiempo $T_o = 10 \text{ ns}$.

Calcule el ensanchamiento ΔT que experimenta el pulso introducido en la entrada de la fibra, la capacidad máxima que permite la fibra de transportar información sin existencia de recepciones o de transmisiones de bits y la tasa máxima B. Además, calcula cuantas veces se ensanchó el pulso.

Calcule todo lo anteriormente mencionado considerando que ahora la fibra tiene índice gradual con *perfil* – $\alpha = 2$.

Desarrollo teórico:

Se desarrolla el ejercicio para fibra óptica con perfil de índice de refracción escalonado, utilizando las ecuaciones 2.39 y 2.40.

Ensanchamiento del pulso:

$$\Delta T = \frac{L n_1^2}{c n_2^2} \cdot \frac{n_1 - n_2}{n_1} \approx \frac{10^4}{3 \cdot 10^8 \cdot 1.497^2} \cdot 1.5^2 \cdot \frac{1.5 - 1.497}{1.5} \approx 100.2 \text{ [ns]}$$

La capacidad máxima de la fibra para que no exista una dispersión de la señal:

$$BL = \frac{n_2^1}{n_1^2} \cdot \frac{c \cdot n_1}{n_1 - n_2} = \frac{1.497^1}{1.5^2} \cdot 3 \cdot 10^8 \cdot \frac{1.5}{1.5 - 1.497} \approx 99.8 \left[\frac{\text{Gb} \cdot \text{km}}{\text{s}} \right]$$

Y la tasa de bits con una distancia $L = 10 \text{ km}$ es:

$$\frac{BL}{L} = \frac{99.8}{10} \approx 9.98 \left[\frac{\text{Gb}}{\text{s}} \right]$$

Si el $T_o = 10 \text{ ns}$ y el ensanchamiento $\Delta T \approx 100.2 \text{ ns}$, se tiene que el pulso se ensancha una cantidad de:

$$\# \text{ veces Ancho} = \frac{T_o + \Delta T}{T_o} \approx \frac{10 + 100.2}{10} \approx 11.02 \text{ [veces]}$$

En el caso de que la fibra tenga índice de refracción gradual, se obtiene lo solicitado con las ecuaciones 2.42 y 2.43.

Ensanchamiento del pulso:

$$\Delta T = \frac{n_1 \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1} \right)^2 L}{8c} \approx \frac{1.5 \cdot (2 \cdot 10^3)^2 \cdot 10^4}{8 \cdot 3 \cdot 10^8} \approx 0.025 [ns]$$

La capacidad máxima de la fibra para que la dispersión de la señal sea mínima:

$$BL < \frac{8c}{n_1 \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1} \right)^2} = \frac{8 \cdot 3 \cdot 10^8}{1.5 \cdot (2 \cdot 10^3)^2} \approx 400000 \left[\frac{Gb \cdot km}{s} \right]$$

Y la tasa de bits con una distancia $L = 10 km$ es:

$$\frac{BL}{L} = \frac{400000}{10} \approx 40000 \left[\frac{Gb}{s} \right]$$

Si el $T_o = 10 ns$ y el ensanchamiento $\Delta T \approx 100.2 ns$, se tiene que el pulso se ensancha una cantidad de:

$$\# veces Ancho = \frac{T_o + \Delta T}{T_o} \approx \frac{10 + 0.025}{10} \approx 1.0025 [veces]$$

Los resultados teóricos se resumen en la tabla 6.5.

Tabla 6.5 Resultados teóricos

Variable	<i>perfil</i> – $\alpha \rightarrow \alpha = 0$	<i>perfil</i> – $\alpha \rightarrow \alpha = 2$
ΔT	100.2 [ns]	0.025 [ns]
BL	99.8 $\left[\frac{Gb \cdot km}{s} \right]$	400000 $\left[\frac{Gb \cdot km}{s} \right]$
B	9.98 $\left[\frac{Gb}{s} \right]$	40000 $\left[\frac{Gb}{s} \right]$
<i>#veces Ancho</i>	11.02 [veces]	1.0025 [veces]

La teoría dice que al existir un índice de refracción gradual, la trayectoria de los rayos que recorren distancias más largas lo hacen a una mayor velocidad por propagarse en un medio de menor índice de refracción que aquellos rayos que siguen trayectorias más cortas, por ende, se compensa el retardo de llegada entre los modos y se minimiza el ensanchamiento de la señal, lo cual efectivamente se observa en los valores obtenidos con el ejercicio.

Desarrollo interfaz:

Se ingresan los datos del ejercicio como variables de entrada a la simulación y se obtienen los resultados de las figuras 6.24 y 6.25 para fibra escalonada y gradual respectivamente.

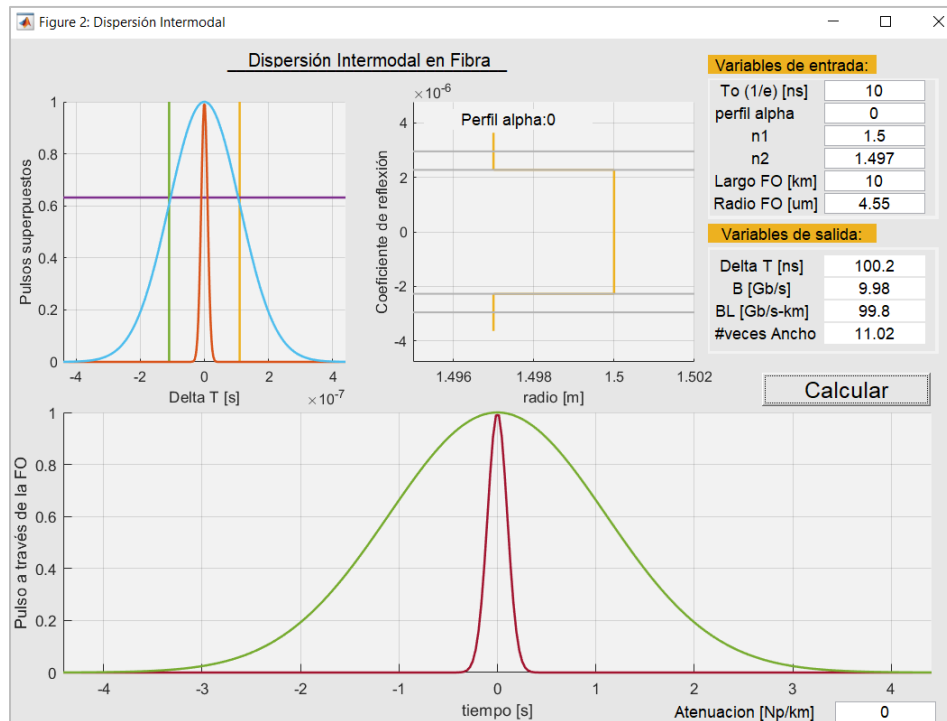


Figura 6.24 Resultados simulación con fibra óptica escalonada.

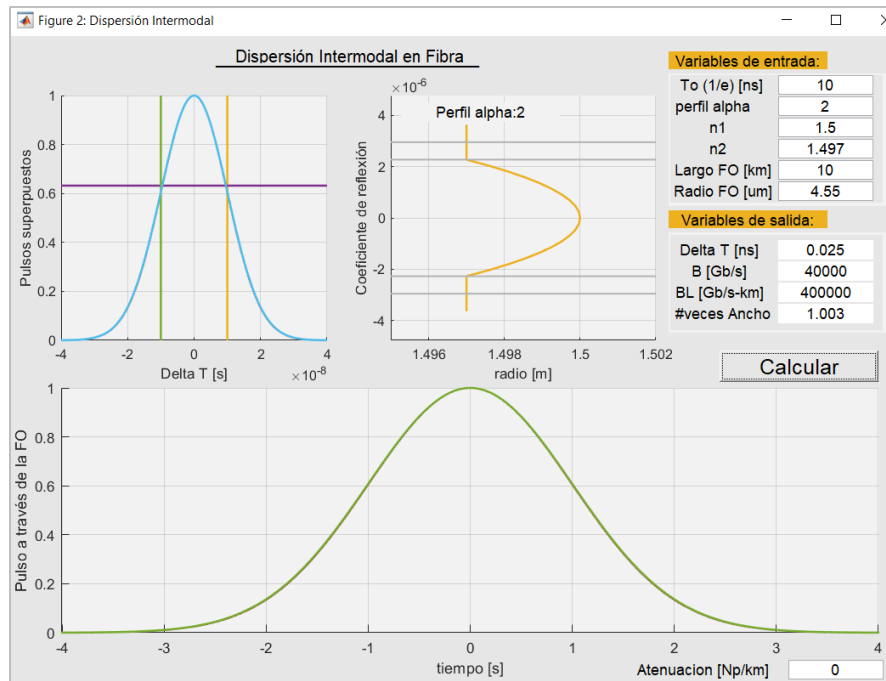


Figura 6.25 Resultados simulación con fibra óptica gradual.

En la tabla 6.6 se extraen los valores obtenidos a partir de la simulación.

Tabla 6.6 Resultados simulación 6.4

Variable	$perfil - \alpha = 0$	$perfil - \alpha = 2$
ΔT	100.2 [ns]	0.025 ns
BL	$99.8 \left[\frac{Gb \cdot km}{s} \right]$	$400000 \left[\frac{Gb \cdot km}{s} \right]$
B	$9.98 \left[\frac{Gb}{s} \right]$	$40000 \left[\frac{Gb}{s} \right]$
#veces Ancho	11.02 [veces]	1.003 [veces]

Como se puede apreciar comparando los resultados de las tablas 6.5 y 6.6, los resultados tanto teóricos como los entregados por la simulación 6.4 concuerdan totalmente en números, y además, se adhieren al comportamiento teórico de la dispersión intermodal, por lo que se considera la simulación 6.4 validada.

7 CONCLUSIONES

En el presente trabajo de memoria se crean con éxito 14 herramientas educativas interactivas dirigidas al estudio de líneas de transmisión, guías de onda y fibra óptica a través de la implementación de rutinas de programación realizadas en MATLAB, con la finalidad de comprender los conceptos teóricos y prácticos de los temas mencionados, complementar con material práctico el desarrollo de las clases de los docentes y resolver problemas de ingeniería básicos y didácticos.

Las etapas de desarrollo del proyecto se implementan tal como fue organizado previo al comienzo de la memoria de título. Estas etapas son:

- Implementación matemática de las rutinas de programación de cada una de las 14 simulaciones: En esta etapa se analizó la teoría matemática que permite modelar y comprender cada uno de los conceptos involucrados en los macro temas de interés para posteriormente plasmarlos en los códigos de MATLAB.
- Validación de datos 1: Se hicieron comparaciones entre las simulaciones obtenidas con los resultados teóricos de casos conocidos de diferentes situaciones existentes en cada tema y se simularon casos realizados en guías de trabajo desarrolladas por profesores y en libros que traten las temáticas de interés contrastando los respectivos resultados.
- Diseño de interfaz de las simulaciones: Se integraron las gráficas diseñadas correspondientes a cada alternativa de simulación previamente seleccionadas en una interfaz gráfica de usuario. Se realizó una programación visual interactiva con un ingreso de datos continuo, siendo éstos las variables de interés. Adicionalmente, se agregaron los datos de salida planificados a la interfaz gráfica.
- Validación de datos 2: Con las interfaces gráficas interactivas ya realizadas en las etapas previas, se volvieron a validar los resultados, por posibles errores de programación en la integración de los gráficos o en los parámetros de entrada o salida de la interfaz.

Las herramientas desarrolladas son la base para resolver problemas reales de ingeniería en sistemas de líneas de transmisión, líneas microstrip, guías de onda y fibra óptica. Los resultados validados en este trabajo ofrecerán a los lectores las bases necesarias para:

- Complementar el presente trabajo haciendo algunas mejoras como: editar el menú principal del software, optimizar el código o desarrollar en mayor detalle la profundidad conceptual de cada simulación.
- Profundizar en los temas desarrollados en el presente trabajo con el fin de convertir las simulaciones que ayudan a resolver problemas básicos de ingeniería a problemas reales de ingeniería.
- Traspasar el código a la aplicación AppDesigner de MATLAB con la finalidad de convertirla en una aplicación libre de escritorio.

Se espera que el trabajo de memoria de título realizado ayude a complementar las clases de los docentes para los estudiantes de Ingeniería Civil Electrónica o afines y les permita tener una mayor claridad de toda la teoría matemática abstracta que modela la propagación de señales.

REFERENCIAS

- [1] Inter-American Dialogue 1155 15th Street. Washington, DC 20005
- [2] Navas K.A., Jayadevan R. (2014). Lab Primer Through MATLAB: Digital Signal Processing, Digital signal Processor and Digital Communication. PHI Learning
- [3] Dale Edgar. (1946). Audiovisual Methods in Teaching. Dryden Press
- [4] Pérez Constantino V. Sistemas de telecomunicaciones 1ra edición. Dpto. de ingeniería de comunicaciones. Universidad de Cantabria.
- [5] Pozar, David M. (2011). “Microwave Engineering”. 4ta edición. John Wiley & Sons.
- [6] Hugh., Young., Freedman R. Física universitaria con física moderna. Décimo tercera edición. Volumen 1.
- [7] Mata Salvador R. Transición guía de onda – Línea microstrip en banda W. Escuela técnica superior de ingeniería de telecomunicaciones. Barcelona.
- [8] Zaiki Awang. “Microstrip and Related Transmission Lines”. Springer.
- [9] Loranca R. Yolanda. (2003). Líneas de transmisión y guías de onda. Cholula, Puebla, México.
- [10] Soto, Marcelo. Líneas de transmisión, unidad 1: Líneas de transmisión parte 1 Universidad técnica Federico Santa María.
- [11] Ortiz L. Manuel. Transmisión vía fibra óptica de señales analógicas utilizando subportadora modulada en frecuencia de pulsos: aplicación potencial en instrumentación y control. Instituto INAOE.
- [12] García. Angel. Funciones de Bessel.
<<http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica3/especial/bessel/bessel.html>>.
- [13] Soto, Marcelo. Guías de onda, unidad 5: Guías de onda parte 1 Universidad Técnica Federico Santa María.
- [14] Soto, Marcelo. Guías de onda, unidad 5: Guías de onda parte 2 Universidad Técnica Federico Santa María.
- [15] Rosas Ariadna G. (2017). Análisis del impacto de las no-linealidades en esquemas de multiplexado espacial de información en fibras ópticas multimodo. Tesis de maestría en ingeniería. Universidad nacional autónoma de México. Ciudad universitaria, México.
- [16] Ortiz, Carlos M. (2010). Transmisión vía fibra óptica de señales analógicas utilizando subportadora modulada en frecuencia de pulsos: aplicación potencial en instrumentación y control. Tesis de grado. INAOE.
- [17] Hugh, Young., Freedman R. Física universitaria con física moderna. Décimo segunda edición. Volumen 2.

- [18] Agrawal Govind P. (2002). “Fiber-Optic Communications Systems”. 4ta edición. John Wiley & sons.
- [19] J. M., Ward¹, A. Maimaiti^{1,2}, Vu H. Le¹ and S. Nic Chormaic¹. Optical Micro- and Nanofiber Pulling Rig. University College Cork, Cork, Ireland.
- [20] Propagación de la luz en guías de onda. Universidad de Valencia. 29 p. <https://www.uv.es/~esanchis/cef/pdf/Temas/B_T1.pdf>.
- [21] Rangel Merino Arturo. “Herramienta educativa para apoyar el aprendizaje de cómo se utiliza la Carta de Smith”. https://la.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/68568-esmithch_v5_14?focused=f11419f0-03a0-49ec-8b06-92c8bf89fc52&tab=function
- [22] Manzano Vera Jaime. (2013). “Estudio de Líneas de Transmisión de alta velocidad utilizando Software de Simulación Electromagnética” (Tesis de Pregrado). Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile.
- [23] Nieto Capuchino R. “Diseño y Simulación de elementos en guía de onda construidos mediante impresión 3D” (Trabajo de grado). Universidad de Alcalá, Madrid, España. Enlace: <https://ebuah.uah.es/dspace/handle/10017/23243>
- [24] Rodríguez Barrera B. (2019). “Diseño y simulación de una antena Microstrip de rango de operación de super altas frecuencias (3.5 GHz a 6 GHz) para la evaluación de la tasa de absorción específica en tejidos humanos” (Trabajo de grado). Universidad Católica de Colombia, Bogotá, Colombia.
- [25] Poveda Escobar G., Carrera Guerrero C. (2015). “Estudio y simulación de la propagación de solitones en una fibra óptica monomodo” (Trabajo de grado). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
- [26] Artículos de Divulgación Técnica, “Diseñando con la Carta de Smith en 3D”, enlace: <https://tomrospa.wordpress.com/2017/06/13/disenando-con-la-carta-de-smith-3d/> y enlace de la herramienta que desarrolla la Carta de Smith en 3D: <http://www.3dsmithchart.com/>