



*“Responsabilidad con pensamiento positivo”*

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA ISRAEL**

**TRABAJO DE TITULACIÓN EN OPCIÓN AL GRADO DE:  
INGENIERO EN ELECTRÓNICA DIGITAL Y  
TELECOMUNICACIONES**

**TEMA:**

IMPLEMENTACIÓN DE UNA ANTENA DEL TIPO VIVALDI PARA  
APLICACIONES DE UWB (ULTRA WIDEBAND) PARA LA FRECUENCIA DE  
3.5 GHZ

**AUTOR:**

**Juan Carlos Veloz Guachamín**

**TUTOR:**

**Ing. Edgar Emanuel González Malla**

**QUITO, ECUADOR 2020**

# UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA ISRAEL

## APROBACIÓN DEL TUTOR

En mi calidad de tutor del componente práctico certifico:

Que el trabajo de titulación “**IMPLEMENTACIÓN DE UNA ANTENA DEL TIPO VIVALDI PARA APLICACIONES DE UWB (ULTRA WIDEBAND) PARA LA FRECUENCIA DE 3.5 GHZ.**”, presentado por el **Sr. Juan Carlos Veloz Guachamín**, estudiante de la carrera de Electrónica Digital y Telecomunicaciones, reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a la evaluación del Tribunal de Grado, que se designe, para su correspondiente estudio y calificación.

Quito D.M. Agosto del 2020

TUTOR

.....  
Ing. Edgar Emanuel González Malla

## **DECLARACIÓN**

Yo, Juan Carlos Veloz Guachamín declaro que la realización y elaboración del presente proyecto de titulación es de mi autoría, que se han citado las fuentes correspondientes, además de respetar las disposiciones legales que protegen los derechos de autor vigentes.

**Juan Carlos Veloz Guachamín**

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a Dios, a mis padres Aída y Ernesto, a mi hermano y hermanas por haberme apoyado siempre en este largo camino de estudio, ya que muchos de mis logros se los debo a ellos, agradezco que siempre me apoyaran y alentaran para que siguiera mis sueños. Un agradecimiento especial para mi hermano José, ya que su apoyo fue fundamental para haber obtenido este logro.

## **DEDICATORIA**

Este proyecto está dedicado a mi amada familia que siempre creyeron en mí, dándome apoyo, aliento y consejos. Para ellos este presente proyecto de grado.

## TABLA DE CONTENIDO

### Índice

<b>AGRADECIMIENTO</b> .....	<b>iii</b>
<b>DEDICATORIA</b> .....	<b>iv</b>
<b>TABLA DE CONTENIDO</b> .....	<b>v</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>ix</b>
<b>LISTA DE ECUACIONES</b> .....	<b>xi</b>
<b>LISTA DE TABLAS</b> .....	<b>xii</b>
<b>RESUMEN</b> .....	<b>xiii</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>xiv</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
Antecedentes .....	1
Planteamiento de problema.....	2
Objetivo General.....	4
Objetivos específicos .....	4
Alcance del proyecto.....	4
Descripción de Capítulos .....	5
Capítulo 1 .....	5
Capítulo 2 .....	5
Capítulo 3 .....	5
Capítulo 4 .....	6
<b>CAPÍTULO 1</b> .....	<b>7</b>
<b>FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA</b> .....	<b>7</b>
1.2 Características de UWB .....	8
1.2.1 Aplicaciones. ....	9

1.3 Antenas Vivaldi .....	9
1.4 Parámetros básicos de una antena.....	11
1.4.1 Patrón de radiación.....	12
1.5.2 Lóbulos de patrón de radiación .....	13
1.5.3 Intensidad de radiación.....	14
1.5.4 Directividad.....	15
1.5.5 Eficiencia.....	16
1.5.6 Ganancia.....	17
1.5.7 Polarización.....	18
1.5.8 Ancho de banda.....	19
1.6 Tipos de antenas.....	20
1.6.1 Antena de alambre.....	20
1.6.2 Antenas de apertura.....	20
1.6.3 Antenas Microstrip.....	21
1.6.6 Antenas Vivaldi.....	22
<b>CAPÍTULO 2 .....</b>	<b>25</b>
<b>MARCO METODOLÓGICO .....</b>	<b>25</b>
2.1 Método lógico deductivo .....	25
2.2 Método empírico-inductivo .....	25
2.3 Simulación y Optimización.....	26
<b>CAPITULO 3 .....</b>	<b>27</b>
<b>PROPUESTA .....</b>	<b>27</b>
<b>CONSTRUCCIÓN DE LA ANTENA VIVALDI.....</b>	<b>27</b>
3.1 Diseño de la antena Vivaldi .....	27
3.1.1 Grosor del sustrato, cálculo del grosor eficaz .....	28

3.1.2	Diseño teórico del Slotline (Ranura).....	30
3.1.3	Diseño teórico de la línea microstrip.....	32
3.2	Dimensiones teóricas de la antena vivaldi .....	34
	Modelo matemático para la construcción de la antena .....	34
	.....	37
3.3	Diseño de la antena Vivaldi .....	38
3.3.1	Software para la simulación .....	39
	Antena Magus .....	39
	Software Ansys HFSS.....	39
	COMSOL Multiphysics® Modeling Software .....	39
3.3	Simulación de los modelos teóricos obtenidos .....	40
	Uso de COMSOL Multiphysics® Modeling Software .....	40
3.5	Presupuesto para el proyecto .....	43
	Tiempo dedicado para realizar el proyecto.....	44
<b>CAPITULO 4</b>	.....	<b>45</b>
<b>IMPLEMENTACIÓN</b>	.....	<b>45</b>
<b>4.1 Desarrollo</b>	.....	<b>45</b>
	Sustrato FR4.....	45
	Conectores SMA.....	46
	Impresora láser o marcador indeleble.....	47
	Cloruro Férrico.....	47
<b>4.2 Implementación de la antena Vivaldi</b>	.....	<b>47</b>
<b>4.3 Resultados de la simulación</b>	.....	<b>50</b>
<b>4.4 Resultados del estudio</b>	.....	<b>55</b>
<b>4.5 Pruebas de funcionamiento</b>	.....	<b>56</b>



4.5.1 Caracterización de la antena vivaldi .....	56
Características principales del VNA-0460.....	56
4.5.2 Análisis de resultado .....	58
<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>65</b>
<b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>67</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>68</b>
<b>ANEXOS 1.....</b>	<b>70</b>
Manual de usuario COMSOL .....	70

## LISTA DE FIGURAS

Figura 0.1. Diferentes tipos de formas de antenas taped-slot.....	1
Figura 0.2. Antena tipo vivaldi.....	2
Figura 1.1. Diferentes rangos y coberturas de las tecnologías existentes.....	7
Figura 1.2. Diagrama de dimensiones de una antena vivaldi .....	10
Figura 1.3. Antena representada por una carga del tipo resistivo.....	11
Figura 1.4. Formas de propagación en sus diferentes fases.....	12
Figura 1.5. Patrón de radiación de una antena.....	13
Figura 1.6. (a) Diferentes tipos de lóbulos en patrón de radiación.....	14
Figura 1.7. (b) Diagrama de lóbulos en el patrón de radiación .....	14
Figura 1.8. (a) Terminales referenciales de una antena, (b) Reflexión, conducción y pérdidas del dieléctrico.....	16
Figura 1.9 Polarización de una antena (a)Rotación de onda .....	18
Figura 1.10. (b)Elipse de polarización.....	19
Figura 1.11. Tipos de antenas de alambre. (a ) Dipolo, (b) Bucle circular (c) Espiral.....	20
Figura 1.12.Tipos de antenas de apertura. (a) Bocina rectangular, (b) Bocina cónica. (c) Guía de onda. ....	21
Figura 1.13. Antenas microstrip. (a) Rectangular, (b) Circular.....	22
Figura 1.14. Diagrama de dimensiones antena vivaldi.....	23
Figura 3.1.Datasheed de sustratos para simulación.....	28
Figura 3.2.Datasheet de sustratos para simulación.....	29
Figura 3.3. Diferentes tipos de grosores de sustratos .....	29
Figura 3.4. Configuración Slotline o ranura.....	30
Figura 3.5. Campos magnéticos y electromagnéticos en un slotline.....	31
Figura 3.6. Configuración de una linea microstrip.....	32
Figura 3.8. Puntos de principio y fin teórico del slotline .....	36
Figura 3.9. Medidas de Antena Vivaldi (COMSOL) .....	38
Figura 3.10. Unidades de medida para el diseño .....	41
Figura 3.11. Medidas generales para el diseño de antena vivaldi .....	41
Figura 3.12. Dominio de radiación.....	42
Figura 3.13. Material y conector virtual para la simulación.....	42

Figura 3.14. Malla entramado electromagnético de la antena vivaldi .....	43
Figura 4.1. Sustrato FR4 doble cara .....	45
Figura 4.2. Conectores SMA .....	46
Figura 4.3. Cloruro Férrico.....	47
Figura 4.4. Limpieza del sustrato para el grabado.....	48
Figura 4.5. Grabado de tinta en sustrato.....	49
Figura 4.6. Antena terminada .....	49
Figura 4.7. Parámetro S (3.38) .....	50
Figura 4.8. Patrones de radiación (3.38).....	50
Figura 4.9. Patrón de radiación 3D (3.38) .....	50
Figura 4.10. Gráfica VSWR (3.38).....	50
Figura 4.11. Patrones de radiación (4.4).....	51
Figura 4.12. Parametro S11 (4.4) .....	51
Figura 4.13. Gráfica VSWR (4.4).....	51
Figura 4.14. Patrones de radiación 3D (4.4).....	51
Figura 4.16. Parámetro S11 (3) .....	52
Figura 4.15. Patrones de radiación (3).....	52
Figura 4.17. Patrón de radiación 3D (3) .....	52
Figura 4.18. Gráfica de VSWR (3).....	52
Figura 4.19. Parámetro S11 (2.25) .....	53
Figura 4.20. Patrones de radiación (2.25).....	53
Figura 4.21. Patrón de radiación 3D (2.25) .....	53
Figura 4.22. Gráfica VSWR (2.25).....	53
Figura 4.23. Gráficas obtenidas previo ala implementación .....	54
Figura 4.24. Antena vivaldi implementada .....	55
Figura 4.25. MegiQ VNA-0460 .....	56
Figura 4.26. Parámetro S11 obtenido de la simulación con las especificaciones mencionadas	58
Figura 4.27. Pérdidas de retorno antena implementada.....	59
Figura 4.28. VSWR de la antena simulada.....	60
Figura 4.29. VSWR de la antena implementada .....	60
Figura 4.30. Carta de Smith impedancia antena implementada .....	63

## LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 0.1. Fórmula para determinar el ancho de banda fraccional.....	3
Ecuación 1.1. Formas para calcular el ancho de banda fraccional.....	8
Ecuación 1.2. Impedancia de una antena.....	11
Ecuación 1.3. Intensidad de radiación.....	15
Ecuación 1.4. Directividad.....	15
Ecuación 1.5. Directividad máxima.....	15
Ecuación 1.6. Eficiencia total de una antena.....	17
Ecuación 1.7. Ganancia de una antena.....	17
Ecuación 3.1. Grosor efectivo.....	29
Ecuación 3.2. (a)Constante dieléctrica efectiva, (b)longitud de onda.....	31
Ecuación 3.3. Longitud de onda del slotline.....	31
Ecuación 3.4. Impedancia del slotline.....	32
Ecuación 3.5. Epsilon efectivo del microstrip.....	33
Ecuación 3.6. Longitud de onda del microstrip.....	33
Ecuación 3.7. Fórmula para calcular el ancho del microstrip.....	33
Ecuación 3.8. Apertura teórica máxima.....	35
Ecuación 3.9. Ancho máximo de antena.....	35
Ecuación 3.10. Ancho mínimo de antena.....	35
Ecuación 3.11. Calculo de constantes para la exponencial de la ranura.....	36
Ecuación 3.12. Fórmula para la curva exponencial dela ranura.....	36
Ecuación 3.13. Fórmulas para el cálculo de dimensiones aproximadas de la antena.....	37
Ecuación 3.14. Fórmulas para el cálculo de la apertura radiante.....	37

## LISTA DE TABLAS

Tabla 3.1	Calculo de heff para los sustratos .....	30
Tabla 3.2	Dimensiones calculadas para la antena .....	37
Tabla 3.3	Valores obtenidos para la apertura radiante .....	37
Tabla 3.4	Dimensiones para la simulación.....	40
Tabla 3.5	Presupuesto y comparación de precios.....	43
Tabla 3.6	Tiempo utilizado para realizar el proyecto .....	44
Tabla 4.1	Resumen de datos del sustrato FR4.....	46
Tabla 4.2	Características técnicas del SMA .....	46
Tabla 4.3	Sustrato para simulación constante dieléctrica de 4.4 .....	50
Tabla 4.4	Sustrato para simulación constante dieléctrica de 4.4 .....	51
Tabla 4.5	Sustrato para simulación constante dieléctrica de 3 .....	52
Tabla 4.6	Sustrato para simulación constante dieléctrica de 2.25 .....	53
Tabla 4.7	Dimensiones para la implementación.....	55
Tabla 4.8	Cálculo de error porcentual .....	59
Tabla 4.9	Cálculo de coeficiente de reflexión y potencia reflejada.....	61
Tabla 4.10	Valores típicos calculados entre VSWR y potencia reflejada .....	62

## **RESUMEN**

Las tecnologías inalámbricas han tomado un impulso enorme en las últimas décadas y el desarrollo de nuevas y más eficientes formas de transmitir la información se han vuelto cada vez más comunes por lo que como un aporte a dicho impulso se realizará un antena del tipo vivaldi para que funcione en ambientes indoor, tomando en cuenta las especificaciones de la FCC (Federal Communications Commission) que manifiesta que, para que se considere comunicaciones de UWB es necesario cumplir con dos definiciones, el ancho de banda debe ser  $> 500$  MHz y el ancho de banda fraccional  $\geq 20\%$  realizado el cálculo pertinente se obtiene 700MHz con una frecuencia de 3,5 GHz, datos que son fundamentales al momento de iniciar el diseño teórico, el cual se basará en los fundamentos de diseño obtenidos en la literatura existente.

Una vez se obtengan los datos se procederá a optimizar el diseño en un software especializado (simulador de onda completa), haciendo barridos paramétricos para optimizarlos, para proceder a la fabricación de la antena en el sustrato más indicado y con los parámetros obtenidos de la optimización, cabe anotar que se deben realizar dos antenas iguales para la medición de los patrones de radiación y demás parámetros, ya que se pretende utilizar el método de espacio libre en el que se mide los parámetros de la antena con un instrumento especializado conocido como VNA (Analizador de redes vectoriales)

## ABSTRACT

Wireless technologies have taken a huge impact in recent decades and the development of new and more efficient ways of transmitting information, has become increasing common, so as a further contribution to this boost, a vivaldi antenna will be made to what function in indoor, taking into account the specifications of the FCC (Federal Communications Commission) that tells us that, in order to be considered UWB communications, it is necessary to comply with two definitions, the bandwidth must be  $> 500$  MHz and the fractional bandwidth  $\geq 20\%$  Performing the relevant calculation we obtain 700Mhz with a frequency of 3.5 GHz, data that are fundamental at the time of starting the theoretical design, which will be based on the design fundamentals obtained in the existing literature.

Once the data is obtained, the design will be optimized in a specialized software (full wave simulator), making parametric sweeps to optimize them, to proceed with the manufacture of the antenna in the most indicated substrate and with the parameters obtained from the optimization, It should be noted that two equal antennas must be made for the measurement of radiation patterns and others parameters, since it is intended to use the especial equip called VNA (Vectorial Network Analyzer).





# INTRODUCCIÓN

## Antecedentes

Los sistemas de comunicación UWB, son sistemas de avance tecnológico acelerado con características atractivas y únicas, que prometen grandes avances en comunicaciones inalámbricas, redes, radares, imágenes, posicionamiento, además de transmisión de datos a alta velocidad, desde que la FCC dio luz verde para su estudio en el 2002 y se aprobaron los estándares IEEE 802.15.3a y 802.15.4a, se han desarrollado varios estudios y modelos para su funcionamiento, entre los cuales están las antenas que pueden utilizarse para mejorar dicha tecnología, por ejemplo; LTSA (Lineal Tapered Slot Antenna), CWSA (Constant Width Tapered Slot Antenna) y ETSA (Exponential Tapered Slot Antenna), también llamada Vivaldi.



Figura 0.1. Diferentes tipos de formas de antenas tapered-slot

Fuente: Djerafi T., Doghri Ali. & Wu K. (2015).

La antena Vivaldi fue desarrollada por P. Gibson en 1.979 como un elemento de antena plana con el cual se puede producir un haz en la salida simétrico, con una ganancia apreciable y con lóbulos laterales pequeños. La antena vivaldi consta de una ranura en el metalizado del sustrato que se amplía exponencialmente, cuya variación exponencial es la que determina las características que tendrá la antena tanto en directividad como ganancia, otro parámetro a tener

en cuenta en el acoplamiento de impedancia de la línea microstrip, esto puede generar algunos problemas de no estar bien adaptada lo que repercutirá en la operación de la antena.

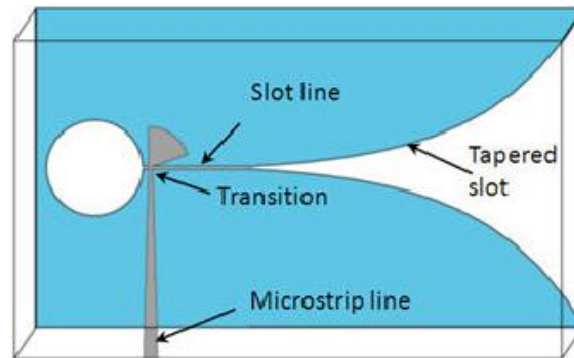


Figura 0.2. Antena tipo vivaldi

Fuente: Kerarti, D.Z., Marouf, F.Z., & Meriah, S.M. (2012).

Sus características principales son:

- Forma parte de las antenas de onda viajera de radiación longitudinal (endfire traveling wave antennas)
- Bajo costo de producción
- Tiene un gran ancho de banda
- Presenta alta directividad
- Produce patrones simétricos de radiación

### Planteamiento de problema

Debido al vertiginoso avance de la tecnología con mejoras y cambios, las necesidades de la sociedad también han evolucionado hacia conexiones más seguras y de alta velocidad, además por la paulatina saturación del canal de 2,4 GHz para comunicaciones, ha servido como impulso para el desarrollo y evolución de tecnologías que están dirigidas para mejorar las deficiencias técnicas, como la baja velocidad de transmisión de datos, falencias que poseen por ejemplo, el WiFi y Bluetooth que son las tecnologías con mayor expansión para redes de área local, por lo que, la tecnología inalámbrica UWB se desarrolla con la consigna de solventar estos

inconvenientes, motivando el estudio del diseño de una antena vivaldi que puede ser utilizada para proveer transmisiones de alta velocidad a poca distancia, ya que posee amplio ancho de banda, además de alta ganancia y baja potencia, lo que la hace ideal para entornos Indoor.

Teniendo presente las características mencionadas, para realizar el presente proyecto se ha tomado en cuenta las especificaciones de la FCC, que dice, que para que se considere comunicaciones de UWB es necesario cumplir con dos definiciones, el ancho de banda debe ser  $> 500$  MHz y el ancho de banda fraccional  $\geq 20\%$ , tomando estas definiciones se utilizará la siguiente fórmula para determinar el ancho de banda fraccional

$$B_f = \frac{BW}{f_c} \times 100\% = \frac{2(f_h - f_l)}{f_h + f_l} \times 100\%$$

Ecuación 0.1. Fórmula para determinar el ancho de banda fraccional

Fuente: FCC, Revision Part 15 of the Commission's Rules Regarding Ultra-Wideband Transmission Systems (2002)

Donde:

Bf = ancho de banda fraccional

BW = ancho de banda total

fc = frecuencia central

fh = frecuencia superior

fl = frecuencia inferior

Fórmula que también servirá para determinar el ancho de banda, siendo  $f_h = 3,850$  GHz y  $f_l = 3,150$  GHz, teniendo como central la frecuencia de  $3,5$  GHz, con un ancho de banda de  $700$  MHz cumpliendo con esto, las especificaciones antes citadas, además habiendo escogido la frecuencia de  $3,5$  GHz por ser la que se encuentra en el rango de especificaciones citadas, ya que las recomendaciones de la FCC ha dividido el espectro UWB para diferentes aplicaciones, se espera además no causar interferencia en las frecuencias que opera actualmente, por ejemplo WiFi, entre las especificaciones que propone la FCC están que el dispositivo debe estar diseñado para funcionar solamente en ambientes indoor para lo que se procederá a realizar los cálculos teóricos para el diseño de la antena vivaldi, luego utilizando un software para simulaciones de

---

onda completa se optimizarán los datos obtenidos hasta lograr los parámetros óptimos y para finalizar utilizando la técnica de campo libre y la herramienta VNA (Analizador de redes vectoriales) obtener los patrones de radiación, pérdidas de retorno y ganancias.

### **Objetivo General**

- Implementar una antena del tipo Vivaldi para aplicaciones UWB (Ultra WideBand, para un ancho de banda de 700 MHz y resuene a 3.5 GHz.

### **Objetivos específicos**

- Diseñar teóricamente los diferentes parámetros de la antena Vivaldi a 3.5 GHz con 700 MHz de ancho de banda.
- Optimizar el diseño teórico mediante un simulador de onda completa.
- Elaborar la antena Vivaldi desde los parámetros obtenidos en los modelos teóricos
- Validar el diseño experimentalmente mediante la obtención de patrón de radiación, ganancia y pérdidas de retorno (Return loss)

### **Alcance del proyecto**

Se recopilará información por medio de una investigación bibliográfica de la literatura existente lo cual permitirá conocer los principios y funcionamiento de la antena que se implementará.

Se realizará modelos teóricos de la antena vivaldi con los datos recopilados anteriormente, con lo que se determinará las dimensiones para la simulación.

---

Se utilizará un simulador de onda completa (COMSOL) para realizar la optimización de los modelos teóricos obtenidos y realizar correcciones necesarias antes de la implementación.

Con los datos obtenidos de las simulaciones realizar la respectiva implementación de la antena para luego realizar un análisis de parámetros que verificará si la antena cumple con las características y parámetros deseados.

## **Descripción de Capítulos**

### **Capítulo 1**

En este capítulo se revisará conceptos, principios teóricos que serán fundamentales para la realización del proyecto, además de consolidar los conocimientos que servirán posteriormente en todo el desarrollo del proyecto.

### **Capítulo 2**

En este capítulo se describe la metodología que se utilizará para obtener por medio de la investigación de la literatura existente los parámetros y características que tendrá la antena del proyecto.

### **Capítulo 3**

En este capítulo se realizará los modelos teóricos de los cuales se desprenderán las dimensiones que tendrá la antena, mismos que servirán posteriormente para la simulación en el software COMSOL (simulador de onda completa).

## **Capítulo 4**

En este capítulo finalmente se describirá el proceso y desarrollo para elaborar de forma artesanal la antena vivaldi desde los datos desprendidos de las simulaciones y se presentará los resultados del estudio.

# CAPÍTULO 1

## FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

### 1.1 UWB (Ultra Wideband)

Los sistemas de comunicación que utilizan UWB proveerán a futuro una gran variedad de aplicaciones, porque dispone de un ancho de banda considerable, además de una amplia capacidad para transmitir datos a grandes velocidades, y por último pero no menos importante bajos costos de implementación, estos son algunos de los beneficios que tiene la tecnología UWB, sin mencionar aún que contribuiría en gran medida a liberar las transmisiones en rangos 2,4 GHz – 5 GHz que en la actualidad se encuentran bastante saturados. Dichos rangos son los preferidos para transmisiones WiFi. En Figura 1.1. se puede observar los diferentes rangos y coberturas de las tecnologías existentes y el lugar en el que esta la UWB.

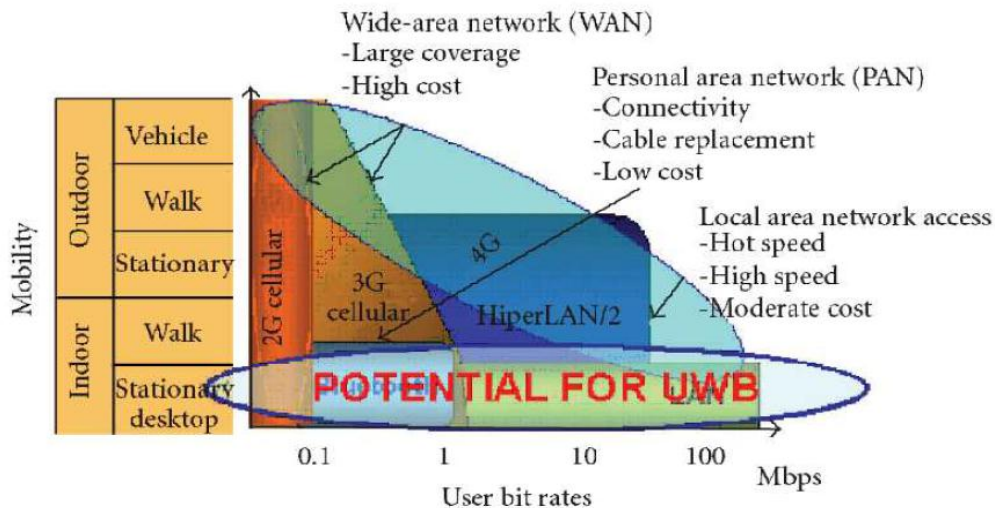


Figura 1.1. Diferentes rangos y coberturas de las tecnologías existentes.

Como ya se ha definido anteriormente la FCC ha publicado los parámetros aceptables para las transmisiones de UWB, las señales UWB deben tener anchos de banda superiores a 500 MHz o un ancho de banda fraccional mayor más del 20% en todo momento de transmisión. El ancho de banda fraccional es un parámetro que generalmente se utiliza para definir y clasificar el tipo de señal, si es banda estrecha, banda ancha o banda ultra ancha y se mide a -10 dB en función de la frecuencia central. La siguiente ecuación muestra esta relación.

$$B_f = \frac{BW}{f_c} \times 100\% = \frac{(f_h - f_l)}{(f_h + f_l)/2} \times 100\% = \frac{2(f_h - f_l)}{f_h + f_l} \times 100\%$$

Ecuación 1.1. Formas para calcular el ancho de banda fraccional

Fuente: FCC, Revision Part 15 of the Commission's Rules Regarding Ultra-Wideband Transmission Systems (2002)

Donde:

Bf = ancho de banda fraccional

BW = ancho de banda total

fc = frecuencia central

fh = frecuencia superior

fl = frecuencia inferior

donde fh y fl son las frecuencias de corte más altas y más bajas del estudio con las que se realizará la antena, respectivamente. Una señal UWB situarse en cualquier lugar del espectro de radiofrecuencia destinado para estas comunicaciones.

## 1.2 Características de UWB

En torno a la tecnología UWB existen varias características que serán de mucha utilidad para las comunicaciones que llegan a los consumidores.

- tienen una complejidad potencialmente baja y bajo costo
- tiene un espectro de señal similar al ruido;



- son resistentes a múltiples trayectos severos y atascos;
- tienen muy buena resolución en el dominio del tiempo que permite la ubicación y el seguimiento.

### **1.2.1 Aplicaciones.**

Cuando se menciona baja complejidad y bajo costo de la tecnología UWB, se hace referencia a una de sus características, que tiene que ver con la banda base de transmisión. Mientras los transmisores convencionales necesitan un mezclador RF, las señales UWB no, porque producen pulsos cortos en el dominio del tiempo para propagarse. En las comunicaciones convencionales en la etapa de mezcla RF generalmente se usa una señal de banda base, a la que se le adiciona una portadora lo que hace que la señal de frecuencia tenga las características necesarias para su propagación, en cambio el UWB al disponer de frecuencias que generalmente se usan como portadoras le evita la necesidad de utilizar conversión ascendente, y en el receptor tampoco necesitaría conversión descendente lo que elimina la necesidad de un oscilador local en el receptor.

Lo reduce significativamente los costos de implementación para las aplicaciones que se pudieran generar para la UWB, aplicaciones que en teoría se implementarían con menos recursos lo que ayudaría en gran medida a la expansión de la tecnología UWB en distintos y muy variados campos de investigación, como los radares, posicionamiento, transmisiones de alta velocidad, etc.

### **1.3 Antenas Vivaldi**

La antena Vivaldi es una antena de banda ultra ancha del TSA (Antena de ranura cónica) que también se conoce como ranura de antena parche, este tipo de antena entra en el rango de onda viajera, lo que quiere decir que sus parámetros tanto corriente como voltaje pueden ser representadas como ondas viajeras, en 1979 P. J. Gibson ofreció un nuevo tipo de antena cuya ranura abierta exponencialmente que se llamó antena Vivaldi, Es por eso que las antenas Vivaldi también se llaman ETSA (Exponencial cónico Antena de ranura). Las antenas Vivaldi pueden proporcionar anchos de banda a varias octavas. Generalmente posee alta directividad además de

generar patrones de radiación simétricos. Las antenas TSA (Taped slot antenna) se utilizan en diferentes tipos de campos de las telecomunicaciones como por ejemplo radares, algunos dispositivos móviles, sistemas de posicionamiento, debido a su bajo costo de implantación y grandes beneficios tecnológicos.

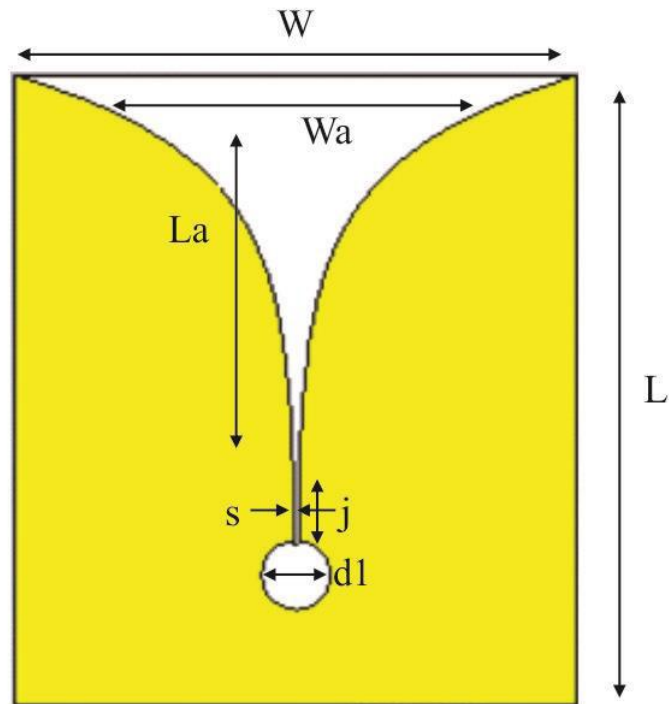


Figura 1.2. Diagrama de dimensiones de una antena vivaldi

Fuente: M. Y. Perdana<sup>1</sup>, T. Hariyadi<sup>1</sup>, Y. Wahyu.(2017)

## 1.4 Parámetros básicos de una antena

“Las antenas son dispositivos que irradian y reciben ondas electromagnéticas que se propagan por el espacio libre, esta es una de las definiciones de antenas publicada por la IEEE (Standard Definitions of Terms for Antennas).” (IEEE, 1983).

El modo de transmisión que se muestra en la figura 1.3 está representada por un generador ideal, la impedancia característica es la línea de transmisión y la antena representada por una carga del tipo resistivo.

Conectada a la línea de transmisión, que son consecuencia equivalente de los circuitos de Thevenin y Norton siendo este uno de los parámetros teóricos fundamentales en el acoplamiento de impedancias concepto que se utilizará posteriormente en el estudio.

$$Z_A = (R_L + R_r) + jX_A$$

Ecuación 1.2. Impedancia de una antena

Fuente: Balanis,(2005)

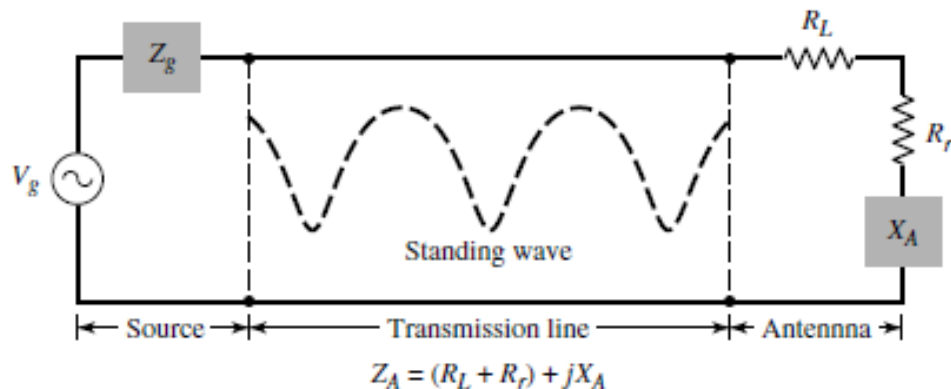


Figura 1.3. Antena representada por una carga del tipo resistivo

Fuente: Balanis,(2005)

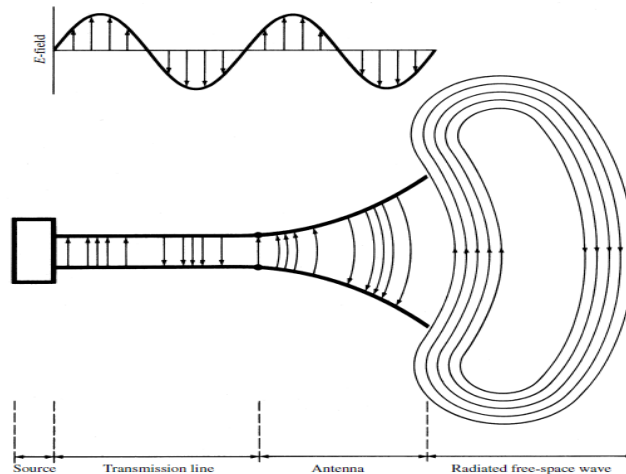


Figura 1.4. Formas de propagación en sus diferentes fases

Fuente: Balanis, (2005)

Para comprender a fondo el funcionamiento de una antena es necesario tener en claro una serie de parámetros que permitirá comprender mejor manera el funcionamiento de las mismas, este conocimiento será de gran utilidad al momento de desarrollar una antena. Los parámetros más importantes se describirán a continuación.

### 1.4.1 Patrón de radiación

Un patrón de radiación de antena o patrón de antena se define como una función matemática puede realizar una representación gráfica que abarca de las propiedades de radiación de la antena como una función de coordenadas espaciales”. En la mayoría de los casos, el patrón de radiación se determina en el campo lejano y se representa como una función de las coordenadas direccionales.

Las propiedades de radiación incluyen densidad de flujo de potencia, intensidad de radiación, intensidad de campo, directividad, fase o polarización. La propiedad de radiación que más preocupa es la bidimensional o tridimensional, distribución espacial de la energía radiada en función de la posición del observador a lo largo de un camino o superficie de radio constante. (Balanis,2005)

Para tener más en claro se puede ver en la figura 1.5 diferentes fuerzas que intervienen en los patrones de radiación.

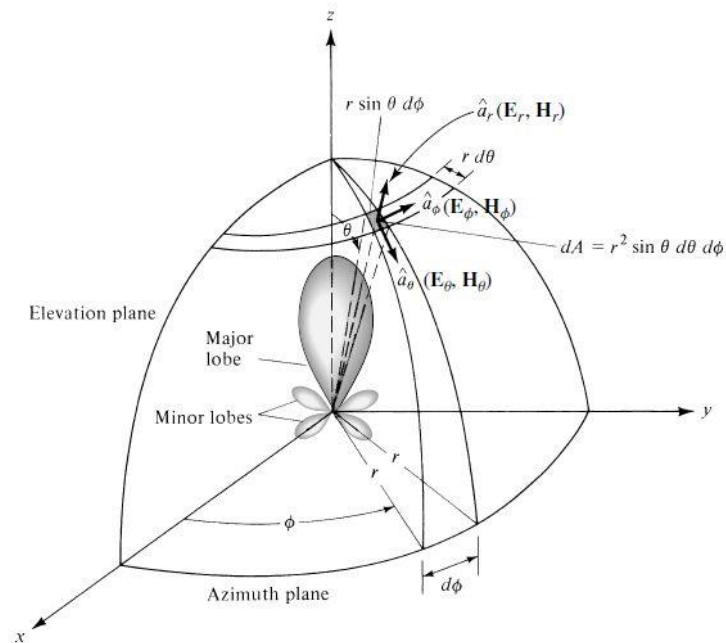


Figura 1.5. Patrón de radiación de una antena

Fuente: C. Balanis, (2005)

### 1.5.2 Lóbulos de patrón de radiación

Varias partes de un patrón de radiación se denominan lóbulos, que pueden sub clasificarse en lóbulos mayores o principales, menores, laterales y de back. Un lóbulo de radiación es una "porción del patrón de radiación limitado por regiones de intensidad de radiación relativamente débil " (Balanis, 2005). La figura 1.6 muestra un tridimensional simétrico patrón polar con varios lóbulos de radiación. Algunos son de mayor intensidad de radiación que otros, pero todos se clasifican como lóbulos.

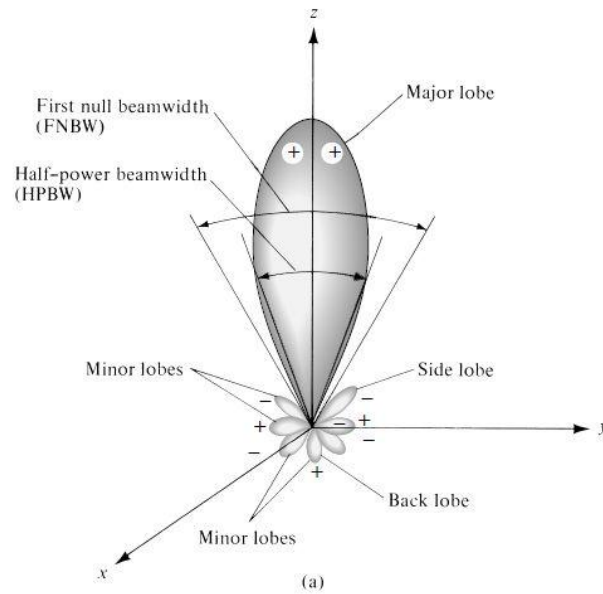


Figura 1.6. (a) Diferentes tipos de lóbulos en patrón de radiación

Fuente: C. Balanis, (2005)

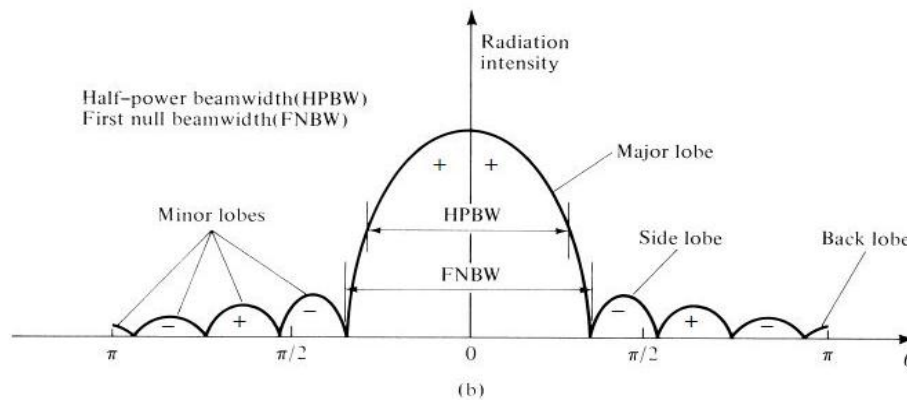


Figura 1.7. (b) Diagrama de lóbulos en el patrón de radiación

Fuente: C. Balanis, (2005)

### 1.5.3 Intensidad de radiación

La intensidad de radiación en una dirección dada se define como "el poder irradiado desde una antena por unidad de ángulo sólido". La intensidad de radiación es un parámetro de campo lejano, y se puede obtener simplemente multiplicando la densidad de radiación por el cuadrado de la distancia. (Balanis, 2005). En forma matemática se expresa como:

$$U = r^2 W_{\text{rad}}$$

Ecuación 1.3. Intensidad de radiación

Fuente: C. Balanis (2005)

Donde

U= intensidad de radiación (W/unidad de ángulo sólido)

Wrad= densidad de radiación (W/m<sup>2</sup>)

### 1.5.4 Directividad

La directividad de una antena definido como "la relación de la intensidad de radiación en una dirección dada desde la antena a la intensidad de radiación promediada en todas las direcciones. La intensidad de radiación promedio es igual a la potencia total radiada por la antena dividida por  $4\pi$ . Si la dirección es no especificada, la dirección de la máxima intensidad de radiación está implícita". Dicho más simplemente, la directividad de una fuente no isotrópica es igual a la proporción de su radiación intensidad en una dirección dada sobre la de una fuente isotrópica. (Balanis,2005)

$$D = \frac{U}{U_0} = \frac{4\pi U}{P_{\text{rad}}}$$

*Ecuación 1.4. Directividad*

Fuente: C. Balanis (2005)

Cuando no se especifica la dirección se entenderá que es la dirección de máxima radiación

$$D_{\text{max}} = D_0 = \frac{U|_{\text{max}}}{U_0} = \frac{U_{\text{max}}}{U_0} = \frac{4\pi U_{\text{max}}}{P_{\text{rad}}}$$

Ecuación 1.5. Directividad máxima

Fuente: C. Balanis (2005)

Donde

$D$ = directividad

$D_0$ = directividad máxima

$U$ = Intensidad de radiación (W/unidad de ángulo sólido)

$U_{max}$ = Intensidad máxima de radiación (W/unidad de ángulo sólido)

$U_0$ = Intensidad de radiación isotrópica en la fuente

$P_{rad}$ = Potencia total radiada

### 1.5.5 Eficiencia

Una antena posee varias eficiencias, no obstante, la eficiencia total de la antena, cuya nomenclatura  $e_0$  (eficiencia total) se utiliza para tener en cuenta las pérdidas en los terminales de entrada y dentro de la estructura de la antena. Dichas pérdidas pueden ser debidas, reflexiones debido a la falta de coincidencia entre la línea de transmisión y la antena, además de pérdidas  $I^2R$  (conducción y dieléctrico). (Balanis, 2005)

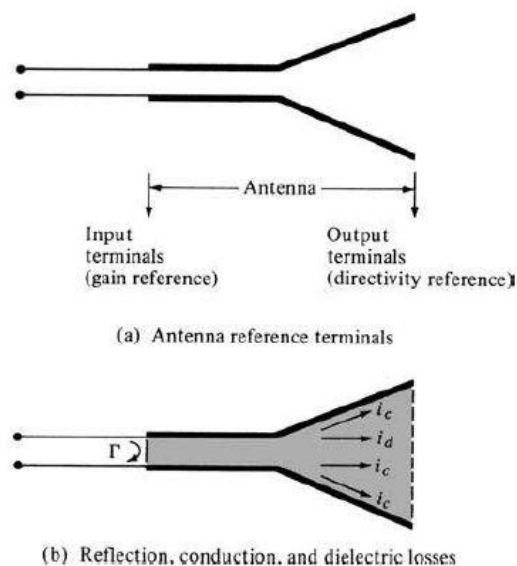


Figura 1.8. (a) Terminales referenciales de una antena, (b) Reflexión, conducción y pérdidas del dieléctrico.

Fuente: C. Balanis (2005)



En general la eficiencia puede escribirse matemáticamente como:

$$e_0 = e_r e_c e_d$$

Ecuación 1.6. Eficiencia total de una antena

Fuente: C. Balanis (2005)

Donde

$e_0$  = eficiencia total

$e_r$  = eficiencia de reflexión =  $(1 - |\Gamma|^2)$

$e_c$  = eficiencia conductual

$e_d$  = eficiencia dieléctrica

$\Gamma$  = voltaje de coeficiente de reflexión =  $|\Gamma| = \frac{VSWR - 1}{VSWR + 1}$

$$VSWR = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|}$$

### 1.5.6 Ganancia

La ganancia describe el rendimiento de una antena. A pesar de que la ganancia de la antena está estrechamente relacionada con la directividad, es una medida que toma en cuenta la eficiencia de la antena, así como sus capacidades direccionales. La ganancia de una antena (en una dirección dada) se define como "la relación de la intensidad, en una dirección dada, a la intensidad de radiación que se obtendría si la potencia aceptada" (Balanis, 2005)

$$Gain = 4\pi \frac{\text{Intensidad de radiación}}{\text{Potencia total entrada}} = 4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{in}}$$

Ecuación 1.7. Ganancia de una antena

Fuente: C. Balanis (2005)

### 1.5.7 Polarización

La polarización de una antena en una dirección dada se define como "la polarización de la antena onda transmitida (radiada) por la antena. Cuando no se indica la dirección, se considera que la polarización es la polarización en la dirección de ganancia máxima ", la polarización de la energía radiada varía con la dirección del centro de la antena, de modo que diferentes partes del patrón pueden tener diferentes polarizaciones.

La polarización de una onda radiada se define como "esa propiedad de una onda electromagnética para describe la dirección variable en el tiempo y la magnitud relativa del vector campo eléctrico. (Balanis, 2005)

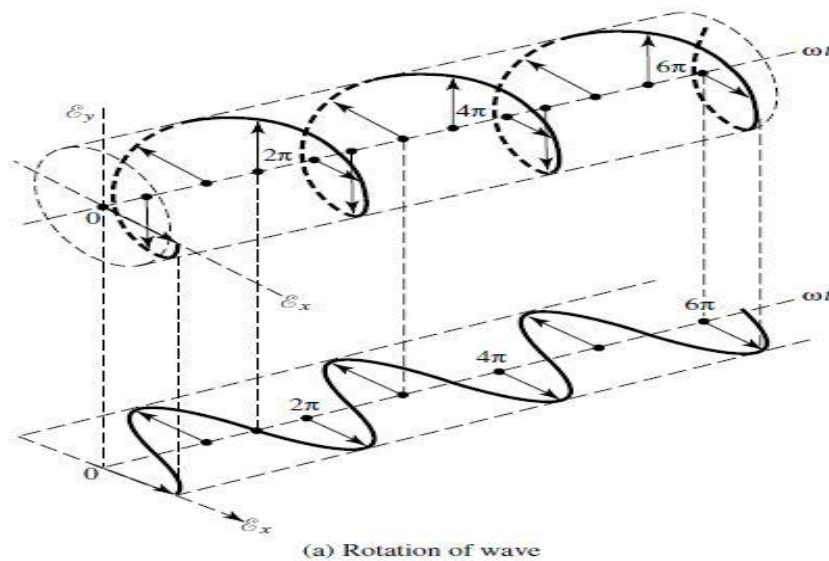


Figura 1.9 Polarización de una antena (a)Rotación de onda

Fuente: C. Balanis (2005)

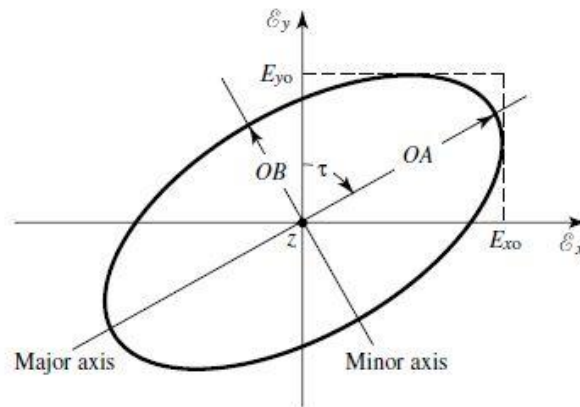


Figura 1.10. (b)Elipse de polarización

Fuente: C. Balanis. (2005)

### 1.5.8 Ancho de banda

El ancho de banda de una antena se puede considerar como "el rango de frecuencias dentro del cual el rendimiento de la antena, con respecto a alguna característica, se ajusta a un determinado estándar". (Balanis, 2005). El ancho de banda debe considerarse como el rango de frecuencias, ya sea en lado de una frecuencia central (generalmente la frecuencia de resonancia para un dipolo), donde las características de la antena (como la impedancia de entrada, patrón, ancho de haz, polarización, nivel lateral del lóbulo, ganancia, dirección del haz, eficiencia de radiación) están dentro de un valor aceptable de aquellos en la frecuencia central. Para antenas de banda ancha, el ancho de banda suele ser expresado como la relación de las frecuencias superior a inferior de operación aceptable, por ejemplo, un ancho de banda de 10: 1 indica que la frecuencia superior es 10 veces mayor que el más bajo. Para antenas de banda estrecha, el ancho de banda se expresa como un porcentaje de la diferencia de frecuencia (superior menos inferior) sobre la frecuencia central del ancho de banda. Por ejemplo, un ancho de banda del 5% indica que la diferencia de frecuencia aceptable para a operación es el 5% de la frecuencia central del ancho de banda.

## 1.6 Tipos de antenas

Existe gran variedad de antenas que se pueden analizar y mostrar sus diferentes características, como, por ejemplo, antenas de alambre, antenas de apertura y antenas microstrip.

### 1.6.1 Antena de alambre

Estas son de los más comunes tipos de antenas, se puede encontrarlos en diferentes tipos de lugares como por ejemplo automóviles, radios, naves, aviones, edificios etc., y tienen además diferentes formas, rectas circulares curvas etc.

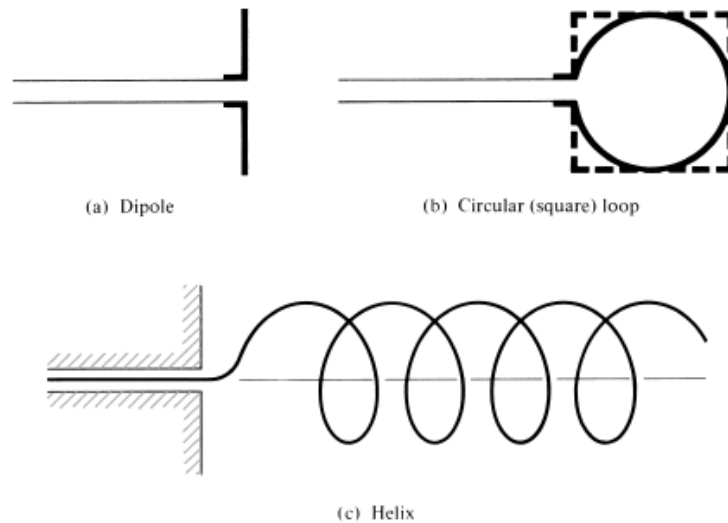


Figura 1.11. Tipos de antenas de alambre. (a) Dipolo, (b) Bucle circular (c) Espiral

Fuente: C. Balanis, (2005)

### 1.6.2 Antenas de apertura

Estas son menos conocidas y se utilizan mayormente en naves espaciales y aviones puesto que se puede colocar en la parte baja de las mismas

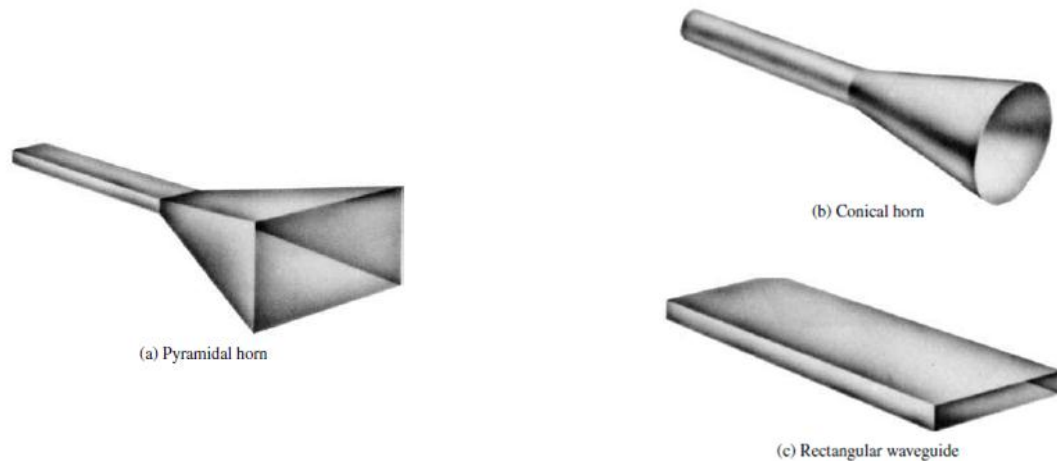


Figura 1.12. Tipos de antenas de apertura. (a) Bocina rectangular, (b) Bocina cónica. (c) Guía de onda.

Fuente: C. Balanis, (2005)

### 1.6.3 Antenas Microstrip

Las antenas de microstrip se hicieron muy populares en la década de 1970 principalmente para aplicaciones en el espacio. En la actualidad el uso de las antenas microstrip están bastante difundido y está presente en diversos productos, las antenas microstrip son parches metálicos que está sobre un sustrato, el parche puede tener diferentes formas y tamaños, según el diseño y la configuración necesaria.

Actualmente las antenas microstrip más conocidas son las antenas de parche circular y rectangular, que son los que se muestran en la Figura 1.13, esto es consecuencia de que son antenas fáciles de implementar, diseñar y analizar, además poseen atractivas características en cuanto a su radiación. Las antenas de microstrip son de bajo perfil, compatibles con planas y no planas superficies, simples y económicas de fabricar utilizando tecnología moderna de circuito impreso, mecánicamente robusto cuando se monta en superficies rígidas, compatible con diseños MMIC, y muy versátil en términos de frecuencia resonante, polarización, patrón e impedancia. Estas antenas se pueden montar en la superficie de aviones de alto rendimiento, naves espaciales, satélites, misiles, automóviles e incluso teléfonos móviles de mano.” (Balanis, 2005: 4-5)

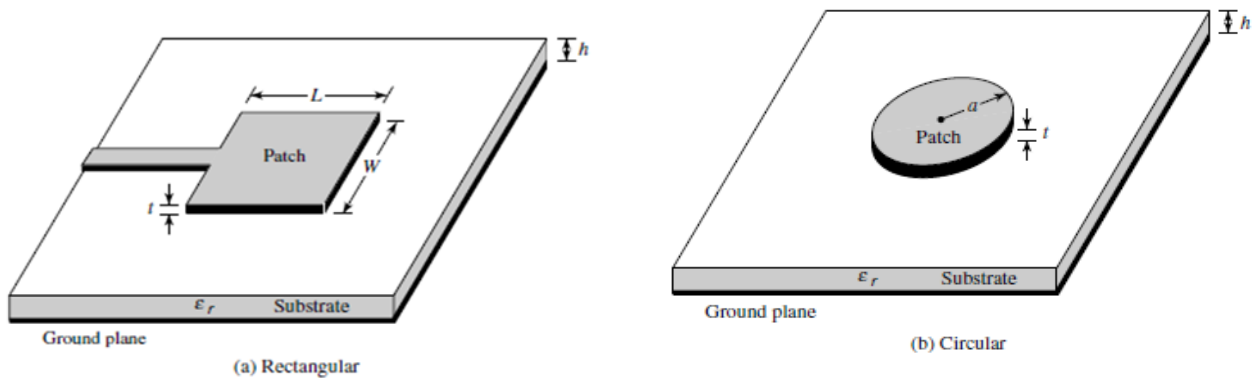


Figura 1.13. Antenas microstrip. (a) Rectangular, (b) Circular.

Fuente: C. Balanis, (2005)

### 1.6.6 Antenas Vivaldi

La antena Vivaldi es una antena de banda ultra ancha del TSA (Antena de ranura cónica) que también se conoce como ranura de antena parche, este tipo de antena entra en el rango de onda viajera, lo que quiere decir que sus parámetros tanto corriente como voltaje pueden ser representadas como ondas viajeras, en 1979 P. J. Gibson ofreció un nuevo tipo de antena cuya ranura abierta exponencialmente que se llamó antena Vivaldi, Es por eso que las antenas Vivaldi también se llaman ETSA (Exponencial cónico Antena de ranura). Las antenas Vivaldi pueden proporcionar anchos de banda a varias octavas. El ancho de banda en este documento pertenece a S11 que es típicamente  $S_{11} < -10$  dB. Los parámetros S11 o SWR se encuentran entre los prominentes en diseño de antena. Generalmente posee alta directividad además de generar patrones de radiación simétricos.

Las antenas del tipo vivaldi se utilizan en diferentes campos tecnológicos y su investigación continúa vigente ya que ofrece muchas ventajas con respecto a otras tecnologías similares.

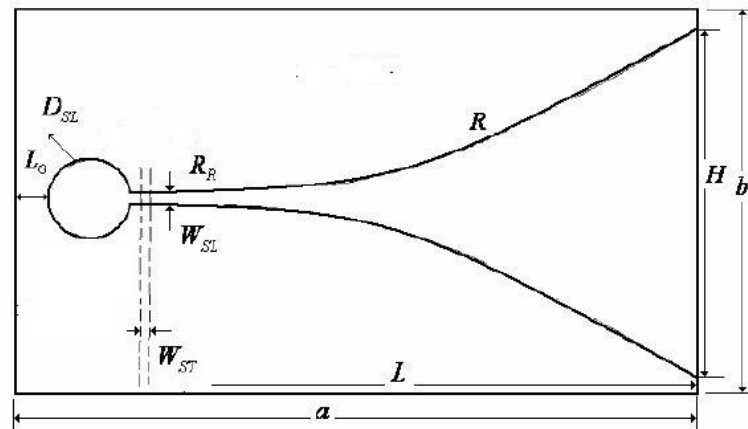


Figura 1.14. Diagrama de dimensiones antena vivaldi

Fuente: J. H. Shafieha, J. Noorinia, and Ch. Ghobadi, (2008)

$W_{SL}$  = ancho del stripline de la antena

$W_{ST}$  = ancho del microstrip

$L_G$  = distancia entre el extremo y cavidad circular de la antena

$D_{SL}$  = diámetro circular de la cavidad del slotline

$R$  = radio de apertura en el slotline

$H$  = largo de la apertura

$b$  = ancho de la antena

$a$  = largo de la antena

$L$  = largo de la sección de apertura

$t$  = grosor del sustrato





## **CAPÍTULO 2**

### **MARCO METODOLÓGICO**

Con respecto al marco metodológico que se utilizará para el presente estudio será el método lógico-deductivo puesto que, se ha de realizar una investigación bibliográfica para recoger y analizar de la literatura existente, características, estándares, datos importantes sobre el diseño de la antena Vivaldi, a fin de determinar las características y parámetros óptimos de diseño y posteriormente optimizar del modelo teórico mediante un simulador de onda completa (COMSOL).

Además del método lógico-deductivo, se utilizará también el método empírico-inductivo, puesto que, se realizará el diseño de la antena en base a modelos matemáticos y simulaciones, para posteriormente utilizar los datos obtenidos en la construcción de la antena vivaldi.

#### **2.1 Método lógico deductivo**

Con el fin de obtener la información más relevante sobre los parámetros óptimos para el diseño de la antena, se realizará una investigación bibliográfica de fuentes científicas online, libros, publicaciones científicas, proyectos de tesis, y una vez consultados se tomará lo más relevante en cuanto a conceptos, métodos que ayuden para el diseño de la antena.

#### **2.2 Método empírico-inductivo**

Una vez recopilada la información mediante la investigación bibliográfica, se utilizará para fundamentar el diseño de la antena, se realizará un modelo teórico que posteriormente servirá para la simulación de parámetros de la antena, con este proceso se logrará encontrar

---

fallas en los parámetros del diseño teórico, con el fin de optimizarlos en la simulación antes de la implementación.

### **2.3 Simulación y Optimización**

Para la simulación se utilizará el software especializado en análisis de diversos tipos de modelos antenas y proyectos en general, el software en cuestión es uno de onda completa, conocido en el mercado como COMSOL Multiphysics® Modeling Software, la aplicación COMSOL es un software para modelado multifísico, es software de ingeniería de alta tecnología.

Con este software se realizarán las simulaciones en las que se optimizarán los diferentes parámetros hasta obtener los resultados deseados, siendo estos posteriormente implementados para las respectivas pruebas de campo, las mismas que serán llevadas a cabo para obtener los patrones de radiación, ganancia y las pérdidas de retorno

## **CAPITULO 3**

### **PROPUESTA**

En este capítulo del presente estudio se abordara como tema principal los parámetros, cálculos y modelos matemáticos que permitirá realizar la antena vivaldi que es el objetivo principal del estudio, una vez realizados los cálculos de modelos matemáticos se podrá ingresar los datos a un simulador de onda completa, en este caso COMSOL, en donde se optimizarán los parámetros para que cumpla el diseño con las características deseadas, este paso es de suma importancia para el estudio, puesto que, los modelos matemáticos proveen datos sin tomar en cuenta algunos parámetros que pudieran causar interferencia en la antena y la optimización de la antena en el simulador permitirá acercarnos mucho más a las características deseadas para la antena a implementar.

### **CONSTRUCCIÓN DE LA ANTENA VIVALDI**

#### **3.1 Diseño de la antena Vivaldi**

Tomando en cuenta consideraciones de carácter técnico recopilados en la investigación bibliográfica, se procederá con la elaboración de los modelos matemáticos de la antena vivaldi, cuya implementación es el objetivo del presente estudio.

Uno de los parámetros más importantes a la hora de diseñar una antena Vivaldi, o cualquier antena con alimentación microstrip es la elección del sustrato, para que cumpla con las especificaciones deseadas, razón por la que, la longitud, el espesor, la constante dieléctrica no son factores que se pueden dejar al azar y deben ser calculados, afortunadamente existe una fórmula postulada por Yngvesson la cual estima que el grosor efectivo del sustrato normalizado

con respecto a la longitud de onda en el espacio vacío (frecuencia central) debe estar entre 0.005 y 0.03, aunque otros estudios la sitúan en 0.006.

Además, se debe tener adicionalmente en cuenta que la constante dieléctrica que se elija repercutirá en el diseño ya que con una constante dieléctrica baja se tendrá en el slotline una impedancia alta lo cual dificultará adaptar la alimentación, y en cuanto al grosor incide en la obtención de lóbulos en la radiación de la antena mientras más grueso es el sustrato los lóbulos aumentaran su magnitud, en cambio sí es delgado los lóbulos tienden a ensancharse.

### 3.1.1 Grosor del sustrato, cálculo del grosor eficaz

Para realizar el cálculo de heff se hará con una fórmula, la cual permitirá verificar si los parámetros escogidos se encuentran dentro de los rangos aceptables.

Los sustratos elegidos como parámetros para las simulaciones son los siguientes el FR4 del tipo RO4003C, RO4725, RO4730 y el FR4 de constante dieléctrica 4,4 con características que se detallan en las Figuras 3.1, 3.2 y 3.3 obtenida de Roger corporation.

Cabe anotar que estos tipos de sustratos se utilizaran para las simulaciones de los cuales se tomará posteriormente el que mejor y más accesible, y que responda a las pruebas para la respectiva implementación.

Property	Typical Value		Direction	Units	Condition	Test Method
	RO4003C	RO4350B				
Dielectric Constant, $\epsilon_r$ , Process	3.38 ± 0.05	(B) 3.48 ± 0.05	Z	--	10 GHz/23°C	IPC-TM-650 2.5.5.5 Clamped Stripline
(D) Dielectric Constant, $\epsilon_r$ , Design	3.55	3.66	Z	--	8 to 40 GHz	Differential Phase Length Method
Dissipation Factor tan, $\delta$	0.0027 0.0021	0.0037 0.0031	Z	--	10 GHz/23°C 2.5 GHz/23°C	IPC-TM-650 2.5.5.5
Thermal Coefficient of $\epsilon_r$	+40	+50	Z	ppm/°C	-50°C to 150°C	IPC-TM-650 2.5.5.5
Volume Resistivity	1.7 X 10 <sup>10</sup>	1.2 X 10 <sup>10</sup>		MΩ•cm	COND A	IPC-TM-650 2.5.17.1
Surface Resistivity	4.2 X 10 <sup>9</sup>	5.7 X 10 <sup>9</sup>		MΩ	COND A	IPC-TM-650 2.5.17.1
Electrical Strength	31.2 (780)	31.2 (780)	Z	KV/mm (V/mil)	0.51mm (0.020")	IPC-TM-650 2.5.6.2
Tensile Modulus	19,650 (2,850) 19,450 (2,821)	16,767 (2,432) 14,153, (2,053)	X Y	MPa (ksi)	RT	ASTM D638
Tensile Strength	139 (20.2) 100 (14.5)	203 (29.5) 130 (18.9)	X Y	MPa (ksi)	RT	ASTM D638
Flexural Strength	276 (40)	255 (37)		MPa (kpsi)		IPC-TM-650 2.4.4
Dimensional Stability	<0.3	<0.5	X,Y	mm/m (mils/inch)	after etch +E2/150°C	IPC-TM-650 2.4.39A

Figura 3.1.Datasheed de sustratos para simulación

Fuente: ROGER Corpotation.com, (2020)

Property	Typical Value [1]	Typical Value [1]	Typical Value [1]	Direction	Units	Condition	Test Method
	RO4725JXR	RO4730JXR	RO4730G3				
Dielectric Constant, $\epsilon_r$ Process	2.55 ± 0.05	3.00 ± 0.05	3.00 ± 0.05	Z		10 GHz/23°C	IPC-TM-650, 2.5.5.5
Dielectric Constant, $\epsilon_r$ Design [3]	2.64	2.98	2.98	Z		1.7 GHz - 5 GHz	Differential Phase Length Method
Dissipation Factor [4]	0.0026	0.0027	0.0029	Z		10 GHz/23°C	IPC-TM-650, 2.5.5.5
	0.0022	0.0023	0.0023			2.5GHz	
Thermal Coefficient of $\epsilon_r$	+34	+32	+26	Z	ppm/°C	-50°C to 150°C	IPC-TM-650, 2.5.5.5
Volume Resistivity (0.030")	2.16 X 10 <sup>8</sup>	5.96 X 10 <sup>8</sup>	4.78 x 10 <sup>8</sup>		MΩ-cm	COND A	IPC-TM-650, 2.5.17.1
Surface Resistivity (0.030")	4.8 X 10 <sup>7</sup>	1.68 X 10 <sup>8</sup>	2.78 x 10 <sup>8</sup>		MΩ	COND A	IPC-TM-650, 2.5.17.1
PIM [2]	-166	-164	-165		dBc	50 ohm 0.060"	43dBm 1900MHz
Electrical Strength (0.030")	630	721	762	Z	V/mil		IPC-TM-650, 2.5.6.2
Flexural Strength	MD	121 (17.5)	167 (24.2)	209 (30.3)	MPa (kpsi)	RT	ASTM D790
	CMD	92 (13.3)	135 (19.6)	152 (22.1)			
Dimensional Stability	<0.4	<0.4	<0.4	X,Y	mm/m	after etch +E2/150°C	IPC-TM-650, 2.4.39A

Figura 3.2.Datasheet de sustratos para simulación

Fuente: ROGER Corpotation.com, (2020)

Standard Thicknesses			Standard Panel Sizes:		Standard Copper Cladding
RO4725JXR	RO4730JXR	RO4730G3			
LoPro Copper 0.0307" (0.780mm) 0.0607" (1.542mm)	LoPro Copper 0.0207" (0.526mm) 0.0307" (0.780mm) 0.0407" (1.034mm) 0.0607" (1.542mm)	LoPro Copper 0.0057" (0.145mm) 0.0107" (0.272mm) 0.0207" (0.526mm) 0.0307" (0.780mm) 0.0407" (1.034mm) 0.0607" (1.542mm)	ED Copper 0.0200" (0.508mm) 0.0300" (0.762mm) 0.0400" (1.016mm) 0.0500" (1.270mm) 0.0600" (1.524mm)	12" X 18" (305 X 457 mm) 24" X 18" (610 X 457 mm) 24" X 36" (610 X 915 mm) 48" X 36" (1.224m X 915mm) Larger sizes may be available	LoPro Reverse Treated EDC Foil ½ oz (18µm), 1 oz (35µm)  Standard EDC (RO4730G3 only) ½ oz (18µm), 1 oz (35µm)

Figura 3.3. Diferentes tipos de grosores de sustratos

Fuente: ROGER Corporation.com, (2020)

Se comprobará con cada sustrato expuesto anteriormente para determinar si es útil para el presente estudio, ejemplo,

$$h_{eff} = \frac{(\sqrt{3.3} - 1)}{0.0857142} * 0.001524 = 0.01451$$

$$0.005 \leq h_{eff} \leq 0.06$$

$$0.005 \leq 0.01451 \leq 0.06$$

$$h_{eff} = \frac{(\sqrt{\epsilon_r} - 1)}{\lambda_0} * h$$

Ecuación 3.1. Grosor efectivo

Fuente: K C. Gupta (1996)

Tabla 3.1 Calculo de heff para los sustratos

2,55	0.010612
3	0.013015
3.3	0.01451
4.4	0.019515

Fuente: Elaborado por el autor

Después de realizar los cálculos para el grosor de 1.524 mm se puede ver que todas las constantes dieléctricas cumplen con lo establecido por la formula, así que cualquiera que se escoja estará dentro de los rangos aceptables.

### 3.1.2 Diseño teórico del Slotline (Ranura)

Según, Cohn (1968) un slotline es una estructura de transmisión en antenas planares, su configuración básica consiste en un sustrato dieléctrico gravado como una angosta ranura en la metalización del mismo sustrato dieléctrico.

Un slotline puede también incluir un microstrip gravado en la tierra del sustrato, este tipo de configuración permite flexibilidad en el diseño de circuitos microondas.

En el slotline las ondas se propagan a través de la ranura, esto hace que el campo eléctrico que cruce a través de la metalización del sustrato dieléctrico, este modo de propagación es non-TEM, por lo que la propagación no está solamente en el sustrato sino se propaga a través del espacio (aire).

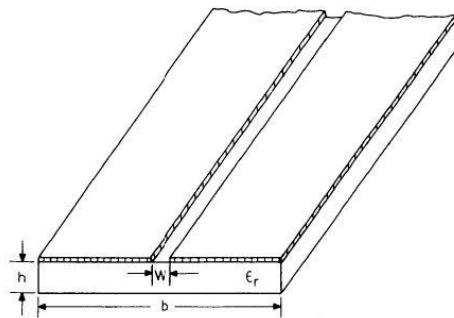


Figura 3.4. Configuración Slotline o ranura

Fuente : K. C. Gupta, (1996)

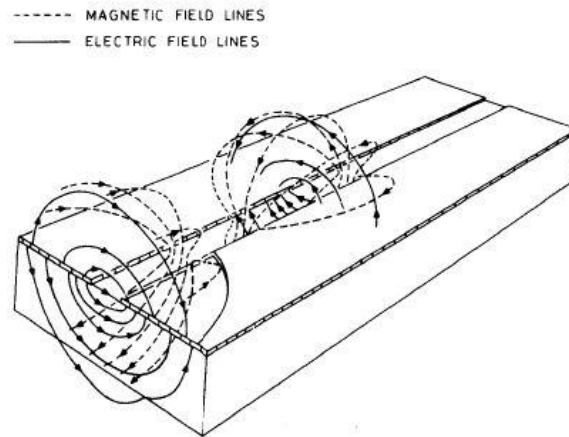


Figura 3.5. Campos magnéticos y electromagnéticos en un slotline

Fuente: K. C. Gupta, (1996)

Existen varios tipos de análisis y diseños de slotlines, pero como se mencionó anteriormente para el método de propagación de un slotline las ondas se propagan por la ranura y por el aire por lo que se debe calcular su  $\epsilon_{effs}$ , para lo que se utilizará la siguiente ecuación

$$(a) \quad \epsilon_{effs} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} \qquad (b) \quad \frac{\lambda_s}{\lambda_0} = \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}}$$

Ecuación 3.2. (a)Constante dieléctrica efectiva, (b)longitud de onda

Fuente: K. C. Gupta (1996)

Para empezar, se debe calcular la longitud de onda guiada a través de la ranura (slotline) para lo cual se necesitarán parámetros que se han mencionado con anterioridad al iniciar este estudio, como son, la constante dieléctrica, el grosor del sustrato mencionado en el cálculo de  $\epsilon_{effs}$  de la ecuación 3.2. así como la frecuencia de trabajo a la que resonara nuestra antena, para lo que se utilizarán las siguientes fórmulas que se han obtenido de la literatura existente (K. C. Gupta 1996)

$$\frac{\lambda_s}{\lambda_0} = 1,045 - 0,365 \ln(\epsilon_r) + \frac{6,3 \left(\frac{w}{h}\right) \epsilon_r^{0,945}}{238,64 + 100 \frac{w}{h}} - \left[ 0,148 - \frac{8,81(\epsilon_r + 0,95)}{100\epsilon_r} \right] \ln\left(\frac{h}{\lambda_0}\right)$$

Ecuación 3.3. Longitud de onda del slotline

Fuente: K. C. Gupta (1996)

$$\begin{aligned}
Z_{0s} = & 60 + 3,69 \operatorname{Sen} \left( \frac{(\epsilon_r - 2,22)\pi}{2,36} \right) + 133,5 \operatorname{Ln}(10\epsilon_r) \sqrt{\frac{w}{\lambda_0}} \\
& + 2,81 [1 - 0,011\epsilon_r (4,48 + \operatorname{Ln}(\epsilon_r))] \frac{w}{h} \operatorname{Ln} \left( \frac{100h}{\lambda_0} \right) \\
& + 131,1 (1,028 - \operatorname{Ln}(\epsilon_r)) \sqrt{\frac{w}{\lambda_0}} + 12,48 (1 \\
& + 0,18 \operatorname{Ln}(\epsilon_r)) \frac{\frac{w}{h}}{\epsilon_r - 2,06 + 0,85 \frac{w^2}{h}}
\end{aligned}$$

Ecuación 3.4. Impedancia del slotline

Fuente: K. C. Gupta (1996)

### 3.1.3 Diseño teórico de la línea microstrip

Uno de los principales requerimientos para que una estructura de transmisión sea adecuada como un circuito de elementos en circuitos integrados de microondas (MICs), es que la estructura sea de configuración planar. Esto implica que debe ser determinada en dimensiones de un solo plano, por ejemplo, el ancho de una línea microstrip en un sustrato dieléctrico debe ser ajustado para controlar la impedancia, esto quiere decir que cuando el diseño del circuito puede ser controlado por parámetros en una sola dimensión puede ser llevado fuera para ser fabricado por técnicas de litografía, esto abarata costos.

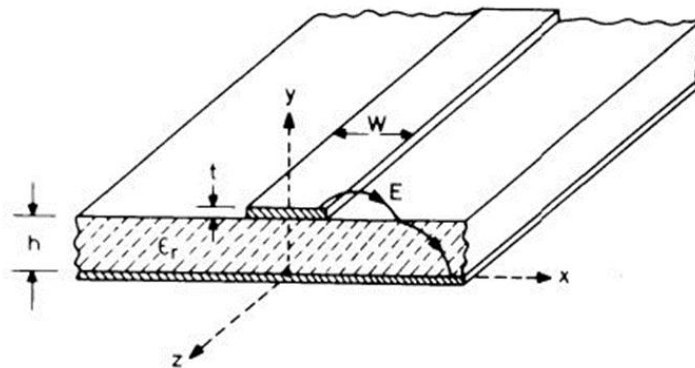


Figura 3.6. Configuración de una línea microstrip

Fuente : K. C. Gupta, (1996)



$$\epsilon_{effm} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2\sqrt{1 + 12\frac{h}{W}}}$$

Ecuación 3.5. Epsilon efectivo del microstrip

Fuente: K. C. Gupta (1996)

La longitud de onda se puede obtenerla con la siguiente formula

$$\lambda_m = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_{effm}}}$$

Ecuación 3.6. Longitud de onda del microstrip

Fuente: K. C. Gupta (1996)

Se debe tener en cuenta, que para el diseño del microstrip, la antena que debe acoplarse fácilmente a las demás impedancias por lo que se fijará la impedancia característica a  $50 \Omega$ , y para el cálculo de la misma se puede utilizar las siguientes formulas obtenidas de la literatura existente. (K. C. Gupta 1996)

$$\frac{W}{h} = \begin{cases} \frac{8e^A}{e^{2A} - 2} & \text{para } \frac{W}{h} < 2 \\ \frac{2}{\pi} \left[ B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} \left\{ \ln(B - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r} \right\} \right] & \text{para } \frac{W}{h} > 2 \end{cases}$$

$$\text{donde } A = \frac{Z_{0m}}{60} \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1}} \left( 0.23 + \frac{0.11}{\epsilon_r} \right)$$

$$B = \frac{377\pi}{2Z_{0m}\sqrt{\epsilon_r}}$$

Ecuación 3.7. Fórmula para calcular el ancho del microstrip

Fuente: K. C. Gupta (1996)

Para fines de estudio en la práctica también se puede obtener datos de la línea microstrip con la ayuda de una herramienta especializada que es de código abierto (Open source) llamada

QUC's estudio, misma que al ingresar los datos de parámetros ayudara con los resultados para el diseño de la antena.

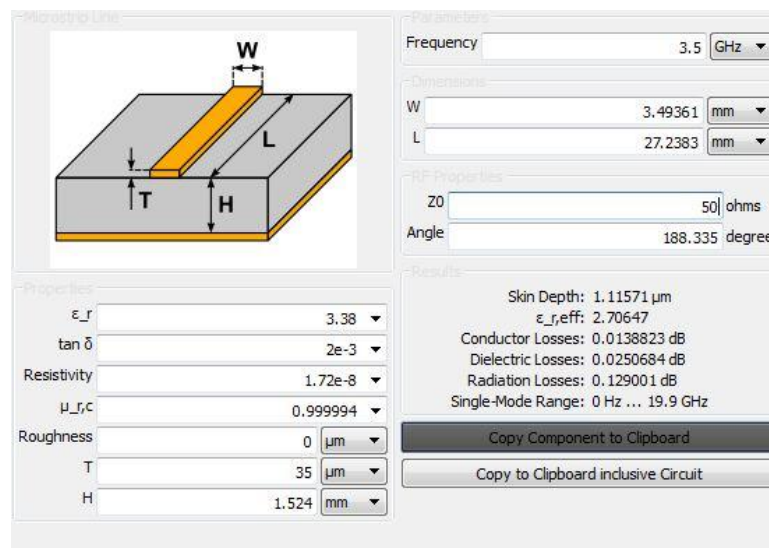


Figura 3.7. Cálculos de una línea de transmisión microstrip realizada en Qucs studio

Fuente: Qucs Studio, Captura del autor

### 3.2 Dimensiones teóricas de la antena vivaldi

#### Modelo matemático para la construcción de la antena

En teoría, las antenas de ranura cónica generalmente tienen un ancho de banda amplio, alta directividad y pueden producir un patrón de radiación simétrica. También es una estructura de alimentación simple y fácil de fabricar. Para la realización de los modelos matemáticos se debe entender que estos son interpretaciones de las variables más relevantes que se investigan para conocer la incidencia de los mismos dentro de un proyecto.

Para el desarrollo de los modelos matemáticos primero se debe identificar las variables principales como son el análisis de la ranura de la antena también conocida como slotline o ranura cónica, esta se construye sobre la metalización de un sustrato cuya constante dieléctrica también es relevante para el estudio.

El diseño de la ranura es se lo realiza en la capa conductora de cobre u otro material empezando por el ancho mínimo de la ranura, ranura que se expandirá exponencialmente hasta

su rango máximo, el principio más estrecho de la ranura puede alimentarse con una línea microstrip, para determinar estos parámetros se utilizará las ecuaciones consultadas en la literatura existente

Para obtener las dimensiones que tendrá la antena se utilizará las siguientes formulas.

$$\lambda g = \frac{c}{f_{\min} \sqrt{\epsilon_r}}$$

Ecuación 3.8. Apertura teórica máxima

Fuente: N. hamzah, K. A. othman, (2011)

Donde

$\lambda g$  = Apertura teórica máxima

$f_{\min}$  = frecuencia mínima

$C$  = velocidad de la luz

$\epsilon_r$  = constante dieléctrica del sustrato

Para calcular el ancho máximo se empleará la siguiente fórmula

$$W_{\max} = \frac{\lambda_g}{2}$$

Ecuación 3.9. Ancho máximo de antena

Fuente: N. hamzah, K. A. othman, (2011)

Y para el ancho menor la siguiente fórmula

$$W_{\min} = \frac{C}{f_0 \sqrt{\epsilon_r}}$$

Ecuación 3.10. Ancho mínimo de antena

Fuente: N. hamzah, K. A. othman, (2011)

Del slotline o ranura cónica es la que le da la forma característica a la antena e incidirá en la forma que radiará la antena, la longitud del cono dependerá en gran medida de la longitud de onda de la frecuencia más baja y la longitud de la antena.

Estos parámetros pueden ser calculados con las fórmulas que se detallan a continuación

$$C1 = \frac{y_2 - y_1}{e^{RX_2} - e^{RX_1}} \quad C2 = \frac{e^{RX_2} y_1 - e^{RX_1} y_2}{e^{RX_2} - e^{RX_1}}$$

Ecuación 3.11. Calculo de constantes para la exponencial de la ranura

Fuente: S. Shukla, N. Upadhyay, S. Sharma and N. Hemrajani, (2013)

$$Y = C1e^{Rx} + C2$$

Ecuación 3.12. Fórmula para la curva exponencial de la ranura

Fuente: S. Shukla, N. Upadhyay, S. Sharma and N. Hemrajani, (2013)

Donde:

C1 y C2 son constantes

R = factor exponencial

$y_1, y_2$  son los puntos en que empieza y termina el slotline

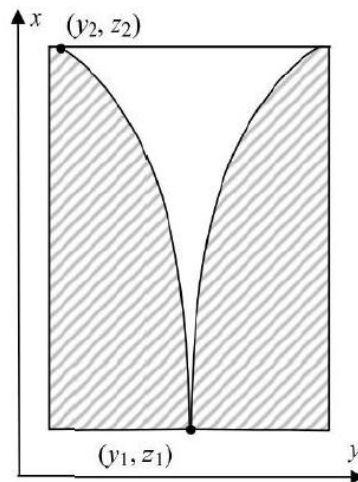


Figura 3.7. Puntos de principio y fin teórico del slotline

Fuente: ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА, (2017)

Para un cálculo aproximado de los parámetros de la antena vivaldi se usarán las siguientes fórmulas.

Para lo cual se necesita el rango de frecuencia para el cual funcionara la antena vivaldi y como se especifica en los apartados anteriores es:

Frecuencia central	Frecuencia máxima	Frecuencia Mínima
F0=3.5 GHz	Fmax= 3.850 GHz	Fmin=3.150 GHz

$$\lambda_{\max} = \frac{C}{f_{\min}}$$

$$\lambda_{\min} = \frac{C}{f_{\max}}$$

$$L \geq \frac{\lambda_{\min} + \lambda_{\max}}{2}$$

$$W \geq \frac{\lambda_{\min} + \lambda_{\max}}{4}$$

Ecuación 3.13. Fórmulas para el cálculo de dimensiones aproximadas de la antena

Fuente: R. Dhawan and G. Kaur (2016)

Para los valores aproximados de L Y W que se tomarán como referencia para las simulaciones están en el siguiente desglose de datos, cabe anotar que los valores deben ser mayores a los calculados.

Tabla 3.2 Dimensiones calculadas para la antena

<b>L</b>	<b>&gt;87mm</b>
<b>W</b>	<b>&gt;44mm</b>

Fuente: Elaborado por el autor

Para la apertura radiante de la antena que se calculará con las formulas siguientes, que fueron definidas anteriormente para el estudio.

$$\lambda_g = \frac{C}{f_{\min} \sqrt{\epsilon_r}}$$

$$W_{\min} = \frac{C}{F_0 \sqrt{\epsilon_r}}$$

$$W_{\max} = \frac{\lambda_g}{2}$$

Ecuación 3.14. Fórmulas para el cálculo de la apertura radiante

Fuente: N. Hamzah, K. A. Othman, (2011)

Tabla 3.3 Valores obtenidos para la apertura radiante

Constante dieléctrica	$\lambda_g$	<b>Wmax</b>	<b>Wmin</b>
2,55	59.6 mm	53.6 mm	29.8 mm
3	54.9 mm	49.48 mm	27.45mm
3,38	51.8 mm	46.62 mm	25.9 mm
4,4	45.4 mm	40.84 mm	22.7 mm

Fuente: Elaborado por el autor

De los valores descritos se han de tomar como referencia para el diseño de la simulación de la antena en COMSOL, ya que los rangos de las dimensiones son bastante parecidos, se tomará un valor promedio de 50 mm para la apertura de la antena.

### 3.3 Diseño de la antena Vivaldi

Con los datos y parámetros obtenidos con los cálculos anteriormente descritos, se puede empezar con el diseño de la antena en un software especializado de simulación de onda completa, se optará, como se ha mencionado anteriormente, por la utilización de un programa llamado COMSOL por su versatilidad a la hora de diseñar los proyectos con antenas para posteriormente imprimir los resultados del estudio.

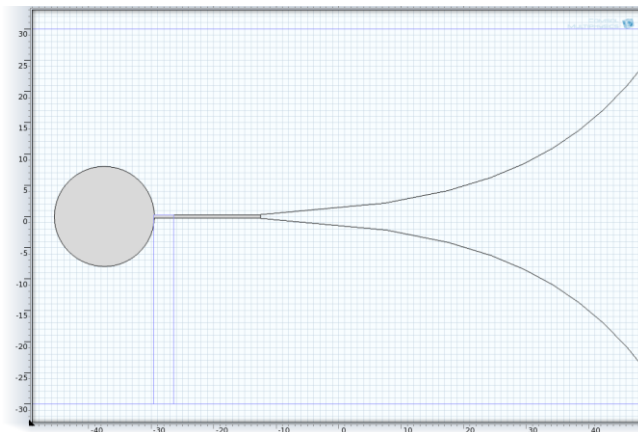


Figura 3.8. Medidas de Antena Vivaldi (COMSOL)

Fuente: Captura del autor

---

### **3.3.1 Software para la simulación**

De la gran variedad de software para simulación se puede obtener gran información en cuanto a ventajas y desventajas a la hora de utilizarlos, se mostrarán los diferentes tipos de programas que pueden ser de gran utilidad para este tipo de proyectos.

#### **Antena Magus**

Antena Magus es un software para acelerar el proceso de diseño y modelado de una antena, es un software que sirve para el mejoramiento de antenas tanto para ingenieros como para estudiantes, ya que ofrece gran variedad de opciones para el desarrollo de los proyectos, la mayor desventaja es que es demasiado costoso.

#### **Software Ansys HFSS**

Es un software de simulación de onda completa que provee fiabilidad, calidad en los procesos de optimización, puede realizar análisis de interferencias radio magnéticas, además de permitir análisis completos de radiofrecuencia, la mayor desventaja de HFSS es la dificultad que ofrece al momento de manipular el software y que algunas de sus características deben adicionarse posteriormente, no posee una gran librería.

#### **COMSOL Multiphysics® Modeling Software**

Es un software que ofrece capacidades superiores para la optimización y diseño de dispositivos de radiofrecuencia, entre las características más importantes está que puede simular el parámetro S y coeficientes de reflexión, VSWR, todos simulados en una gran variedad de frecuencias, además su interfaz es bastante intuitiva a la hora de realizar los proyectos, por lo que este software ayudará en gran medida a la obtención de datos para el presente proyecto y las gráficas que se obtendrán ayudarán bastante en el análisis de parámetros de la antena posteriormente en el Capítulo 4.

Una vez determinado el software para la simulación se ingresarán los datos para realizar la respectiva simulación

Tabla 3.4 Dimensiones para la simulación

<b>L</b>	<b>100 mm</b>
<b>W</b>	60 mm
<b>Apertura</b>	50 mm
<b>Ws</b>	0.5 mm
<b>Radio</b>	8 mm
<b>Union Slotline</b>	20 mm

Fuente: Elaborado por el autor

### 3.3 Simulación de los modelos teóricos obtenidos

El primer paso antes de comenzar con el diseño de una antena en el simulador de onda completa COMSOL es ingresar los parámetros a utilizar para cada constante dieléctrica que se ha escogido para el proyecto, al tener todos los cálculos necesarios con las fórmulas mencionadas se procederá a ingresar los datos en el simulador.

#### Uso de COMSOL Multiphysics® Modeling Software

Como ya se ha mencionado todas las características que ofrece para la realización del proyecto, estas serán de gran utilidad para realizar las simulaciones.

Primero se debe configurar los parámetros básicos el tipo de proyecto, en este caso radiofrecuencia, luego ondas electromagnéticas en el dominio de la frecuencia se agrega el proyecto, se inicia un estudio de proyecto en el dominio de frecuencia y aceptar, ya se puede iniciar la configuración básica, como las unidades que se manejará todo el diseño en todo momento, en este caso mm (milímetros).

Se puede poner algunas variables para facilitar el diseño en definiciones globales esto permitirá que estén listas para utilizarlas.



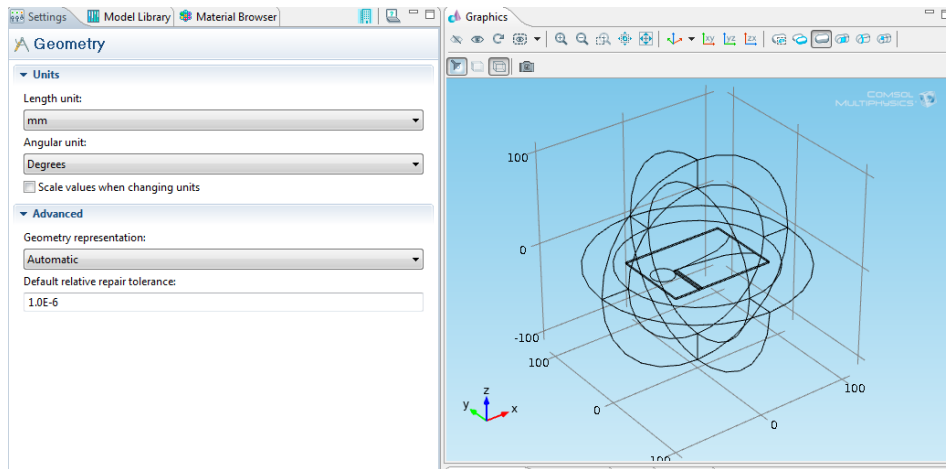


Figura 3.9. Unidades de medida para el diseño

Fuente: Captura De Comsol (realizada por el autor)

Con las medidas propuestas en los apartados anteriores se coloca las medidas que tendrá el sustrato tanto en L, W,  $W_s$  (inicio de ranura), radio y apertura radiante, con estos datos se obtendrá la forma básica de la antena a simular, cabe anotar que se debe realizar el diseño de cada figura geométrica por separado y unirlos posteriormente para que funcionen como un todo.

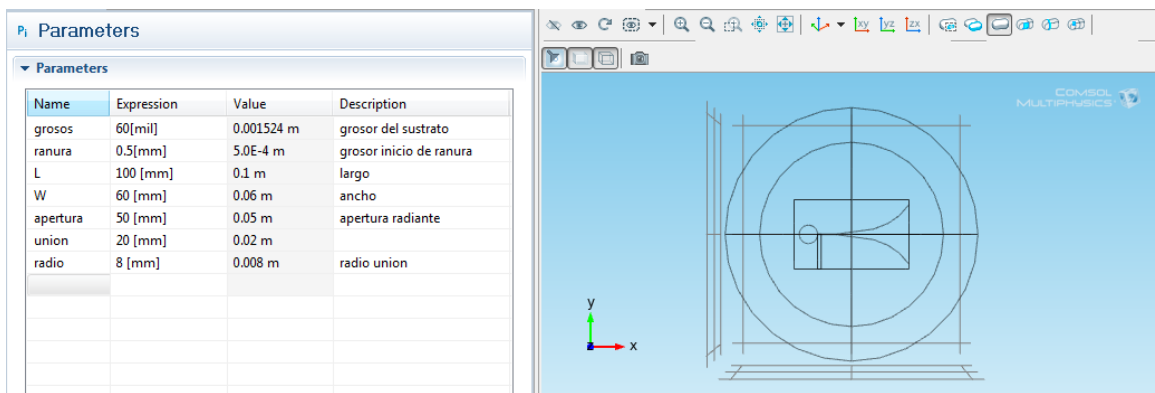


Figura 3.10. Medidas generales para el diseño de antena vivaldi

Fuente: Captura Comsol Software (Realizada por el autor)

Se continuará con los límites exteriores de la simulación que comprende los dominios de radiación y campo electromagnéticos los cuales servirán posteriormente para la obtención de resultados y gráficas de la antena, este paso es de suma importancia puesto que, está cubierta será la que hará las funciones de una cámara anecoica.

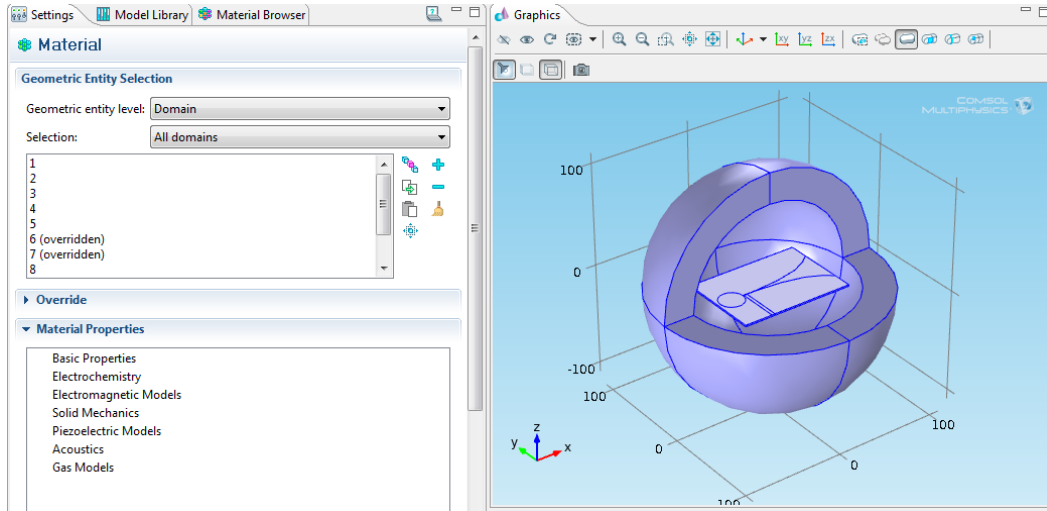


Figura 3.11. Dominio de radiación

Fuente: Captura Comsol Software (Realizada por el autor)

Se escogerá los materiales y pondrá una línea de alimentación virtual para dar inicio a la simulación, los materiales que se utilizaran como ya se ha dicho, es el sustrato FR4 de 4.4 y grosor de 1.524 mm (1.6), y la alimentación virtual a 50 ohms.

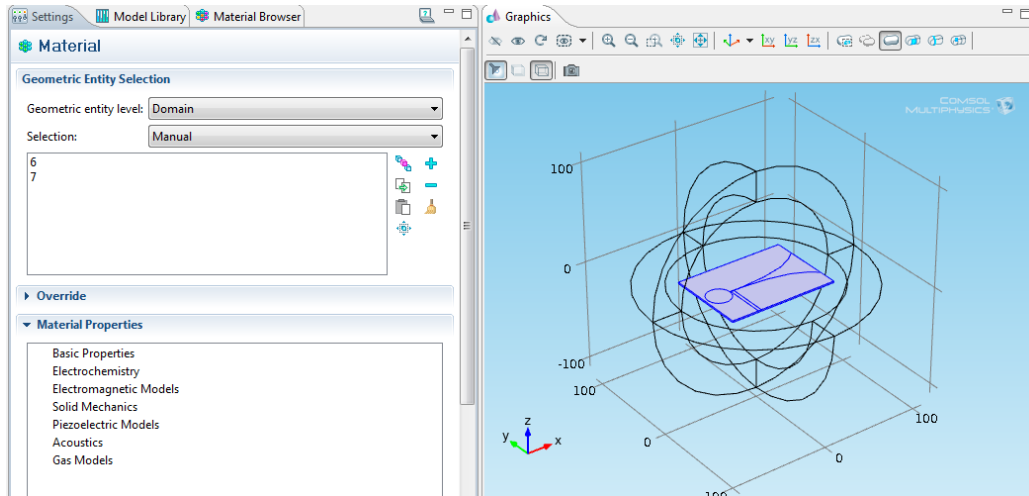


Figura 3.12. Material y conector virtual para la simulación

Fuente: Captura Comsol Software (Realizada por el autor)

Antes de realizar el cálculo final de parámetros para la simulación se verificará la construcción general de la simulación y los diferentes parámetros, la verificación se la realiza con el parámetro estudio que es el que calculará todos los datos para cada frecuencia los que conformará la solución 1 de la que se desprenderá cada una de las gráficas obtenidas.

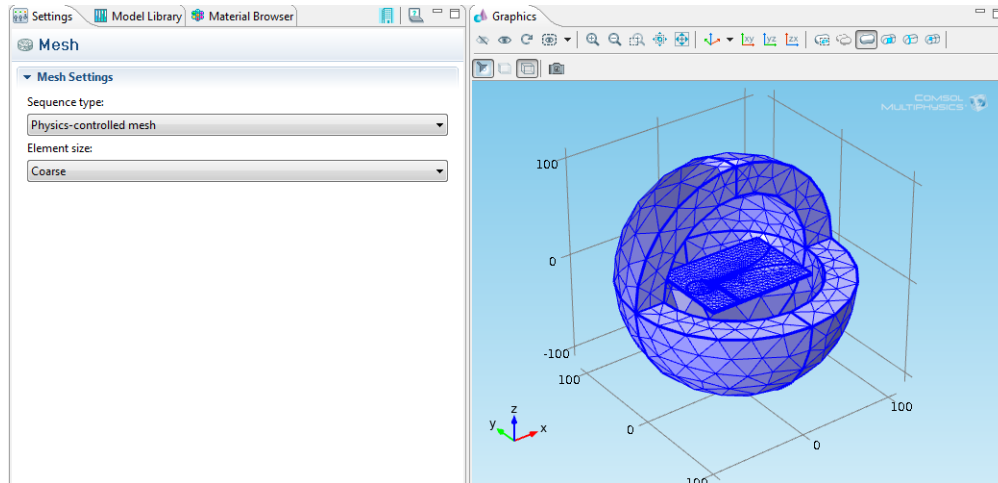


Figura 3.13. Malla entramado electromagnético de la antena vivaldi

Fuente: Captura Comsol Software (Realizada por el autor)

### 3.5 Presupuesto para el proyecto

En cuanto al presupuesto para el presente proyecto, al ser una antena vivaldi de bajo costo, para la implementación de la misma, se optó por el uso de un sustrato FR4 con una constante dieléctrica de 4,4 con pérdidas tangenciales de 0.2 y grosor de 1,524 mm por ser de fácil adquisición y disponibilidad en el mercado.

Además del sustrato FR4 será necesario conectores SMA, cloruro férrico, marcador indeleble, estaño, pasta para soldar, además de otros gastos que se detallaran a continuación.

Tabla 3.5 Presupuesto y comparación de precios

Producto	Precio de compra en megatronic	Precio de otro proveedor
Sustrato FR4	8 USD	10 USD
Conectores SMA	5 USD	6 USD
Cloruro férrico	1 USD	1 USD
Marcador indeleble	1,50 USD	2 USD
Estaño	2 USD	2 USD

Pasta para soldar	1 USD	1 USD
Sierra para corte	5 USD	5 USD
Cautín 60w	10 USD	15 USD
Movilización	30 USD	30 USD
Envío online	3 USD	10 USD
Total	66,5 USD	82 USD

Fuente: Elaborado por el autor

Como se puede observar el costo de implementación para la antena es relativamente bajo y esta es otra ventaja de las antenas vivaldi su bajo costo de producción.

A continuación, se detalla el tiempo empleado para el presente proyecto.

### Tiempo dedicado para realizar el proyecto

Tabla 3.6 Tiempo utilizado para realizar el proyecto

<b>Actividad</b>	<b>Tiempo</b>
Investigación en fuentes bibliográficas e internet	50 horas
Asesorías	20 horas
Desarrollo teórico del proyecto	20 horas
Desarrollo de simulaciones	30 horas
Implementación del proyecto	12 horas
Redacción del presente proyecto	72 horas
Total	204 horas

Fuente: Elaborado por el autor

## CAPITULO 4

### IMPLEMENTACIÓN

#### 4.1 Desarrollo

Después de la realización de las simulaciones pertinentes y obtención de datos de las mismas se ha de usar estos datos para escoger la mejor opción para la implementación de la antena, la cual debe cumplir con las especificaciones técnicas y de factibilidad para que se ajuste a las necesidades de este proyecto, razón por la que se empezará con una breve descripción de los materiales a utilizarse.

#### Sustrato FR4

El sustrato a utilizarse será un Sustrato FR4 doble cara, con una constante dieléctrica de 4.4, cuyo grosor es de 1.524 mm y con pérdidas tangenciales de 0.2, esta elección responde mayormente a la disponibilidad actual del sustrato para las pruebas e implementación.



Figura 4.1. Sustrato FR4 doble cara

Fuente: [spanish.alibaba.com](http://spanish.alibaba.com)

Tabla 4.1 Resumen de datos del sustrato FR4

<b>Constante dieléctrica</b>	<b>4.4</b>
<b>Perdidas tangenciales</b>	<b>0.2</b>
<b>Grosor</b>	<b>1.524 mm</b>

Fuente: Elaborado por el autor

### Conectores SMA

Los conectores que serán necesarios para la implementación serán un conector de RF tipo SMA hembra para borde impreso. Ideales para impresos de 1.6 mm de espesor. Usado comúnmente para conexiones de Antena, en aplicaciones como GPS, Telemetría, control remoto, celular, etc.



Figura 4.2. Conectores SMA

Fuente: Electrolab.co

Tabla 4.2 Características técnicas del SMA

<b>Impedancia</b>	<b>50 Ohm</b>
<b>Frecuencia</b>	<b>0 a 6 GHz</b>
<b>Longitud</b>	<b>13 mm</b>
<b>Longitud de la punta</b>	<b>4 mm</b>
<b>Material del conector</b>	<b>Cobre</b>

Fuente: Elaborado por el autor

### **Impresora láser o marcador indeleble**

Para el grabado en la placa se puede utilizar un proceso de grabado por calor utilizando una impresora láser y marcador indeleble, aunque el proceso de impresión es mucho más fácil y versátil, usar un marcador permite gran libertad para desarrollar el diseño en el sustrato, pero también puede causar algún fallo en el diseño.

### **Cloruro Férrico**

Ácido utilizado para el grabado de circuitos impresos cuya activación es realizada con agua y además se debe tomar algunas medidas de seguridad como el uso de guantes, gafas y recipientes plásticos resistentes, porque es bastante corrosivo, motivo por el cual se debe tener cuidado al en el tiempo de exposición con el sustrato.



*Figura 4.3. Cloruro Férrico*

Fuente: Importronic.com

## **4.2 Implementación de la antena Vivaldi**

Para la construcción misma de la antena se realizará siguiendo la forma más habitual y artesanal, se utilizará los materiales antes descritos para el efecto.

El grabado se los realiza en el sustrato FR4 para luego llevarlo a el cloruro férrico y posteriormente realizar el grabado de la antena en el sustrato.

Se ha de considerar los métodos disponibles para la construcción de la antena Vivaldi en los cuales figura método de grabado por marcador indeleble y por otro lado impresión láser que se graba en la placa por medio de calor, ambos métodos comprobados y eficaces a la hora de realizar este tipo de proyectos.

Para facilitar las mediciones de parámetros se realizan dos antenas iguales las mismas que seguirán el método a continuación descrito.

1. Limpieza para mejorar el grabado de la antena en el sustrato, este paso es bastante importante ya que cualquier impureza dificultará el grabado en la placa ocasionando reacciones indeseables para el proyecto.



Figura 4.1. Limpieza del sustrato para el grabado

Fuente: Realizado por el autor

2. Grabado con retoque de tinta para que el ácido retire el material sobrante, el material una vez limpio se marcara con el diseño propuesto para su grabado, como se ha dicho antes, el marcador permite libertad a la hora de realizar el diseño, pero hay que tener mucho cuidado para que el gravado sea uniforme y no cause problemas al ahora de sumergirlo en el ácido (cloruro férrico).



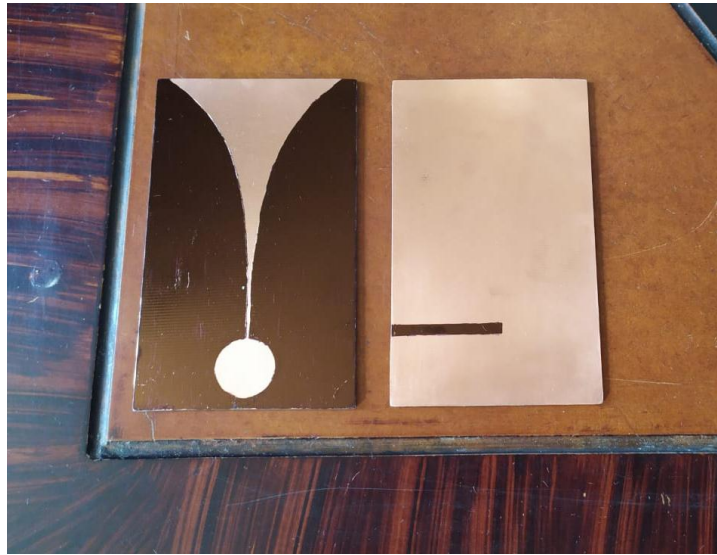


Figura 4.2. Grabado de tinta en sustrato

Fuente: Realizado por el autor

3. Antena terminada limpia y con sus respectivos componentes para la medición.



Figura 4.3. Antena terminada

Fuente: Realizado por el autor

### 4.3 Resultados de la simulación

Con los datos obtenidos se ha obtenido los siguientes resultados que se dividirán por sustratos estudiados para mejorar la visualización de los resultados

Tabla 4.3 Sustrato para simulación constante dieléctrica de 4.4

<b>Constante dieléctrica</b>	<b>3.38</b>
<b>Grosor del sustrato</b>	<b>1.524 mm</b>

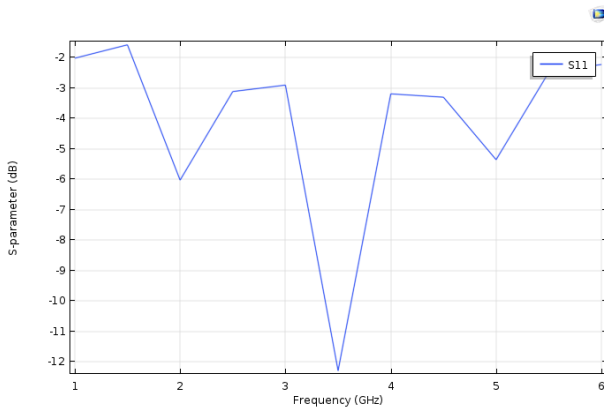


Figura 4.1. Parámetro S (3.38)

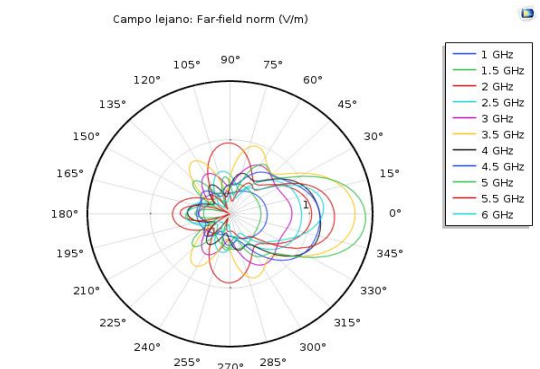


Figura 4.2. Patrones de radiación (3.38)

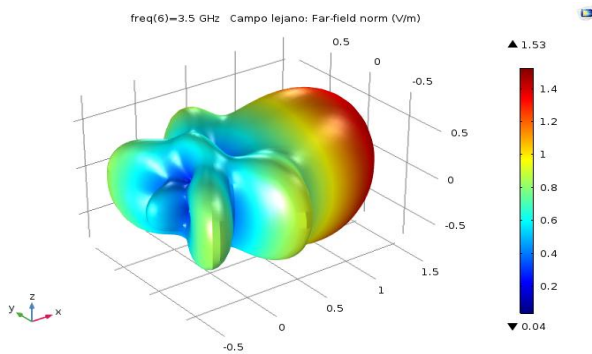


Figura 4.3. Patrón de radiación 3D (3.38)

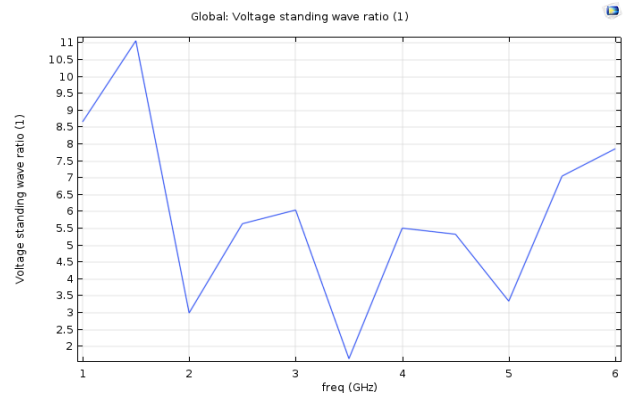


Figura 4.4. Gráfica VSWR (3.38)

Fuente: Capturas realizadas por el autor desde COMSOL

En las gráficas expuestas se puede observar que el parámetro S11 no es tan bueno, pero es aceptable, pues está en el rango de -12 dB, su ancho de banda es aproximadamente de 300

MHz a -10 dB, y el VSWR de la antena a 3.5 GHz es menor a 2, por lo que esta simulación no cumple con las expectativas del proyecto.

Tabla 4.4 Sustrato para simulación constante dieléctrica de 4.4

<b>Constante dieléctrica</b>	<b>4.4</b>
<b>Grosor del sustrato</b>	<b>1.524 mm</b>

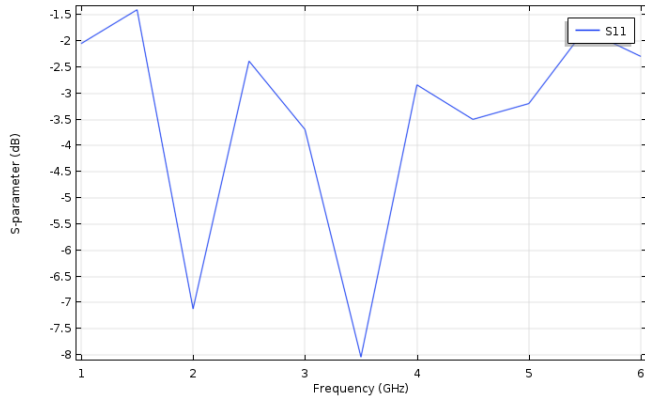


Figura 4.6. Parámetro S11 (4.4)

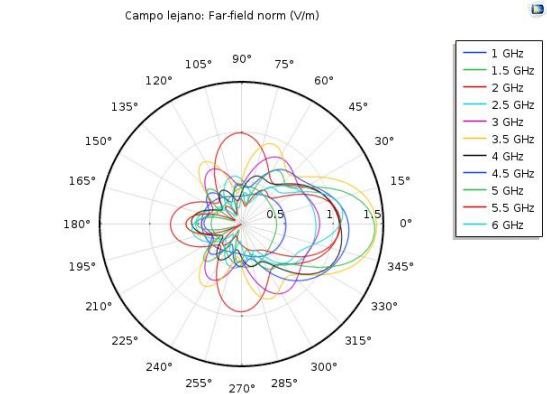


Figura 4.5. Patrones de radiación (4.4)

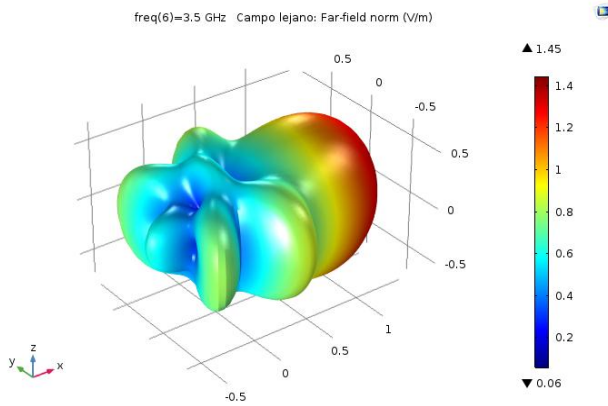


Figura 4.8. Patrones de radiación 3D (4.4)

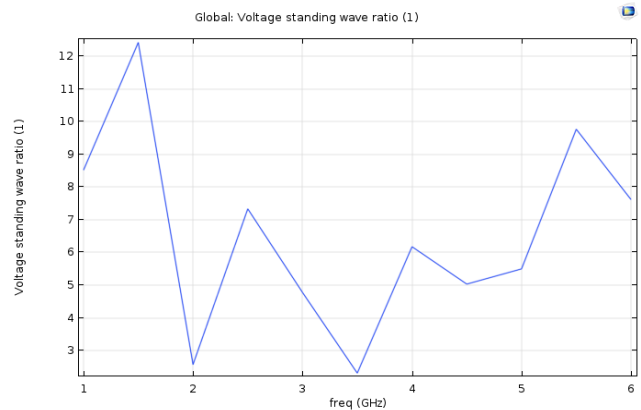


Figura 4.7. Gráfica VSWR (4.4)

Fuente: Capturas realizadas por el autor desde COMSOL

De los datos obtenidos de la simulación para 4.4, también se desprende información interesante como se puede ver su parámetro S no es bueno su magnitud es baja, y el VSWR para 3.5 GHz está cercano a 2, aunque para las demás frecuencias es alto.

Tabla 4.5 Sustrato para simulación constante dieléctrica de 3

<b>Constante dieléctrica</b>	<b>3</b>
<b>Grosor del sustrato</b>	<b>1.524 mm</b>

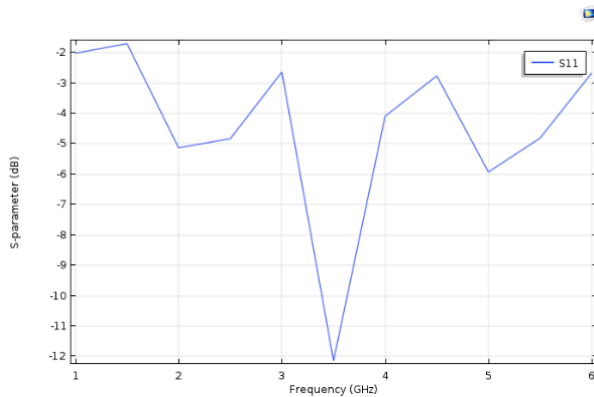


Figura 4.9. Parámetro S11 (3)

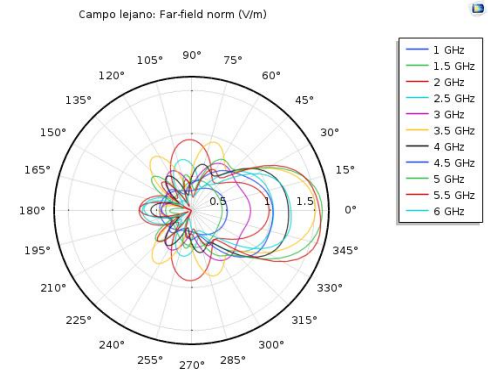


Figura 4.10. Patrones de radiación (3)

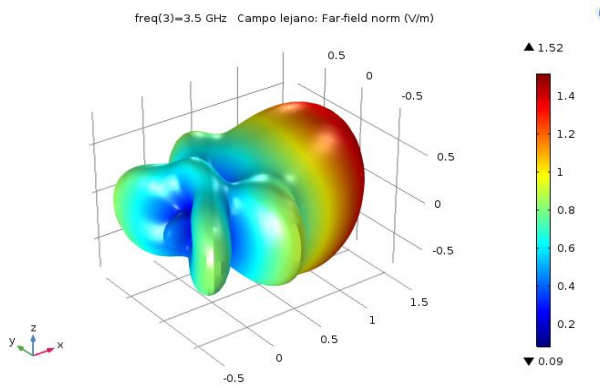


Figura 4.11. Patrón de radiación 3D (3)

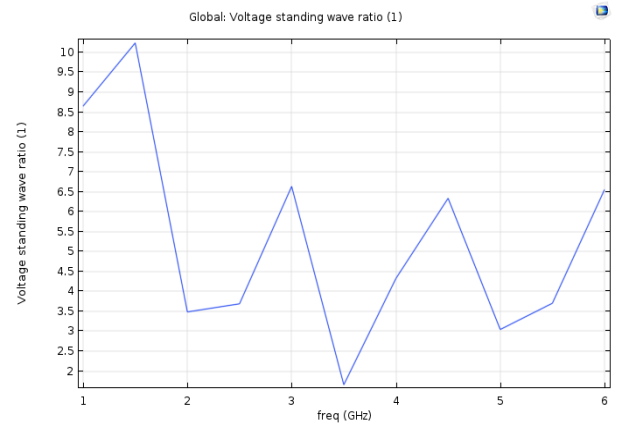


Figura 4.12. Gráfica de VSWR (3)

Fuente: Capturas realizadas por el autor desde COMSOL

Analizando las gráficas obtenidas se puede verificar que para este tipo de sustrato el parámetro S es de -12 dB, el ancho de banda medido a - 10 dB sería aproximadamente de 200 MHz, el VSWR para 3.5 GHz es menor a 2, para los demás valores es bastante alto.

Tabla 4.6 Sustrato para simulación constante dieléctrica de 2.25

<b>Constante dieléctrica</b>	<b>2.25</b>
<b>Grosor del sustrato</b>	<b>1.524 mm</b>

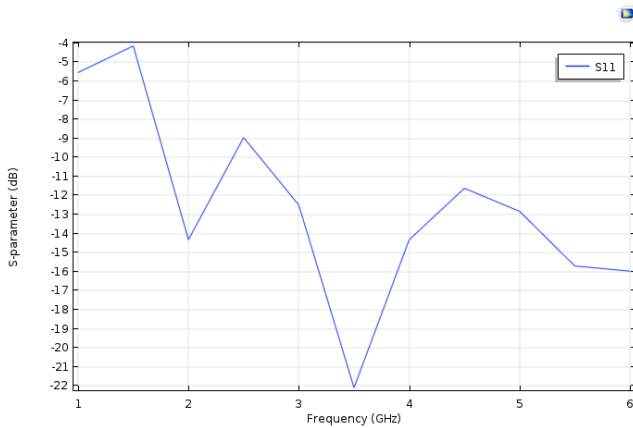


Figura 4.13. Parámetro S11 (2.25)

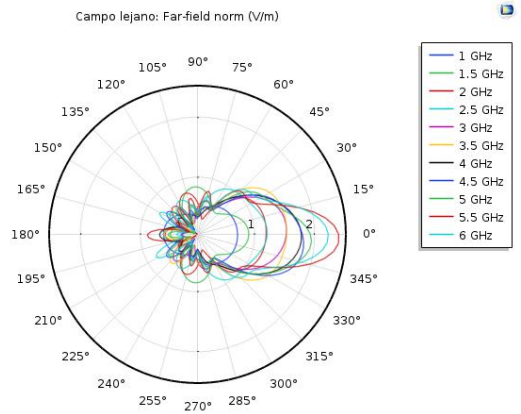


Figura 4.14. Patrones de radiación (2.25)

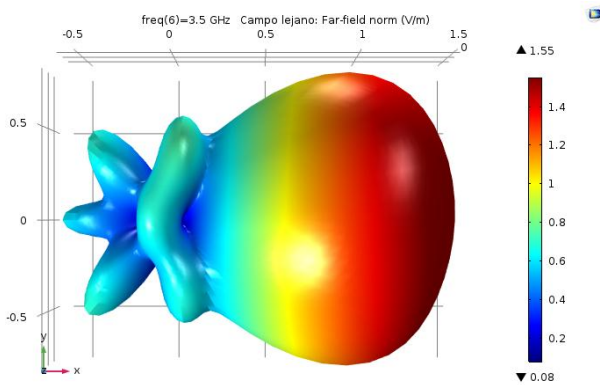


Figura 4.15. Patrón de radiación 3D (2.25)

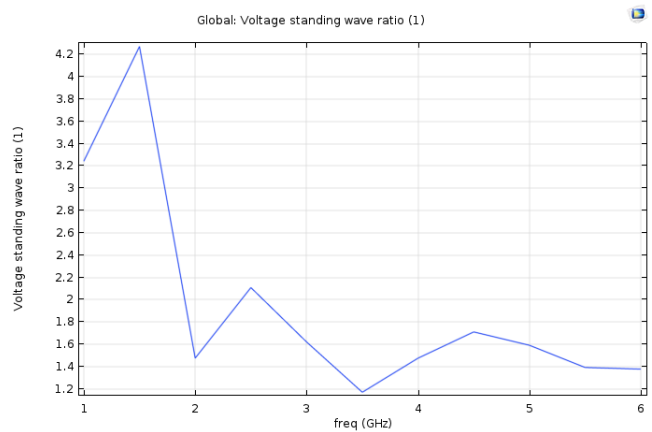


Figura 4.16. Gráfica VSWR (2.25)

Fuente: Capturas realizadas por el autor desde COMSOL

Se puede observar como al variar los parámetros del sustrato se puede obtener grandes cambios en el comportamiento de la antena, mejora el parámetro S y su grafica de VSWR

notoriamente se mantiene bajo el rango promedio de 2, pero su ancho de banda medido a -10 dB no es el esperado.

Una vez realizadas las simulaciones y analizado los datos expuestos, se realiza algunos ajustes en los parámetros en función del sustrato elegido previo a la implementación obteniendo las siguientes gráficas de COMSOL, gráficas que se analizarán junto con los resultados obtenidos con el analizador de campos vectoriales (VNA).

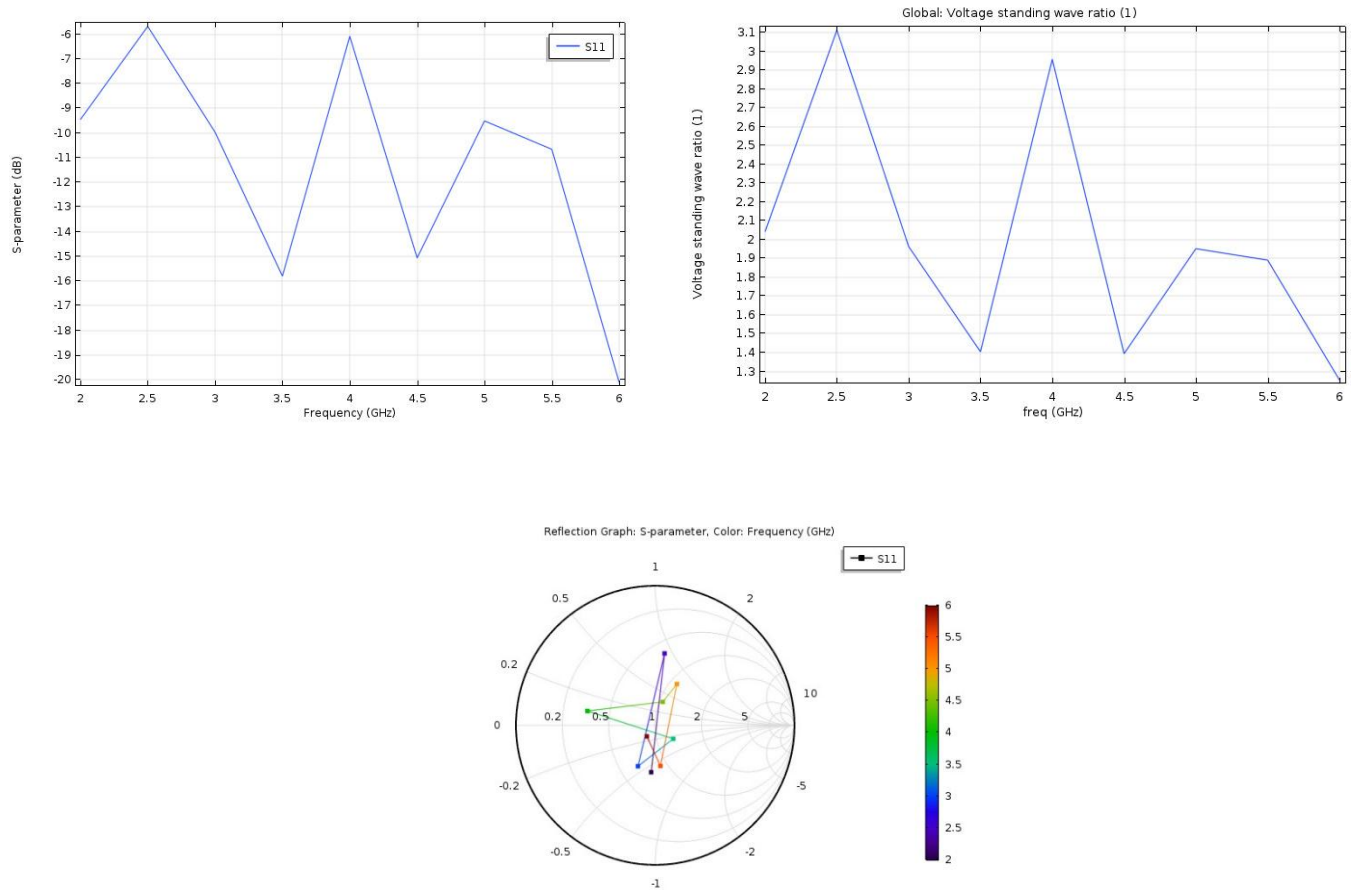


Figura 4.23 Gráficas obtenidas previo la implementación

Fuente: Realizado por el autor en COMSOL

#### 4.4 Resultados del estudio

Después de realizar los modelos teóricos anteriormente expuestos y con cuyos resultados se realiza las simulaciones, mismas que servirán para la obtención de los datos para el mejoramiento y optimización de parámetros de la antena a implementar.

Se puede verificar que los parámetros finales escogidos de la simulación cumplen con las especificaciones deseadas, después de analizar los resultados obtenidos de las simulaciones se concluye con las dimensiones que se implementará la antena.

Tabla 4.7 Dimensiones para la implementación

<b>L</b>	<b>100 mm</b>
<b>W</b>	60 mm
<b>Apertura</b>	50 mm
<b>Ws</b>	0.5 mm
<b>Radio</b>	8 mm
<b>Union Slotline</b>	20 mm

Fuente: Realizada por el autor

Con estos parámetros se elaboró la antena que se presenta ya con sus conectores para las pruebas de campo con un VNA.

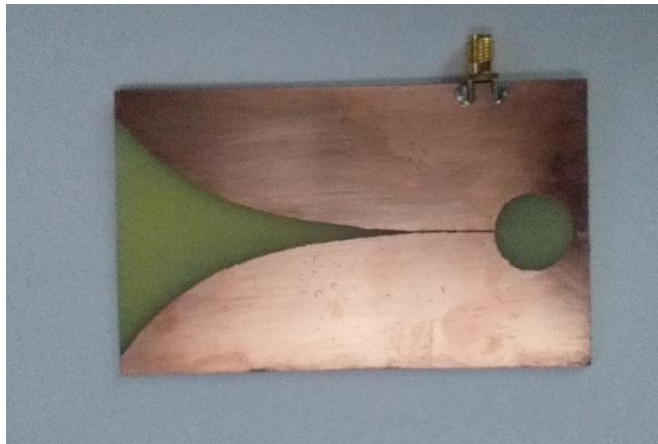


Figura 4.24. Antena vivaldi implementada

Fuente: Realizado por el autor

## 4.5 Pruebas de funcionamiento

### 4.5.1 Caracterización de la antena vivaldi

Para la caracterización de la antena vivaldi será necesario la utilización de un instrumento de medición especializado conocido como VNA (analizador de redes vectoriales), este instrumento permite verificar las condiciones en las que opera la antena a medir, para así establecer sus características técnicas principales, como son parámetro S, carta de Smith, gráfica VSWR.

Para lo cual se utilizará un equipo suministrado por la Universidad Israel es un MegiQ VNA0460, que como se ha mencionado es un equipo que dispone de la capacidad de analizar redes vectoriales de radio frecuencia, este equipo se utiliza en proyectos de alta frecuencia y al tener la antena una frecuencia central de 3.5 GHz es perfecto para el análisis.



Figura 4.25 MegiQ VNA-0460

Fuente: [www.batronix.com](http://www.batronix.com) (2020)

### Características principales del VNA-0460

El VNA-0460 es un analizador de red vectorial bidireccional de 2 puertos que se controla desde una PC a través de una conexión USB.



El software incluido proporciona un control total sobre las mediciones, la configuración, el almacenamiento de datos y los informes.

Este VNA es ideal para medir todo tipo de microcircuitos como antenas, atenuadores, amplificadores, etc. Las bandas de telecomunicaciones en las que trabaja son GSM, Wifi, DECT, GPS, DECT, ISM, Bluetooth, Zigbee. (www.megiq.com, 2020)

Entre las características principales del VNA-0460 están:

- VNA bidireccional de 2 puertos
- Medida S11, S12, S21, S22
- Frecuencia 400 MHz a 4 GHz
- Potencia -30 a + 5dBm
- Barrido de hasta 20001 puntos
- Velocidad de barrido de hasta 4000 muestras por segundo
- Normalización completa de 12 términos
- Barridos paramétricos
- Posee asistente de Calkit de calibración
- Formatos de visualización: impedancia de la fuente, impedancia del puerto, pérdida de retorno, pérdida directa, ROE, impedancia, impedancia (Smith), ganancia, ganancia polar.

Para realizar las pruebas de campo de la antena se debe tomar un par de precauciones mencionadas por el fabricante, el primer paso instalar el software que viene incluido en los elementos que acompañan al VNA.

Otro paso importante antes de caracterizar la antena es calibrar el quipo, para el proyecto se usará el puerto 1 del VNA y para calibrarlo será necesario un kit de calibración también incluido junto al VNA.

Una vez cumplido con estos parámetros que son necesarios para el correcto análisis de la antena, ya se pueden realizar las pruebas respectivas.

### 4.5.2 Análisis de resultado

En cuanto a los resultados obtenidos en las simulaciones se debe entender en primer lugar que, los parámetros a los que se pretende llegar después de la realización del proyecto, son los establecidos por la FCC (Federal Communications Commission), que establece el ancho de banda para las antenas  $> 500$  MHz a  $-10$  dB dentro del rango de la UWB 3.1 GHz a 10.6.

Una vez realizadas simulaciones finales del proyecto, se pudo obtener los siguientes parámetros que serán analizados a continuación, en cuanto a el parámetro S, se puede mencionar que a  $-10$  dB su ancho de banda es aproximadamente de 700 MHz, se encuentra que la magnitud para la frecuencia de 3.5 GHz es  $-16$  dB, con estos datos se puede al menos confirmar que la antena está irradiando, puesto que si rebasa  $-10$  dB y esta sobre los  $-15$  dB se considera el rango aceptable para la antena a la frecuencia de resonancia

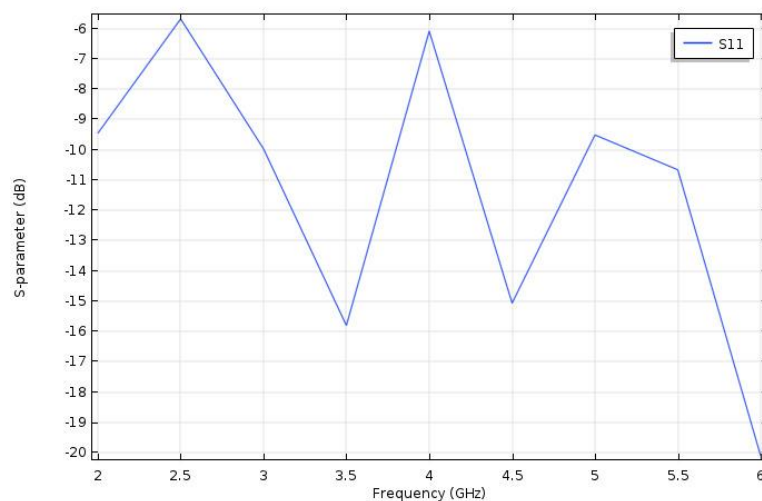


Figura 4.26. Parámetro S11 obtenido de la simulación con las especificaciones mencionadas

Fuente: realizado por el autor en COMSOL

Después de realizar las calibraciones pertinentes en el equipo VNA-0460, se pudo obtener los siguientes datos de la antena implementada, datos que se detallan a continuación.

En la figura 4.27 se pueden observar dos picos de resonancia que sobrepasan el límite de  $-10$  dB cuyas frecuencias son 2.4 GHz a  $-10,8$  dB y la que interesa para el estudio 3,480 GHz a  $-13$  dB. Estas mediciones corresponden a las pérdidas de retorno (return loss), que muestra

cuanto de la onda de voltaje está de regreso, para entenderlo mejor, si el valor de la magnitud se acerca a 0 dB quiere decir que toda la onda de voltaje está de regreso lo que causa que la antena no irradie potencia alguna en ese rango de frecuencia, no así, con las mediciones que sobrepasan el límite de -10 dB, la teoría dice que los picos que se ven en la gráfica obtenida del VNA deben al menos llegar al límite de -10 dB para considerarse frecuencia radiante.

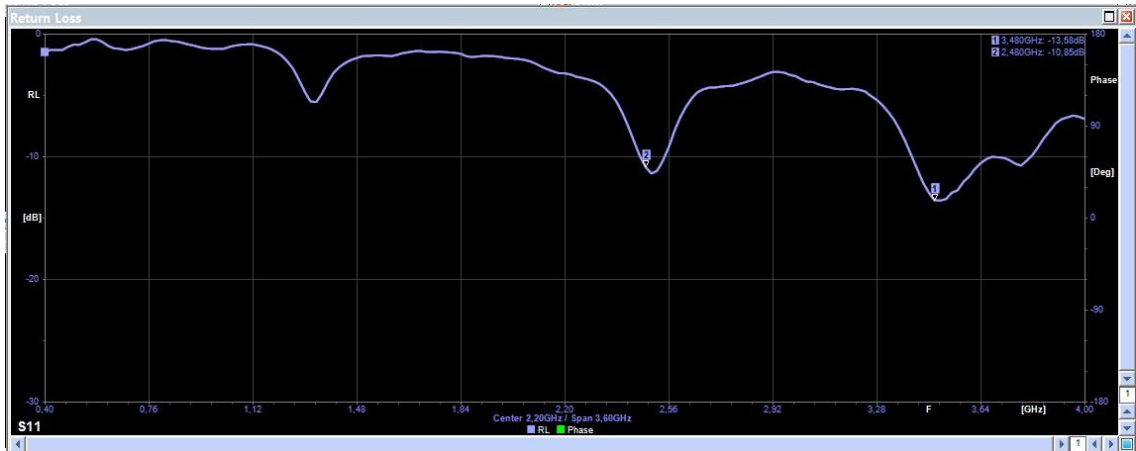


Figura 4.27 Pérdidas de retorno antena implementada

Fuente: Elaborada por el autor

Con el fin de validar los datos se realizará el cálculo de errores para comparar los datos obtenidos en las simulaciones como en las pruebas con el VNA.

Para hacerlo se calculará el error porcentual que es la forma en la que se evalúa que tan inexacta es una medición con respecto al valor estándar o propuesto para un estudio, se lo calcula tomando el valor real menos el valor medido, dividido para el valor real y multiplicado por el 100%, en términos generales el error porcentual es la diferencia que existe entre el valor real y el medido expresado en función del 100 %.

Tabla 4.8 Cálculo de error porcentual

	Simulación	Medición VNA
<b>Frecuencia de operación</b>	3.5 GHz	3.5 GHz
<b>Frecuencia obtenida</b>	3.5 GHz	3.480 GHz
<b>Error (%)</b>	0 %	0.571 %

Fuente: Elaborado por el autor

Otro factor a considerar en la comparación de la antena desarrollada será el VSWR que se obtuvo de la simulación, en la figura 4.28 se puede apreciar una medición de 1.4 para la frecuencia de 3.5 GHz que es la que interesa para el estudio, adicionalmente se puede mirar que hay otro VSWR bajo para la frecuencia de 4.5 GHz.

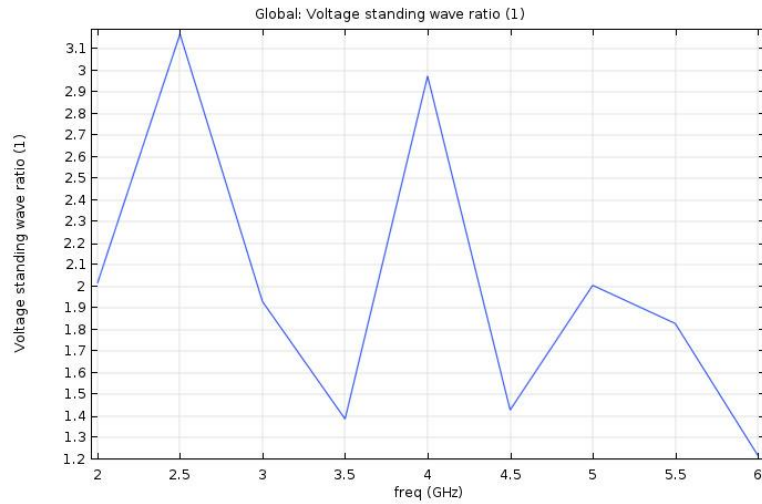


Figura 4.28. VSWR de la antena simulada

Fuente: Realizado por el autor en COMSOL

Una vez revisados los datos obtenidos de las simulaciones se puede avanzar a el análisis de los datos obtenidos de la caracterización de la antena por medio del VNA.

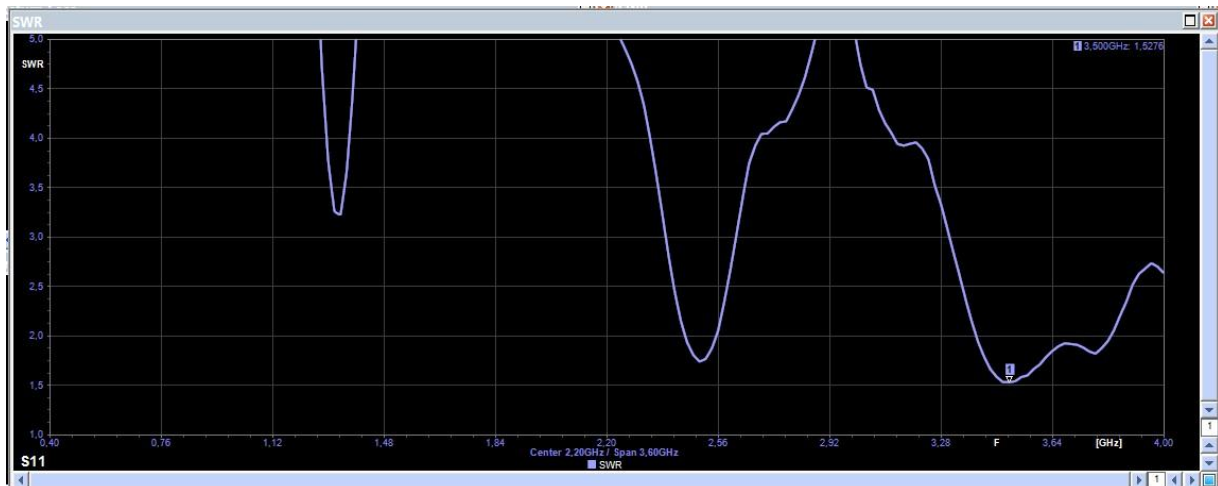


Figura 4.29 VSWR de la antena implementada

Fuente: realizado por el autor

Usualmente cuando se realiza análisis de parámetros para una antena está presente el VSWR, también conocido como ROE (relación de onda estacionaria), que no es otra cosa más que la relación que existe entre la cantidad de energía irradiada por la antena y la cantidad de energía reflejada por diferentes factores como pueden ser acoples, cables, plano a tierra, etc.

En la siguiente tabla 4.9 se puede observar la relación que existe la ROE y la potencia reflejada en porcentaje.

Tabla 4.9 Cálculo de coeficiente de reflexión y potencia reflejada

	<b>VSWR (ROE)</b>	<b>Coefficiente de reflexión</b>	<b>Potencia reflejada (en porcentaje al 100 %)</b>
<b>Ecuaciones para el calculo</b>	$= \frac{1 +  \Gamma }{1 -  \Gamma }$	$ \Gamma  = \frac{VSWR - 1}{VSWR + 1}$	$ \Gamma ^2$
<b>Antena Simulada</b>	1.4	0.17	2.78 %
<b>Antena implementada</b>	1.52	0.2	4.25 %

Fuente: Realizada por el autor

En función del VSWR (ROE) obtenido tanto en la simulación como en la medición con el VNA, se puede obtener el coeficiente de reflexión para calcular la potencia reflejada de la antena en este caso para la simulación está en 2.78 % de potencia reflejada, mientras que en la antena implementada la potencia reflejada está en 4.25 %, lo que indica que las antenas se encuentran en los rangos aceptables de radiación, puesto que la potencia reflejada es relativamente baja.

Para tener una idea más clara de la relación que existe entre el VSWR (ROE), se puede ver la tabla 4.10 que muestra las diferentes potencias reflejadas en función del VSWR que se haya medido u obtenido en simulaciones.

Tabla 4.10 Valores típicos calculados entre VSWR y potencia reflejada

<b>VSWR</b>	<b>Voltaje reflejado</b>	<b>Potencia reflejada (%)</b>
<b>1.0:1</b>	0	0
1.1:1	5	0.22
1.2:1	9	0.82
1.3:1	13	1.70
1.4:1	17	2.8
1.5:1	20	4
1.6:1	23	5.3
1.7:1	26	6.7
1.8:1	29	8.2
1.9:1	31	9.6
2.0:1	33	11.11
2.5:1	43	18.4
3.0:1	50	25
4.0:1	56	36
5.0:1	67	44.4
10.0:1	82	67

Fuente: Realizada por el autor

En cuanto a los valores de la carta de Smith de visualizan en la figura 4.30, la carta de Smith es una forma de observar impedancias, admitancias, coeficiente de reflexión, parámetros de dispersión en un solo gráfico que expresa las impedancias en el plano complejo para verificar el nivel de adatacion de una antenas, líneas de transmisión, etc.

Mientras más se acerca la gráfica a los valores la impedancia normalizada de 50 ohms que se sitúa en el centro de la carta des Smith, se dice que la antena está bien adaptada, caso contrario, si se aleja del centro de la carta de Smith implicaría peor adaptación lo que repercutiría en el desempeño de la antena.

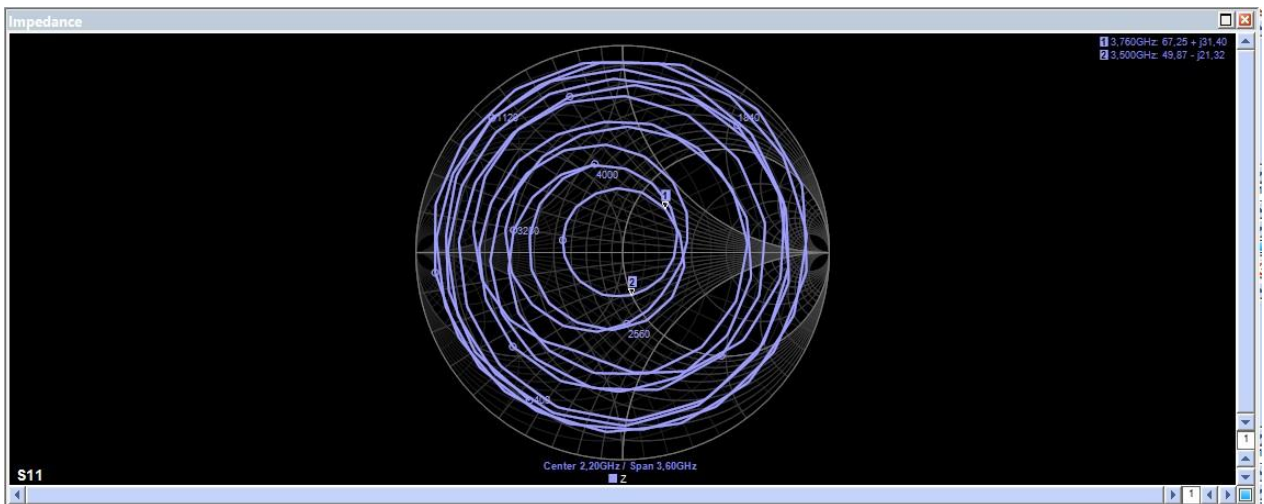


Figura 4.30 Carta de Smith impedancia de antena implementada

Fuente: Realizada por el autor

En la figura 4.30 obtenida de las mediciones del VNA se puede observar que los valores de resonancia para la antena no pasan por el centro, pero se encuentran bastante cerca de la impedancia en el centro de la carta de Smith puesto que la impedancia para 3.5 GHz se mide en 49.87-j21.32, datos con los que se puede decir que cumple con criterios de funcionalidad.

Con los resultados obtenidos tanto en la simulación como en la implementación se observa que cumplen con las frecuencias de resonancia para las que fueron diseñadas las antenas, cabe anotar que, con algunas pequeñas diferencias entre la implementación y la simulación, diferencias que eran de esperarse al ser implementada la antena de manera artesanal, y en cuanto a las frecuencias resonantes no deseadas que aparecen en los resultados podrían suprimirse con filtros notch, que son ranuras que se hacen en el metalizado de la antena para eliminar rangos de frecuencias específicos, acotación que podría servir para estudios futuros.





## CONCLUSIONES

- La antena vivaldi de ranura cónica que es objeto de este estudio, es en efecto una antena que posee un gran ancho de banda, además de gran directividad y su costo de producción es relativamente bajo, lo que la hace especialmente deseable a la hora de implementarla en proyectos de este tipo. Para su elaboración fue necesario un sustrato FR4 con una constante dieléctrica de 4,4, grosor de 1,524 mm y 0.2 pérdidas tangenciales.
- El diseño teórico de la antena se utilizaron las ecuaciones disponibles en la literatura existente para lo cual se ha consultado con el mayor rigor la mejor forma de obtener los mejores y más eficaces parámetros para consolidar el éxito en la simulación de parámetros en el software escogido para este fin.
- La simulación y optimización de parámetros de la antena vivaldi en el software COMSOL se observa la variación de parámetros y su incidencia a la hora de modificarlos en el diseño para obtener los resultados deseados y escoger el mejor, para la implementación, por lo cual se optó por el uso de varios tipos de sustratos que están especificados en el estudio y optimizar el que mejores resultados ofrece.
- Como ya se ha mencionado con anterioridad para la implementación de las antenas se utilizó con un sustrato FR4, cuya constante dieléctrica es 4,4, su grosor es de 1.524 mm, provee los parámetros deseados para el éxito del estudio los cuales se comportan tal como es esperado, brindando un ancho de banda aceptable a -10 dB, resuena a 3,4 GHz y funciona a -13 dB, estos son los datos recogidos de la misma.
- Al realizar una comparación de datos obtenidos con las simulaciones y las obtenidas con el VNA se desprenden algunas observaciones interesantes, como las variaciones que hubo en cuanto a parámetros entre la simulación y la implementación, variaciones que pueden

deberse a la calidad de los materiales o la técnica utilizada para la implementación de la antena de cualquier forma se cumplió con los parámetros promedio para su funcionamiento.

- Como conclusión final las antenas vivaldi en general son antenas muy prometedoras para desarrollar tecnologías a futuro, como por ejemplo para transmisiones de video de alta resolución, aprovechando su gran ancho de banda, también podría crearse conexiones entre dispositivos cercanos como serian un reproductor de video, audio y un TV o reproductor de sonido, todas las características de la antena vivaldi se prestan para este avance en tecnología.

## RECOMENDACIONES

- Para la fase de simulación es necesario escoger de manera adecuada el simulador de onda completa, debe ser uno que se ajuste a nuestra necesidad ya que de este apartado se desprenderán los parámetros óptimos que se utilizaran posteriormente en la implementación del mismo. El software COMSOL además de ser versátil a la hora de ingresar los datos para la simulación en una potente herramienta para optimizar los diferentes proyectos de radio frecuencia.
- Para el grabado es importante tener en cuenta que un ácido como el cloruro férrico es bastante corrosivo y se debe ser cuidadoso al momento de utilizarlo para no tener problemas posteriores en la antena que se necesita implementar ya que errores en el grabado pueden ser bastante perjudiciales a la hora de obtener los resultados finales.
- Los materiales a utilizar son de vital importancia al momento de desarrollar proyectos con antenas, razón por la que siempre se debe verificar la calidad de los mismos, y con esto se garantiza el éxito del proyecto, a pesar de ser una desventaja el no tener gran variedad de sustratos en el mercado.
- Se debe calibrar bien el equipo VNA para obtener las mejores mediciones y evitar errores en las mismas.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFÍA

- Balanis, C. (2005). *Antena theory analysis and desing*. New Yersey: A John Wiley & Sons, INC.
- Cardama, A. (1998). *Antenas*. Barcelona.
- Dhawan, R., & Kaur, G. (2016). Vivaldi antenna simulation on defining parameters, parametric study and results. *International Science Press*, 5129-5138.
- Di Benedetto, M., Kaiser, T., Molisch, F., Opperann, I., Politano, C., & Porcino, C. (2006). *UWB Communication System*. New York.
- Djerafi , T., Doghri, A., & Wu , K. (2015). *Substrate Integrated Waveguide Antennas*. Montreal. Canada: Poly-Grames Research Center.
- ETSI-TG31A Technical Report. (2003). *Technical characteristics for SRD communication equipment using Ultra-Wideband technology (UWB)*. Francia.
- Federal Communications Commission. (2002). *Revision of Part 15 of the Commission's Rules Regarding Ultra-Wideband Transmission Systems*. ET Docket 98-153. FCC 02-48.
- Gupta, K. C., Carg, R., Bahl, I., & Bhartia, P. (1996). *Microstrip lines and slotlines*. Londres: Artech House.
- Kerarti, D., Marouf, F., & Meriah, S. M. (2012). New tapered slot vivaldi antenna for UWB aplicaciones. *24th International Conference on Microelectronic*, (págs. 1-4).
- Mohamm, S., Kerarti, D., & Marouf, F. (2012). *New tapered slot vivaldi antenna for UWB applications*. Tlemcen. Algeria.
- Shafieha, J. H., Noorinia, J., & Ghobadi, C. (2008). *Probing the feed line parameters in vivaldi notch antennas*. Urnia. Iran.
- Shukla, S., Upadhyay, N., Sharma , S., & Hemrajani, N. (2013). C-Band Vivaldi Antenna and Its Array. *Asian Journal of Engineering and Applied Technology*, 2(1), 28-35.

Yati Hamzah, N., & Othman, K. (2011). Designing Vivaldi Antenna with Various Sizes using CST Software. *World Congress on Engineering*. Londres.

## ANEXOS 1

Manual de usuario COMSOL



# INTRODUCTION TO COMSOL Multiphysics



## Introduction

---

Read this book if you are new to COMSOL Multiphysics®. It provides an overview of the COMSOL® environment with examples that show you how to use the COMSOL Desktop® user interface and the Model Builder. It also provides a quick introduction to creating applications using the Application Builder.

If you have not yet installed the software, install it now according to the instructions at [www.comsol.com/product-download](http://www.comsol.com/product-download).

In addition to this book, an extensive documentation set is available after installation. Tutorials can be found throughout the COMSOL website, including in the Video Gallery at [www.comsol.com/videos](http://www.comsol.com/videos) and on the COMSOL Blog at [www.comsol.com/blogs](http://www.comsol.com/blogs).

# COMSOL Desktop®

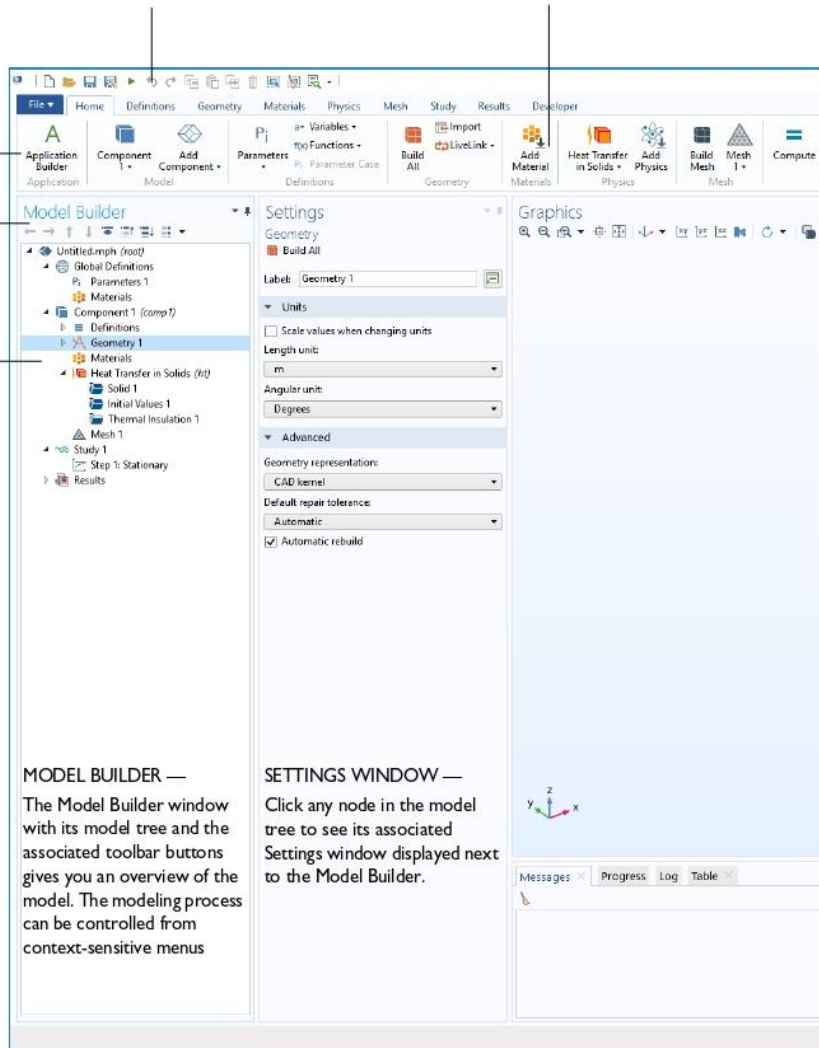
**QUICK ACCESS TOOLBAR** — Use these buttons for access to functionality such as file open/save, undo/redo, copy/paste, and delete.

**RIBBON** — The ribbon tabs have buttons and drop-down lists for controlling all steps of the modeling process.

**APPLICATION BUILDER** — Click this button to switch to the Application Builder and start building an application based on your model.

**MODEL BUILDER TOOLBAR**

**MODEL TREE** — The model tree gives an overview of the model and all of the functionality and operations needed for building and solving

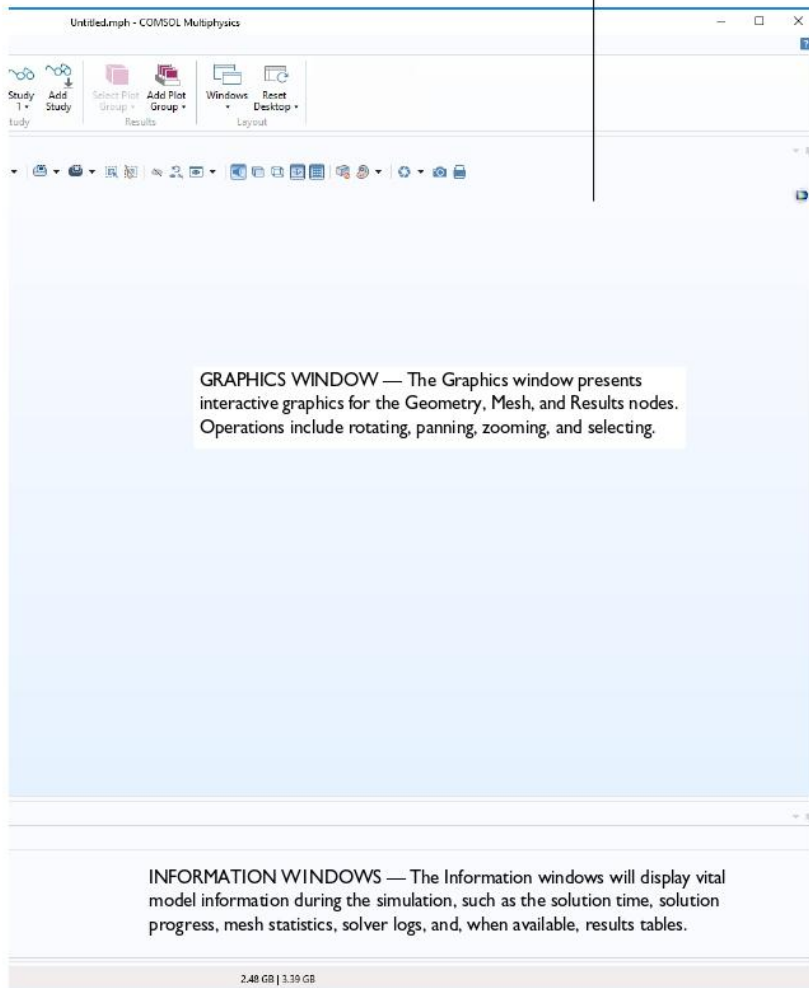


**MODEL BUILDER** — The Model Builder window with its model tree and the associated toolbar buttons gives you an overview of the model. The modeling process can be controlled from context-sensitive menus

**SETTINGS WINDOW** — Click any node in the model tree to see its associated Settings window displayed next to the Model Builder.



## GRAPHICS WINDOW TOOLBAR



The screenshot on the previous pages is what you will see when you first start modeling in COMSOL Multiphysics using the Model Builder. The COMSOL Desktop<sup>®</sup> user interface provides a complete and integrated environment for physics modeling and simulation as well as application design, providing you with the tools necessary to build a user-friendly interface for your models. You can customize the desktop to your own needs. The windows can be resized, moved, docked, and detached. Any changes you make to the layout will be saved when you close the session and available again the next time you open COMSOL Multiphysics. As you build your model, additional windows and widgets will be added. (See page 26 for an example of a more developed desktop.) Among the available windows and user interface components are the following:

### **Quick Access Toolbar**

The Quick Access Toolbar gives access to functionality such as **Open**, **Save**, **Undo**, **Redo**, **Copy**, **Paste**, and **Delete**. You can customize its content from the **Customize Quick Access Toolbar** list (the downward-facing arrow to the right of the toolbar).

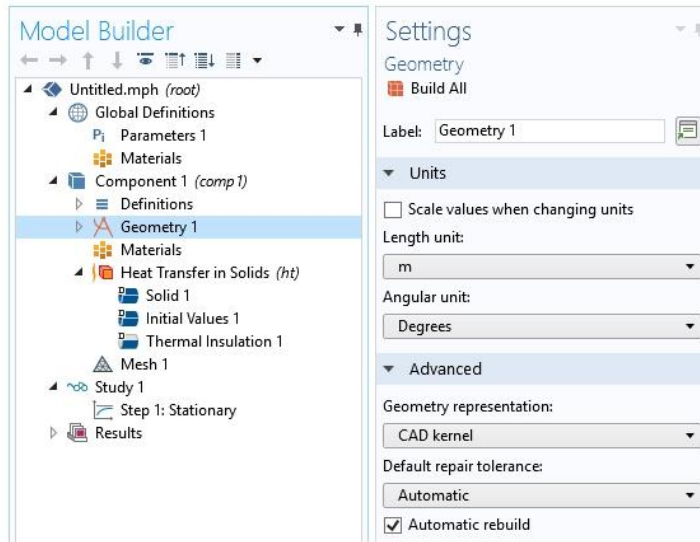
### **Ribbon**

The ribbon at the top of the desktop gives access to commands used to complete most modeling tasks. The ribbon is only available in the Windows<sup>®</sup> version of the COMSOL Desktop environment and is replaced by menus and toolbars in the OS X and Linux<sup>®</sup> versions. Click the **Application Builder** button to switch from the Model Builder to the Application Builder and start building an application based on your model.

### **Settings Window**

This is the main window for entering all of the specifications of the model, including the dimensions of the geometry, properties of the materials, boundary conditions and initial conditions, and any other information that the solver will

need to carry out the simulation. The picture below shows the **Settings** window for the **Geometry** node.



### Plot Windows

These are the windows for graphical output. In addition to the **Graphics** window, **Plot** windows are used for visualizing results. Several **Plot** windows can be used to show multiple results simultaneously. A special case is the **Convergence Plot** window, an automatically generated **Plot** window that displays a graphical indication of the convergence of the solution process while a model is running.

### Information Windows

These are the windows for nongraphical information. They include:

- **Messages:** Various information about the current COMSOL Multiphysics session is displayed in this window.
- **Progress:** Progress information from the solver in addition to stop buttons.
- **Log:** Information from the solver, such as the number of degrees of freedom, solution time, and solver iteration data.
- **Table:** Numerical data in table format as defined in the **Results** node.
- **External Process:** Provides a control panel for cluster, cloud, and batch jobs.

## Other Windows

The **Windows** drop-down list in the **Home** tab of the ribbon gives you access to all COMSOL Desktop windows. On OS X and Linux<sup>®</sup>, you will find this in the **Windows** menu. In addition to the windows described earlier you can access the following windows:

- **Add Physics and Add Multiphysics:** Expand the physics interfaces in a model.
- **Add Study:** Change the type of study.
- **Add Material from Library** and the **Material Browser:** Access the material property libraries.
- **Application Libraries:** Choose among the collections of MPH-files containing tutorial models and runnable applications with accompanying documentation.
- **Part Libraries:** Load one of the predefined parameterized geometry models.
- **Selection List:** Show a list of geometry objects, domains, boundaries, edges, and points that are currently available for selection.
- **Properties:** View model tree node properties.
- **Debug Log:** Display debug information for methods.
- **Recovery Files:** View recovery files.
- **Comparison Results:** Compare the Model Builder and Application Builder settings of two MPH files.

## Progress Bar with Cancel Button

The **Progress Bar** with a button for canceling the current computation, if any, is located in the lower right-hand corner of the COMSOL Desktop interface.

## Dynamic Help

The **Help** window provides context-dependent help texts about windows and model tree nodes. If you have the **Help** window open in your desktop (by typing F1, for example), you will get dynamic help (in English only) when you click a node or a window. From the **Help** window, you can search for other topics, such as menu items.

## The Model Builder and the Application Builder

---

The two main components of the COMSOL Desktop environment are the Model Builder and the Application Builder.

The Model Builder is the tool where you define the model and its components, such as how to solve it, the analysis of results, and creating reports. You do that by

building a model tree. The model tree reflects the underlying data structure, the model object, which stores the state of the model including settings for geometry, mesh, physics, boundary conditions, studies, solvers, postprocessing, and visualizations.

The Application Builder allows you to quickly create an application with a specialized user interface that is easy to use. An application is typically based on a model created with the Model Builder. The Application Builder provides two important tools for creating applications: The Form editor and the Method editor. In addition, an application can have a menu bar or a ribbon. The Form editor includes drag-and-drop capabilities to easily access and include user interface components, such as input fields, graphics windows, and buttons. The Method editor is a programming environment that, for example, allows you to modify the model represented by the model object data structure. You can also use the Method editor to add user interface logic and auxiliary functionality to an application. The Java<sup>®</sup> programming language is used to write code in the Method editor, which means that all Java<sup>®</sup> syntax and Java<sup>®</sup> libraries can be used.

In the Method editor, program code is stored in methods. A method is another name for what is known in other programming languages as a subroutine, function, or procedure. Methods can be used to modify the model object data structure in the Model Builder and the Application Builder. A method can be used both for modifying the model object of the current session and for modifying the model object in a running application.

This book, *Introduction to COMSOL Multiphysics*, gives a detailed introduction to using the Model Builder and a quick introduction to the Application Builder. For detailed information on how to use the Application Builder, including the Form editor and Method editor, see *Introduction to Application Builder*.

## **Applications, COMSOL Server, and COMSOL Compiler**

---

The Application Builder is included in the Windows<sup>®</sup> version of COMSOL Multiphysics. With a COMSOL Multiphysics license, applications can be run from the COMSOL Desktop environment. Although applications cannot be built with the macOS or Linux<sup>®</sup> versions of the software, applications can still be run with COMSOL Multiphysics on those platforms.

With a COMSOL Server<sup>™</sup> license, applications can be run in major web browsers on a variety of operating systems and hardware platforms. In addition, you can run applications by connecting to COMSOL Server with an easy-to-install COMSOL Client for Windows<sup>®</sup>.

| 11

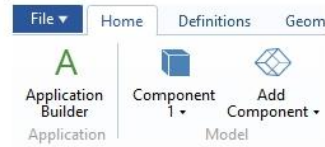
The COMSOL Client for Windows<sup>®</sup> allows a user to run applications that require a LiveLink<sup>™</sup> product for CAD (this functionality is not available when running applications with a web browser).

Running applications in a web browser does not require any installation and no web browser plug-ins are needed. Running an application in a web browser supports interactive graphics in 1D, 2D, and 3D. In a web browser, graphics rendering in 3D are based on WebGL<sup>™</sup> technology, which comes included with all major web browsers.

To create an application based on your model, click the **Application Builder** button, accessible from the **Home** tab in the ribbon.

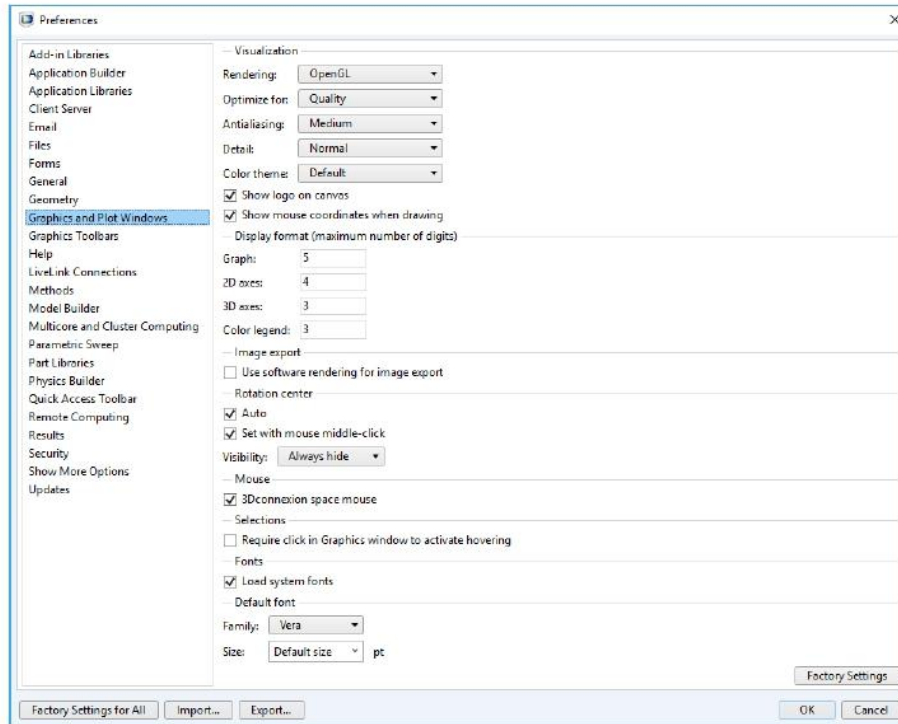
By using the COMSOL Compiler product you can compile your application (MPH-file) to an executable file for Windows<sup>®</sup>, Linux<sup>®</sup>, and macOS. You can freely distribute the executable and it can be run without any license file.

For more information on creating COMSOL applications, refer to the section “Building an Application with the Application Builder” on page 96 and the book *Introduction to Application Builder*.



## Preferences

Preferences are settings that affect the modeling environment. Most are persistent between modeling sessions, but some are saved with the model. You access the preferences from the **File** menu by selecting **Preferences**.



In the **Preferences** window, you can change settings such as graphics rendering, the number of displayed digits for results, the maximum number of CPU cores used for computations, or paths to user-defined application libraries. Take a moment to browse your current settings to familiarize yourself with the different options.

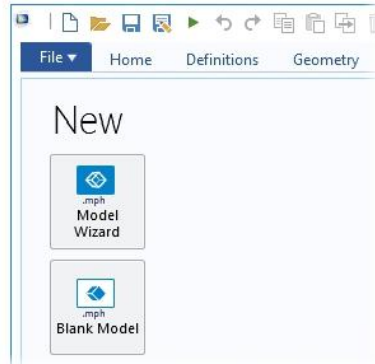
There are three graphics rendering options available: **OpenGL**<sup>®</sup>, **DirectX**<sup>®</sup>, and **Software Rendering**. The **DirectX**<sup>®</sup> option is not available in macOS or Linux<sup>®</sup>, but is available in Windows<sup>®</sup> if you choose to install the DirectX<sup>®</sup> runtime libraries during installation. If your computer does not have a dedicated graphics card, you may have to switch to **Software Rendering** for slower but fully functional graphics. A list of recommended graphics cards can be found at:

[www.comsol.com/system-requirements](http://www.comsol.com/system-requirements)

## Creating a New Model

---

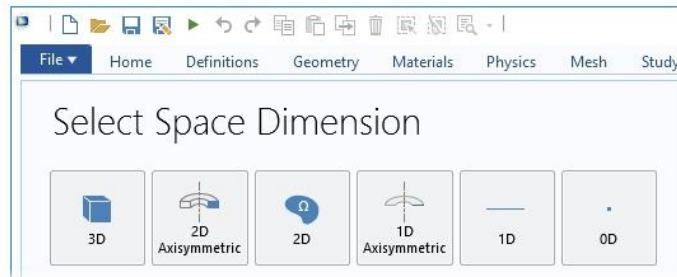
You can set up a model guided by the **Model Wizard** or start from a **Blank Model** as shown in the figure below.



### CREATING A MODEL GUIDED BY THE MODEL WIZARD

The Model Wizard will guide you in setting up the space dimension, physics, and study type in a few steps:

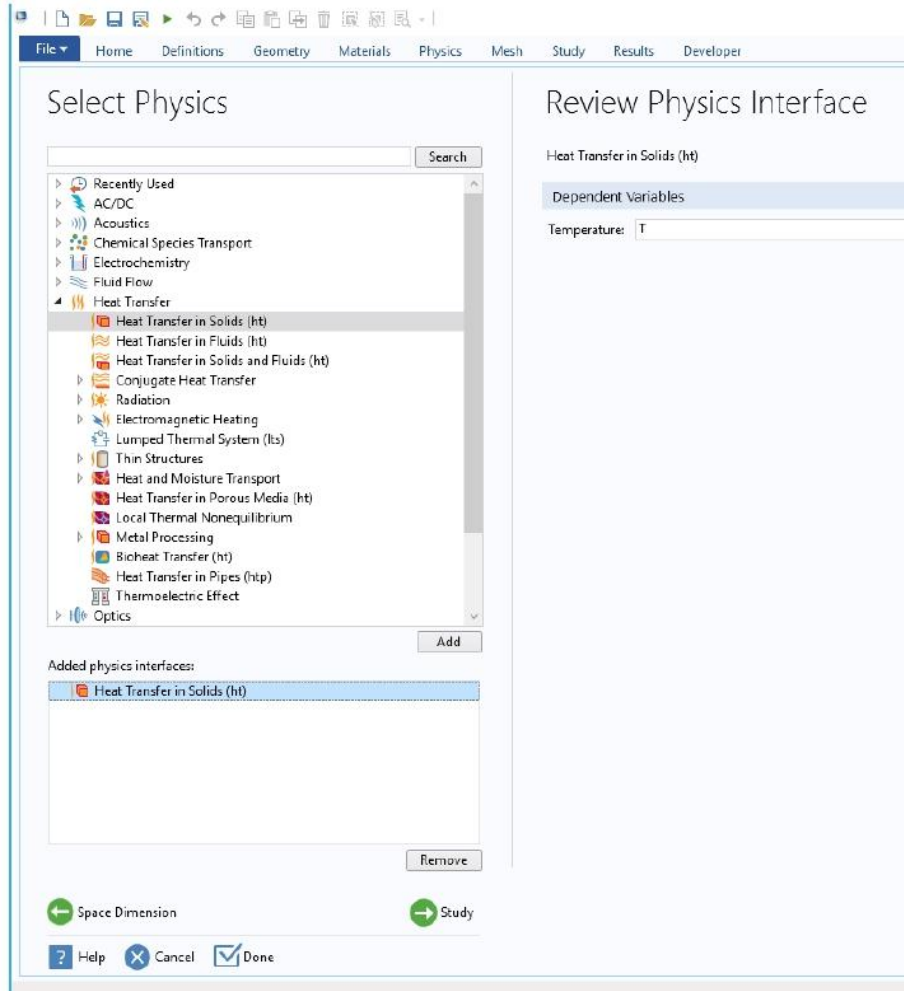
- 1 Start by selecting the space dimension for your model component: **3D**, **2D Axisymmetric**, **2D**, **1D Axisymmetric**, or **0D**.



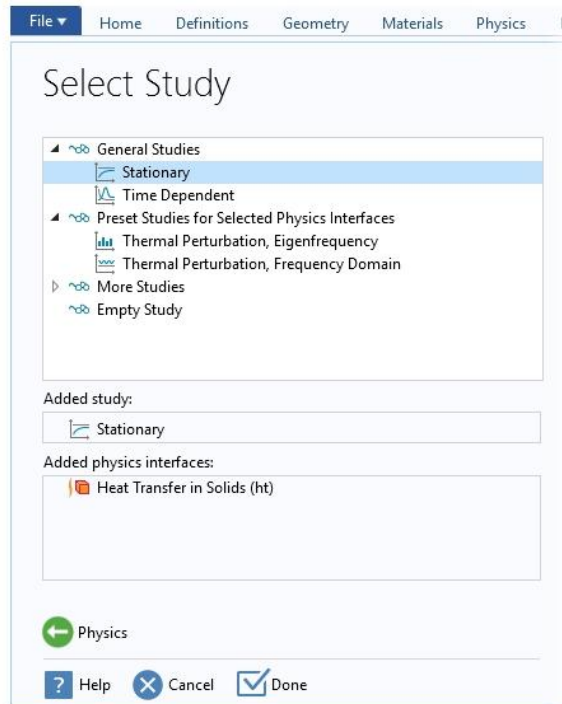
- 2 Now, add one or more physics interfaces. These are organized in a number of physics branches in order to make them easy to locate. These branches do not directly correspond to products. When products are added to your COMSOL



Multiphysics installation, one or more branches will be populated with additional physics interfaces.



- 3 Select the Study type that represents the solver or set of solvers that will be used for the computation.



Finally, click **Done**. The desktop is now displayed with the model tree configured according to the choices you made in the Model Wizard.

## CREATING A BLANK MODEL

The **Blank Model** option will open the COMSOL Desktop interface without any **Component** or **Study**. You can right-click the model tree to add a **Component** of a certain space dimension, physics interface, or **Study**.

## The Ribbon and Quick Access Toolbar

The ribbon tabs in the COMSOL Desktop environment reflect the modeling workflow and give an overview of the functionality available for each modeling step, including building simulation applications from your models.



The **Home** tab contains buttons for the most common operations for making changes to a model, running simulations, and for building and testing applications. Examples include changing model parameters for a parameterized geometry, reviewing material properties and physics, building the mesh, running a study, and visualizing the simulation results.

There are standard tabs for each of the main steps in the modeling process. These are ordered from left to right according to the workflow: **Definitions**, **Geometry**, **Materials**, **Physics**, **Mesh**, **Study**, **Results**, and **Developer**.

Contextual tabs are shown only if and when they are needed, such as the **3D Plot Group** tab, which is shown when the corresponding plot group is added or when the node is selected in the model tree.



Modal tabs are used for very specific operations, when other operations in the ribbon may become temporarily irrelevant. An example is the **Work Plane** modal tab. When working with work planes, other tabs are not shown, since they do not present relevant operations.



### THE RIBBON VS. THE MODEL BUILDER

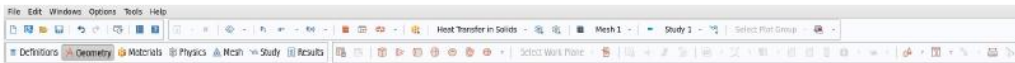
The ribbon gives quick access to available commands and complements the model tree in the **Model Builder** window. Most of the functionality accessed from the ribbon is also accessible from contextual menus by right-clicking nodes in the model tree. Certain operations are only available from the ribbon, such as selecting which desktop window to display. In the COMSOL Desktop interface for macOS and Linux®, this functionality is available from toolbars, which replace the ribbon on these platforms. There are also operations that are only available from the model tree, such as reordering and disabling nodes.

## THE QUICK ACCESS TOOLBAR

The **Quick Access Toolbar** contains a set of commands that are independent of the ribbon tab that is currently displayed. You can customize the **Quick Access Toolbar** and add most commands available in the **File** menu, including commands for undoing and redoing recent actions, as well as for copying, pasting, duplicating, and deleting nodes in the model tree. You can also choose to position the **Quick Access Toolbar** above or below the ribbon.

## MACOS AND LINUX<sup>®</sup>

In the COMSOL Desktop environment for macOS and Linux<sup>®</sup>, the ribbon is replaced by a set of menus and toolbars.



The instructions in this book are based on the Windows<sup>®</sup> version of the COMSOL Desktop environment. However, running COMSOL Multiphysics and the COMSOL Desktop environment in macOS and Linux<sup>®</sup> is very similar, keeping in mind that the ribbon user interface components can instead be found in the corresponding menus and toolbars.

## The Model Builder and the Model Tree

---

Using the Model Builder, you build a model by starting with the default model tree, adding nodes, and editing the node settings.

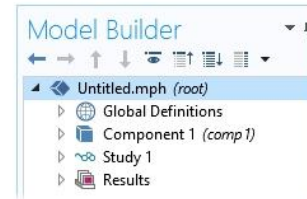
All of the nodes in the default model tree are top-level parent nodes. You can right-click on them to see a list of child nodes, or subnodes, that you can add beneath them. This is the means by which nodes are added to the tree.

When you click on a child node, you will see its node settings in the **Settings** window. It is here that you can edit node settings.

It is worth noting that if you have the **Help** window open, which is achieved either by selecting **Help** from the **File** menu or by pressing the function key F1, then you will also get dynamic help (in English only) when you click on a node.

## THE ROOT, GLOBAL DEFINITIONS, AND RESULTS NODES

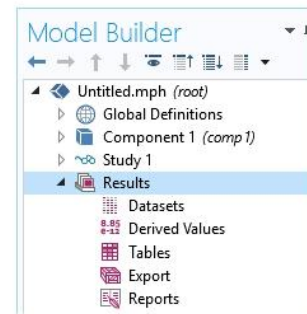
A model tree always has a root node (initially labeled `Untitled.mph`), a **Global Definitions** node, and a **Results** node. The label on the root node is the name of the multiphysics model file, or MPH file, to which the model is saved. The root node has settings for author name, default unit system, and more.



The **Global Definitions** node has a **Parameters** and **Materials** subnode by default. The **Global Definitions** node is where you, among other things, define parameters, variables, functions, and couplings that can be used throughout the model tree. They can be used, for example, to define the values and functional dependencies of material properties, forces, geometry, and other relevant features. The **Global Definitions** node itself has no settings, but its child nodes have plenty of them. The **Materials** subnode stores material properties that can be referenced in the **Component** nodes of a model.

The **Results** node is where you access the solution after performing a simulation and where you find tools for processing the data. The **Results** node initially has five subnodes:

- **Datasets**, which contains a list of solutions you can work with.
- **Derived Values**, which defines values to be derived from the solution using a number of postprocessing tools.
- **Tables**, which is a convenient destination for the **Derived Values** or for **Results** generated by probes that monitor the solution in real-time while the simulation is running.
- **Export**, which defines numerical data, images, and animations to be exported to files.
- **Reports**, which contains automatically generated or custom reports about the model in HTML or Microsoft® Word format.

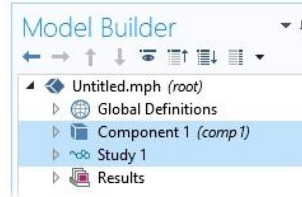


To these five default subnodes, you may also add more **Plot Group** subnodes that define graphs to be displayed in the **Graphics** window or in **Plot** windows. Some of these may be created automatically, depending on the type of simulations you are performing, but you may include additional figures by right-clicking on the **Results** node and choosing from the list of plot types.

## THE COMPONENT AND STUDY NODES

In addition to the three nodes just described, there are two additional top-level node types:

**Component** nodes and **Study** nodes. These are usually created by the Model Wizard when you create a new model. After using the Model Wizard to specify what type of physics you are modeling and what type of **Study** (for example, steady-state, time-dependent, frequency-domain, or eigenfrequency analysis) you will carry out, the Model Wizard automatically creates one node of each type and shows you their contents.

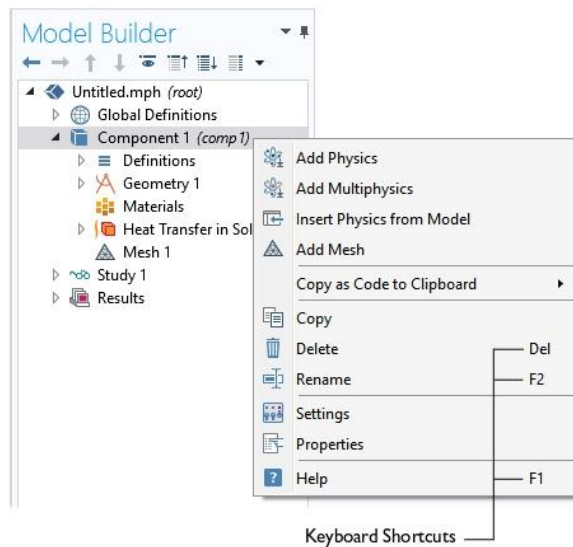


It is also possible to add more **Component** and **Study** nodes as you develop the model. A model can contain multiple **Component** and **Study** nodes and it would be confusing if they all had the same name. Therefore, these types of nodes can be renamed to be descriptive of their individual purposes.

If a model has multiple **Component** nodes, they can be coupled to form a more sophisticated sequence of simulation steps.

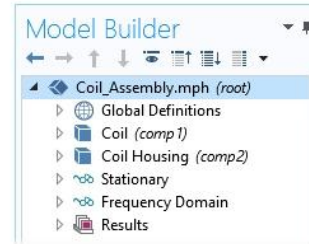
Note that each **Study** node may carry out a different type of computation, so each one has a separate **Compute** button = .

To be more specific, suppose that you build a model that simulates a coil assembly that is made up of two parts, a coil and a coil housing. You can create two **Component** nodes, one that models the coil and the other the coil housing. You can then rename each of the nodes with the name of the object. Similarly, you can also create two **Study** nodes, the first simulating the stationary or steady-state behavior of the assembly, and the second simulating the frequency response. You can rename these two nodes to be **Stationary** and **Frequency Domain**.



When the model is complete, save it to a file named `Coil Assembly.mph`. At that point, the model tree in the Model Builder looks like the figure below.

In this figure, the root node is named `Coil Assembly.mph`, indicating the file in which the model is saved. The **Global Definitions** node and the **Results** node each have their default name. Additionally, there are two **Component** nodes and two **Study** nodes with the names chosen in the previous paragraph.



## PARAMETERS, VARIABLES, AND SCOPE

### *Global Parameters*

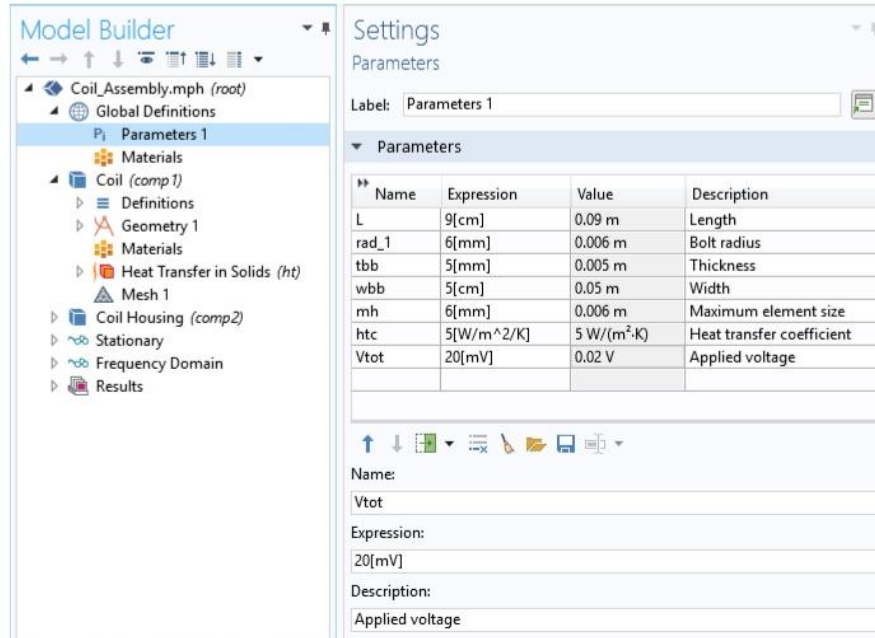
Global parameters are user-defined constant scalars that are usable throughout the model. That is to say, they are “global” in nature. Important uses are:

- Parameterizing geometric dimensions.
- Specifying mesh element sizes.
- Defining parametric sweeps (simulations that are repeated for a variety of different values of a parameter such as a frequency or load).

A global parameter expression can contain numbers, global parameters, built-in constants, built-in and user-defined functions with global parameter expressions as arguments, and unary and binary operators. For a list of available operators, see “Appendix C — Language Elements and Reserved Names” on page 181. Because these expressions are evaluated before a simulation begins, global parameters may not depend on the time variable  $t$ . Likewise, they may not depend on spatial variables like  $x$ ,  $y$ , or  $z$ , nor on the dependent variables for which your equations are solving.

It is important to know that the names of parameters are case sensitive.

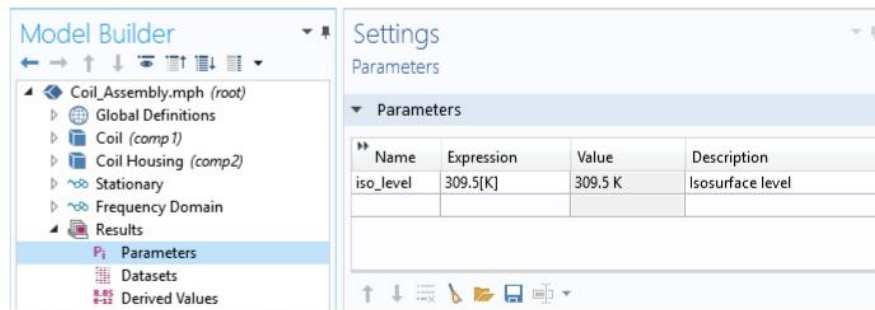
You define global parameters in the **Parameters** node in the model tree under **Global Definitions**.



Note that you can add multiple **Parameters** nodes and they will be named **Parameters 1**, **Parameters 2**, etc. In addition, **Parameters** can be organized into several cases and then swept over, for more information see “Parametric Sweeps” on page 141.

### Results Parameters

For greater flexibility, it is possible to define parameters that are only used in the **Results** node. Using these parameters does not require resolving the model.

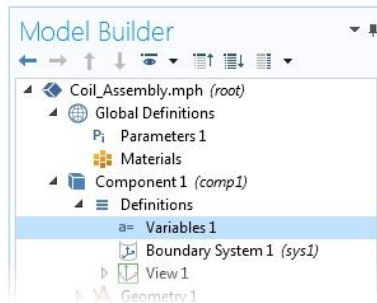




Result parameters may depend on other parameters and built-in functions.

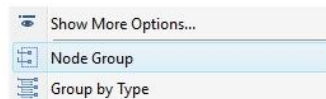
### Variables

Variables have associated **Variables** nodes in the model tree and can be defined either in the **Global Definitions** node or in the **Definitions** subnode of any **Component** node.



Naturally, the choice of where to define the variable depends on whether you want it to be global (that is, usable throughout the model tree) or locally defined within a single **Component** node. Like a parameter expression, a variable expression may contain numbers, parameters, built-in constants, and unary and binary operators. However, it may also contain variables like  $t$ ,  $x$ ,  $y$ , or  $z$ ; functions with variable expressions as arguments; and dependent variables that you are solving for in addition to their space and time derivatives.

If you have a model with many **Variables** nodes it may be useful to group them together by using the **Node Group** feature, as shown below.



Node groups can be used to group nodes in **Global Definitions**, **Definitions** under a **Component**, **Materials**, physics interfaces, and results.

### Variables Used in Applications

Model parameters and variables can be used in applications. For example, you can let the user of an application change the value of a parameter. In addition, variables to be used in applications can be defined in the Application Builder, in the application tree under the **Declarations** node. Such variables can also be used in model methods.

### *Scope*

The “scope” of a parameter or variable is a statement about where it may be used in an expression. All global parameters are defined in the **Global Definitions** node of the model tree as a **Parameters** subnode. This means that they are global in scope and can be used throughout the model tree.

A variable may also be defined in the Global Definitions node, as a **Variables** subnode, and have global scope, but they are subject to other limitations. For example, variables may not be used in **Geometry**, **Mesh**, or **Study** nodes (with the one exception that a variable may be used in an expression that determines when the simulation should stop).

A variable that is instead defined under the **Definitions** subnode of a **Component** node has local scope and is intended for use in that particular **Component** (but, again, not in the **Geometry** or **Mesh** nodes). They may be used, for example, to specify material properties in the **Materials** subnode of a **Component** or to specify boundary conditions or interactions. It is sometimes valuable to limit the scope of the variable to only a certain part of the geometry, such as certain boundaries. For that purpose, provisions are available in the settings for a variable to select whether to apply the definition either to the entire geometry of the **Component** or only to a **Domain**, **Boundary**, **Edge**, or **Point**.

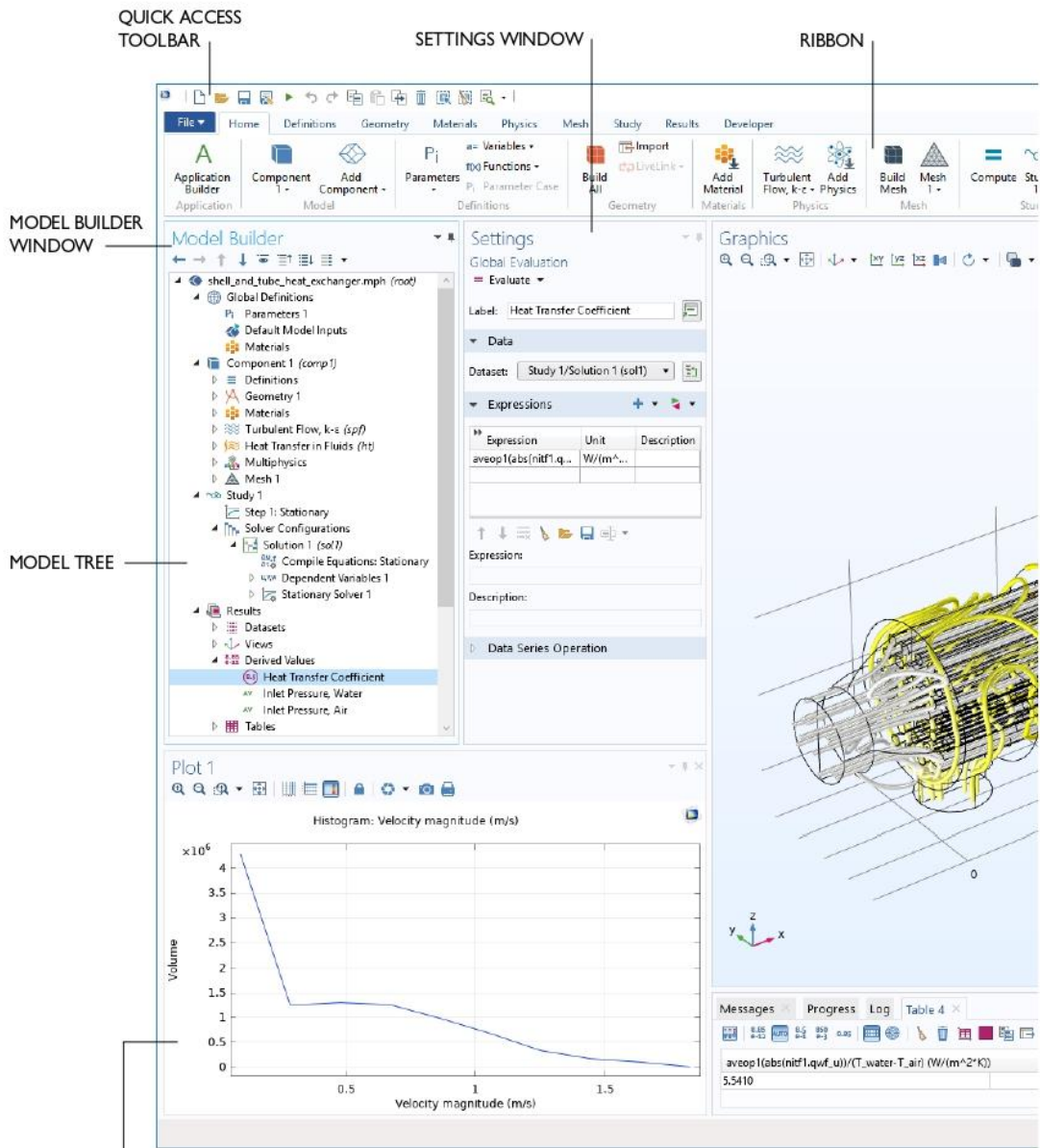
The figure at right shows the definition of two variables,  $q_{pin}$  and  $R$ , for which the scope is limited to just two boundaries identified by numbers 15 and 19.

Such a group of numbers is called a **Selection** and can be named and then referenced elsewhere in a model. This can be useful, for example, when defining material properties or boundary conditions that will use the variable at certain boundaries but not elsewhere. To give a name to the **Selection**, click the **Create Selection** button (🔗) to the right of the **Selection** list.

Although the variables defined in the **Variables** node under the **Component > Definitions** subnode are intended to have local scope, they can still be accessed outside of the **Component** node in the model tree by being sufficiently specific about their identity. This is done by using a “dot-notation” where the variable name is preceded by the name of the **Component** node in which it is defined and they are joined by a “dot”. In other words, if a variable named `foo` is defined in a **Component** node named `MyModel`, then this variable may be accessed outside of the Component node by using `MyModel.foo`. This can be useful, for example, when you want to use the variable to make plots in the **Results** node. Variables defined under the **Declarations** node in the Application Builder are available globally in form objects and methods but cannot be used in the Model Builder.

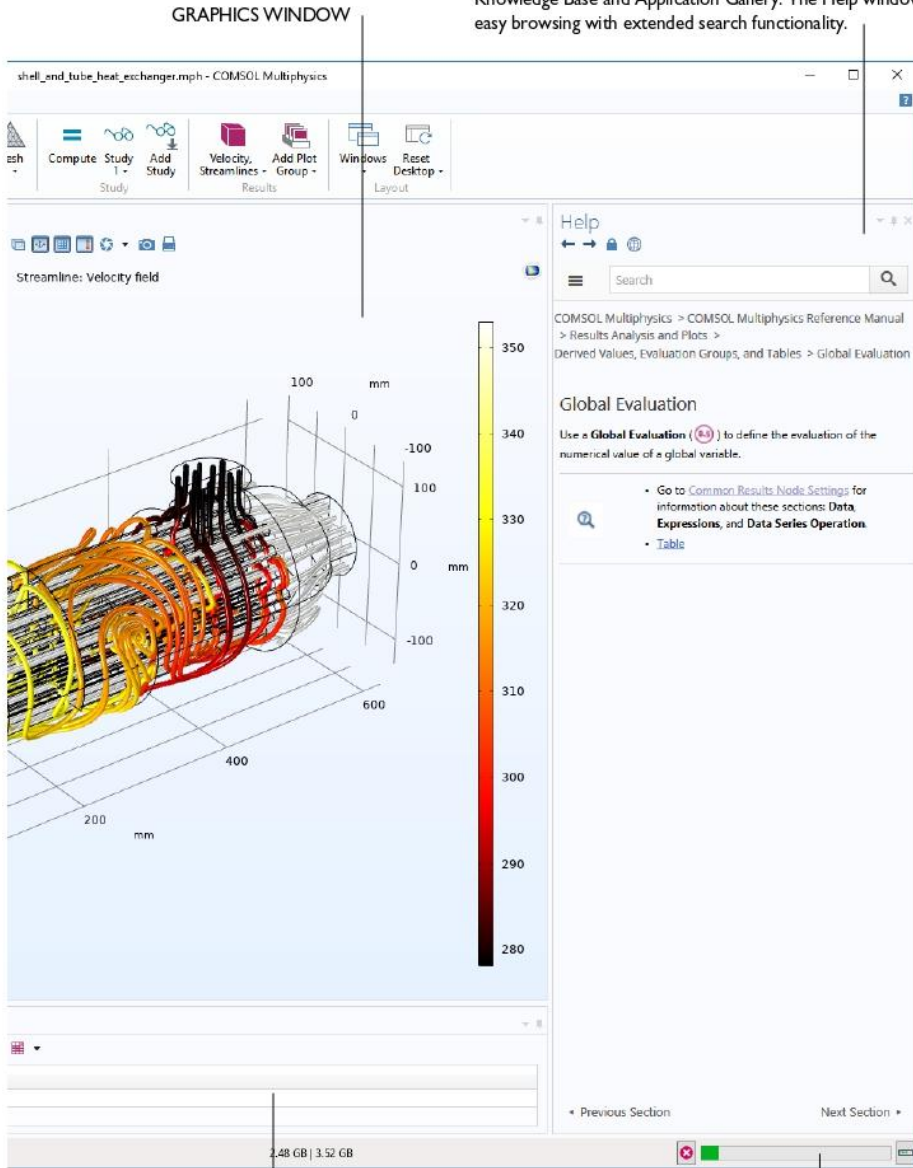
The following spread shows an example of a customized desktop with additional windows.





**PLOT WINDOW** — The Plot window is used to visualize Results quantities, probes, and convergence plots. Several Plot windows can be used to show multiple results simultaneously.

DYNAMIC HELP — Continuously updated with online access to the Knowledge Base and Application Gallery. The Help window enables easy browsing with extended search functionality.



GRAPHICS WINDOW

INFORMATION WINDOWS

PROGRESS BAR WITH CANCEL BUTTON

## Built-In Constants, Variables, and Functions

---

COMSOL Multiphysics comes with many built-in constants, variables, and functions. They have reserved names that cannot be redefined by the user. If you use a reserved name for a user-defined variable, parameter, or function, the text you enter will turn orange (a warning) or red (an error) and you will get a tooltip message if you select the text string.

Some important examples are:

- Mathematical constants such as  $\pi$  (3.14...) or the imaginary unit  $i$  or  $j$
- Physical constants such as `g_const` (acceleration of gravity), `c_const` (speed of light), or `R_const` (universal gas constant)
- The time variable, `t`
- First- and second-order derivatives of the dependent variables (the solution) whose names are derived from the spatial coordinate names and dependent variable names (which are user-defined variables)
- Mathematical functions such as `cos`, `sin`, `exp`, `log`, `log10`, and `sqrt`


See “Appendix C — Language Elements and Reserved Names” on page 181 for more information.


## The Application Libraries


---

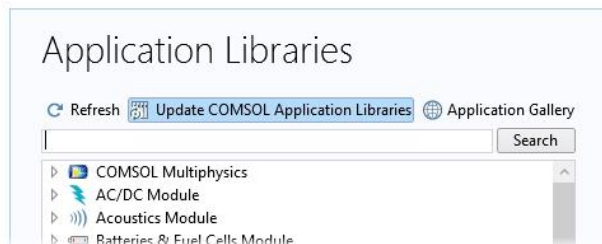
The Application Libraries are collections of MPH files containing tutorial models and runnable applications with accompanying documentation. Tutorial models show how to use the Model Builder and have documentation that includes theoretical background and step-by-step instructions. Runnable applications have instructions on how to use the application. You can readily inspect and edit all tutorial models and applications to make them your own. Each physics-based add-on module comes with its own application library with examples specific to its applications and physics area. You can use the step-by-step instructions and the MPH files as a template for your own modeling.



results are easily regenerated. You can open these to study the settings and to mesh and re-solve. It is also possible to download the full versions — with meshes and solutions — of most of these when you update your Application Libraries. These appear in the Application Libraries window with the  icon. If you position the cursor at a compact file in the Application Libraries window, a **No solutions stored** message appears. A solved version is available for download via the Application Library Update (except in a few cases where the file is a template related to another, regular, model).

- Preview MPH files, with only a model description and thumbnail image available. These appear in the Application Libraries window with the  icon. The file is a preview of an application or a model file, including the model description and information about used products and physics interfaces and the computation time. Solved and compact versions are available for download. Model documentation will be available if you have specified the use of online help (see the *Reference Manual* for details on how to do this).

The Application Libraries are updated on a regular basis by COMSOL. To check all available updates, click **Update COMSOL Application Libraries**  at the top of the **Application Libraries** window. You can also find this option from the **File > Help** menu (Windows<sup>®</sup> users) or from the **Help** menu (macOS and Linux<sup>®</sup> users). This connects you to the COMSOL website, where you can access new applications and the latest updates.

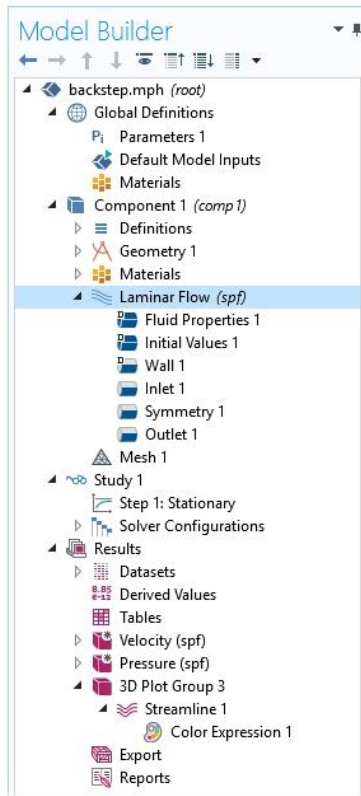


If your computer has an internet connection, then you can click the **Application Gallery** button to access a wide range of additional examples from the COMSOL website.



## Workflow and Sequence of Operations

In the **Model Builder** window, every step of the modeling process, from defining global variables to the final report of results, is displayed in the model tree.



From top to bottom, the model tree defines an orderly sequence of operations. In the following branches of the model tree, the node order makes a difference and you can change the sequence of operations by moving the subnodes up or down the model tree:

- **Geometry**
- **Materials**
- **Physics**
- **Mesh**
- **Study**
- **Plot Groups**

Nodes may be reordered by these methods:

- Drag-and-drop
- Right-clicking the node and selecting **Move Up** or **Move Down**
- Pressing Ctrl + Up arrow or Ctrl + Down arrow

In other branches, the ordering of nodes is not significant with respect to the sequence of operations, but some nodes can be reordered for readability. Child nodes to **Global Definitions** is one such example.

You can view the sequence of operations presented as program code statements by saving the model as a **Model File for MATLAB<sup>®</sup>** or as a **Model File for Java<sup>®</sup>** after having selected **Compact History** in the **File** menu. Note that the model history keeps a complete record of the changes you make to a model as you build it. As such, it includes all of your corrections, including changes to parameters and boundary conditions and modifications of solver methods. Compacting this history removes all of the overridden changes and leaves a clean copy of the most recent form of the model steps. In the Application Builder, you can use the **Record Method** option to view and edit program code statements in the Method editor.

As you work with the COMSOL Desktop interface and the Model Builder, you will grow to appreciate the organized and streamlined approach. However, any description of a user interface is inadequate until you try it for yourself. In the next chapters, you are invited to work through two examples to familiarize yourself with the software.

## Example 1: Structural Analysis of a Wrench

---

This simple example requires none of the add-on products to COMSOL Multiphysics®. For more fully-featured structural mechanics models, see the Structural Mechanics Module application library.

At some point in your life, it is likely that you have tightened a bolt using a wrench. This exercise takes you through a structural mechanics model that analyzes this basic task from the perspective of the structural integrity of the wrench subjected to a worst-case loading.

The wrench is, of course, made from steel, a ductile material. If the applied torque is too high, the tool will be permanently deformed due to the steel's elastoplastic behavior when pushed beyond its yield stress level. To analyze whether the wrench handle is appropriately dimensioned, you will check if the mechanical stress level is within the yield stress limit.

This tutorial gives a quick introduction to the Model Builder workflow. It starts with opening the Model Wizard and adding a physics option for solid mechanics. Then a geometry is imported and steel is selected as the material. You then explore the other key steps in creating a model by defining a parameter and boundary condition for the load; selecting geometric entities in the Graphics window; defining the Mesh and Study; and finally, examining the results numerically and through visualization.

If you prefer to practice with a more advanced model, read this section to familiarize yourself with some of the key features, and then go to the tutorial “Example 2: The Busbar — A Multiphysics Model” on page 59.

## Model Wizard

---

- 1 To start the software, double-click the COMSOL Multiphysics icon on the desktop, which will take you to the New window with two options for creating a new model: **Model Wizard** or **Blank Model**.



If you select **Blank Model**, you can right-click the root node in the model tree to manually add a **Component** and a **Study**. For this tutorial, click the **Model Wizard** button.



If the COMSOL Desktop user interface is already open, you can start the Model Wizard by selecting **New** from the **File** menu. Choose the **Model Wizard**.



The Model Wizard will guide you through the first steps of setting up a model. The next window lets you select the dimension of the modeling space.

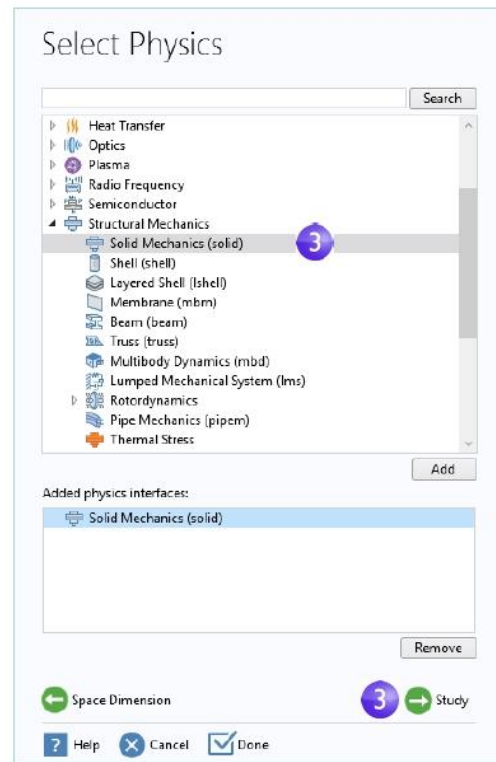
- 2 In the **Select Space Dimension** window, select 3D.





- 3 In **Select Physics**, select **Structural Mechanics > Solid Mechanics (solid)** . Click **Add**.


Without add-on modules, **Solid Mechanics** is the only physics interface available in the **Structural Mechanics** folder. In the picture to the right, part of the **Structural Mechanics** folder is shown as it appears when all add-on modules are available.

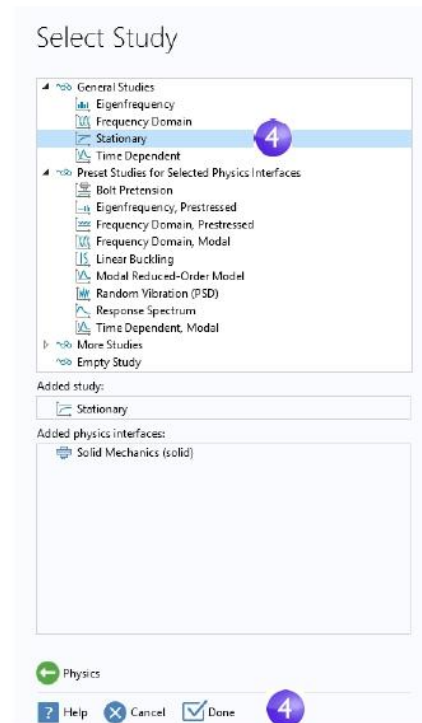
Click **Study** → to continue.



4 Click **Stationary**  under **Preset Studies**. Click **Done**  once you have finished.

Preset studies have solver and equation settings adapted to the selected physics, which is, in this example, **Solid Mechanics**. A **Stationary** study is used in this case — there are no time-varying loads or material properties.

Any selection from the **Custom Studies** branch  requires manual settings.



## Geometry

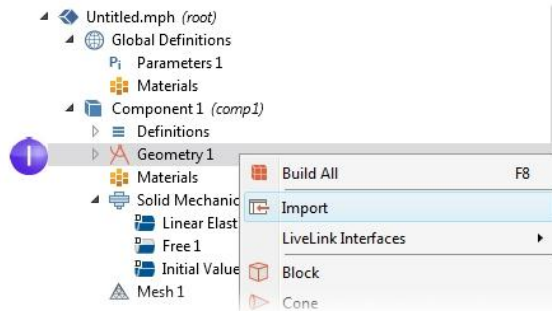
This tutorial uses a geometry that was previously created and stored in the COMSOL native CAD format, .mphbin. To learn how to build your own geometry, see “Appendix A — Building a Geometry” on page 159.

### File Locations

The location of the application library that contains the file used in this exercise varies based on the software installation and operating system. In Windows<sup>®</sup>, the file path will be similar to:

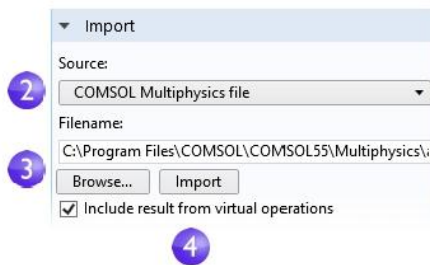
C:\Program Files\COMSOL\COMSOL55\Multiphysics\applications.

- 1 In the Model Builder window, under **Component 1**, right-click **Geometry 1** and select **Import**.









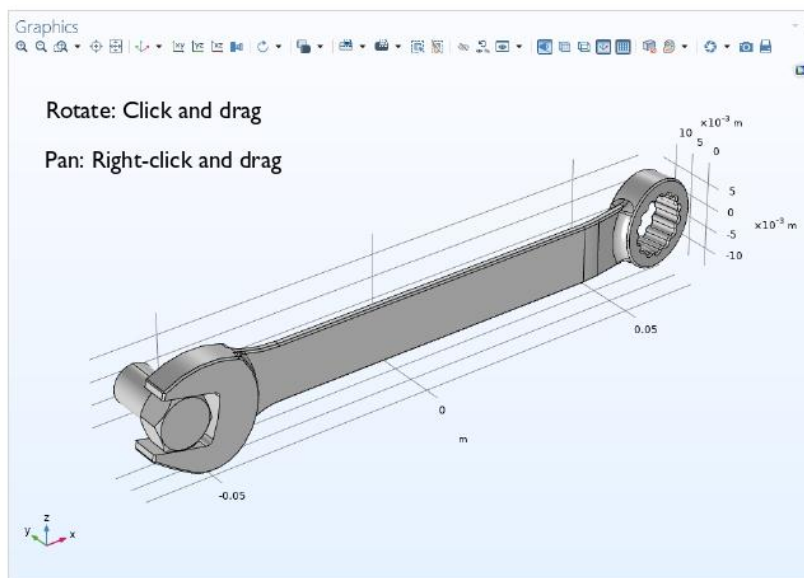
As an alternative, you can use the ribbon and click **Import** from the **Geometry** tab.

- 2 In the **Settings** window for **Import**, from the **Source** list, select **COMSOL Multiphysics file**.



- 3 Click **Browse** and locate the file `wrench.mphbin` in the application library folder of the COMSOL installation folder. Its default location in Windows® is  
 C:\Program Files\COMSOL\COMSOL55\Multiphysics\applications\COMSOL\_Multiphysics\ Structural\_Mechanics\wrench.mphbin  
 Double-click to add or click **Open**.
- 4 Click **Import** to display the geometry in the **Graphics** window.

- 5 Click the wrench geometry in the **Graphics** window and then experiment with moving it around. As you point to or click the geometry, it changes color. Click the **Zoom In** , **Zoom Out** , **Go to Default 3D View** , **Zoom Extents** , and **Transparency**  buttons on the **Graphics** window toolbar to see what happens to the geometry:
- To rotate, click and drag anywhere in the **Graphics** window.
  - To move, right-click and drag.
  - To zoom in and out, click the mouse scroll wheel, continue holding it, and drag.
  - To get back to the original position, click the **Go to Default 3D View**  button on the toolbar.




Also see “Appendix B — Keyboard and Mouse Shortcuts” on page 176 for additional information.

The imported model has two parts, or domains, corresponding to the bolt and the wrench. In this exercise, the focus will be on analyzing the stress in the wrench.



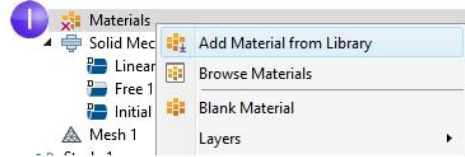
## Materials

The **Materials** node  stores the material properties for all physics and all domains in a **Component** node. Use the same generic steel material for both the bolt and tool. Here is how to choose it in the Model Builder.

1 Open the **Add Materials window**.

You can open the Add Materials window in either of these two ways:

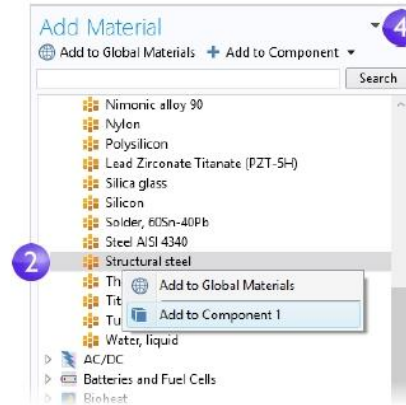
- Right-click **Component 1 > Materials**  in the **Model Builder** and select **Add Material from Library** 



- From the ribbon, select the **Home** tab and then click **Add Material**.

2 In the Add Material window, click to expand the **Built-In** folder. Scroll down to find **Structural steel**, right-click, and select **Add to Component 1**.

3 Examine the **Material Contents** section in the **Settings** window for **Material** to see the properties that are available. Properties with green check marks are used by the physics in the simulation.



4 Close the **Add Material** window.

3

Property	Variable	Value	Unit	Property group
<input checked="" type="checkbox"/> Density	rho	7850[kg/m^3]	kg/m <sup>3</sup>	Basic
<input checked="" type="checkbox"/> Young's modulus	E	200e9[Pa]	Pa	Young's modulus and Poisson's ratio
<input checked="" type="checkbox"/> Poisson's ratio	nu	0.30	1	Young's modulus and Poisson's ratio
Relative permeability	mu_r_iso ;...	1	1	Basic
Heat capacity at constant pressure	Cp	475[J/(kg*K)]	J/(kg*K)	Basic
Thermal conductivity	k_iso ; kii...	44.5[W/(m*K)]	W/(m*K)	Basic
Electrical conductivity	sigma_iso ;...	4.032e6[S/m]	S/m	Basic
Relative permittivity	epsilon_iso ;...	1	1	Basic
Coefficient of thermal expansion	alpha_iso ;...	12.3e-6[1/K]	1/K	Basic
Murnaghan third-order elastic moduli	l	-3.0e11[Pa]	N/m <sup>2</sup>	Murnaghan
Murnaghan third-order elastic moduli	m	-6.2e11[Pa]	N/m <sup>2</sup>	Murnaghan

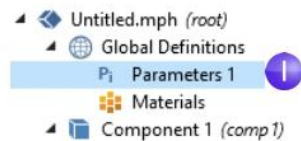
- Also see the busbar tutorial sections “Materials” on page 73 and “Customizing Materials” on page 115 to learn more about working with materials.

## Global Definitions

You will now define a global parameter specifying the load applied to the wrench.

### Parameters

- In the **Model Builder**, under **Global Definitions** , choose **Parameters 1** .



- Go to the **Settings** window for **Parameters 1**. In the **Parameters** table, enter these settings:

- In the **Name** column or field, enter F.
- In the **Expression** column or field, enter 150[N]. The square-bracket notation is used to associate a physical unit to a numerical value; in this case, the unit of force in Newtons. The **Value** column is automatically updated based on the expression entered once you leave the field or press Return.
- In the **Description** column or field, enter Applied force.

Parameters			
Name	Expression	Value	Description
F	150[N]	150 N	Applied force

- If you have a **Parameters** table with more than one entry, you can sort the table with respect to a particular column by clicking on the corresponding header.

The sections “Global Definitions” on page 65 and “Parameters, Functions, Variables, and Couplings” on page 110 show you more about working with parameters.

So far, you have added the physics and study, imported a geometry, added the material, and defined one parameter. The **Model Builder** node sequence should now match the figure to the right. The default feature nodes under **Solid Mechanics** are indicated by a **D** in the upper-left corner of the node icon.

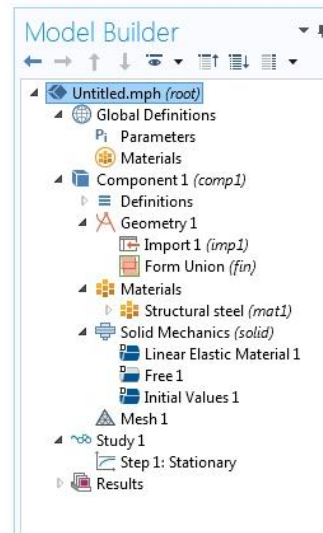
The default nodes for **Solid Mechanics** are: **Linear Elastic Material**, **Free**, and **Initial Values**.

The node **Linear Elastic Material** is the default material model for the **Solid Mechanics** interface. The node **Free** is a boundary condition that allows all boundaries to move freely without a constraint or load. The node **Initial Values** is used for specifying initial displacement and velocity values for a nonlinear or transient analysis (not applicable in this case).

The default physics nodes cannot be removed. Instead, you specify physics settings that deviate from that of the default nodes by adding additional nodes. These additional nodes can override or contribute to the settings of the default nodes as well as other nodes. For more information, see “Override and Contribution: Exclusive and Contributing Nodes” on page 126.

At any time, you can save your model and then open it later in exactly the state in which it was saved.

- 3 From the File Menu, select **File > Save As**. Browse to a folder where you have write permissions, and save the file as `wrench.mph`.



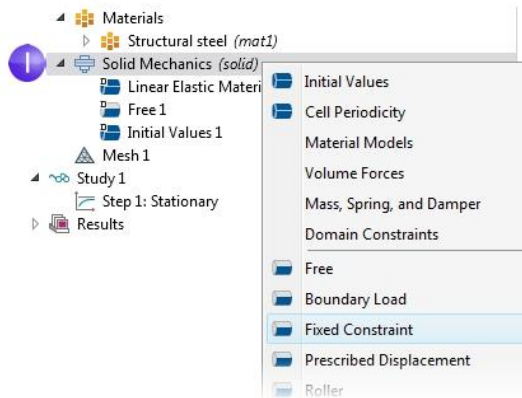
## Physics and Boundary Conditions

With the geometry and materials defined, you are now ready to set the boundary conditions.

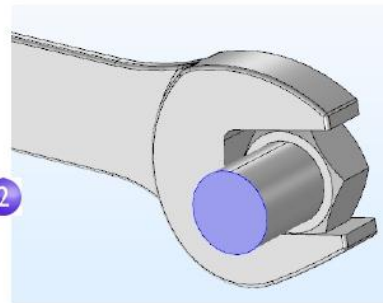
- 1 In the **Model Builder**, right-click **Solid Mechanics (solid)** and select **Fixed Constraint**.

This boundary condition constrains the displacement of each point on a boundary surface to be zero in all directions.

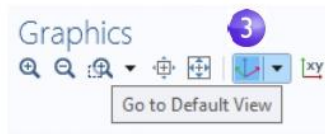
You can also use the ribbon and select, from the **Physics** tab, **Boundaries > Fixed Constraint**.



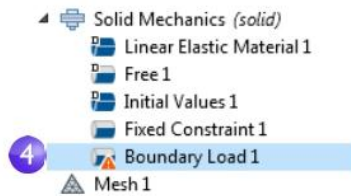
- 2 In the **Graphics** window, rotate the geometry by clicking anywhere in the window and then dragging the wrench into the position shown. Click on the exposed front surface of the partially modeled bolt. The boundary turns blue indicating that it has been selected. The **Boundary number** in the **Selection** list should be **35**.



- 3 Click the **Go to Default View** button on the **Graphics** toolbar to restore the geometry to the default view.

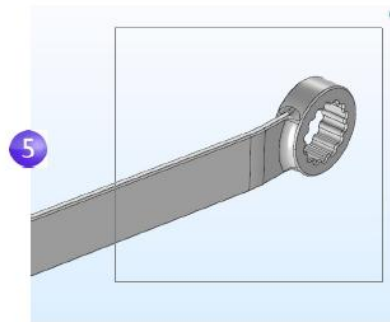


- In the **Model Builder**, right-click **Solid Mechanics (solid)** and select **Boundary Load**. A **Boundary Load** node is added to the **Model Builder** sequence.

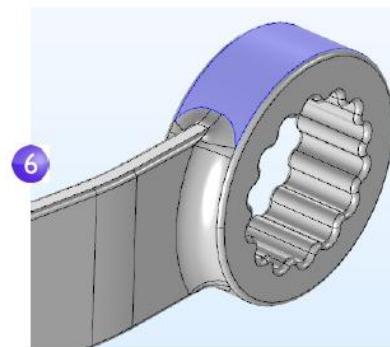


The “warning” attribute displayed on the Boundary Load node indicates that its boundary selection is empty. The next step will be to select a boundary.

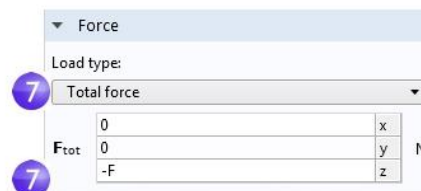
- In the **Graphics** window, click the **Zoom Box** button on the toolbar and drag the mouse to select the square region shown in the figure to the right. Release the mouse button to zoom in on the selected region.



- Select the top socket face (boundary III) by clicking the boundary to highlight it in blue and add it to the **Selection** list.



- In the **Settings** window for **Boundary Load**, under **Force**, select **Total force** as the **Load type** and enter  $-F$  in the text field for the  $z$  component. The negative sign indicates the negative  $z$  direction (downward). With these settings, the load of 150 N will be distributed uniformly across the selected surface.

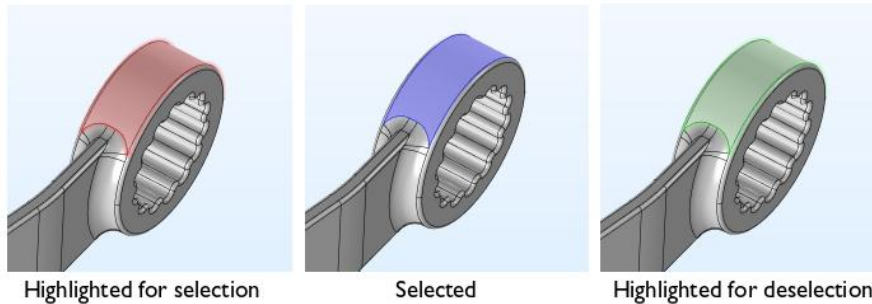


Note that to simplify the modeling process, the mechanical contact between the bolt and the wrench is approximated with a material interface boundary condition. Such an internal boundary condition is automatically defined and guarantees continuity in normal stress and displacement across a material interface. A more detailed analysis including mechanical contact can be done with the Structural Mechanics Module.

### SELECTING BOUNDARIES AND OTHER GEOMETRIC ENTITIES

When a boundary is unselected, its color is typically gray. The exception is when you use the material **Appearance** setting available in **Materials**; see page 76. To select a boundary, first hover over it. This highlights the boundary in red, assuming the boundary was previously unselected. Now, click to select the boundary by using the left mouse button. The boundary now turns blue. Its boundary number will appear in the **Selection** list in the **Settings** window of the corresponding boundary condition. Once a boundary is selected and you hover over it again, the boundary turns green. If you click a boundary highlighted in green, the boundary is deselected and now turns gray again. The same technique for selecting and deselecting is applicable to geometry objects, domains, boundaries, edges, and points.

The figure below shows the different selection states for a boundary.

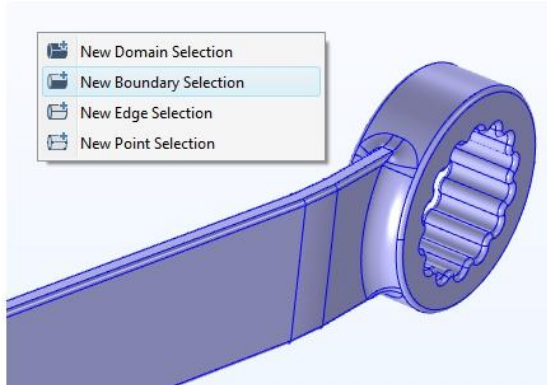


To select internal surfaces that are hidden behind the one closest to you, use one of the following methods to cycle through the boundaries at the mouse pointer: roll the mouse scroll wheel, use the keyboard + and - buttons, use the keyboard arrow-up and arrow-down buttons, or use two-finger drag on a touchpad.

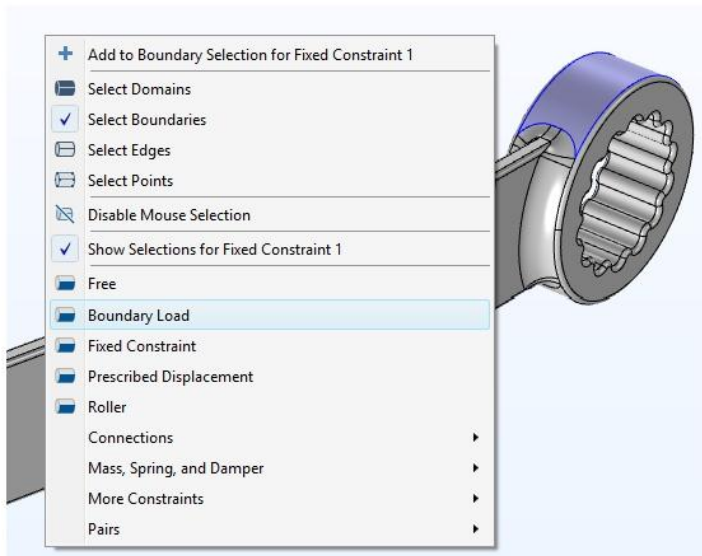
### SELECTING USING THE GRAPHICS WINDOW CONTEXT MENUS

As an alternative selection method, as of version 5.5, you can right-click in the **Graphics** window and select one of the options for domain, boundary, edge, or point selection.

For example, to assign a **Boundary Load** boundary condition, first right-click and select **New Boundary Selection**, as shown in the figure below.



Click to select the boundaries to which you would like to apply the boundary condition. (In this case, the top socket face; boundary **III**.) Then, right-click again and select **Boundary Load**, as shown in the figure below.




You can also use this method to add additional boundaries to the selections of an already created boundary condition. In the example above, you could, for example, select the menu option **Add to Boundary Selection for Fixed Constraint I** (although it wouldn't be applicable in this example).

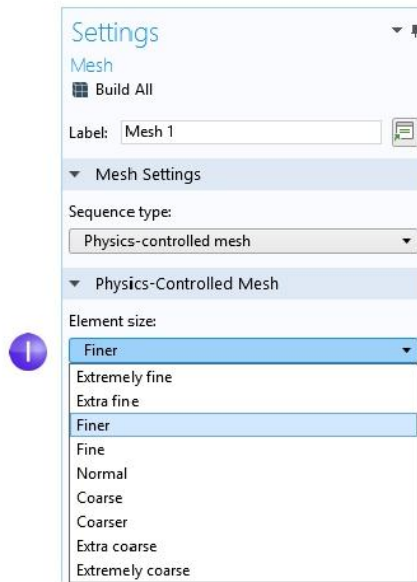
## Mesh


---

The mesh settings determine the resolution of the finite element mesh used to discretize the model. The finite element method divides the model into small elements of geometrically simple shapes, in this case tetrahedra. In each tetrahedron, a set of polynomial functions is used to approximate the structural displacement field — how much the object deforms in each of the three coordinate directions. The stress is then computed by differentiating the displacement field.

In this example, because the geometry contains small edges and faces, you will define a slightly finer mesh than the default setting suggests. This will better resolve the variations of the stress field and give a more accurate result. Refining the mesh size to improve computational accuracy always involves some sacrifice in speed and typically requires increased memory usage.

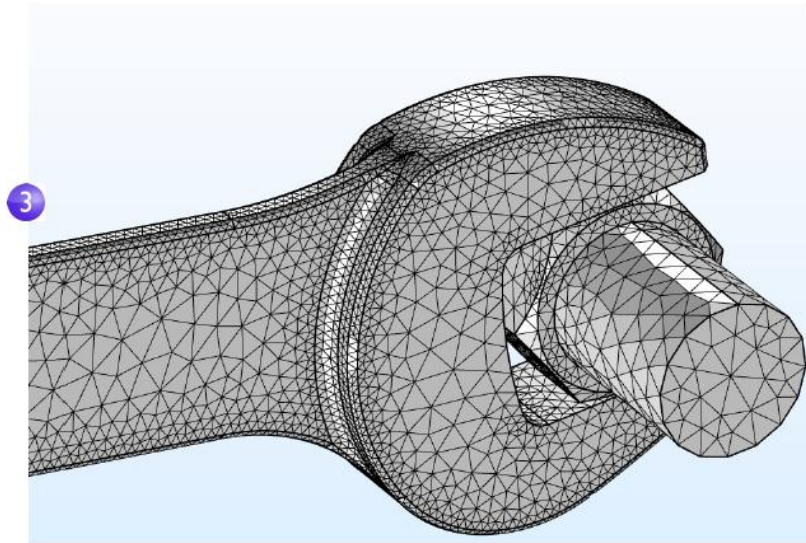
- 1 In the **Model Builder**, under **Component 1**, click **Mesh 1** . In the **Settings** window for **Mesh**, under **Mesh Settings**, select **Finer** from the **Element size** list.



- 2 Click the **Build All** button  in the **Settings** window or on the **Mesh** toolbar. The resulting mesh will require about 5GB to solve. If you have a computer with less than 5GB of RAM you can select **Fine** from the **Element size** list (instead of **Finer**.)



- 3 After a few seconds, the mesh is displayed in the **Graphics** window. Rotate the wrench to take a look at the element size distribution (this may vary a bit depending on the version you are running).



## Study

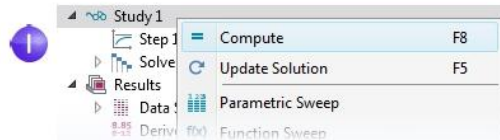
In the beginning of setting up the model, you selected a **Stationary** study, which implies that a stationary solver will be used. For this to be applicable, the assumption is that the load, deformation, and stress do not vary in time. To start the solver:

- 1 Right-click **Study 1** and select **Compute** = (or press F8).

After a few seconds of computation time, the default plot is displayed in the **Graphics**

window. During computation, a

**Progress** window shows progress information from the solvers. After the computation you can find other useful information about the computation in the **Messages** and **Log** windows; Click the **Messages** and **Log** tabs under the **Graphics**



window to see the kind of information available to you. The **Messages** window can also be opened from the **Windows** drop-down list in the **Home** tab of the ribbon.

```

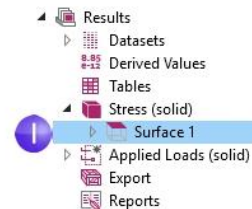
Messages x Progress Log
----- Stationary Solver 1 in Study 1/Solution 1 (sol1) -----
Started at Oct 7, 2019 10:55:00 AM.
Linear solver
Number of degrees of freedom solved for: 412767.
Symmetric matrices found.
Scales for dependent variables:
Displacement field (compl.u): 1
Orthonormal null-space function used.
Iter   SolEst   Damping   Stepsize #Res #Jac #Sol LinIt   LinErr   LinRes
  1     0.88    1.0000000    0.88    1    1    1    12    7.5e-06  0.0031
Solution time: 12 s.
Physical memory: 1.82 GB
Virtual memory: 2.24 GB
Ended at Oct 7, 2019 10:55:12 AM.
----- Stationary Solver 1 in Study 1/Solution 1 (sol1) ----->

```

## Results



The von Mises stress is displayed in the **Graphics** window in a default Surface plot with the displacement visualized using a Deformation subnode. Change the default unit ( $\text{N/m}^2$ ) to the more suitable MPa as shown in the following steps.

- 1 In the **Model Builder**, expand the **Results > Stress (solid)** node, then click **Surface 1**.

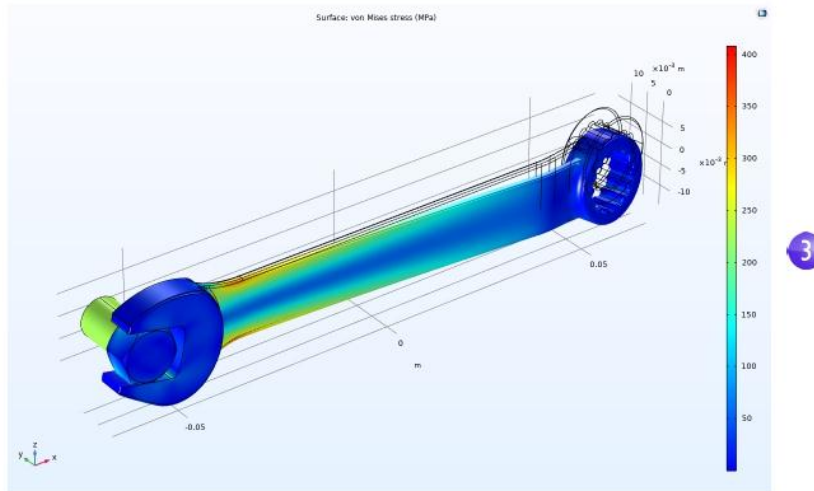


- 2 In the **Settings** window under **Expression**, from the **Unit** list, select **MPa** (or type MPa in the field).



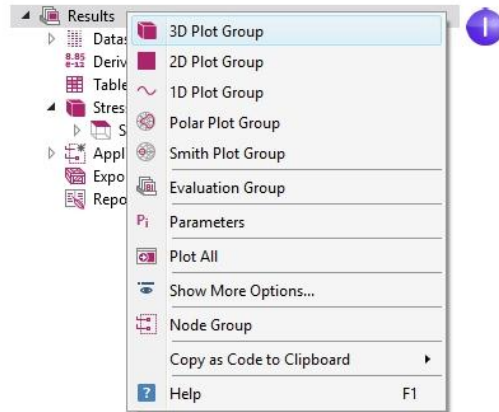
- 3 Click the **Plot** button  on the toolbar of the **Settings** window for the **Surface** plot and then click the **Go to Default 3D View** button  on the **Graphics window** toolbar.

The von Mises stress distribution is shown in the bolt and wrench under an applied vertical load.

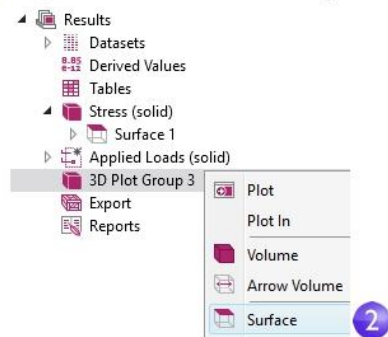



For a typical steel used for tools like a wrench, the yield stress is about 600 MPa, which means that we are getting close to plastic deformation for our 150 N load (which corresponds to about 34 pounds force). You may also be interested in a safety margin of, say, a factor of three. To quickly assess which parts of the wrench are at risk of plastic deformation, you can plot an inequality expression such as `solid.mises>200[MPa]`.

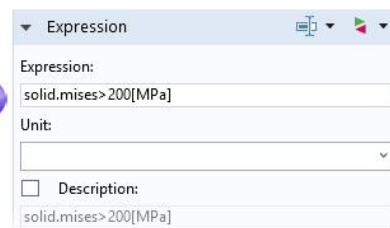
- 1 Right-click the **Results** node  and add a **3D Plot Group** .



- 2 Right-click the **3D Plot Group 3** node  and select **Surface** .



- 3 In the **Settings** window for **Surface**, click the **Replace Expression** button  and select **Model > Component1 > Solid Mechanics > Stress > solid.mises-von Mises stress - N/m<sup>2</sup>** by double-clicking. When you know the variable name beforehand, you can also directly enter **solid.mises** in the **Expression** field. Now edit this expression to: **solid.mises>200[MPa]**.

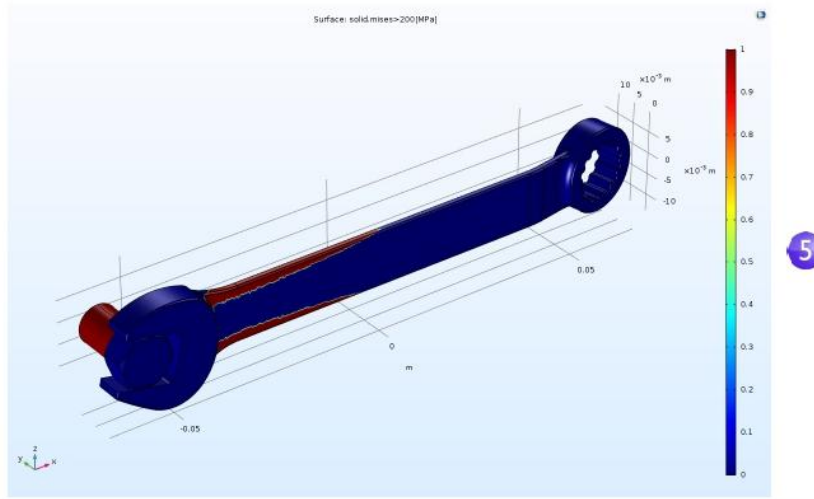


This is a boolean expression that evaluates to either 1 for true or 0 for false. In areas where the expression evaluates to 1, the safety margin is exceeded.

- 4 Click the **Plot** button .

- 5 In the **Model Builder**, click **3D Plot Group 2**. Press F2 and, in the **Rename 3D Plot Group** dialog box, enter **Safety Margin**. Click **OK**. Alternatively, edit the label at the top of the **Settings** window.

The resulting plot shows that the stress in the bolt is high, but the focus of this exercise is on the wrench. If you wish to comfortably certify the wrench for a 150 N load with a factor-of-three safety margin, you would need to change the handle design somewhat, such as by making it wider.



You may have noticed that the manufacturer, for various reasons, has chosen an asymmetric design for the wrench. Because of that, the stress field may be different if the wrench is flipped around. Try now, on your own, to apply the same force in the other direction and visualize the maximum von Mises stress to see if there is any difference.

## Convergence Analysis



---

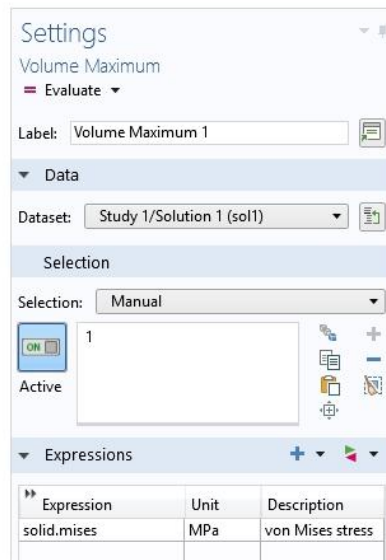
The results from a simulation software such as COMSOL Multiphysics can shorten design times dramatically by, for example, reducing the number of experiments or product tests. However, simulation software is not a substitute for real-world testing. This is especially important if there are risks for physical or environmental damage. One way to reduce (but not eliminate) the risk of drawing the wrong conclusions from simulation results is to perform a convergence analysis.

To check the accuracy of the computed maximum von Mises stress in the wrench, you can now continue with a mesh convergence analysis. Do that by using a finer mesh and therefore a higher number of degrees of freedom (DOFs).

- ⚠ This section illustrates some more in-depth functionality and the steps below could be skipped at a first reading. In order to run the convergence analysis below, a computer with at least 4GB of memory (RAM) is recommended.

### EVALUATING THE MAXIMUM VON MISES STRESS

- 1 To study the maximum von Mises stress in the wrench, in the **Results** section of the model tree, right-click the **Derived Values**  node and select **Maximum > Volume Maximum** MAX.
- 2 In the **Settings** window for **Volume Maximum**, under **Selection**, choose **Manual** and select the wrench, domain 1, by clicking on the wrench in the **Graphics** window. We will only consider values in the wrench domain and neglect those in the bolt.
- 3 In the first row of the **Expressions** table, in the **Expression** column, type `solid.mises`. To find the expression for the von Mises stress, you can also click the **Replace Expression** button  and browse to this variable.
- 4 In the **Expressions table**, type MPa as the **Unit**.



5 In the **Settings** window for **Volume Maximum**, click **Evaluate** to evaluate the maximum stress. The result will be displayed in a Table window and will be approximately 375 MPa.

Messages		Progress		Log		Table 1	
8.85	e+11	0.5	850	e-1	e-3	0.85	
von Mises stress (MPa)							5
375.50							

6 To see where the maximum value is attained, you can use a **Max/Min Volume** plot.

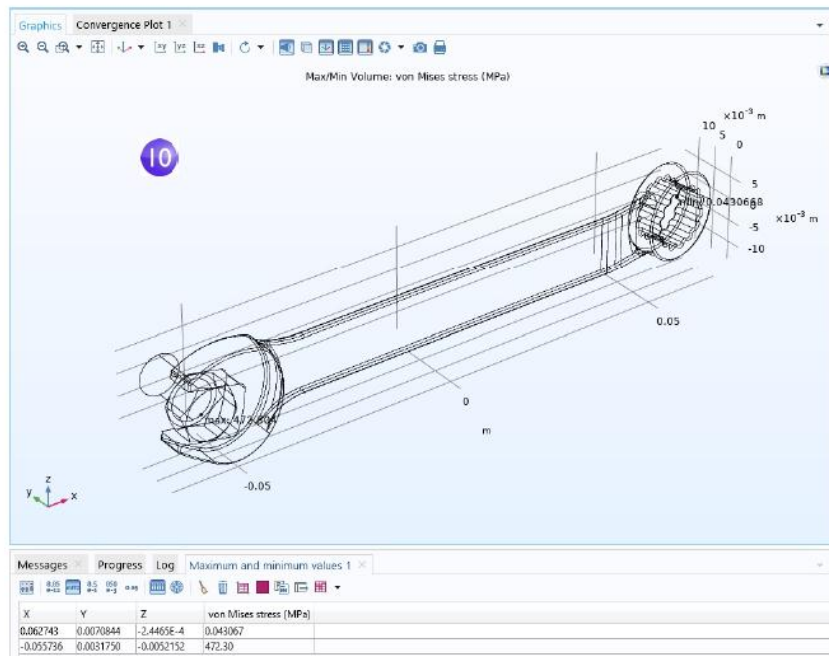
Right-click the **Results** node and add a **3D Plot Group**. Next, right-click the **3D Plot Group 4** node and select **More Plots > Max/Min Volume**.

7 To plot values in the wrench and not in the bolt, right-click the **Max/Min Volume** node and select **Selection** and select the wrench domain number 1.

8 In the **Settings** window for **Max/Min Volume**, in the **Expression** text field, type `solid.mises`.



9 In the **Settings** window under **Expression**, from the **Unit** list, select **MPa** (or enter MPa in the field).

10 Click the **Plot** button. This type of plot simultaneously shows the location of the maximum and minimum values and also their coordinate location in the table below (the exact values may differ depending on the version you are running).

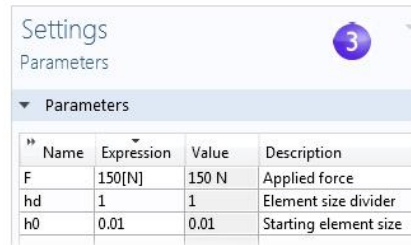


## PARAMETERIZING THE MESH


We will now define a parametric sweep for successively refining the mesh size while solving and then finally plot the maximum von Mises stress vs. mesh size. First, we define the parameters that will be used for controlling the mesh density.


- 1 In the **Model Builder**, click **Parameters I**  under **Global Definitions** .
- 2 Go to the **Settings** window for **Parameters**. In the **Parameters** table (or under the table in the fields), enter these settings:
  - In the **Name** column or field, enter `hd`. This parameter will be used in the parametric sweep to control the element size.
  - In the **Expression** column or field, enter `1`.
  - In the **Description** column or field, enter `Element size divider`.

- 3 Now, enter another parameter with **Name** `h0`, **Expression** `0.01`, and **Description** `Starting element size`. This parameter will be used to define the element size at the start of the parametric sweep.



Name	Expression	Value	Description
F	150[N]	150 N	Applied force
hd	1	1	Element size divider
h0	0.01	0.01	Starting element size

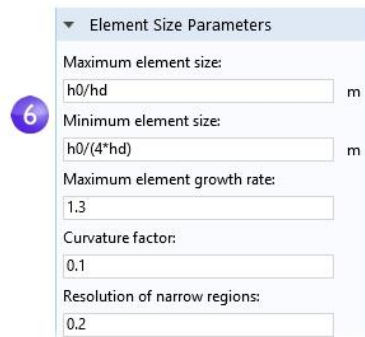
- 4 In the **Model Builder**, under **Component I**, click **Mesh I** . In the **Settings** window for **Mesh**, select **User-controlled mesh** from the **Sequence type** list.

- 5 Under **Mesh I**, click the **Size** node .

- 6 In the **Settings** window for **Size**, under **Element Size**, click the **Custom** button.

Under **Element Size Parameters**, enter:

- `h0/hd` in the **Maximum element size** field.
- `h0/(4*hd)` in the **Minimum element size** field.
- `1.3` in the **Maximum element growth rate** field.
- `0.1` in the **Curvature factor** field.
- `0.2` in the **Resolution of narrow regions** field.



Element Size Parameters

Maximum element size:  m

Minimum element size:  m

Maximum element growth rate:

Curvature factor:

Resolution of narrow regions:

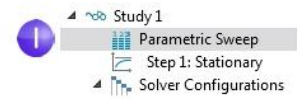
See page 85 for more information on the element size parameters.

## PARAMETRIC SWEEP AND SOLVER SETTINGS

As a next step, add a parametric sweep for the parameter `hd`.



1 In the **Model Builder**, right-click **Study 1** and select **Parametric Sweep**. A **Parametric Sweep** node is added to the **Model Builder** sequence.



2 In the **Settings** window for **Parametric Sweep**, under the table in the **Study Settings** section, click the **Add** button **+**. From the **Parameter name** list in the table, select **hd**.

3 Enter a range of **Parameter values** to sweep for. Click the **Range** button and enter the values in the **Range** dialog box. In the **Start** field, enter 1. In the **Step** field, enter 1, and in the **Stop** field, enter 6. Click **Replace**. The **Parameter value list** will now display  $\text{range}(1, 1, 6)$ .



The settings above make sure that as the sweep progresses, the value of the parameter **hd** increases and the maximum and minimum element sizes decrease.

See page 141 for more information on defining parametric sweeps.

For the highest value of **hd**, the number of DOFs will exceed one million. Therefore, we will switch to a more memory-efficient iterative solver.

4 Under **Study 1 > Solver Configurations > Solution 1**, expand the **Stationary Solver I** node, and right-click **Suggested Iterative Solver** and select **Enable**. Selecting an iterative solver option typically reduces memory usage but can require physics-specific tailoring of the solver settings for efficient computations.

5 Under **General** in the **Settings** window for **Suggested Iterative Solver**, change the **Preconditioning** to **Right**. (This is a low-level solver option, which in this case will suppress a warning message that would otherwise appear. However, this setting does not affect the resulting solution. Preconditioning is a mathematical transformation used to prepare the finite element equation system for using the iterative solver.)

6 Click the **Study 1** node and select **Compute**, either in the **Settings** window or by right-clicking the node. You can also click **Compute** in the ribbon **Home** or **Study** tab. The computation time will be a few minutes (depending on the computer hardware) and memory usage will be about 4GB.

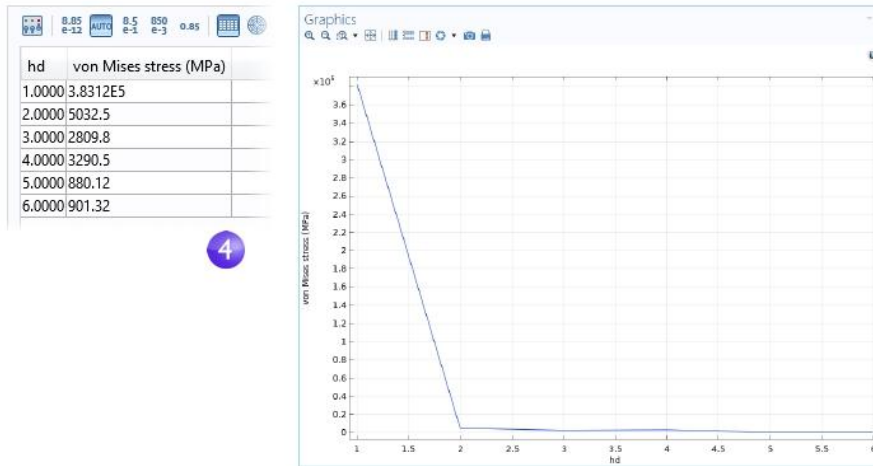
## RESULTS ANALYSIS

As a final step, analyze the results from the parametric sweep by displaying the maximum von Mises stress in a table.

- 1 In the Model Builder under **Results > Derived Values**, select the **Volume Maximum** node **MAX**.

The solutions from the parametric sweep are stored in a new **Dataset** named **Study I/Parametric Solutions I**. Now, change the **Volume Maximum** settings accordingly:

- 2 In the **Settings** window for **Volume Maximum**, change the **Dataset** to **Study I/Parametric Solutions I**.
- 3 Click the arrow next to the **Evaluate** button at the top of the **Settings** window for **Volume Maximum** and select to evaluate in a **New Table**. This evaluation may take 20 seconds or so.
- 4 To plot the results in the **Table**, click the **Table Graph** button at the top of the **Table** window (the first few values will vary depending on the version due to slight mesh variations for coarser meshes before a converged value has been reached).



It is more interesting to plot the maximum value vs. the number of DOFs. This is possible by using the built-in variable `numberofDOFs`.

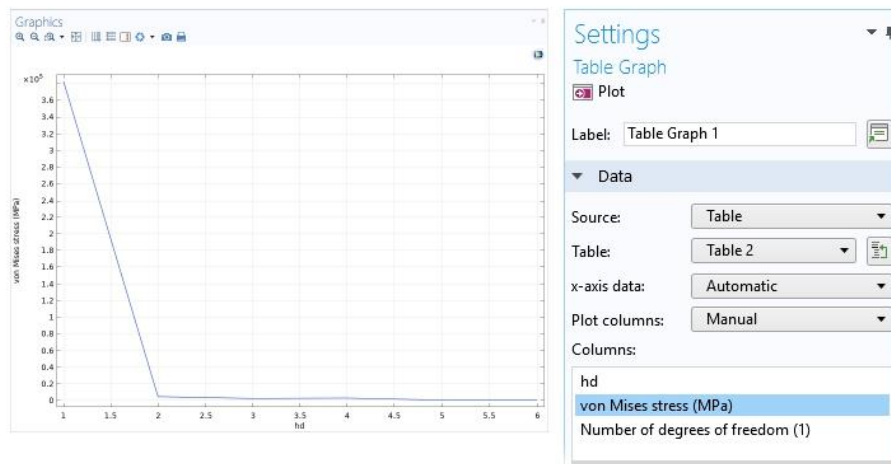
- 5 Right-click the **Derived Values** node and select **Global Evaluation**.
- 6 In the **Settings** window for **Global Evaluation**, change the **Dataset** to **Study I/Parametric Solutions I**.
- 7 In the **Expressions** field, enter `numberofDOFs`.

⚠ You can type the first few characters of the variable name and then use the keyboard shortcut `Ctrl+Space` to get a variable suggestion from the list of available variables.

- 8 In the **Settings** window for **Global Evaluation**, click the arrow next to the **Evaluate** button and select the option to evaluate in **Table 2**. This displays the DOF values for each parameter next to the previously evaluated data.

This convergence analysis shows that the computed value of the maximum von Mises stress in the wrench handle will decrease from the high original value, for a mesh with about 40,000 DOFs, to 375 MPa for a mesh with about 1,000,000 DOFs. It also shows that above 500,000 DOFs the results have essentially the same accuracy as for 1,000,000 DOFs.

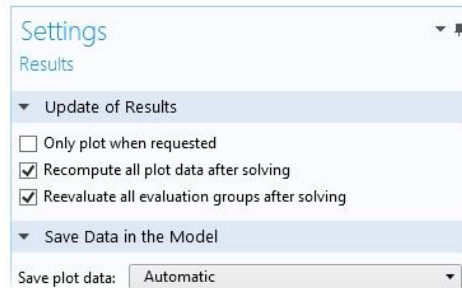
The figure below shows the associated **Table Graph** and **Table Graph Settings** window.



Note that depending on the version of COMSOL Multiphysics that you are running, the above values may vary slightly due to variations in the number of elements generated by the meshing algorithm.

As an alternative to **Derived Values**, you can use **Evaluation Groups**. An **Evaluation Group** shares some of the properties of **Plot Groups** as well as **Derived Values**. An **Evaluation Group** comes with an integrated table whereas **Derived Values** outputs to a table of your choice. In addition, **Evaluation Groups** allows you to automatically

re-evaluate after solving. To enable this, select the corresponding check box in the **Settings** window of the **Results** node as shown in the figure below.



In this **Settings** window you can also request to regenerate all plots after solving. You add an **Evaluation Group** in the same way as a **Plot Group** by right-clicking the **Results** node. The figure below shows an **Evaluation Group** that performs the same task as the **Derived Values** described earlier.



The figure below shows the corresponding **Evaluation Group** table.

hd	von Mises stress (N/m <sup>2</sup> )	Number of degrees of freedom (1)
1.0000	1532430374	42171
2.0000	405348707	114864
3.0000	389445143	250548
4.0000	383066839	447384
5.0000	377347488	702099
6.0000	375450208	951522

This concludes the wrench tutorial.

