

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

ESTUDIO Y SIMULACIÓN DE LA PROPAGACIÓN DE SEÑALES EMITIDAS POR NODOS SENSORES EN REDES CON TOPOLOGÍA LINEAL

ESTUDIO Y SIMULACIÓN DE LA PROPAGACIÓN DE SEÑALES EMITIDAS POR NODOS SENSORES COLOCADOS EN EL INTERIOR DE TUBERÍAS EN REDES CON TOPOLOGÍA LINEAL

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN
TELECOMUNICACIONES**

STEVEN ANDRÉS GRANIZO ALARCÓN

steven.granizo@epn.edu.ec

DIRECTOR: DR. PABLO ANÍBAL LUPERA MORILLO

pablo.lupera@epn.edu.ec

DMQ, febrero 2022

CERTIFICACIONES

Yo, STEVEN ANDRÉS GRANIZO ALARCÓN declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

STEVEN ANDRÉS GRANIZO ALARCÓN

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por STEVEN ANDRÉS GRANIZO ALARCÓN, bajo mi supervisión.

DR. PABLO ANÍBAL LUPERA MORILLO
DIRECTOR

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

STEVEN ANDRÉS GRANIZO ALARCÓN

DR. PABLO ANÍBAL LUPERA MORILLO

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mis padres, Nancy y Edgar, por ser quienes siempre me han apoyado en cada aspecto de vida y me han enseñado que el esfuerzo y dedicación da frutos. De igual manera, a mis hermanos y amigos por estar siempre para mí.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por la vida y por darme una familia que siempre me ha apoyado en las diferentes situaciones que se han presentado. De igual manera, agradezco a mis amigos quienes me han apoyado a lo largo de mi vida estudiantil. Además, agradezco a todos quienes han puesto un granito de arena para ayudarme a cumplir mis objetivos.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES.....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	II
DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTO.....	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	V
RESUMEN	VI
ABSTRACT	VII
1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 OBJETIVO GENERAL	2
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	2
1.3 ALCANCE	2
1.4 MARCO TEÓRICO	2
1.4.1 ESCENARIO DE SIMULACIÓN	2
1.4.1.1 Sistema de Oleoducto Ecuatoriano.....	2
1.4.1.2 Oleoducto de crudos pesados (OCP).....	4
1.4.1.3 Combustibles.....	5
1.4.2 MODELO DE PROPAGACIÓN DE GUÍA DE ONDA.....	6
1.4.2.1 Propagación en guías de onda circulares.....	7
1.4.2.2 Modos TE	9
1.4.2.3 Modos TM	11
1.4.3 NODOS SENSORES	13
1.4.3.1 Estándar IEEE 802.15.4/Zigbee	13
1.4.4 PARÁMETROS S.....	14
2 METODOLOGÍA.....	16
3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	24
3.1 RESULTADOS.....	24
3.2 CONCLUSIONES	34
3.3 RECOMENDACIONES.....	35
4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	37

RESUMEN

En el presente trabajo de integración curricular se realiza el estudio de la propagación de señales emitidas por nodos sensores en el interior de tuberías como oleoductos. Para ello, se utiliza el modelo de propagación de guías de onda, tomando a las tuberías como guías de onda circulares.

En el primer capítulo se detalla la información referente al escenario de simulación. En este sentido, se presenta la información sobre el Sistema de Oleoducto Ecuatoriano y el Oleoducto de Crudos Pesados, así como características del crudo que transportan.

En el segundo capítulo se detalla el proceso para la simulación de un tramo de las tuberías en la herramienta de simulación CST Studio Suite.

En el tercer capítulo se muestran los resultados de las simulaciones a través de gráficos de los parámetros S y de los patrones de campo eléctrico y magnético. Además, se realiza un análisis de los resultados obtenidos.

Por último, se presentan conclusiones y recomendaciones del trabajo realizado.

PALABRAS CLAVE: propagación, ondas electromagnéticas, guías de onda, oleoducto, parámetros S, campo eléctrico, campo magnético.

ABSTRACT

This final degree project presents the study of propagation of signals emitted by sensor nodes inside pipelines such as oil pipelines. For this purpose, we use this project shows the use of the waveguide propagation model where the pipelines act as circular waveguides.

The first chapter details the information concerning the simulation scenario. This chapter shows information about “Sistema de Oleoducto Ecuatoriano” and “Oleoducto de Crudos Pesados” and the characteristics of the crude oil they transport.

The second chapter details the process for the simulation of a pipeline section using the simulation tool CST Studio Suite.

The third chapter shows the simulation results using figures of the S-parameters and the electric and magnetic field patterns. In addition, this chapter shows an analysis of the obtained results.

Finally, conclusions and recommendations about this project are presented.

KEYWORDS: propagation, electromagnetic waves, waveguides, pipeline, S-parameters, electric field, magnetic field.

1 INTRODUCCIÓN

En el Ecuador existen redes con topología lineal, como los oleoductos, que necesitan ser monitoreadas debido al constante riesgo de fugas, ejemplos de estas redes son el Sistema de Oleoducto Ecuatoriano y el Oleoducto de Crudos Pesados, en los cuales se podría realizar el monitoreo a través de redes inalámbricas o cableadas.

El uso de redes inalámbricas para el monitoreo de las mencionadas estructuras supone una facilidad del despliegue de red a lo largo de las mismas, ya que, como se verá en el escenario de simulación, el recorrido de estas estructuras atraviesa terrenos que dificultan el tendido de cables.

Para desplegar redes inalámbricas en las estructuras con topología lineal se propone el uso de nodos sensores que pueden ser ubicados en el exterior o interior de las tuberías. El presente trabajo de integración curricular se centrará en el estudio de la propagación de señales emitidas por nodos sensores colocados al interior de las tuberías.

Los nodos sensores enviarán información de monitoreo de forma inalámbrica utilizando las tuberías como guías de ondas electromagnéticas. Por esta razón, se plantea realizar el estudio de la propagación de ondas electromagnéticas utilizando el modelo de propagación de guías de onda.

Para esto, en el presente trabajo de integración curricular se realiza el estudio de las guías de onda circulares, mostrando las ecuaciones que definen sus campos eléctrico y magnético a través del uso de coordenadas polares. De igual manera, se muestran características de estas guías de onda como son los modos de propagación, la velocidad de propagación, la frecuencia de corte, etc.

Con el objetivo de poder realizar el modelado de un segmento de la estructura se han recopilado características térmicas y eléctricas relevantes sobre los materiales que componen las tuberías y el crudo que transportan. Entre las características se encuentran la conductividad térmica, capacidad térmica, permitividad, permeabilidad, entre otras, que permiten obtener un modelo lo más acercado al real.

Con base en el estudio de las guías de onda, las características recopiladas de los materiales y utilizando la herramienta de simulación CST Studio Suite, se realizan simulaciones para el análisis de la propagación en el interior de un segmento corto de dos metros de las tuberías, utilizando como medio de propagación el aire y el petróleo. Como resultados se obtienen los parámetros S y los patrones de campo eléctrico y magnético en

las guías de onda, estos resultados se analizan y comparan en las dos simulaciones realizadas.

1.1 OBJETIVO GENERAL

Simular la propagación de señales electromagnéticas generadas por nodos sensores instalados en el interior de oleoductos, a través del modelo de propagación de guías de onda.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Analizar teóricamente el modelo de propagación de guías de onda en guías de onda con sección circular.
2. Modelar un tramo del oleoducto con las características de los materiales que lo compone y del combustible transportado.
3. Simular la propagación de señales en el tramo de oleoducto modelado considerando el rango de frecuencias de 200 MHz a 2.6 GHz .

1.3 ALCANCE

En el proyecto se analiza el modelo de propagación de guías de onda aplicado a guías de onda circulares. Se realiza la simulación de la propagación de ondas electromagnéticas al interior de una guía de onda circular utilizando el oleoducto como guía de onda. Las simulaciones de la propagación se realizan utilizando el programa CST Studio Suite, en el cual se modela un tramo recto de dos metros del oleoducto. El material utilizado para modelar el oleoducto es acero al carbón y la simulación se realiza en el rango de 200 MHz a 2.6 GHz .

1.4 MARCO TEÓRICO

1.4.1 ESCENARIO DE SIMULACIÓN

1.4.1.1 Sistema de Oleoducto Ecuatoriano.

El objetivo del Sistema de Oleoducto Transecuatoriano, SOTE, es transportar petróleo extraído en la Amazonía ecuatoriana y llevarlo hasta el Terminal Balao, en la provincia de Esmeraldas. Con un recorrido total de 497 km [1], el crudo atraviesa un conjunto de estaciones de bombeo, estaciones reductoras de presión y tanques de almacenamiento.

En su recorrido, la tubería va cambiando de diámetro, así, 429 km del recorrido total corresponden a una tubería de 26 pulgadas, mientras que el recorrido restante corresponde

a una tubería de 20 pulgadas [2]. La tubería está hecha de acero y utiliza las especificaciones API 5L-X70 y API 5L-X60 [3], con un espesor de 0,375 pulgadas. En la figura 1 se muestra el espesor de la tubería en todo el recorrido del SOTE, se observa que las medidas de espesor de la tubería varían entre alrededor de 0.8 y 0.35 pulgadas, con un máximo de espesor entre la estación de La Virgen y San Juan a los 2500 msnm.

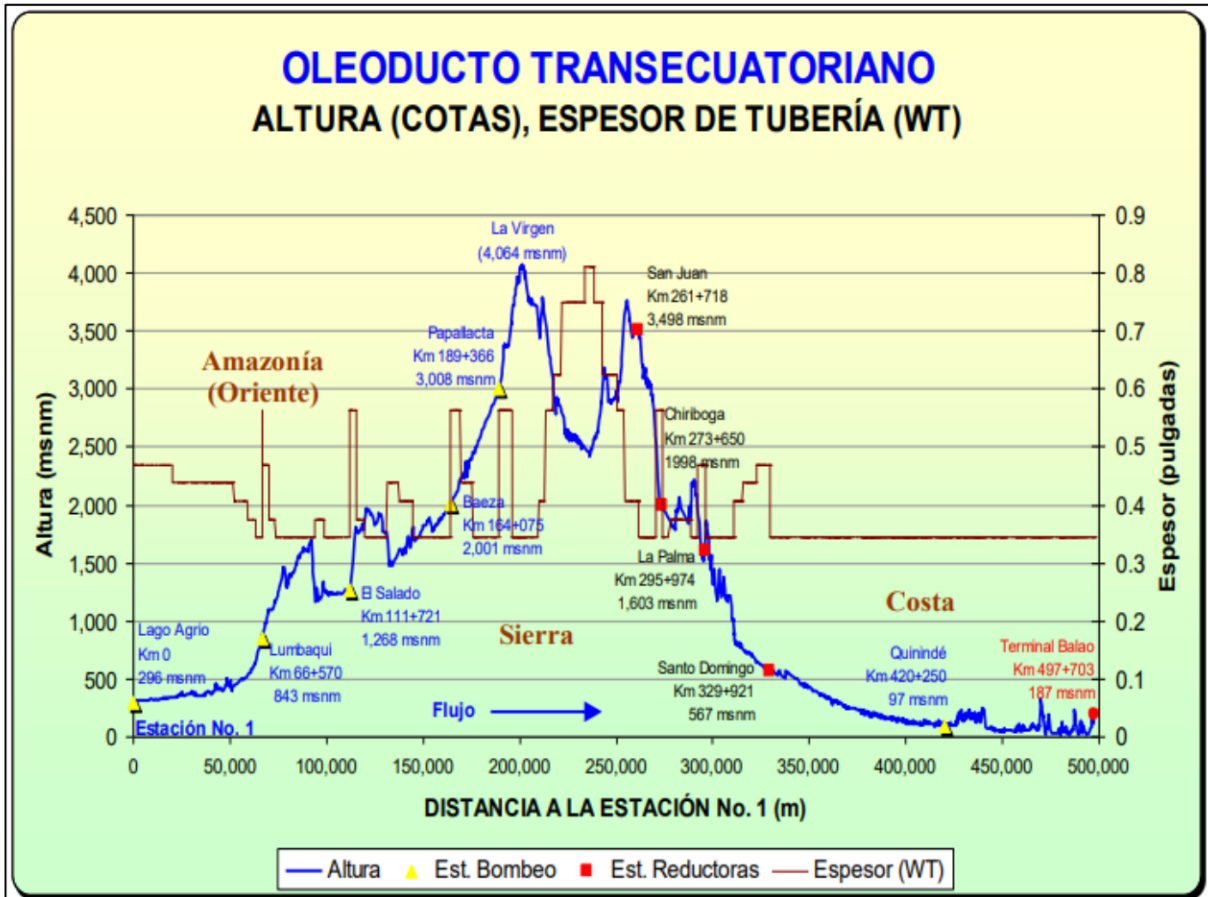


Figura 1: Perfil del SOTE y espesor de la tubería [4].

Por su parte, la figura 2 muestra una vista superior del recorrido del SOTE desde Lago Agrio a Esmeraldas, además, se muestra la longitud del diámetro del oleoducto en su recorrido por las diferentes estaciones.



Figura 2: Recorrido del SOTE [5].

1.4.1.2 Oleoducto de crudos pesados (OCP).

El oleoducto de crudos pesados, OCP, al igual que el SOTE transporta el crudo desde la Amazonía hasta la provincia de Esmeraldas. Su operación empieza en el Terminal Amazonas y termina en el Terminal Marítimo OCP con un recorrido total de 485 km a través de sus 7 estaciones [6] [7].

El tipo de oleoducto utilizado es de alta presión hecho con acero al carbono de acuerdo con las especificaciones API 5L-X70 [3], además, está revestido con epoxy de fusión¹, características que permiten el enterramiento de la tubería. El diámetro del oleoducto varía a lo largo de la ruta. Los diámetros de la tubería son de 24, 32, 34 y 36 pulgadas [8].

En la figura 3 se observa una vista lateral del recorrido del OCP a través de las diferentes estaciones, además, se muestra el nombre de las estaciones, la distancia entre cada una de ellas y la distancia total del recorrido.

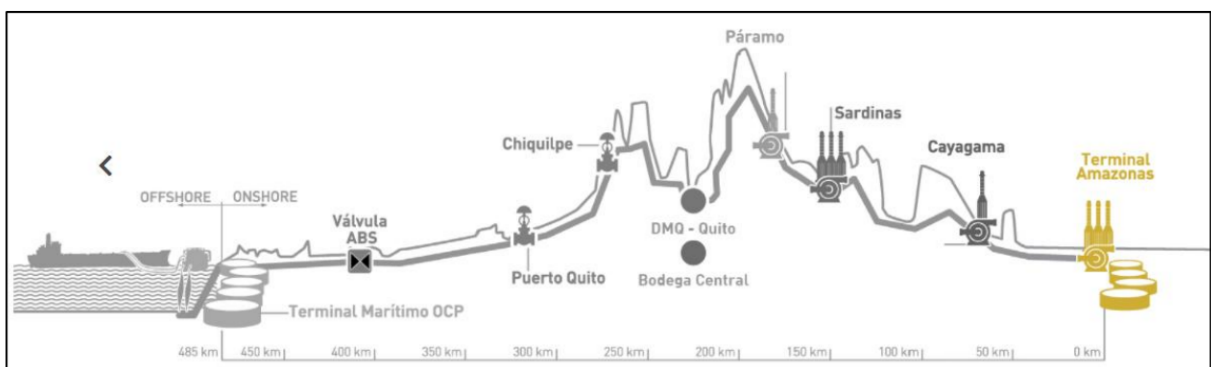


Figura 3: Perfil del OCP [7].

¹ Epoxi de fusión: Temperatura de trabajo -73°C y 110°C , resistencia a la compresión 705 kg/cm^2 , resistencia dieléctrica $1180\text{ V/mil}/46\text{ kV/mm}$.

La figura 4 muestra una vista superior del recorrido tanto del OCP como del SOTE, además, se observa que el recorrido es bastante similar hasta llegar a la región Sierra, en donde el SOTE y el OCP separan su recorrido para volver a unirse en la región Costa.

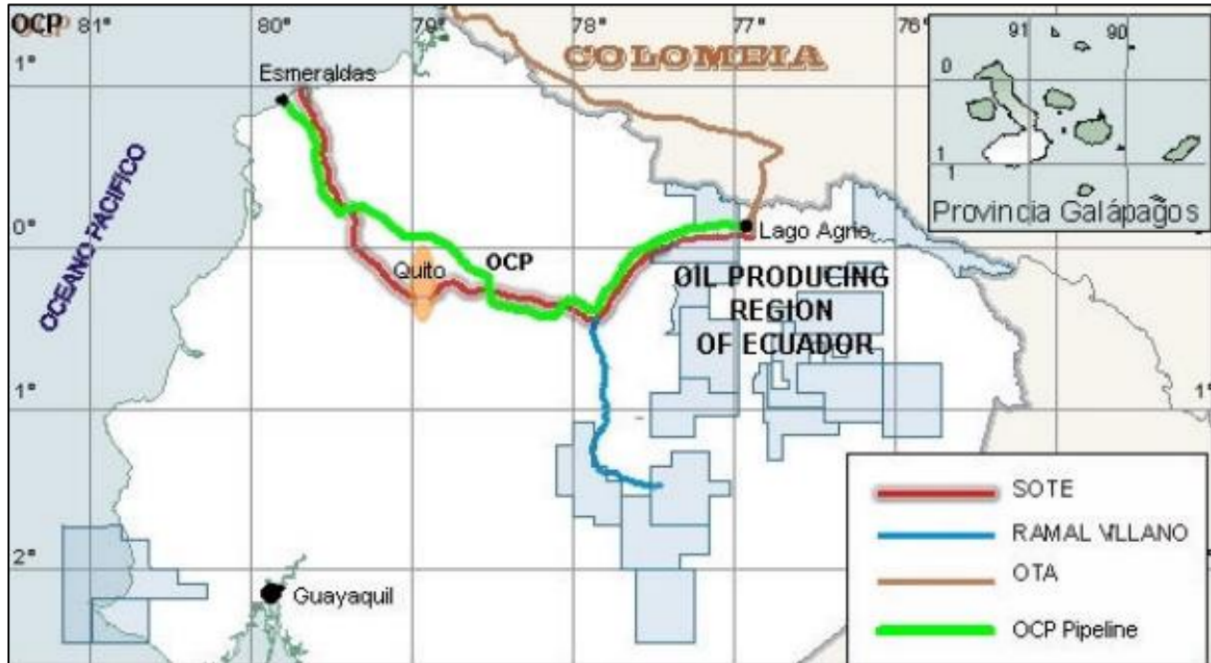


Figura 4: Recorrido del OCP y SOTE [8].

1.4.1.3 Combustibles

Los hidrocarburos están conformados principalmente por carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno y azufre. El petróleo tiene una composición promedio del 85 % de C, 12 % de H y el 3 % restante tiene S, O, N y otros elementos metálicos, sin embargo, la composición mencionada es variable y depende de factores como el lugar donde se ha formado y la variación en la concentración de los elementos [9].

El SOTE transporta crudo a un volumen de 345640 barriles promedio por día [10]. Dicho crudo es de tres tipos:

- Crudo de exportación, con una densidad promedio de 24° API² [10].
- Crudo para la refinería Esmeraldas, con una densidad promedio de 25,5° API [10].
- Crudo para La Libertad, con una densidad promedio de 28,2° API [10].

² Gravedad API (American Petroleum Institute): estándar para medir la densidad del petróleo al comparar su densidad con la del agua

El OCP, por su parte, transporta alrededor de 137 mil barriles diarios de crudo de entre 18° y 24° API de densidad [10].

Algunas de las características principales del crudo se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Parámetros del crudo.

Características	Magnitud
Densidad	980 $\frac{kg}{m^3}$ [11]
Conductividad Térmica ³	0,12 $\frac{W}{K m}$ [12]
Capacidad Térmica ⁴	2,13 $\frac{kJ}{K kg}$ [13]
Conductividad Eléctrica	167 $\frac{nS}{m}$ [14]
Permitividad Relativa	2,13 [15]

1.4.2 MODELO DE PROPAGACIÓN DE GUÍA DE ONDA.

Las guías de onda son estructuras formadas por conductores y/o dieléctricos capaces de guiar el flujo de energía electromagnética por su interior en una dirección paralela a su eje [16] [17] [18]. La propagación se produce en un medio dieléctrico que está acotado⁵ ya sea por un material conductor o por otro dieléctrico [17], esto hace que puedan propagar señales de altas frecuencias y potencias con bajas pérdidas [19].

Dichas estructuras pueden tener diferentes tipos de sección transversal, por ejemplo: rectangulares o circulares. En este estudio, se analizará el modelo de propagación de guías de onda circulares.

Según [21], la característica de una línea de transmisión que define el método a utilizar para su análisis es el espacio de propagación de las ondas electromagnéticas. En este sentido, de acuerdo con la relación entre el tamaño del espacio de propagación y la longitud de onda característica se tienen múltiples casos de análisis que se muestran en la tabla 2.

³ Conductividad Térmica: capacidad de un material para conducir calor.

⁴ Capacidad Térmica: relación entre el calor absorbido por un material y el cambio de temperatura.

⁵ Acotado: delimitado por otro material.

Tabla 2. Método de análisis según dimensiones del espacio de propagación [21].

Espacio de propagación	Método de análisis
$\ll \lambda_0$	Teoría de circuitos de corriente alterna y teoría general de líneas de transmisión.
$\approx \lambda_0$	Campos electromagnéticos y modos superiores de propagación.
$\gg \lambda_0$	Onda electromagnética TEM plana y uniforme.

El rango de frecuencias a utilizar es de $200 \text{ MHz} < f < 2.6 \text{ GHz}$, lo que implica un rango de longitudes de onda de $115.38 \text{ mm} < \lambda_0 < 1.5 \text{ m}$. Analizando el oleoducto de diámetro de 26 pulgadas, 66.04 cm, la longitud de onda de corte, según [21], se halla con la ecuación 1.1:

$$f_c = \frac{1.841 * c}{2\pi * a} \quad (1.1)$$

Esta fórmula se aplica cuando el medio de propagación es el aire, en donde:

$$c = 3 * 10^8 \frac{m}{s}, \text{ es la velocidad de la luz}$$

$$a = 32.0675 \text{ cm}, \text{ es el radio interior de la guía de onda}$$

Así, se obtiene una frecuencia de corte de 274.11 MHz la cual corresponde una longitud de onda de 1.13 m . De esta manera, la relación entre la longitud de onda de corte y el espacio de propagación es:

$$\frac{\lambda_0}{D} = \frac{1.13 \text{ m}}{0.64135 \text{ m}} = 1.76$$

Esta relación muestra que el espacio de propagación no es mucho mayor ni mucho menor que la longitud de onda de corte, por tanto, la propagación en el oleoducto puede describirse resolviendo las ecuaciones de Maxwell y utilizando campos electromagnéticos [21].

1.4.2.1 Propagación en guías de onda circulares.

Para el análisis de guías de onda circulares se toma como referencia un tubo metálico redondo y hueco con radio a y transmisión de potencia en la dirección del eje z , como el mostrado en la figura 5, dada la geometría de la guía de onda conviene utilizar coordenadas cilíndricas.

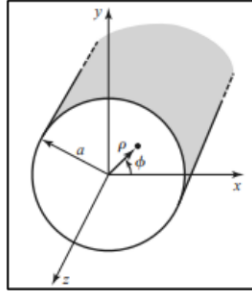


Figura 5: Geometría de una guía de onda circular [19].

Los modos de propagación son soluciones a la ecuación de la onda para el campo eléctrico o magnético [17]. Las ondas propagadas en guías de onda circulares pueden corresponder a dos modos, estos son:

- Modo TE (transversal eléctrico), en el que el campo eléctrico es transversal a la dirección de la propagación y no contiene ninguna componente longitudinal eléctrica [16] [20].
- Modo TM (transversal magnético), en el que el campo magnético es transversal a la dirección de propagación y no contiene ninguna componente longitudinal magnética [16] [20].

Los campos transversales en coordenadas cilíndricas pueden derivarse de E_z y H_z , componentes de campo para los modos TM y TE respectivamente. El cambio de coordenadas resulta en componentes expresados en ρ y ϕ , como son [19]:

$$E_\rho = \frac{-1}{k_c^2} \left(\beta \frac{\delta E_z}{\delta \rho} + \frac{j\omega\mu}{\rho} \frac{\delta H_z}{\delta \phi} \right), \quad (1.2)$$

$$E_\phi = \frac{-1}{k_c^2} \left(\frac{\beta}{\rho} \frac{\delta E_z}{\delta \phi} - j\omega\mu \frac{\delta H_z}{\delta \rho} \right), \quad (1.3)$$

$$H_\rho = \frac{-1}{k_c^2} \left(\frac{j\omega\epsilon}{\rho} \frac{\delta E_z}{\delta \phi} - \beta \frac{\delta H_z}{\delta \rho} \right), \quad (1.4)$$

$$H_\phi = \frac{-1}{k_c^2} \left(j\omega\epsilon \frac{\delta E_z}{\delta \rho} + \frac{\beta}{\rho} \frac{\delta H_z}{\delta \phi} \right). \quad (1.5)$$

Donde:

β es la constante de propagación

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda_g} \quad (1.6)$$

λ_g es la longitud de onda en la guía

$$\lambda_g = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{f}\right)^2}} \quad (1.7)$$

f_c es la frecuencia de corte del modo dominante

f es la frecuencia de interés

λ es la longitud de onda característica en el material de propagación

$$\lambda = \frac{\lambda_{vacio}}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (1.8)$$

ω es la frecuencia angular

μ es la permeabilidad

k_c es el número de onda de corte y

$$k_c^2 = k^2 - \beta^2 \quad (1.9)$$

k es el número de onda del material que llena la línea de transmisión o la guía de onda.

$$k = \omega\sqrt{\mu\epsilon} \quad (1.10)$$

ϵ es la permitividad

Además, se ha supuesto la propagación en $e^{-j\beta z}$. Para la propagación en $e^{+j\beta z}$, se debe sustituir β por $-\beta$ en todas las expresiones.

Con estos parámetros también es posible calcular la velocidad de propagación en la guía de onda, a través de la siguiente ecuación:

$$v_p = f * \lambda_g \quad (1.11)$$

1.4.2.2 Modos TE

Los modos TE se caracterizan porque $E_z = 0$ y $H_z \neq 0$, donde H_z debe cumplir con la ecuación de Helmholtz en coordenadas cilíndricas sabiendo que $H_z(\rho, \phi, z) = h_z(\rho, \phi)e^{-\beta z}$ entonces se obtiene [17] [19] [20] [21]:

$$\left(\frac{\delta^2}{\delta\rho^2} + \frac{1}{\rho}\frac{\delta}{\delta\rho} + \frac{1}{\rho^2}\frac{\delta^2}{\delta\phi^2} + k_c^2\right)h_z(\rho, \phi) = 0. \quad (1.12)$$

Utilizando el método de separación de variables [17] [19] [20] [21]:

$$h_z(\rho, \phi) = R(\rho)P(\phi). \quad (1.13)$$

Reemplazando, la expresión anterior en la ecuación obtenida [17] [19] [20] [21]:

$$\frac{1}{R}\frac{\delta^2 R}{\delta\rho^2} + \frac{1}{\rho R}\frac{\delta R}{\delta\rho} + \frac{1}{\rho^2 P}\frac{\delta^2 P}{\delta\phi^2} + k_c^2 = 0, \quad (1.14)$$

$$\frac{\rho^2}{R} \frac{\delta^2 R}{\delta \rho^2} + \frac{\rho}{R} \frac{\delta R}{\delta \rho} + \rho^2 k_c^2 = -\frac{1}{P} \frac{\delta^2 P}{\delta \phi^2}. \quad (1.15)$$

La parte izquierda de la ecuación depende únicamente de ρ y la parte derecha únicamente de ϕ , y esta última se llamará k_ϕ^2 , de la siguiente manera:

$$-\frac{1}{P} \frac{\delta^2 P}{\delta \phi^2} = k_\phi^2. \quad (1.16)$$

Y, por tanto:

$$\rho^2 \frac{\delta^2 R}{\delta \rho^2} + \rho \frac{\delta R}{\delta \rho} + (\rho^2 k_c^2 - k_\phi^2) R = 0. \quad (1.17)$$

La solución general para la ecuación encontrada es:

$$P(\phi) = A \sin(k_\phi \phi) + B \cos(k_\phi \phi). \quad (1.18)$$

La solución de h_z debe ser periódica en ϕ , por causa de la geometría de la guía, entonces $h_z(\rho, \phi) = h_z(\rho, \phi \pm 2m\pi)$ y k_ϕ debe ser un número entero:

$$P(\phi) = A \sin(n\phi) + B \cos(n\phi). \quad (1.19)$$

Reemplazando esto, se obtiene la reconocida ecuación de Bessel:

$$\rho^2 \frac{\delta^2 R}{\delta \rho^2} + \rho \frac{\delta R}{\delta \rho} + (\rho^2 k_c^2 - n^2) R = 0. \quad (1.20)$$

Cuya solución es:

$$R(\rho) = C J_n(k_c \rho) + D Y_n(k_c \rho). \quad (1.21)$$

En donde, $J_n(x)$ es la función de Bessel de primer grado, y, $Y_n(x)$ la de segundo grado.

Si $\rho = 0$, entonces, $Y_n(k_c \rho)$ es infinito, y esto no es aceptable para una guía de onda circular, por tanto, es indispensable que $D = 0$, dando como resultado:

$$h_z(\rho, \phi) = (A \sin(k_\phi \phi) + B \cos(k_\phi \phi)) J_n(k_c \rho). \quad (1.22)$$

En donde la constante C ha sido absorbida por A y B .

Si se aplican las condiciones de contorno, $E_{tangencial} = 0$ en las paredes de la guía, se obtiene que $E_\phi(\rho, \phi) = 0$ para $\rho = a$. Entonces, encontrando E_ϕ de H_z se obtiene:

$$E_\phi(\rho, \phi, z) = \frac{j\omega\mu}{k_c} (A \sin(n\phi) + B \cos(n\phi)) J'_n(k_c \rho) e^{-j\beta z}. \quad (1.23)$$

En donde $J'_n(k_c \rho)$ es la derivada de J_n con respecto a su argumento. Así, para cumplir que $E_\phi(\rho, \phi) = 0$ para $\rho = a$

$$J'_n(k_c a) = 0. \quad (1.24)$$

Y si las raíces de $J'_n(x)$ son definidas como p'_{nm} , entonces $J'_n(p'_{nm}) = 0$, en donde p'_{nm} es la m-ésima raíz de J'_n , por tanto, el número de onda de corte k_c , debe ser:

$$k_{c_{nm}} = \frac{p'_{nm}}{a}. \quad (1.25)$$

Los valores de p'_{nm} están dados en tablas matemáticas; como referencia en la Tabla 3 se muestran los primeros valores.

Tabla 3. Valores de p'_{nm} para los modos TE de una guía de onda circular

n	p'_{n1}	p'_{n2}	p'_{n3}
0	3.832	7.016	10.174
1	1.841	5.331	8.536
2	3.054	6.706	9.970

Con la ecuación de $k_{c_{nm}}$ se puede calcular la frecuencia de corte de los modos TE_{nm} con la siguiente ecuación

$$f_{c_{nm}} = \frac{p'_{nm}}{2\pi a \sqrt{\mu\epsilon}}. \quad (1.26)$$

Teniendo en cuenta todas las consideraciones anteriores, las ecuaciones de los campos electromagnéticos se definen como:

$$E_z = 0, \quad (1.27)$$

$$H_z = (A \sin(n\phi) + B \cos(n\phi)) J_n(k_c \rho) e^{-j\beta z}, \quad (1.28)$$

$$E_\rho = \frac{-j\omega\mu n}{k_c^2 \rho} (A \cos(n\phi) - B \sin(n\phi)) J_n(k_c \rho) e^{-j\beta z}, \quad (1.29)$$

$$E_\phi = \frac{j\omega\mu}{k_c} (A \sin(n\phi) + B \cos(n\phi)) J'_n(k_c \rho) e^{-j\beta z}, \quad (1.30)$$

$$H_\rho = \frac{-j\beta}{k_c} (A \sin(n\phi) + B \cos(n\phi)) J'_n(k_c \rho) e^{-j\beta z}, \quad (1.31)$$

$$H_\phi = \frac{-j\beta n}{k_c^2 \rho} (A \cos(n\phi) - B \sin(n\phi)) J_n(k_c \rho) e^{-j\beta z}. \quad (1.32)$$

1.4.2.3 Modos TM

Para los modos TM se tiene que $E_z \neq 0$ y $H_z = 0$, donde E_z debe cumplir con la ecuación de Helmholtz en coordenadas cilíndricas sabiendo que $E_z(\rho, \phi, z) = e_z(\rho, \phi) e^{-\beta z}$ entonces se obtiene [17] [19] [20] [21]:

$$\left(\frac{\delta^2}{\delta\rho^2} + \frac{1}{\rho}\frac{\delta}{\delta\rho} + \frac{1}{\rho^2}\frac{\delta^2}{\delta\phi^2} + k_c^2\right)e_z(\rho, \phi) = 0. \quad (1.33)$$

Utilizando el mismo procedimiento de los modos TE, se obtiene que:

$$e_z(\rho, \phi) = (A \sin(n\phi) + B \cos(n\phi))J_n(k_c\rho), \quad (1.34)$$

Para este caso, se deben encontrar las raíces de la función de Bessel que cumplan:

$$J_n(k_c a) = 0, \quad (1.35)$$

$$k_{c_{nm}} = \frac{p_{nm}}{a}. \quad (1.36)$$

Los primeros valores de p_{nm} para los modos TM están dados en la Tabla 4.

Tabla 4. Valores de p_{nm} para los modos TM de una guía de onda circular

n	p_{n1}	p_{n2}	p_{n3}
0	2.405	5.520	8.654
1	3.832	7.016	10.174
2	5.135	8.417	11.620

La frecuencia de corte se puede calcular como:

$$f_{c_{nm}} = \frac{p_{nm}}{2\pi a \sqrt{\mu\epsilon}} \quad (1.37)$$

Con las consideraciones antes mencionadas, se definen las ecuaciones de los campos electromagnéticos como:

$$H_z = 0, \quad (1.38)$$

$$E_z = (A \sin(n\phi) + B \cos(n\phi))J_n(k_c\rho) e^{-j\beta z}, \quad (1.39)$$

$$E_\rho = \frac{-j\beta}{k_c} (A \sin(n\phi) + B \cos(n\phi))J'_n(k_c\rho) e^{-j\beta z}, \quad (1.40)$$

$$E_\phi = \frac{-j\beta n}{k_c^2 \rho} (A \cos(n\phi) - B \sin(n\phi))J_n(k_c\rho) e^{-j\beta z}, \quad (1.41)$$

$$H_\rho = \frac{j\omega\epsilon n}{k_c^2 \rho} (A \cos(n\phi) - B \sin(n\phi))J_n(k_c\rho) e^{-j\beta z}, \quad (1.42)$$

$$H_\phi = \frac{-j\omega\epsilon}{k_c} (A \sin(n\phi) + B \cos(n\phi))J'_n(k_c\rho) e^{-j\beta z}. \quad (1.43)$$

1.4.3 NODOS SENSORES

Las redes de sensores inalámbricas, *Wireless Sensor Networks*, WSN, son redes que utilizan múltiples sensores para el control de condiciones en diferentes puntos, como la temperatura, el sonido, la vibración, la presión, etc. [22] [23]. Los nodos que forman parte de estas redes, también llamados *moten* [24], están compuestos por sensores que procesarán información y la transmitirán a los demás nodos de manera inalámbrica a través de la red [22].

Los nodos sensores son autónomos y se caracterizan por ser pequeños y estar distribuidos espacialmente, además, su construcción y funcionamiento se ejecuta teniendo en cuenta el ahorro energético [23] [24]. Para cumplir con estas características los nodos se componen de procesador, fuente de alimentación, memorias de almacenamiento y uso de programa, dispositivo de comunicación y sensores [22] [23].

Uno de los estándares utilizados para este tipo de redes es el IEEE 802.15.4/Zigbee, cuyas características se describen a continuación [22] [24].

1.4.3.1 Estándar IEEE 802.15.4/Zigbee

El estándar IEEE 802.15.4 es un estándar que define la capa física y el control de acceso al medio para redes de área personal (WPAN, *Wireless Personal Area Network*). Este estándar se centra en el bajo costo de la comunicación por lo que las tasas de transmisión de datos son bajas [25] [26] [27].

Según el estándar 802.15.4 se definen dos tipos de dispositivos [25] [26] [27]:

- Dispositivos con funcionalidad completa (FFD, *Full Function Device*).
- Dispositivos con funcionalidad reducida (RFD, *Reduced Function Device*).

En este estándar se han definido tres categorías de dispositivos [26] [27]:

- Coordinador: encargado de realizar la asociación⁶ y des-asociación de dispositivos en la red.
- Ruteador: enruta mensajes entre nodos y permite asociaciones.
- Terminal: son los dispositivos en los que se desarrollan las funciones de control.

Las características que define el protocolo son [26] [27]:

⁶ Asociación: unión de un dispositivo a una red Zigbee.

- Dos bandas de frecuencia disponible la banda de 868/915 MHz y la banda de 2.4 GHz.
- Sensibilidad de recepción: -85 dBm en la banda de 2.4 GHz y -92 dBm en la 868/915 MHz.
- Potencia de transmisión: definida por regulaciones locales, para Ecuador a una frecuencia de 2.4 GHz se permite una potencia límite de 1000 mW [28].
- Velocidad de transmisión: 250 kbps en la banda de 2.4 GHz y 20/40 kbps en la 868/915 MHz.
- Alcance: 10 – 75 metros.

1.4.4 PARÁMETROS S

En una guía de onda, tanto la corriente como el voltaje a lo largo de la misma es la suma de dos ondas que viajan en ambos sentidos de esta [29], estas son: una onda incidente y una onda reflejada [19], [21]. Las propiedades de transmisión y reflexión de una guía de onda se pueden modelar a través de un sistema de ecuaciones [21], en el cual se involucran las ondas incidentes, reflejadas y los coeficientes de transmisión y reflexión, estos coeficientes son llamados parámetros S de “scattering” o de dispersión [29].

Para modelar las propiedades mencionadas, se pueden colocar dos planos de referencia antes y después de la guía de onda, la cual se representa como una caja en la figura 6.

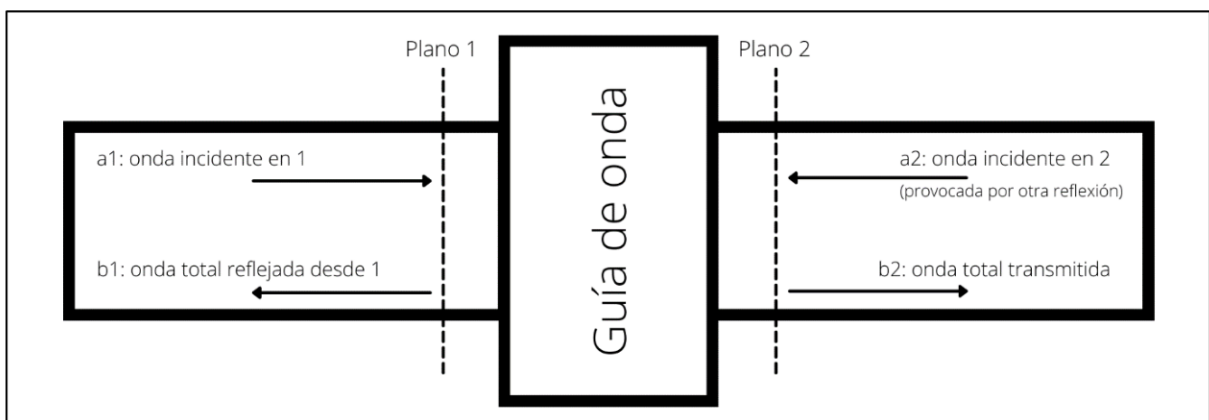


Figura 6: Representación de una guía de onda para determinación de parámetros S.

La onda incidente que viaja del puerto 1 hacia el puerto 2, a_1 , será afectada por el coeficiente de transmisión S_{21} . Por otro lado, la onda incidente a_2 , que viaja del puerto 2 al puerto 1, será afectada por el coeficiente de transmisión S_{12} . Generalizando, una onda

incidente, a_j , que viaja del puerto j al puerto i , será afectada por un coeficiente de transmisión S_{ij} .

De acuerdo con la figura 6, la onda total reflejada a la izquierda del plano 1, es decir, la onda b_1 , depende de las ondas incidentes a_1 y a_2 , entonces [21], [29]:

$$b_1 = S_{11} a_1 + S_{12} a_2 \quad (1.44)$$

En donde S_{11} es el coeficiente de reflexión de la onda a_1 sobre el puerto 1.

Bajo el mismo razonamiento se puede obtener que la onda reflejada b_2 es [21], [29]:

$$b_2 = S_{21} a_1 + S_{22} a_2 \quad (1.45)$$

En donde S_{22} es el coeficiente de reflexión de la onda a_2 sobre el puerto 2.

Escribiendo las ecuaciones de b_1 y b_2 en notación matricial se obtiene [21], [29]:

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{pmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix}$$

El sistema de ecuaciones hallado describe las ondas reflejadas de los dos puertos en función de las ondas incidentes multiplicadas por los parámetros S de la guía de onda, además, la matriz de parámetros S que se obtuvo es llamada matriz de “scattering” o matriz de dispersión [21], [19].

El desarrollo realizado se puede extender para un circuito de n puertos, así, la matriz resultante de orden $n \times n$, será [19], [21], [29]:

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \dots & S_{1n} \\ S_{21} & S_{22} & \dots & S_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{n1} & S_{n2} & \dots & S_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_n \end{bmatrix}$$

La diagonal contiene los coeficientes de reflexión, S_{ii} , que permiten cuantificar la señal reflejada en función de la señal incidente en un mismo puerto [19], [29]. Por otra parte, los coeficientes de transmisión, S_{ij} , permiten cuantificar la señal que se transmite entre dos puertos del circuito analizado [19], [29].

2 METODOLOGÍA

Para realizar la simulación se utiliza la herramienta CST STUDIO en su versión 2018. En ella se ha creado una nueva simulación del área de aplicación “MW & RF & OPTICAL” [30], figura 7a, en el flujo de trabajo llamado “Antennas”, se selecciona “Waveguide”, figura 7b, y el tipo de simulación “Time Domain”, figura 7c. Después, se seleccionan las unidades de medida (de preferencia utilizar el Sistema Internacional), figura 7d.

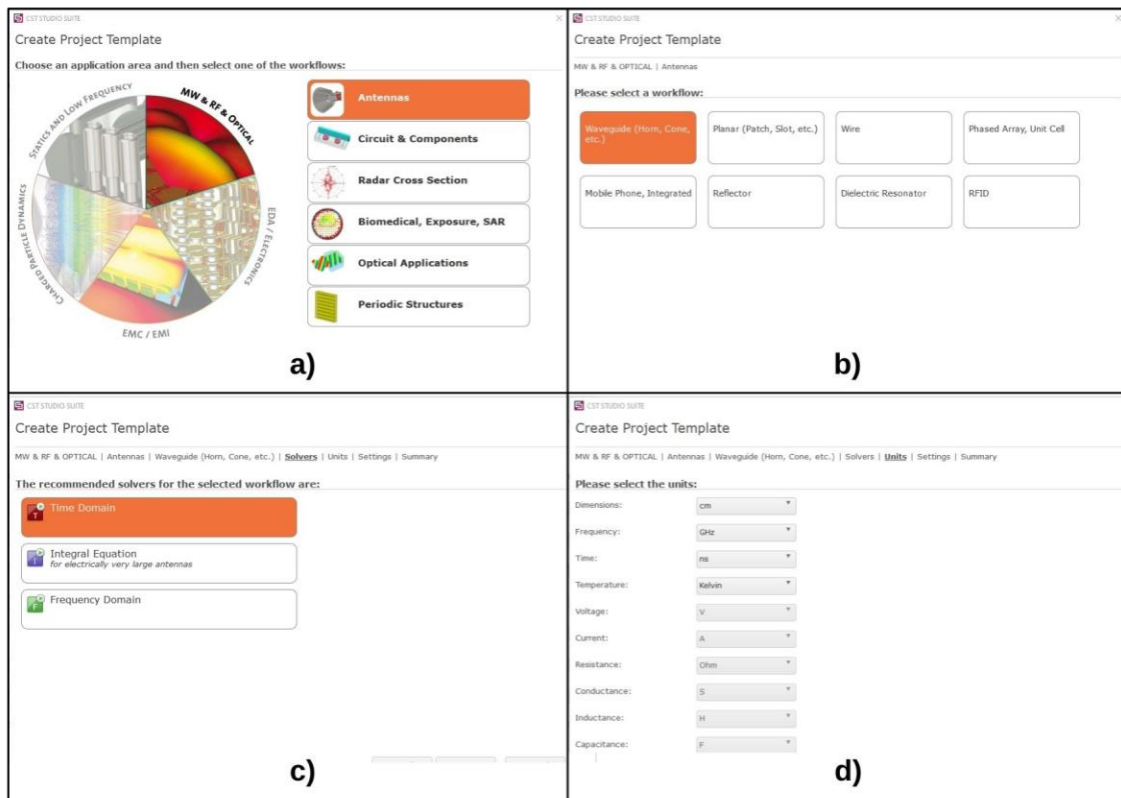


Figura 7: Flujo para crear un nuevo proyecto en CST Studio.

- a) Áreas de aplicación disponibles para la simulación.
- b) Flujos de trabajo disponibles para la simulación.
- c) Tipos de simulaciones disponibles.
- d) Selección de unidades para la simulación.

Se selecciona el rango de frecuencia para la simulación, en este caso de 200 MHz a 2.6 GHz, así como los monitores (*monitors*) para resultados, en este caso se seleccionaron todos: campo eléctrico, campo magnético, campo lejano, flujo de potencia y pérdidas de potencia; además, se seleccionan las frecuencias a las que se analizarán dichos monitores, 266.2061 MHz, 274.1133 MHz y 2.4 GHz, esto se puede observar en la figura 8a. A continuación, el programa mostrará un resumen de las propiedades y configuraciones seleccionadas, figura 8b.

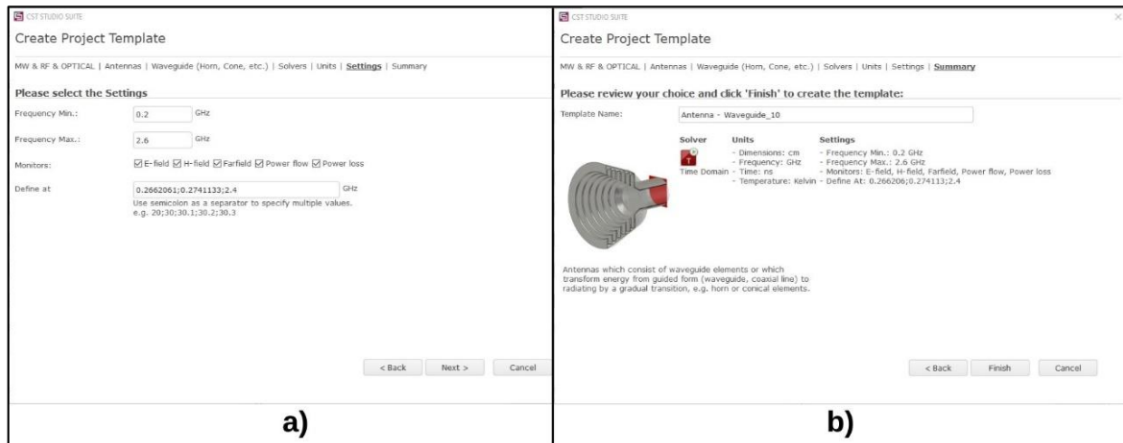


Figura 8: Configuración y resumen de parámetros para el nuevo proyecto.

a) Selección de frecuencias y monitores para simular.

b) Resumen de parámetros seleccionados.

Para empezar con el modelado de la tubería se crearán dos nuevos materiales: el material de la tubería, acero al carbón, y el crudo que recorre la tubería. Para ello en el “Árbol de navegación” dando clic derecho sobre la carpeta “Materiales” se seleccionará “Nuevo Material”, figura 9a.

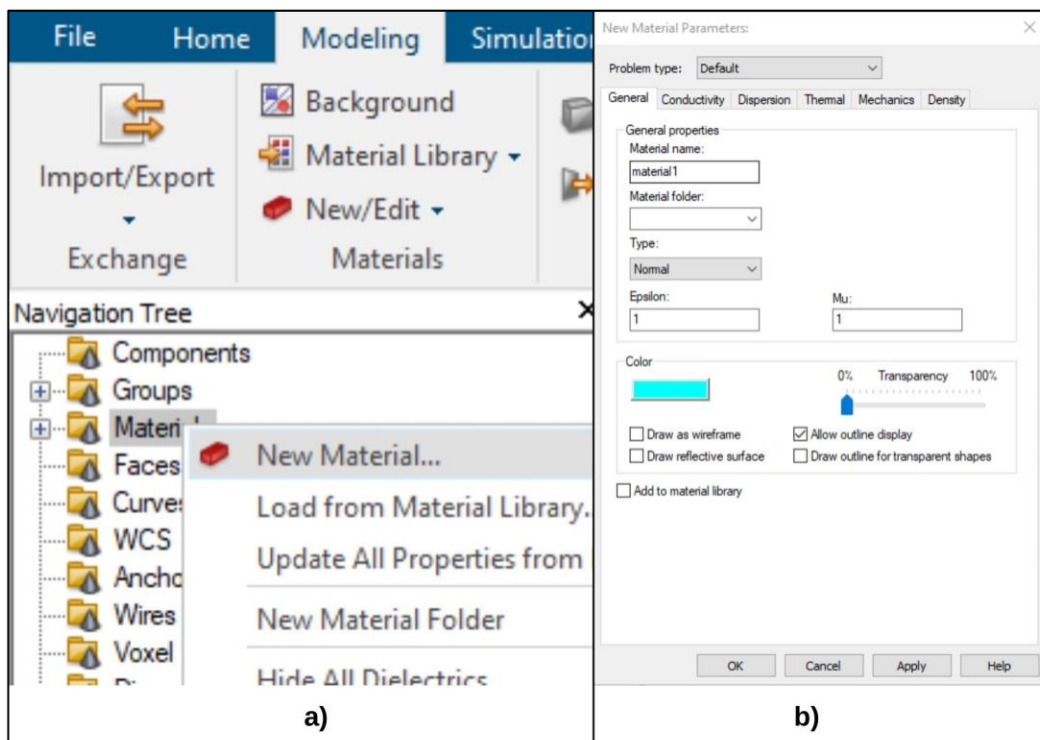


Figura 9: Creación de nuevo material para realizar el modelado.

a) Proceso para creación de un nuevo material.

b) Ventana de ingreso de parámetros del nuevo material.

Aparecerá una ventana para añadir diferentes parámetros propios de cada material, figura 9b, en este proyecto dichos parámetros se llenan de acuerdo con las tablas 5 y 6.

Tabla 5. Parámetros del crudo.

Características	Magnitud
Densidad	$980 \frac{kg}{m^3}$ [11]
Conductividad Térmica	$0,12 \frac{W}{K m}$ [12]
Capacidad Térmica	$2,13 \frac{kJ}{K kg}$ [13]
Conductividad Eléctrica	$167 \frac{nS}{m}$ [14]
Permitividad relativa	2,13 [15]

Tabla 6. Parámetros del acero al carbón.

Parámetro	Magnitud
Densidad	$7850 \frac{kg}{m^3}$ [31]
Módulo de Young ⁷	210 GPa [32]
Coefficiente de Poisson ⁸	0.3 [32]
Coefficiente de expansión térmica ⁹	$12,2 \times 10^{-6} \frac{1}{K}$ [33]
Conductividad Térmica	$45 \frac{W}{K m}$ [34]
Capacidad Térmica	$0,49 \frac{kJ}{K kg}$ [35]
Conductividad Eléctrica	$6 \frac{MS}{m}$ [36]
Permeabilidad relativa	100 [37]

Después de añadir los dos materiales requeridos, estos se pueden observar en la carpeta materiales, figura 10a, y se añaden a la librería local dando clic derecho sobre el nombre del material y seleccionando “Añadir a la librería de materiales”, figura 10b.

⁷ Módulo de Young: constante numérica que describe las propiedades elásticas de un sólido al tensionarlo o comprimirlo en una dirección.

⁸ Coeficiente de Poisson: relación entre la fracción de expansión y la fracción de compresión aplicada a un material.

⁹ Coeficiente de expansión térmica: relación entre un cambio de volumen o longitud por unidad de temperatura.

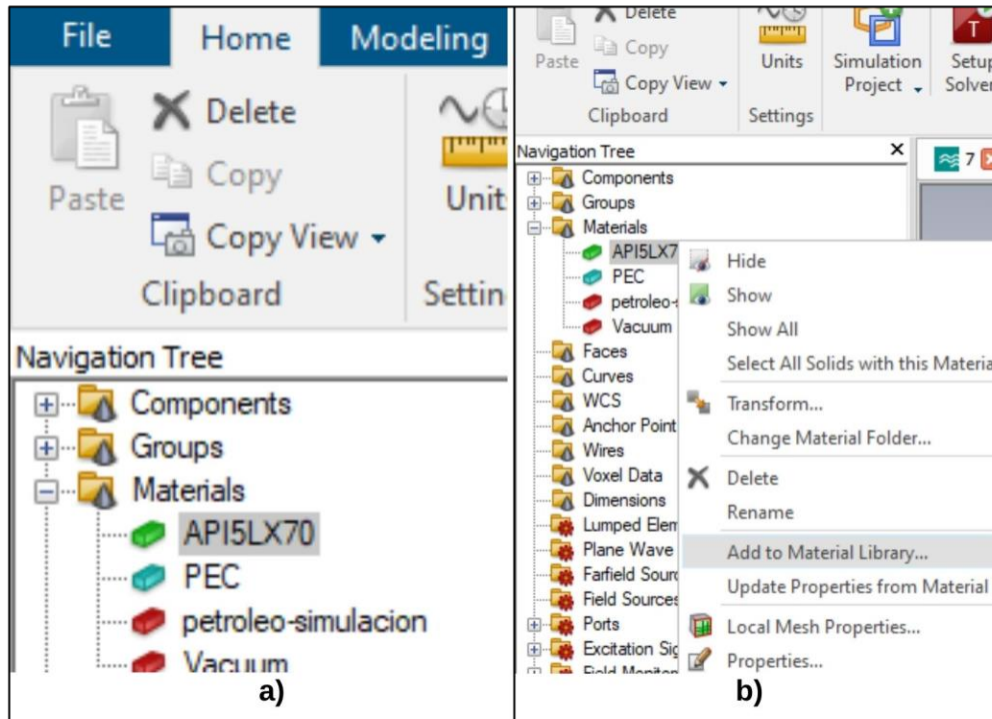


Figura 10: Añadir materiales creados a la librería local.

a) Materiales creados para utilizar en la simulación.

b) Adición de los materiales a la librería.

A continuación, se realiza el modelado de la tubería de 26 pulgadas de diámetro y 0.375 pulgadas de espesor, para esto, en la pestaña de modelado se selecciona el tipo de forma (cilindro), figura 11a, y los parámetros que se añaden se muestran en la tabla 7.

Tabla 7. Parámetros físicos de la tubería.

Parámetro	Magnitud
Radio exterior	33,02 <i>cm</i>
Radio interior	32,0675 <i>cm</i>
Centro en X y Y	0
Zmin	-100 <i>cm</i>
Zmax	100 <i>cm</i>

Para seleccionar el material se debe dar clic sobre “Material” y “Cargar desde librería de materiales”, figura 11b, buscar en la lista el nombre del material a usar, seleccionar y crear.

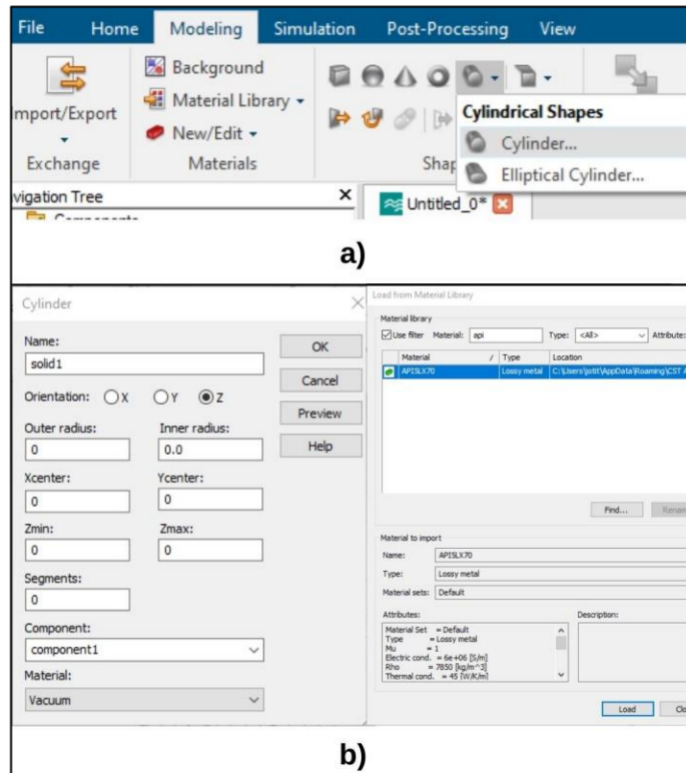


Figura 11: Modelado de la tubería.

a) Selección de forma para el modelado de la tubería.

b) Selección de material para modelar la tubería.

A continuación, se realiza el modelado del crudo, para ello se añadirá otro cilindro con los parámetros mostrados en la tabla 7. En este caso se debe seleccionar como material del cilindro el crudo creado anteriormente.

Tabla 7. Parámetros para el modelo del crudo.

Parámetro	Magnitud
Radio exterior	32,0675 <i>cm</i>
Radio interior	0 <i>cm</i>
Centro en X y Y	0
Zmin	-100 <i>cm</i>
Zmax	100 <i>cm</i>

El resultado del modelado de los materiales se muestra en la figura 12.

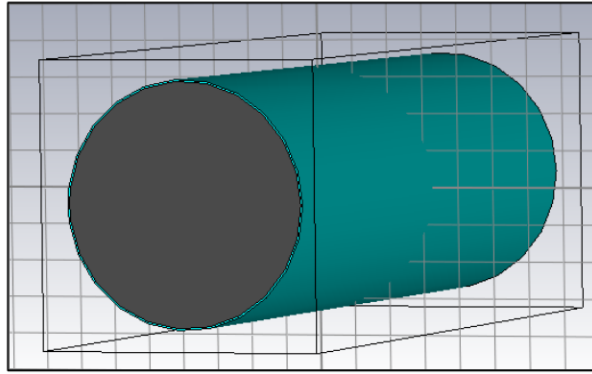


Figura 12: Modelado de un tramo de 2 metros de tubería de acero al carbón con crudo en su interior.

Ahora se deben seleccionar los puertos de la tubería, para ello, en la pestaña de modelado se deben seleccionar “picks”, figura 13a, y dar doble clic sobre una de las caras de la tubería. La cara seleccionada se pintará con cuadrados rojos, figura 13b.

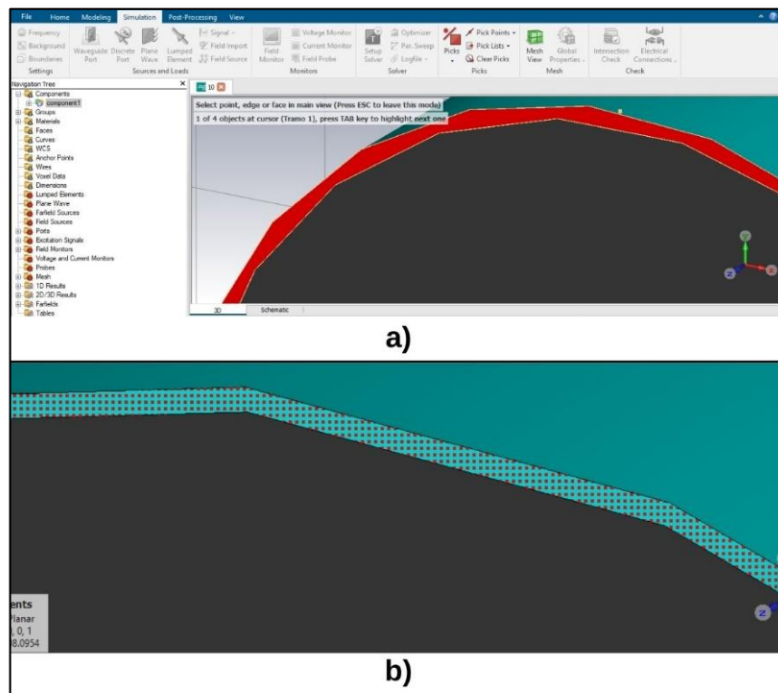


Figura 13: Selección de las caras de la guía de onda para los puertos de la simulación.

- a) Colocar el “pick” en una de las caras.
- b) Vista de la cara después de la selección.

A continuación, se debe seleccionar “Waveguide Port” en la pestaña de simulación y en la ventana emergente seleccionar ok con los parámetros por defecto, figura 14. Así, la cara seleccionada será el primer puerto de la guía de onda.

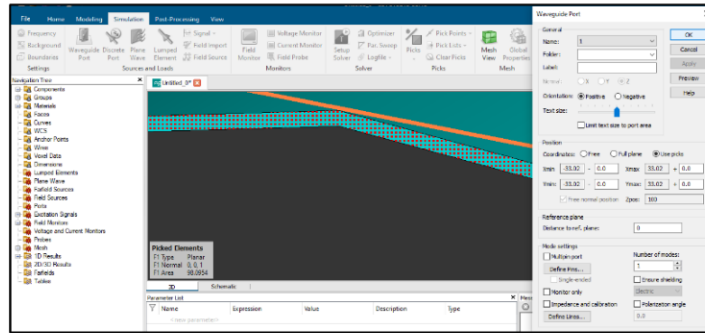


Figura 14: Creación de puertos.

Se debe repetir este proceso con la otra cara de la tubería, logrando tener dos puertos de la guía de onda, figura 15.

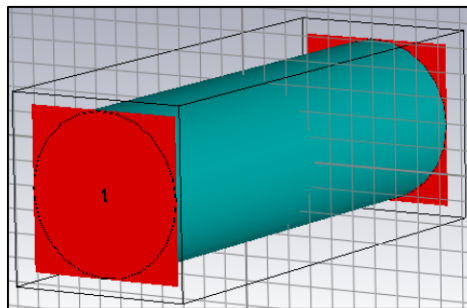


Figura 15: Modelado de la tubería con la creación de dos puertos.

El siguiente paso consiste en empezar la simulación, para ello, en la pestaña de simulación se selecciona “Setup Solver”, dejando los parámetros por defecto y dar clic en “Start”, como se muestra en la figura 16.

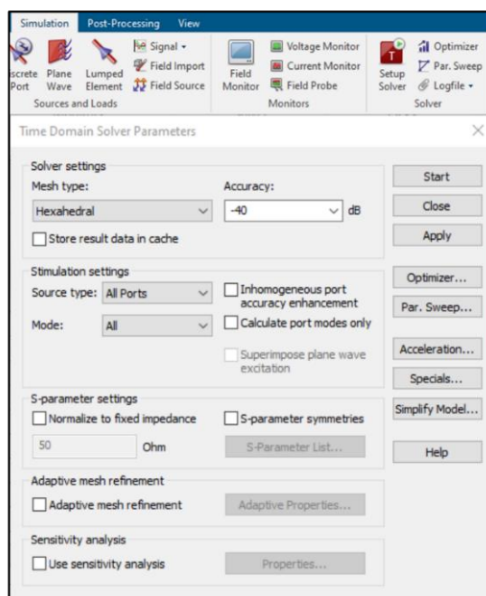


Figura 16: Configuración e inicio de la simulación.

Los resultados de la simulación se muestran en las carpetas que se encuentran divididas en 1D y 2D/3D. En los resultados 1D se obtienen: los parámetros S, energía, potencia, VSWR, etc. Por su parte, en los resultados 2D/3D se obtienen: campos eléctricos y magnéticos en los puertos, campos eléctricos y magnéticos a las frecuencias de monitorización, flujo de potencia, etc. Estos resultados se observan en el árbol de navegación, figura 17.

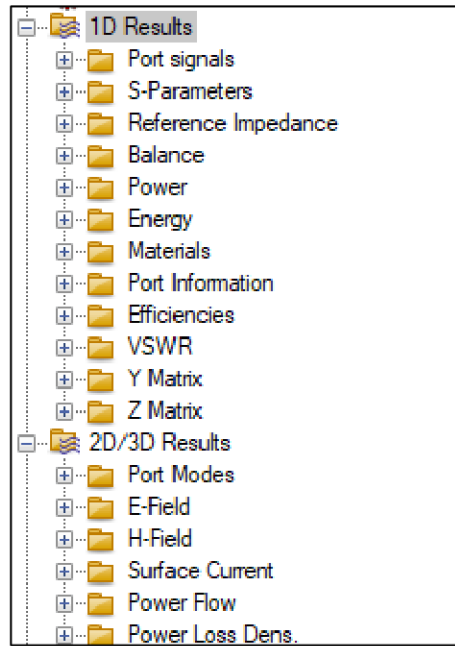


Figura 17: Carpetas de resultados

3 RESULTADOS, RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

Y

3.1 RESULTADOS

Como parte de los resultados obtenidos se realizaron dos simulaciones, la primera sin petróleo dentro de la tubería, a la que se llamará simulación 1, y la segunda con petróleo dentro de la tubería, a la que se llamará simulación 2, después de presentar los resultados de las simulaciones se tratará de explicar los valores y relacionarlos con los conceptos teóricos. El resultado del modelado de la tubería vacía se muestra en la figura 18, mientras que el modelado de la tubería con petróleo se muestra en la figura 19.

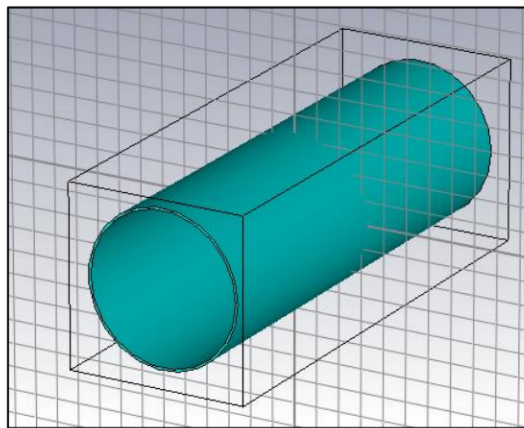


Figura 18: Modelado de la tubería vacía.

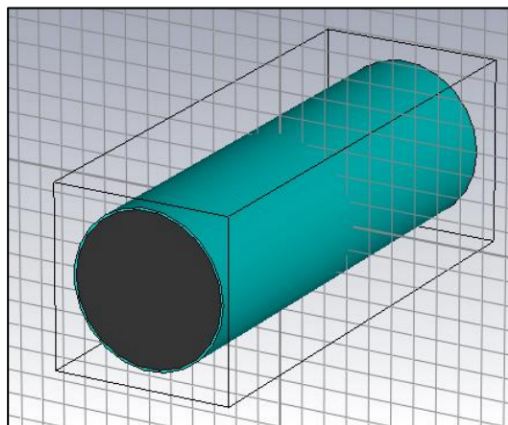


Figura 19: Modelado de la tubería con petróleo dentro.

En la simulación 1, para el parámetro S_{11} , se obtuvo la gráfica mostrada en la figura 20, en ella se observa que, a la frecuencia de interés de 2.4 GHz , el valor del parámetro S_{11} es de

-43.260808 dB, al convertir este parámetro a porcentaje se obtiene que el 0.00472% de la potencia incidente en el puerto 1 se refleja hacia el mismo puerto.

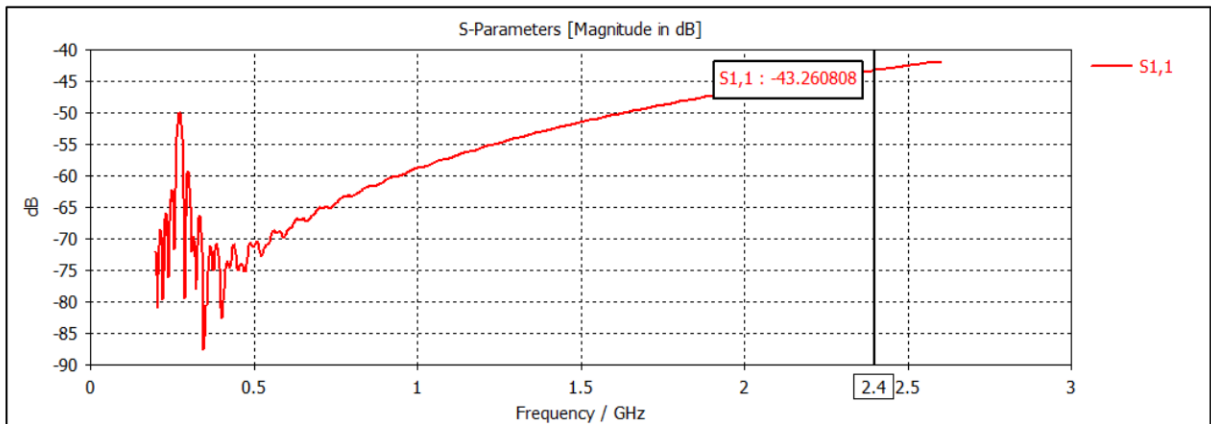


Figura 20: Parámetro S_{11} medido en dB en la simulación 1.

En la figura 21, se muestra el comportamiento inicial del parámetro S_{21} en la simulación 1. El marcador del gráfico muestra que a 277.1 MHz el valor de S_{21} es de -3.01 dB, esto indica que, a la frecuencia considerada, el 50% de la potencia incidente en el puerto 1 es aprovechada o está presente en el puerto 2.

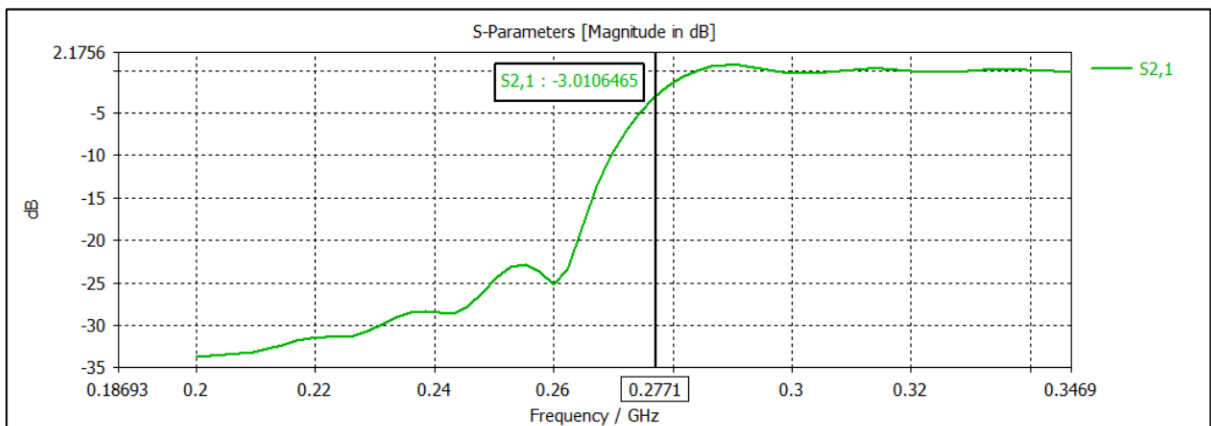


Figura 21: Parámetro S_{21} medido en dB en la simulación 1.

En la figura 22 se muestra el comportamiento del parámetro S_{21} en todo el rango de frecuencias simulado, se determina que a la frecuencia de 2.4 GHz se tiene un valor de S_{21} de -0.0078307385 dB. Al convertir este valor a porcentaje se obtiene que el 99.82% de la potencia enviada desde el puerto 1 es aprovechada por el puerto 2.

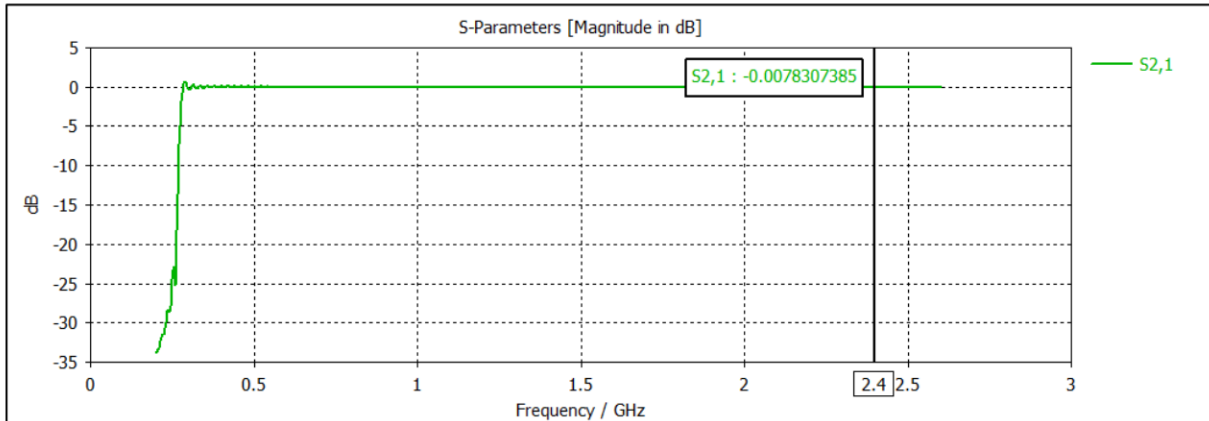


Figura 22: Parámetro S_{21} medido en dB en la simulación 1.

La figura 23 muestra la gráfica de la magnitud de VSWR para la simulación 1. Se puede observar que, en el rango de frecuencias simulado, el VSWR varía entre 1 y 1.016. El marcador muestra que el VSWR a 2.4 GHz es de 1.0138351, esto implica un valor de -43.26 dB de magnitud en el parámetro S_{11} confirmando el análisis realizado con la figura 20, es decir, que el 0.00472% de la potencia incidente en el puerto 1 se refleja a sí mismo.

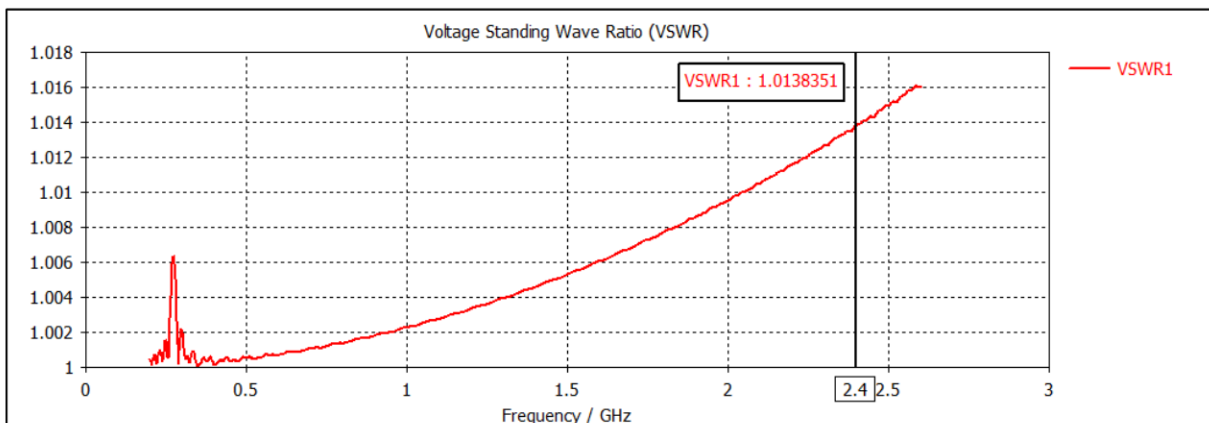


Figura 23: Magnitud de VSWR en la simulación 1.

En la figura 24 se muestra el patrón del campo eléctrico a una frecuencia de 1.4 GHz . Se observa que dicho patrón corresponde al patrón de campo eléctrico del modo TE_{11} , que es el modo fundamental en las guías de onda circulares [19] [21].

En la parte inferior izquierda de la figura 24 se muestra un cuadro resumen de la guía de onda, en él se observa que la frecuencia de corte de la guía de onda es de 273.95 MHz , que no existe una diferencia significativa con la frecuencia de corte encontrada en el capítulo 2, de 274.11 MHz , con una diferencia de 160 kHz . De igual manera, en el cuadro resumen se observa el valor de la máxima intensidad de campo eléctrico a 1.4 GHz que es de $49.92 \frac{\text{V}}{\text{m}}$.

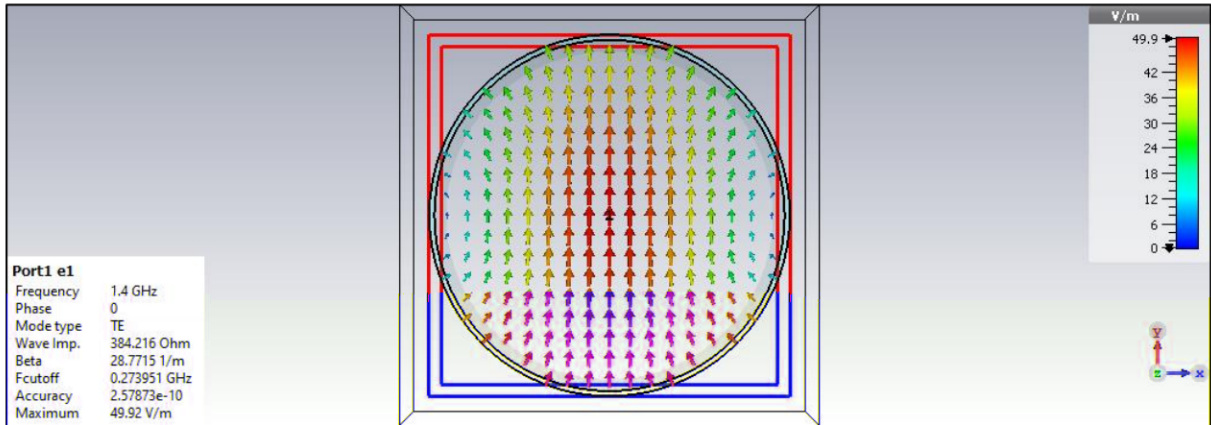


Figura 24: Campo eléctrico a 1.4 GHz en la simulación 1.

Las figuras 25 y 26 muestran el campo eléctrico de la guía de onda a las frecuencias de 274.11 MHz y 2.4 GHz, respectivamente. En ellas el patrón de campo eléctrico corresponde al modo TE_{11} . El valor de la máxima intensidad de campo eléctrico registrado a 274.11 MHz, en la figura 25, es de $195.614 \frac{V}{m}$, mientras que a 2.4 GHz es de $48.7196 \frac{V}{m}$, según la figura 26.

Esta variación en la magnitud se debe a que existe una diferencia en la distribución transversal del campo eléctrico.

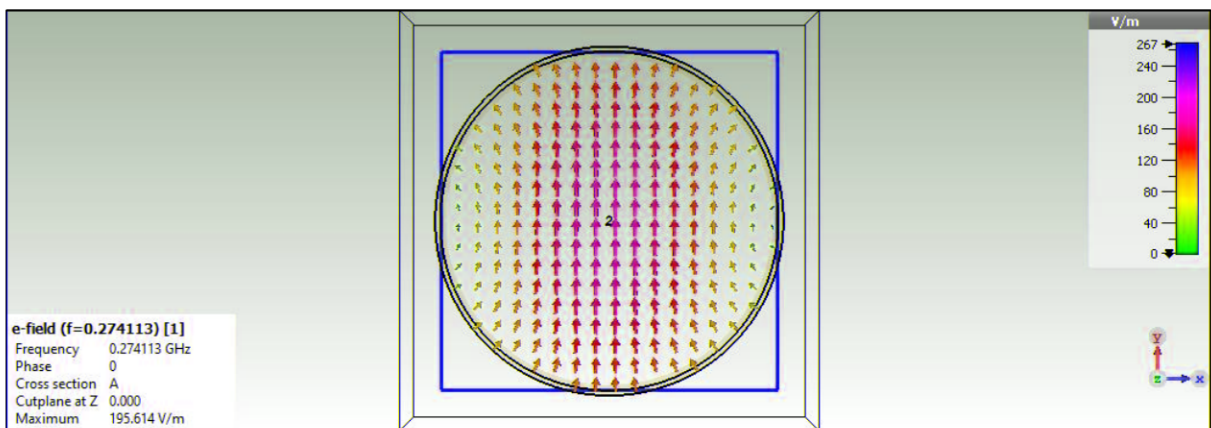


Figura 25: Campo eléctrico a 274.11 MHz en la simulación 1.

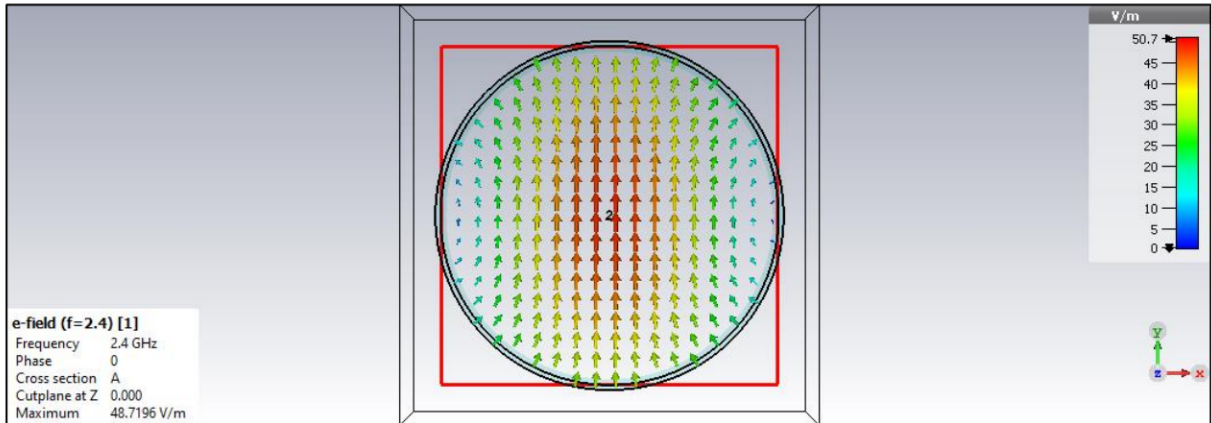


Figura 26: Campo eléctrico a 2.4 GHz en la simulación 1.

Con referencia a los campos magnéticos, la figura 27 muestra el patrón de distribución del campo magnético en la guía de onda a una frecuencia de 1.4 GHz. Se observa que dicho patrón corresponde al modo TE_{11} . En el cuadro resumen de la figura 27 se muestra la máxima intensidad de campo magnético a 1.4 GHz que corresponde a $129.931 \frac{mA}{m}$.

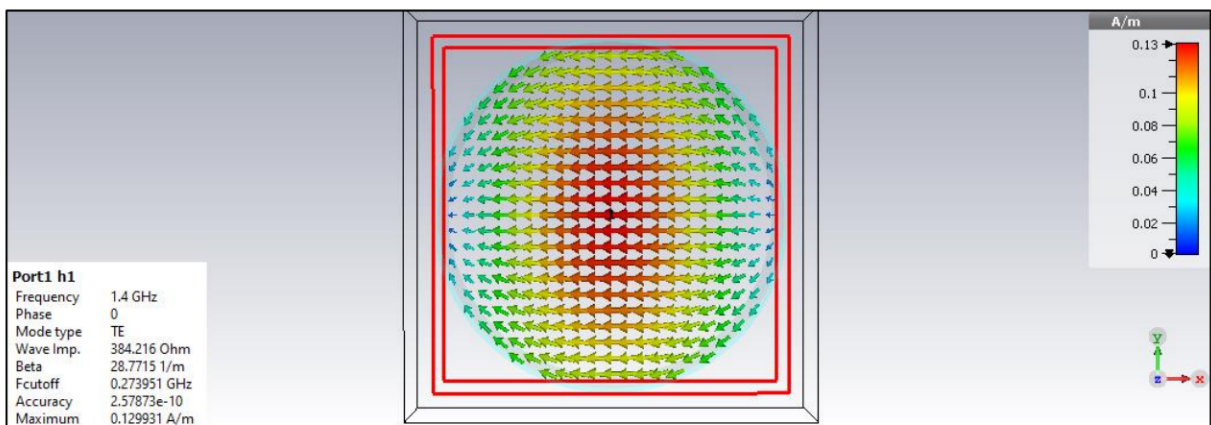


Figura 27: Campo magnético a 1.4 GHz en la simulación 1.

La figura 28 y 29 muestran el campo magnético a una frecuencia de 274.11 MHz y 2.4 GHz, respectivamente. El patrón de campo magnético, en ambas figuras, corresponde al modo TE_{11} . El valor de la máxima intensidad de campo magnético a la frecuencia de 274.11 MHz es de $333.17 \frac{mA}{m}$, mientras que a 2.4 GHz es de $129.508 \frac{mA}{m}$. Esta variación en la magnitud se debe a que existe una diferencia en la distribución transversal del campo magnético.

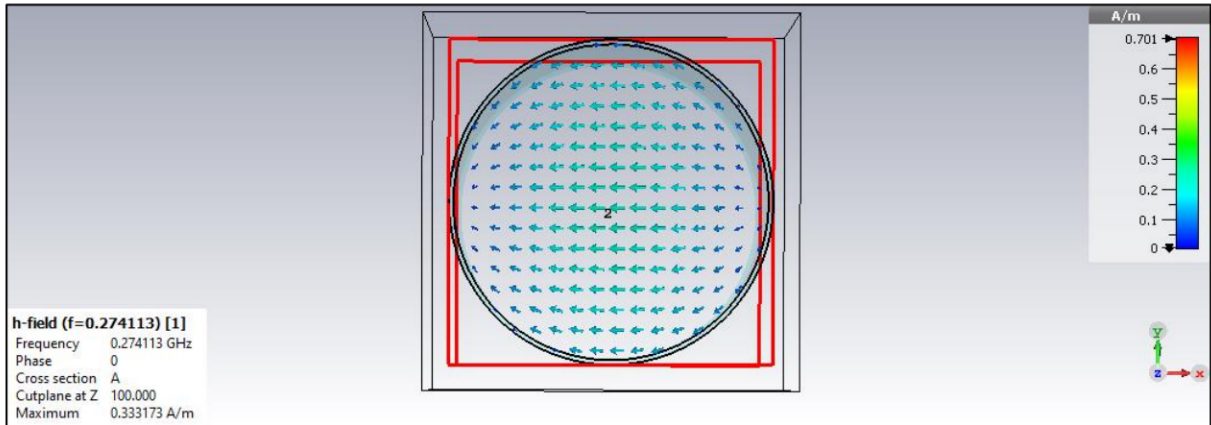


Figura 28: Campo magnético a 274.11 MHz en la simulación 1.

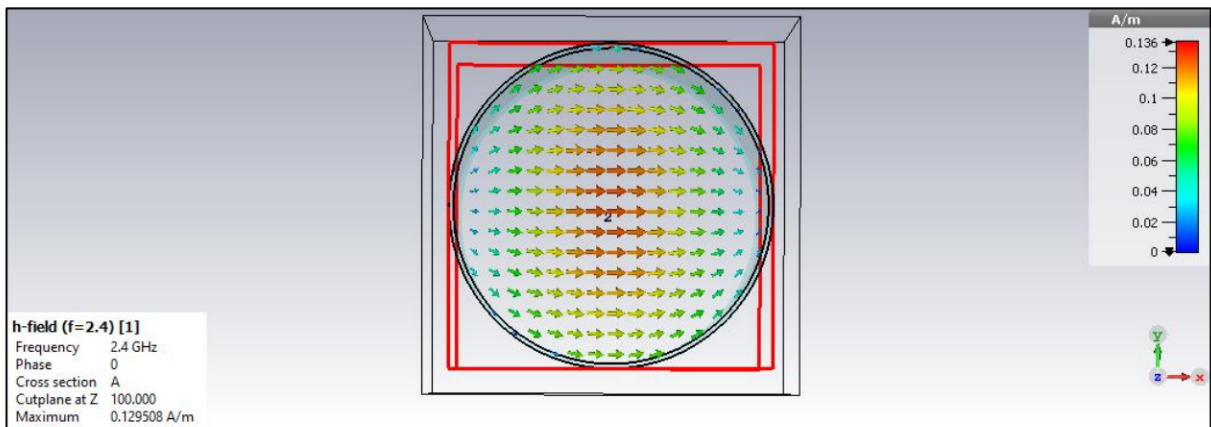


Figura 29: Campo magnético a 2.4 GHz en la simulación 1.

Por otro lado, en la simulación 2, para el parámetro S_{11} se tiene la gráfica mostrada en la figura 30. En ella el marcador muestra que a 2.4 GHz la magnitud de S_{11} es de -47.272244 dB, que, al convertirlo en porcentaje se obtiene un 0.001874% de potencia reflejada en el puerto 1.

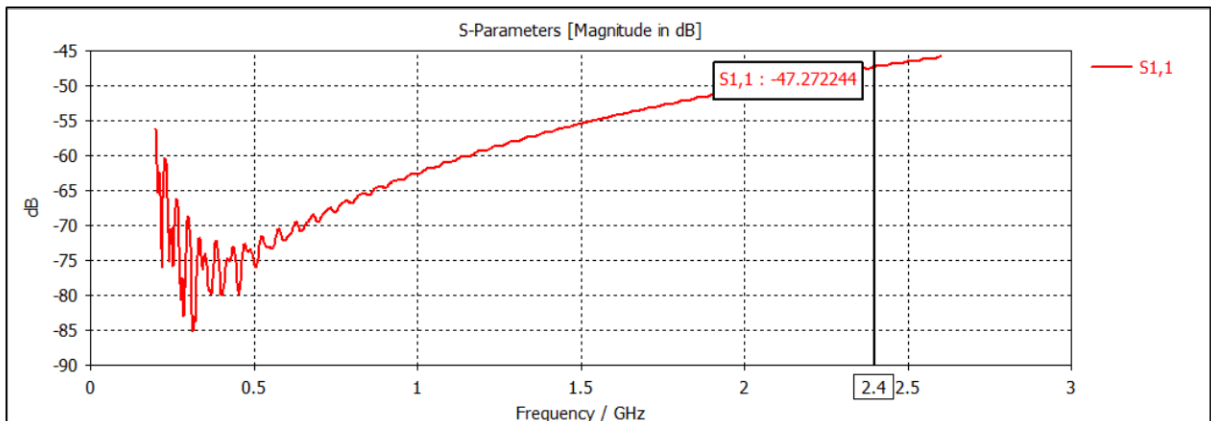


Figura 30: Parámetro S_{11} medido en dB en la simulación 2.

La figura 31 muestra el comportamiento inicial del parámetro S_{21} para la simulación 2. Se observa que a partir de 500 MHz empieza a estabilizarse la magnitud de S_{21} en 0 dB, a la frecuencia de interés 2.4 GHz, el marcador muestra un valor de -0.00080343199 dB, lo que implica que el 99.98% de la potencia incidente en el puerto 1 llega al puerto 2.

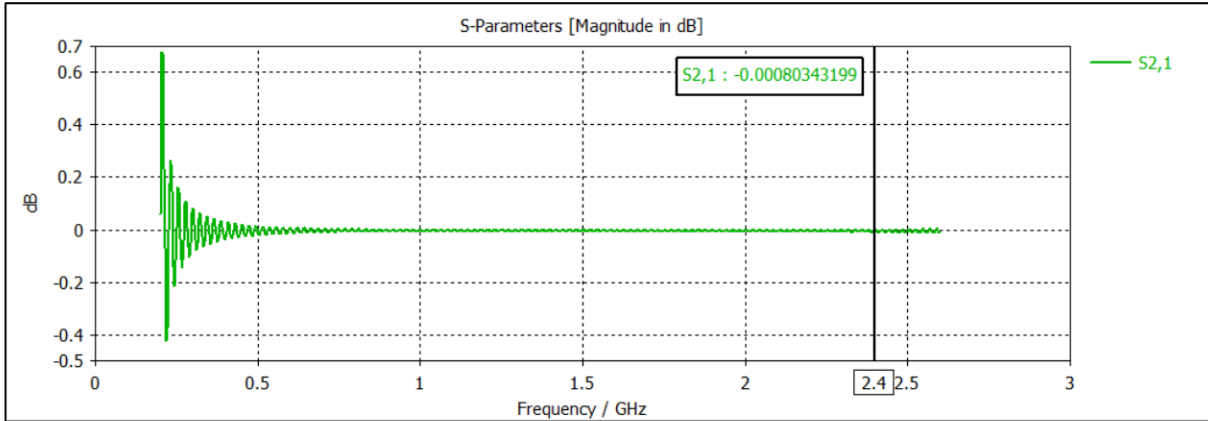


Figura 31: Parámetro S_{21} medido en dB en la simulación 2.

En la figura 32 se puede observar la gráfica de VSWR para la simulación 2; su magnitud varía entre 1 y 1.01 en el rango de frecuencias simulado. El marcador muestra un valor de 1.0086957, lo que implica un valor de -47.27 dB de magnitud para el parámetro S_{11} . Esto muestra que el 0.00187% de la potencia que incide en el puerto 1 se refleja a sí mismo.

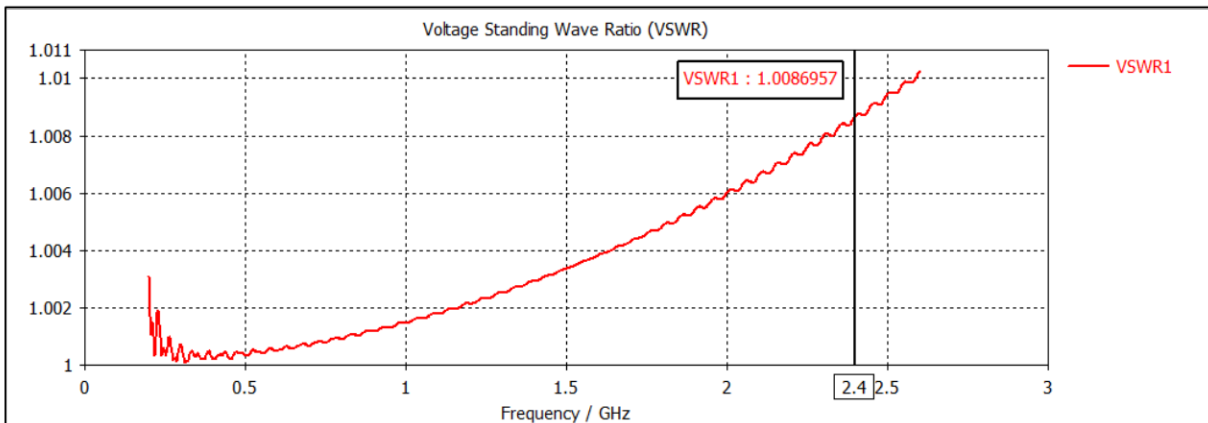


Figura 32: Magnitud de VSWR en la simulación 2.

Las figuras 33 y 34 muestran el patrón de campo eléctrico para la simulación 2 a una frecuencia de 1.4 GHz y 2.4 GHz, respectivamente. El patrón observado corresponde al del modo TE_{11} . En el cuadro resumen de la figura 33, se observa que la frecuencia de corte para la simulación 2 es de 187.674 MHz y que la intensidad de campo eléctrico máxima a

1.4 GHz es de $41.09 \frac{V}{m}$. Por su parte, en el cuadro resumen de la figura 34 se puede observar que la máxima intensidad de campo eléctrico a 2.4 GHz es de $40.40 \frac{V}{m}$.

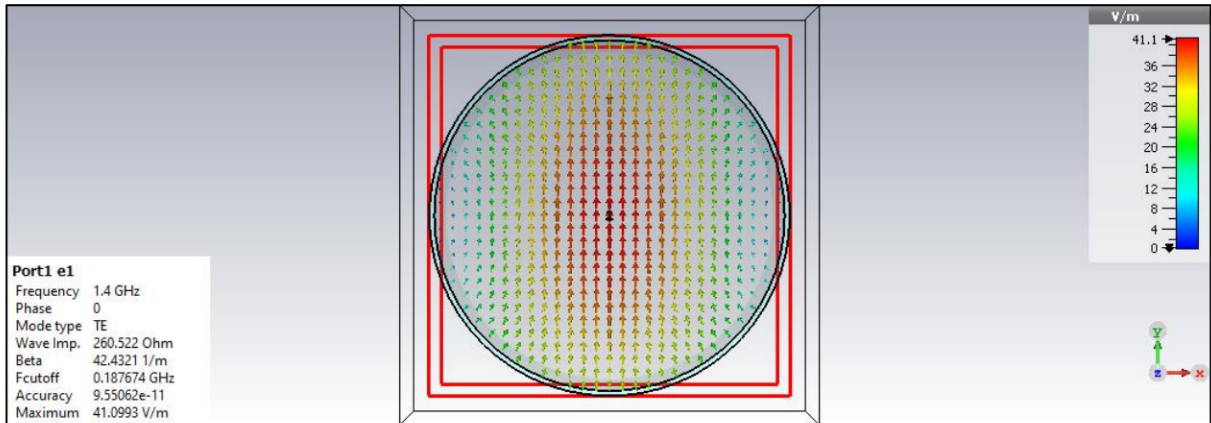


Figura 33: Campo eléctrico a 1.4 GHz en la simulación 2.

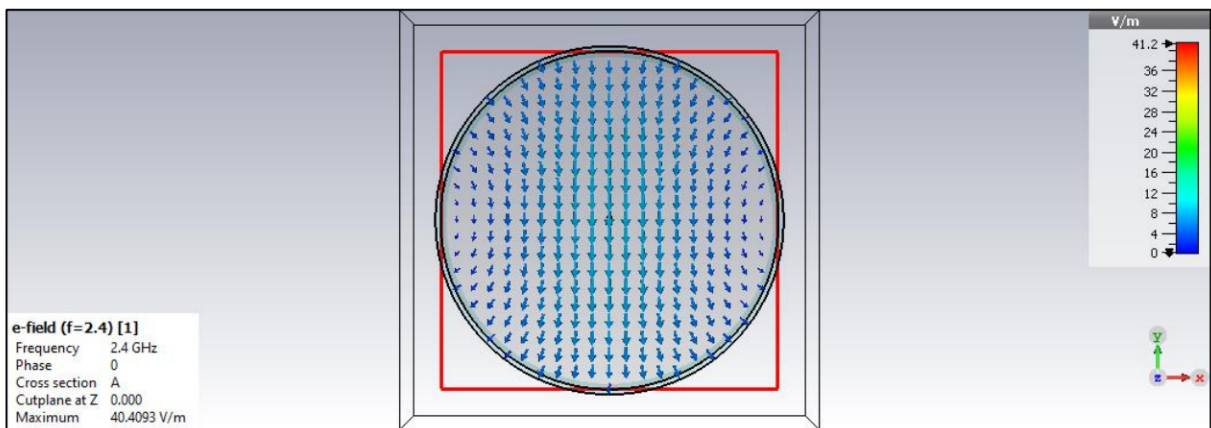


Figura 34: Campo eléctrico a 2.4 GHz en la simulación 2.

En lo que refiere al campo magnético, la figura 35 y 36 muestran el patrón de campo magnético a 1.4 GHz y 2.4 GHz, respectivamente. En dichas figuras se observa que el patrón de campo magnético corresponde al modo TE_{11} .

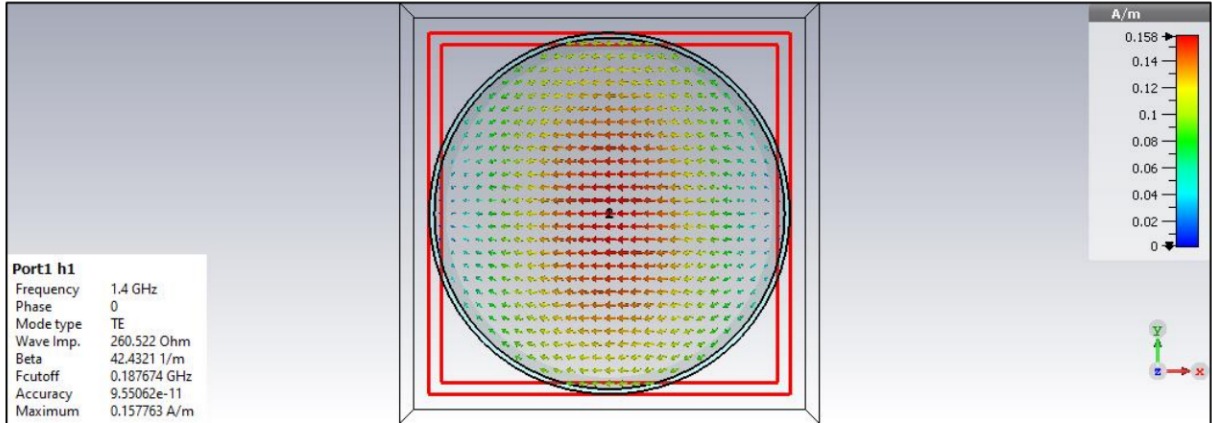


Figura 35: Campo magnético a 1.4 GHz en la simulación 2.

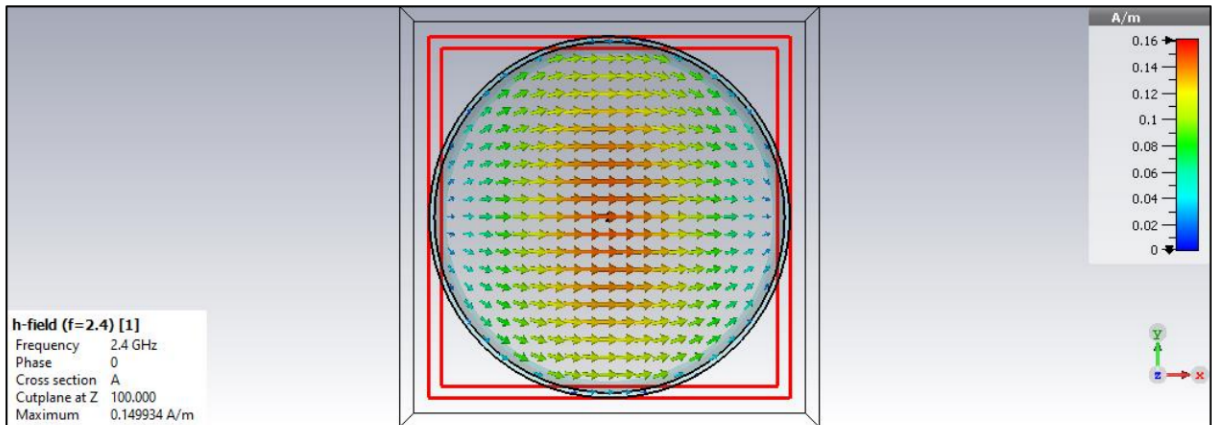


Figura 36: Campo magnético a 2.4 GHz en la simulación 2.

En el cuadro resumen de la figura 35, se observa que a 1.4 GHz la máxima intensidad de campo magnético es de $157.76 \frac{mA}{m}$, mientras que en el cuadro resumen de la figura 36, se observa que a 2.4 GHz la máxima intensidad de campo magnético es de $149.93 \frac{mA}{m}$.

Para obtener la velocidad de propagación para ambas simulaciones se utilizarán las ecuaciones mostradas en el capítulo 2, que por facilidad se muestran a continuación:

$$v_p = f * \lambda_g. \quad (1.11)$$

En donde la longitud de onda en la guía se calcula con la ecuación 1.7:

$$\lambda_g = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{f}\right)^2}}. \quad (1.7)$$

Y la longitud de onda característica en el material de propagación se halla con la ecuación 1.8:

$$\lambda = \frac{\lambda_{vacío}}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (1.8)$$

Así, para la simulación 1 se tiene que λ es de 0.125 m, obteniendo una λ_g de 0.1258 m y una velocidad de propagación de $3 * 10^8 \frac{m}{s}$.

De la misma manera, para la simulación 2 se tiene que λ es de 0.08565 m, obteniendo una λ_g de 0.085912 m y una velocidad de propagación de $206.18798 * 10^6 \frac{m}{s}$.

A continuación, en la tabla 8, se muestra un resumen de los resultados obtenidos en las dos simulaciones.

Tabla 8. Resultados obtenidos en las dos simulaciones con la tubería sin petróleo y con petróleo.

Parámetros	Simulación 1 (Tubería vacía)	Simulación 2 (Tubería con petróleo)
Frecuencia de corte (f_c)	273.951 MHz	187.674 MHz
S_{11} a 2.4 GHz	-43.260808 dB	-47.272244 dB
S_{21} a 2.4 GHz	-0.0078307385 dB	-0.00080343199 dB
VSWR a 2.4 GHz	1.0138351	1.0086957
Velocidad de propagación	$3 * 10^8 \frac{m}{s}$	$206.18798 * 10^6 \frac{m}{s}$

Como se observa en la tabla 8, la frecuencia de corte para la simulación 1 es de 273.951 MHz, y esta corresponde a la hallada teóricamente 274.11 MHz, sin embargo, para la simulación 2, la frecuencia de corte ha cambiado a 187.674 MHz.

Esto se debe a que en la simulación 2 el medio de propagación es el petróleo, por lo que se debe considerar la permitividad relativa del petróleo, ϵ_r , en la fórmula para calcular la frecuencia de corte, así, se obtiene la ecuación 3.1:

$$f_c = \frac{1.841 * c}{2\pi * a * \sqrt{\epsilon_r}} \quad (3.1)$$

En donde $\epsilon_r = 2.13$, obteniendo una frecuencia de corte teórica de 187.819 MHz, que corresponde a la frecuencia obtenida en la simulación, con una variación de 145 kHz.

Por otro lado, el comportamiento del VSWR en ambas simulaciones no tiene una variación significativa, siendo mayor el VSWR de la simulación 1 por un valor de $5.1394 * 10^{-3}$, esta variación implica un 0.002846% más de pérdidas en la tubería sin petróleo.

Esto se corrobora con los valores de S_{11} a 2.4 GHz mostrados en la tabla 8, ya que la diferencia es de -4.01 dB , lo que implica menor potencia reflejada al puerto 1 en la tubería con petróleo. De igual manera, el comportamiento del VSWR y S_{11} se confirma con el parámetro S_{21} a 2.4 GHz , ya que en la tabla 8 se evidencia que la potencia enviada desde el puerto 1 al puerto 2 es un 0.1616% mayor aprovechada en la tubería con petróleo.

Con respecto a la velocidad de propagación, en la tubería vacía las ondas se propagan más rápido que en la tubería con petróleo. La velocidad de las ondas en la tubería vacía supera por $93.81202 * 10^6 \frac{m}{s}$ a las ondas en la tubería con petróleo.

3.2 CONCLUSIONES

La herramienta de simulación CST Studio Suite permite la simulación de guías de onda circulares con las dimensiones de las tuberías del SOTE y del OCP. Además, permite la creación de materiales nuevos, como son el acero al carbón y el petróleo, para que los resultados de las simulaciones realizadas sean muy acercados al comportamiento real de la propagación de señales dentro de dichas tuberías.

En los oleoductos SOTE y OCP, la propagación de ondas electromagnéticas se puede realizar suponiendo que las tuberías son guías de onda circulares de grandes dimensiones, en este sentido, a una frecuencia de 2.4 GHz , la propagación de las ondas dentro de las tuberías se producirá a una velocidad de $206.18798 * 10^6 \frac{m}{s}$.

Utilizar el petróleo como medio hace que la velocidad de propagación disminuya en un 31.27% en comparación de una tubería sin petróleo y al usar el aire como medio de propagación en guías de onda con las mismas dimensiones y características que las tuberías del SOTE y OCP.

La frecuencia de corte del modo fundamental, TE_{11} , de la guía de onda es menor en la tubería llena de petróleo que en la tubería vacía, esto, debido a la permitividad relativa que tiene el petróleo, así, la frecuencia de corte del modo TE_{11} en la tubería vacía es de 273.951 MHz y en la tubería con petróleo es de 187.674 MHz .

Al utilizar las tuberías del SOTE y OCP como guías de onda circulares, sea que se use el aire o el petróleo como medio de propagación, el valor de VSWR no varía

significativamente, así, las pérdidas por reflexión son un 0.002846% más altas en una tubería sin petróleo que en una con petróleo.

Utilizar el petróleo como medio de propagación en las tuberías del SOTE y OCP permite una mejor utilización de la potencia, ya que, al comparar el parámetro S_{21} en las dos simulaciones realizadas, un 0.16% de potencia es mejor aprovechada al usar el petróleo en vez del aire como medio.

Los patrones de flujo de los campos eléctricos y magnéticos en las dos simulaciones realizadas corresponden a los patrones del modo fundamental de las guías de onda circulares, modo TE_{11} . Sin embargo, existe una disminución en la magnitud de intensidad máxima de campo eléctrico y magnético, esta variación se debe a que la distribución de los campos varía en la sección transversal a medida que la frecuencia aumenta.

3.3 RECOMENDACIONES

La herramienta de simulación utilizada en el presente trabajo, CST Studio Suite, toma un tiempo considerable para realizar las simulaciones. Dicho tiempo depende de las características de la computadora, como memoria RAM y tipo de procesador. Por tal razón, se recomienda definir adecuadamente todos los parámetros de los materiales a utilizar y de los modelos a generar antes de empezar una simulación.

Aunque en las simulaciones realizadas se utilizó 2.4 GHz como frecuencia de interés para el análisis, con base en la metodología explicada, se puede realizar el mismo análisis en las bandas de frecuencia de $868/915\text{ MHz}$ que la tecnología Zigbee dispone.

Con base en las simulaciones realizadas se puede analizar la propagación de ondas electromagnéticas en tramos del SOTE y OCP cuyas tuberías posean diámetros y espesores mayores o menores a los usados en el presente trabajo.

En el presente trabajo se ha realizado un análisis de los parámetros S y de los patrones de campo eléctrico y magnético al usar las tuberías del SOTE y OCP como guías de onda, sin embargo, se sugiere realizar un estudio de los perfiles de retardo de potencia.

En las simulaciones realizadas en este estudio se utilizó el petróleo como medio de propagación, sin embargo, para utilizar dicho material se investigaron características generales del crudo. Por tal razón, se sugiere realizar un estudio de la propagación considerando los diferentes tipos de petróleo o combustibles que se transportan en el SOTE y OCP.

En las simulaciones realizadas se modeló un segmento recto de las tuberías, sin embargo, como se mostró en el capítulo 1, el recorrido del SOTE y el OCP tiene segmentos con ciertas curvaturas. Por tal razón, se sugiere realizar el análisis de la propagación de guías de onda modelando secciones curvas de las tuberías.

4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] "SOTE, 45 años al servicio de los ecuatorianos – EP PETROECUADOR", Eppetroecuador.ec, 2021. [Online]. Available: <https://www.eppetroecuador.ec/?p=3972>.
- [2] G. Castro, "Impacto ambiental generado por los derrames de petróleo en el SOTE en el tramo comprendido entre Lago Agrio y Baeza", Trabajo de investigación previo a la obtención del grado de Magíster en Manejo de Recursos Naturales Renovables, Facultad de Ingeniería en Ciencias Agropecuarias y Ambientales, Universidad Técnica del Norte, Ibarra, Ecuador, 2009.
- [3] "API 5L Pipe Specification (46th Edition Updated on 2020)", *Octalsteel.com*, 2021. [Online]. Available: <https://www.octalsteel.com/api-5l-pipe-specification>.
- [4] M. Jiménez, "Diseño del cuadro de mando integral (CMI) para la gerencia de oleoducto de PETROECUADOR", Tesis previa a la obtención del grado de Magíster en Gerencia Empresarial (MBA), Facultad de Ciencias Administrativas, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, 2007.
- [5] Informe Estadístico Enero-octubre 2020, PETROECUADOR, Informe Provisional, noviembre 2020.
- [6] P. Reyes, "Desarrollo de un algoritmo y programa en Matlab para sistematizar y automatizar un modelo digital hidrodinámico en estado estable de un oleoducto para transporte de crudo liviano", Tesis previa a la obtención del grado de Magíster en Sistemas de Transporte de petróleo y derivados, Facultad de Ingeniería Mecánica, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, 2012.
- [7] "RUTA DE LAS ESTACIONES OCP", OCP Ecuador, 2021. [Online]. Available: <https://www.ocpecuador.com/funcionamiento/transporte-crudo-pesado/>
- [8] T. Zboya, "Oleoducto de crudos Pesados (OCP) Ecuador: The Challenges" Rio Pipeline Conference & Exposition, Río de Janeiro, Brasil, 2003, pp. 2.
- [9] A. Chamorro, "El petróleo en el Ecuador, la nueva era petrolera", EP Petroecuador, 1st ed., 2013.
- [10] G. Ayala, "Monitoreo y Evaluación ambiental histórica de los impactos, generados por las operaciones del SOTE, sobre microcuencas del Río Aguarico", Trabajo de Titulación, Facultad de Ingenierías y Ciencias Agronómicas, Universidad de las Américas, Quito, Ecuador, 2008.
- [11] "El petróleo y su comportamiento", *Miteco.gob.es*. [Online]. Available: https://www.miteco.gob.es/es/costas/temas/proteccion-medio-marino/plan-ribera/contaminacion-marina-accidental/petroleo_y_comportamiento.aspx

- [12] S. K. Elam, I. Tokura, K. Saito & R. A. Altenkirch, Thermal conductivity of crude oils. Experimental Thermal and Fluid Science, University of Kentucky, Lexington, 1989.
- [13] Engineering ToolBox. *Liquids and Fluids - Specific Heats*, 2003. [Online]. Available: https://www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-fluids-d_151.html
- [14] M. Mehdi & M. Farzad. Parametric study on electrical conductivity of crude oils; basis experimental data. Petroleum and Coal, Department of Refining Technologies Development, Research Institute of Petroleum Industry (RIPI), 2016.
- [15] K. Folgero, A. Linge & S. Froyeb, "Permittivity Calculator: Method and Tool for Calculating the Permittivity of Oils from PT data" in 30th International North Sea Flow Measurement Workshop, 2012.
- [16] J.A. Bava y A.J. Sanz, *Microondas y Recepción Satelital*. Edición. Lugar de publicación: Editorial, Año de publicación.
- [17] F. Dios, D. Artigas, J. Recolons, A. Comerón y F. Canal, *Campos electromagnéticos*. Universitat Politècnica de Catalunya: Iniciativa Digital Politècnica, 2004.
- [18] A. Sánchez, Guías de onda. Fundació per a la Universitat Oberta de Catalunya.
- [19] D. M. Pozar, *Microwave Engineering*. 4th ed. University of Massachusetts: Wiley, 2012.
- [20] R. Peño, "Análisis y diseño de transformadores de campo en guía de onda", Proyecto Fin de Carrera, Dpto. de Ingeniería Informática, Universidad Autónoma de Madrid, Madrid, 2010.
- [21] R. Neri and Beltrán Porrugas. Luis H., *Líneas de transmisión*, 1st ed. Xalapa, México: Universidad Veracruzana, 2013.
- [22] Zennaro, M., Introduction to wireless sensor networks, Italy: Trieste, I. C. T. P, 2012.
- [23] N. Aakvaag and J. Frey, " Redes de sensores inalámbricos Nuevas soluciones de interconexión para la automatización industrial", *Revista ABB*, vol. 2, no. 2, pp. 39-42, 2006.
- [24] D. Archila, " Estado del arte de las redes de sensores inalámbricos", *TIA*, vol. 2, no.1, pp. 4-10, julio-diciembre 2013.
- [25] F. Urbano, "Redes de Sensores inalámbricos Aplicadas a Optimización en Agricultura de Precisión para Cultivos de Café en Colombia," *Journal de Ciencia e Ingeniería*, vol. 5, no. 1, pp. 46-52, agosto, 2013.
- [26] A. Díaz, "Diseño e implementación de una red inalámbrica para sufragio electrónico basada en el estándar ZIGBEE (IEEE802. 15.4)", Trabajo de Titulación,

Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, 2007.

- [27] S. C. Ergen, (2004, Septiembre 10). ZigBee/IEEE 802.15.4 Summary [Online]. Available: <http://pages.cs.wisc.edu/~suman/courses/707/papers/zigbee.pdf>
- [28] Agencia de regulación y control de las telecomunicaciones, "NORMA TÉCNICA DE ESPECTRO DE USO LIBRE Y DE ESPECTRO PARA USO DETERMINADO EN BANDAS LIBRES", 2018. [Online]. Available: <https://www.arcotel.gob.ec/wp-content/uploads/2018/04/NORMA-ESPECTRO-DE-USO-LIBRE-Y-ESPECTRO-PARA-USO-DETERMINADO-EN-BANDAS-LIBRES.pdf>
- [29] H. Silva, Líneas de transmisión y parámetros S aplicados a la metrología, Electrónica e Informática, Instituto Nacional de Tecnología Industrial, 2014.
- [30] CST Studio Suite High Frequency Simulation, 1st ed. Dassault Systèmes, 2020, p. 18.
- [31] "European Steel and Alloy Grades / Numbers Searchable Database", Steelnumber.com, 2011. [Online]. Available: http://www.steelnumber.com/en/steel_composition_eu.php?name_id=693
- [32] W. Zhao, T. Warren Liao, & L. Kompotiatis. Stress and Springback Analyses of API X70 Pipeline Steel Under 3-Roller Bending via Finite Element Method, Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 30(5), pp. 470–482, 2016.
- [33] Valves Instruments Plus Ltd. "Thermal Expansion", pp. 1. [Online]. Available: https://www.vip-ltd.co.uk/Expansion/Thermal_Expansion.pdf
- [34] "Comparing the thermal conductivity of stainless steel to other metals", Stainless Structural, 2020. [Online]. Available: <https://www.stainless-structurals.com/blog/comparing-the-thermal-conductivity-of-stainless-steel-to-other-metals/>.
- [35] Engineering ToolBox. Metals - Specific Heats. 2003. [Online] Available: https://www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-metals-d_152.html.
- [36] J. Inglehart, "Aluminum Vs. Steel Conductivity", Sciencing, 2022. [Online]. Available: <https://sciencing.com/insulators-8031301.html>.
- [37] Engineering ToolBox. Permeability, 2016. [Online] Available: https://www.engineeringtoolbox.com/permeability-d_1923.html