

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA**  
**ESCUELA DE CIENCIA E INGENIERIA DE LOS MATERIALES**

“Modelación y simulación inicial del proceso de corte láser aplicado a un cable de acero inoxidable, mediante el uso del software COMSOL Multiphysics”

**Proyecto Final de Graduación para optar por el título de Ingeniero en Materiales con el grado académico de Licenciatura**

Realizado por: Antony Carmona Calvo, 2015110220

Profesor(a) Guía: Bruno Chine Polito  
Profesor Lector: Francisco Rodríguez Méndez  
Profesor Lector: Roberto Fernández Chaves  
Asesor Industrial: Antony Masis Romero

Cartago, Junio 2025

## **Resumen**

En este trabajo se desarrolla un trabajo de modelación preliminar y su sucesiva simulación computacional, utilizando el programa computacional COMSOL Multiphysics, para analizar el proceso de corte láser de un cable de acero inoxidable.

Se revisa la literatura científica para describir los fenómenos físicos que intervienen en este proceso, como la transferencia de calor y la mecánica de fluidos, junto con su aplicación a la modelación computacional. A partir de esta revisión, se estudian algunos modelos específicos que representan computacionalmente los mecanismos físicos anteriores.

Inicialmente se elaboran diferentes modelos bidimensionales del proceso de corte láser y se analizan los resultados computacionales obtenidos. Esto permite desarrollar tres versiones finales de la modelación de este proceso térmico, que pueden ser integrados y usados como una base válida para su descripción y análisis. Los tres modelos computacionales finales, que incorporan datos reales como geometría y propiedades de los materiales empleados en la industria, brindan valores de la temperatura y de las modificaciones geométricas del material, a medida que se aplica el proceso térmico de corte láser. En este último caso, se recurre a la modelación del cambio de fase que se produce en el material cuando se alcanzan los valores de temperatura del equilibrio sólido-líquido.

Finalmente, se lleva a cabo una estimación simple de los costos asociados a la incorporación del software COMSOL Multiphysics en la industria, para la modelación computacional del proceso de corte láser.

### **Palabras clave:**

Procesos térmicos, corte láser, modelación y simulación computacional.

## **Abstract**

This work involves the development of a preliminary modeling and its subsequent computer simulation, using the COMSOL Multiphysics software, to analyze the laser cutting process of a stainless-steel cable.

The scientific literature is reviewed to describe the physical phenomena involved in this process, such as heat transfer and fluid mechanics, along with their application to computational modeling. Based on this review, some specific models that computationally represent the aforementioned physical mechanisms are studied.

Initially, two-dimensional models of the laser cutting process are developed and the resulting computational data is analyzed. This allows for the development of three final versions of the thermal process modeling, which can be integrated and used as a valid foundation for its description and analysis. The three final computational models, which incorporate real-world data such as geometry and material properties used in the industry, provide temperature values and geometric modifications of the material as the thermal laser cutting process is applied. In the latter case, phase change modeling is used to represent the transformation that occurs in the material when the solid-liquid equilibrium temperature is reached.

Finally, a simple cost estimation is carried out for the incorporation of COMSOL Multiphysics software in the industry for the computational modeling of the laser cutting process.

## **Key works:**

Thermal processes, laser processing, computational modelling and simulation.

**CONSTANCIA DE DEFENSA PUBLICA DEL  
PROYECTO FINAL DE GRADUACIÓN**

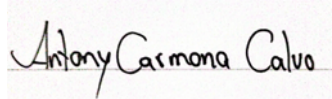
El presente Proyecto Final de Graduación titulado “Modelación y simulación inicial del proceso de corte láser aplicado a un cable de acero inoxidable, mediante el uso del software COMSOL Multiphysics” y realizado en la empresa Boston Scientific, durante el I Semestre de 2025, ha sido defendido, ante el Tribunal Examinador integrado por los profesores Bruno Chiné Polito, Francisco Rodríguez Méndez, Roberto Fernández Chaves; como requisito para optar al grado de Licenciatura en Ingeniería en Materiales de la Escuela de Ciencia e Ingeniería de los Materiales, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Este documento y su defensa ante el Tribunal Examinador han sido declarados:

Públicos

Confidenciales

\_\_\_\_\_  
Dr. Bruno Chiné Polito  
Profesor Guía

  
\_\_\_\_\_  
Antony Carmona Calvo  
Estudiante

\_\_\_\_\_  
M.Sc. Francisco Rodríguez Méndez  
Profesor Lector

\_\_\_\_\_  
Lic. Roberto Fernández Chaves  
Profesor Lector

\_\_\_\_\_  
M.Sc. Ricardo Esquivel Isern  
Director Escuela de Ciencia e Ingeniería de los Materiales

Cartago, 24 de Junio de 2025

## ACTA DE ENTREGA DEL INFORME FINAL DEL PROYECTO FINAL DE GRADUACIÓN

Se certifica que se ha recibido el Informe Final del Proyecto Final de Graduación, realizado por la estudiante Antony Carmona Calvo, carné 2015110220, la cual se titula: “Modelación y simulación inicial del proceso de corte láser aplicado a un cable de acero inoxidable, mediante el uso del software COMSOL Multiphysics” y que se realizó en la empresa Boston Scientific en el I Semestre de 2025.

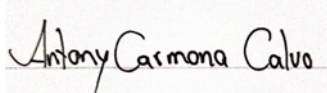
El Proyecto Final de Graduación es un requisito académico del Programa de Licenciatura en Ingeniería en Materiales de la Escuela de Ciencia e Ingeniería en Materiales del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Este documento ha sido declarado:

Públicos

Confidenciales

\_\_\_\_\_  
Dr. Bruno Chiné Polito  
Profesor Guía

  
\_\_\_\_\_  
Antony Carmona Calvo  
Estudiante

\_\_\_\_\_  
M.Sc. Francisco Rodríguez Méndez  
Profesor Lector

\_\_\_\_\_  
Lic. Roberto Fernández Chaves  
Profesor Lector

\_\_\_\_\_  
M.Sc. Ricardo Esquivel Isern  
Director Escuela de Ciencia e Ingeniería de los Materiales

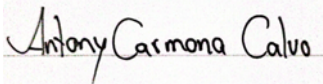
Cartago, 24 de Junio de 2025

Señores

Instituto Tecnológico de Costa Rica

Biblioteca José Figueres Ferrer

Yo Antony Carmona Calvo, carné 2015110220, autorizo (x) no autorizo ( ) a la Biblioteca José Figueres del Instituto Tecnológico de Costa Rica disponer del Trabajo Final realizado por mi persona, con el título “Modelación y simulación inicial del proceso de corte láser aplicado a un cable de acero inoxidable, mediante el uso del software COMSOL Multiphysics” para ser ubicado en el Repositorio institucional y Catálogo SIBITEC para ser accesado a través de la red Internet.



Antony Carmona Calvo

Firma de estudiante

116810468

Cédula

## **Agradecimientos**

Expreso mi más profundo agradecimiento al profesor Bruno Chiné Polito, cuya acertada orientación, observaciones y constante disposición en este trabajo han sido claves en la culminación de mi proyecto.

Asimismo, agradezco profundamente la colaboración de mis colegas, del personal técnico y administrativo del Instituto Tecnológico de Costa Rica, a la empresa Boston Scientific, así como de otros profesionales que, sin mencionarlos individualmente, dedicaron su tiempo, compartieron sus ideas y brindaron apoyo directo o indirecto a lo largo de este proceso. Su generosidad y buen ánimo resultaron decisivos para culminar con éxito esta etapa.

# Índice General

|  |    |
|--|----|
| Resumen .....  | 2  |
| Agradecimientos .....  | 7  |
| Índice de figuras .....  | 11 |
| Índice de Tablas .....   | 14 |
| 1. Descripción del problema .....                                    | 15 |
| 2. Justificación del trabajo .....                                   | 16 |
| 3. Objetivo General.....   | 17 |
| 4. Objetivos Específicos .....                                       | 17 |
| 5. Alcances y limitaciones .....                                     | 17 |
| 5.1 Alcances .....   | 17 |
| 5.2 Limitaciones.....  | 18 |
| 6. Marco Teórico.....  | 19 |
| 6.1 Definición del láser .....                                       | 19 |
| 6.1.1 Introducción del láser .....                                   | 19 |
| 6.1.2 Aplicaciones del láser en el procesamiento de materiales. .... | 22 |
| 6.1.3 Dinámica de la remoción de material .....                      | 24 |
| 6.1.4 Consideraciones sobre el corte láser.....                      | 27 |
| 6.2 Fenómenos Físicos.....   | 28 |
| 6.3 Propiedades del material .....                                   | 36 |
| 6.4 Modelación de fenómenos físicos.....                             | 38 |
| 6.5 Estimación de costos.....  | 40 |
| 7. Metodología.....  | 42 |
| 7.1 Investigación bibliográfica sobre trabajos relacionados .....    | 42 |

|  |    |
|--|----|
| 7.1.1 Modelo base 1: Modelado de la absorción de un rayo láser en un vidrio de sílice.<br>(Modeling Laser Beam Absorption in Silica Glass with Beer-Lambert Law) ..... | 42 |
| 7.1.1.1 Modificaciones realizadas al modelo base 1. ....   | 47 |
| 7.1.2 Modelo base 2: Enfriamiento y solidificación de metal (Cooling and Solidification<br>of Metal) .....   | 50 |
| 7.1.2.1 Modificaciones realizadas al modelo base 2. ....   | 53 |
| 7.1.2.2 Modelo MB 2.4 .....  | 55 |
| 7.1.3 Modelo base 3: Modelado de remoción de material a través de ablación térmica<br>(Modeling Material Removal through Thermal Ablation) .....                       | 59 |
| 7.1.3.1 Modificaciones realizadas al modelo base 3 .....   | 62 |
| 7.1.3.2 Modelo MB 3.3 .....  | 63 |
| 7.2 Desarrollo de las geometrías .....   | 65 |
| 7.3 Modelación de los fenómenos físicos que gobiernan el proceso de corte láser.....   | 67 |
| 7.3.1 Modelación de la transferencia de calor .....  | 68 |
| 7.3.2 Modelación de la transferencia de calor acoplado a la dinámica de fluidos .....  | 68 |
| 8. Resultados y Análisis.....  | 70 |
| 8.1 Descripción general de los modelos .....   | 70 |
| 8.1.1 Geometría .....  | 70 |
| 8.1.2 Dominios y fronteras .....   | 71 |
| 8.1.3 Mallado.....   | 72 |
| 8.2. Modelo IT1.MB.1 .....   | 73 |
| 8.3 Modelo IT2.MB.1 .....  | 76 |
| 8.4 Modelo IT3.MB.1-2.....   | 79 |
| 8.5 Modelos finales.....   | 84 |
| 8.5.1 Modelo A .....   | 84 |

|                               |    |
|-------------------------------|----|
| 8.5.2 Modelo B.....           | 87 |
| 8.5.3 Modelo C.....           | 91 |
| 8.6 Cálculo de inversión..... | 93 |
| 9. Conclusiones.....          | 96 |
| 10. Recomendaciones.....      | 97 |
| 11. Bibliografía.....         | 98 |

## Índice de figuras

| <u>Tabla No.</u>  | <u>Descripción</u>  | <u>Página</u> |
|-------------------|---|---------------|
| <b>Figura 1.</b>  | Configuración de un láser de CO <sub>2</sub> de onda continua, (a) Partes principales de la máquina, (b) estado inicial de bombeo de energía, (c) excitación y desexcitación de átomos en el medio dando pie a la emisión del láser y (d) emisión estimulada y formación del rayo láser.(Dutta Majumdar & Manna, 2003b) ..... | 20            |
| <b>Figura 2 .</b> | Diagrama esquemático del láser Nd:YAG(Raghibir Singh Khandpur, 2019) .....  | 22            |
| <b>Figura 3.</b>  | Endoprótesis de aceros inoxidable 316L.(Meng et al., 2009).....   | 23            |
| <b>Figura 4.</b>  | Ilustración esquemática de importantes atributos de calidad, Kentry: es el ancho de la entrada del láser, Kexit es el ancho a la salida de láser, Ra es la rugosidad del láser, S el espesor del material, 1 la capa oxidada, 2 la capa refundida y 3 la zona afectada térmicamente.(Dubey & Yadava, 2008) .....              | 25            |
| <b>Figura 5.</b>  | Esquema de la zona mixta producida durante el calentamiento. (Elaboración propia).....  | 32            |
| <b>Figura 6.</b>  | Simplificación de la geometría para el corte láser. (Elaboración propia) .....  | 35            |
| <b>Figura 7.</b>  | Mallado del diseño de un modelo a escala para una aeronave.(G. R. Liu & Quek, 2014).....  | 39            |
| <b>Figura 8.</b>  | Geometría del primer modelo.(Comsol Multiphysics, 2025,a) .....   | 43            |
| <b>Figura 9 .</b> | Resultados de perfil de temperatura del primer modelo.(Comsol Multiphysics, 2025a).....   | 45            |
| <b>Figura 10.</b> | Gráfico de temperatura a lo largo del eje central de la geometría, en función de diferentes tiempos, para el primer modelo descrito.(Comsol Multiphysics, 2025a).....   | 46            |
| <b>Figura 11.</b> | Resultados de intensidad del láser sobre el dominio central para el primer modelo descrito.(Comsol Multiphysics, 2025a).....  | 47            |
| <b>Figura 12.</b> | Modelo MB 1.1, resultados de temperatura para el estudio estacionario. ....   | 48            |
| <b>Figura 13.</b> | Resultados de temperatura modelo MB 1.2, geometría 3D. ....   | 49            |
| <b>Figura 14.</b> | Resultados de temperatura a lo largo del eje central, para el estudio estacionario, modelo MB.1.2.....  | 50            |
| <b>Figura 15.</b> | Gráfico del trazo del cambio de fases, líquido a sólido, para el segundo modelo, $\nabla T$ de 75 K (1= Fase sólida – 0 = Fase Líquida).(COMSOL Multiphysics (b), 2025) .....   | 52            |

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 16.</b> Gráfico de la interfaz del cambio de fases, líquido a sólido, para el segundo modelo, $\nabla T$ de 25 K (1= Fase sólida – 0 = Fase Líquida).(COMSOL Multiphysics (b), 2025)                                      | 53 |
| <b>Figura 17.</b> Resultados del modelo MB 2.4 para el cambio de fase (estudio dependiente del tiempo $t= 120$ segundos), con acercamiento a la sección de incidencia del láser. (1= sólido, 0= líquido).                           | 57 |
| <b>Figura 18.</b> Gráfica del cambio de fase, para la superficie del modelo MB 2.4 en dirección radial (1= sólido, 0= líquido).   | 58 |
| <b>Figura 19.</b> Resultados de temperatura del modelo MB 2.4 en 3D, ampliación del centro de la pieza.   | 59 |
| <b>Figura 20.</b> Resultados del perfil de temperatura y geometría desarrollada en el modelo de remoción de material a través de ablación térmica.(Frei, 2016)  | 61 |
| <b>Figura 21.</b> Resultados de temperatura y geometría para el modelo base 3.  | 64 |
| <b>Figura 22.</b> Resultados en 3D sobre temperatura y geometría para el modelo base 3.   | 65 |
| <b>Figura 23.</b> Geometrías planteadas para el modelo computacional del corte láser. (Elaboración propia)  | 66 |
| <b>Figura 24.</b> Geometría inicial para el modelo de corte láser, cuadrado de 0.029 in de lado, con una región central (área impactada por el láser) de 0.0087 in de base y 0.029 in de altura (no a escala). (Elaboración propia) | 67 |
| <b>Figura 25.</b> Geometría empleada en los modelos IT.MB.1, IT.MB.2 e IT1. MB. (1-2).  | 71 |
| <b>Figura 26.</b> Dominios (parte superior) y fronteras del modelo (numeradas de la F1 a la F7).  | 72 |
| <b>Figura 27.</b> Mallado del modelo 1 para los dos diferentes dominios.  | 73 |
| <b>Figura 28.</b> Perfil de temperatura modelo IT1.MB.1   | 75 |
| <b>Figura 29.</b> Perfil de temperatura modelo IT1.MB.1   | 76 |
| <b>Figura 30.</b> Valores de temperatura del modelo IT2.MB.1  | 78 |
| <b>Figura 31.</b> Valores de intensidad de radiación del modelo IT2.MB.1  | 79 |
| <b>Figura 32.</b> Resultados de: Superior) Perfiles de temperatura sobre la superficie de la geometría, Inferior) Cambio de fases sobre el eje central.   | 81 |

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 33.</b> Resultados de temperatura en el estudio dependiente del tiempo (120 segundos).<br>.....   | 82 |
| <b>Figura 34.</b> Resultados del estudio no dependiente del tiempo para: Superior) Cambio de fase sobre el radio de la superficie, Inferior) Temperatura sobre el eje z. .... | 83 |
| <b>Figura 35 .</b> Resultados del perfil de temperatura en 2D y 3D para los estudios: a) Dependiente del tiempo, b) Estacionario. ....  | 85 |
| <b>Figura 36.</b> Gráfico de fase para el estudio estacionario.....   | 86 |
| <b>Figura 37.</b> Gráfico de fases para el estudio dependiente del tiempo. ....   | 87 |
| <b>Figura 38.</b> Modelo B; resultados de temperatura obtenida en el modelo.....  | 88 |
| <b>Figura 39.</b> Modelo B; Trazabilidad del cambio de fase, mostrando solo los intervalos de cada 0.1 segundos (1= sólido, 0 = líquido). ....                                | 89 |
| <b>Figura 40.</b> Resultados de temperatura obtenidos, versión en 3D, modelo B. ....  | 90 |
| <b>Figura 41.</b> Cambios de geometría para la superficie expuesta a la acción del láser.....   | 91 |
| <b>Figura 42.</b> Visualización 3D del modelo C en el que muestra el avance en la formación del cráter. ....  | 92 |

## Índice de Tablas

| <u>Tabla No.</u> | <u>Descripción</u>   | <u>Página</u> |
|------------------|--|---------------|
| <b>Tabla 1.</b>  | Composición química de varios aceros inoxidables (valores dados en porcentajes).(Lillard, 2010)..... | 36            |
| <b>Tabla 2.</b>  | Parámetros del material usado para el desarrollo de la simulación. ....                              | 37            |
| <b>Tabla 3.</b>  | Resumen de modelos generados con el modelo base 2. ....  | 54            |
| <b>Tabla 4.</b>  | Resumen de modelos generados con el modelo base 3. ....  | 62            |

# 1. Descripción del problema

El desarrollo de nuevas tecnologías ha impactado de gran forma la industria de dispositivos médicos, con su implementación se han podido crear dispositivos más pequeños y livianos que permiten que los procedimientos sean más seguros y poco invasivos. Los sistemas láser han sido usados en la manufactura donde se necesita gran precisión como lo es la soldadura, marcado o corte, además se caracterizan por obtener superficies con gran acabado que impiden dejar rastros de material en la superficie que pudiera afectar la higiene de los componentes.

El análisis de estos procesos de manufactura permite comprender no solo su origen y los fenómenos físicos implicados, sino también los posibles resultados que pueden surgir durante la fabricación de los componentes.

Para el caso de la empresa Boston Scientific, en donde se encontró esta oportunidad de desarrollo del problema planteado, se emplea el uso del corte láser para cables de acero inoxidable que son empleados en sus dispositivos médicos para algunas de sus áreas como lo son la correspondiente a gastroenterología.

Considerando lo anterior, una forma de comprender y predecir los posibles resultados que se puedan generar en el proceso de corte láser es mediante la simulación computacional. Usar esta herramienta puede ser en términos generales más económico, porque no requiere ni de un equipo completo de corte láser o instalaciones para ejecutar pruebas o demostraciones, además de que sus resultados, cuando son confiables, resultan ser validos al igual que los que se pueden obtener de forma experimental.

Esto tiene como propósito fortalecer criterios técnicos, facilitando la identificación y corrección de defectos en la línea de producción. Además, permite evaluar la necesidad de realizar cambios y validarlos para responder a requerimientos económicos, ya sea en términos de volumen o modificaciones en parámetros clave del proceso, como la materia prima o la configuración de los ajustes del láser.

## 2. Justificación del trabajo

El crecimiento de la industria médica ha significado un desarrollo de innovación y tecnología para afrontar las diferentes necesidades del mercado en cuanto a tratamientos y cuidado de pacientes en todo el mundo, apuntando a crear dispositivos médicos cada vez menos invasivos y mejorando la efectividad de estos.

En Costa Rica, las empresas del sector de dispositivos médicos reportaron un crecimiento del 21,7% en sus ventas en comparación con 2022 y son las que más invierten en desarrollo tecnológico, con un 4,65% de su facturación, según el Benchmarking de Indicadores Empresariales 2024 presentado por la Cámara de Industrias de Costa Rica (CICR). (Brenda Camarillo, 2024)

Según datos de la Promotora de Comercio Exterior (Procomer), en el 2023 los envíos de esta categoría superaron los \$7.600 millones.

El láser en la industria de dispositivos médicos juega un papel estelar, tanto por su precisión y exactitud, características fundamentales en esta industria para minimizar el riesgo al paciente, como por el excelente desempeño que tiene frente a otros procesos de manufactura. Esto queda en evidencia a la hora de ser usado para el corte de herramientas o partes con diseños complejos como instrumentos quirúrgicos, implantes o prótesis, la aplicabilidad en diferentes tipos de materiales y espesores manteniendo su precisión, o eliminación de daño térmico en el material de corte sin dejar de lado que son completamente automatizados. (Baison, 2023)

En el presente proyecto tiene como objetivo el análisis del proceso de manufactura con corte láser, así como la comprensión de los fenómenos físicos que intervienen en su ejecución. A partir de estos principios fundamentales y con el respaldo de la modelación y simulación computacional, se pretende desarrollar un modelo que ayude a analizar los resultados derivados de la aplicación de este método en la fabricación de componentes destinados a dispositivos médicos. La implementación de dicha herramienta podría contribuir a optimizar diversas etapas del proceso de manufactura, facilitando el diseño, la validación de nuevos parámetros y la resolución eficiente de problemas de calidad que puedan surgir en la línea de producción.

### **3. Objetivo General**

- Desarrollar un modelo inicial para describir el proceso de corte láser de cables de acero inoxidable en la industria médica, utilizando el software COMSOL Multiphysics, como potencial herramienta para el análisis de dicho proceso.

### **4. Objetivos Específicos**

- Analizar los principios de transferencia de calor conjugada a la mecánica de fluidos, aplicada al proceso de corte láser y su modelación computacional.
- Describir el proceso de corte láser para el acero inoxidable, mediante modelación y simulación multifísica en 2 dimensiones (2D) y con un modelo 3D basado en el anterior, variando uno de los parámetros de corte.
- Contrastar los resultados de ambos modelos, para verificar si es posible obtener información respecto de las especificaciones del proceso de corte.
- Calcular el costo de inversión relacionado con el desarrollo del modelo computacional a realizar.

### **5. Alcances y limitaciones**

#### 5.1 Alcances

- Se plantea crear un modelo computacional de una configuración sencilla, en 2 y 3 dimensiones mediante el programa computacional COMSOL Multiphysics, el cual describa el proceso de corte láser para cables de acero inoxidable.
- Se realizará la comparación de ambos modelos con el objetivo de definir cuál es más apropiado para representar el proceso de corte en términos de practicidad, resultados obtenidos, complejidad y consumo de recursos computacionales.

## 5.2 Limitaciones

- No se pretende modificar ningún otro parámetro del modelo que no sea referente a los que definen al láser empleado.
- No se tiene previsto realizar pruebas experimentales destinadas a corroborar los resultados computacionales obtenidos.
- No se contempla necesariamente la implementación del modelo en la industria, como soporte para alguna línea de producción que use el proceso de corte láser.

## 6. Marco Teórico

### 6.1 Definición del láser

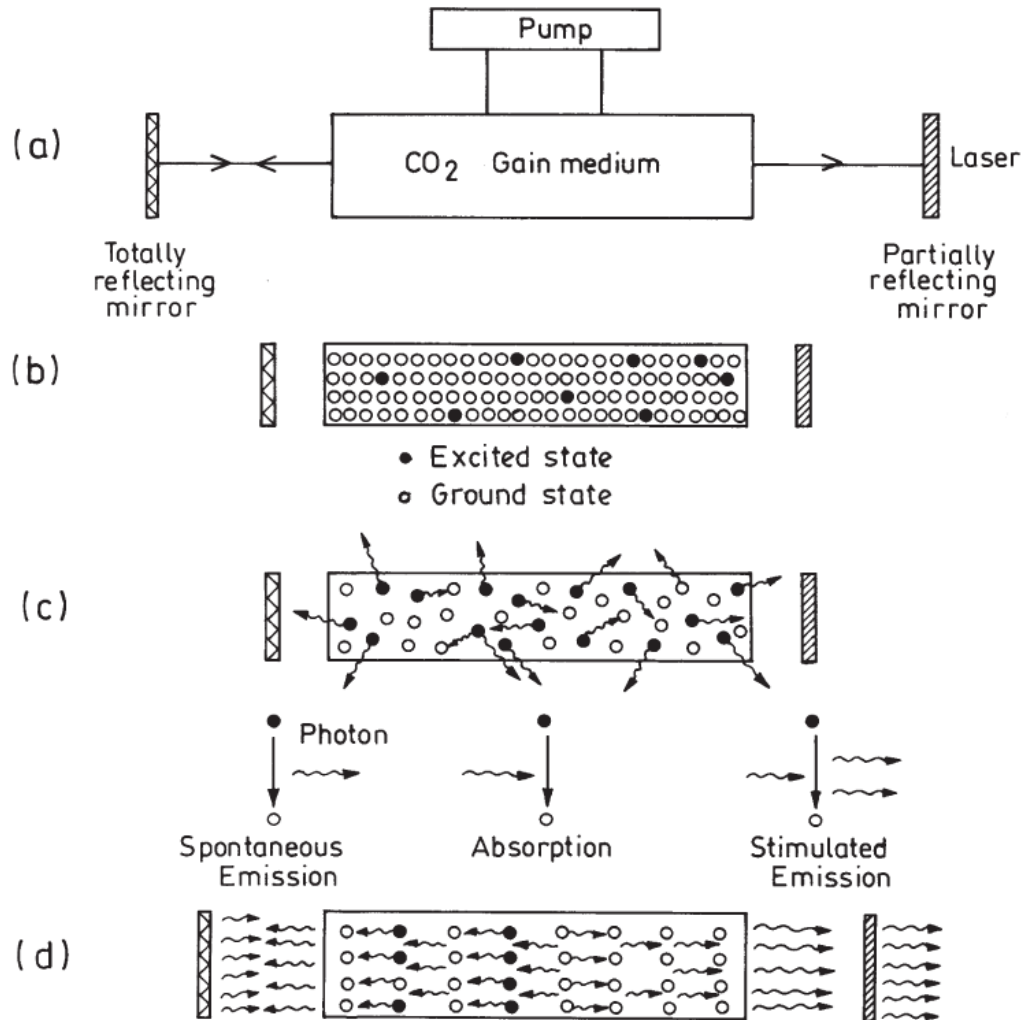
#### 6.1.1 Introducción del láser

Fue Einstein quien inicialmente sentó los fundamentos de la teoría del láser, cuando en 1905 publicó un estudio que explicaba datos experimentales del efecto fotoeléctrico como resultado de la energía de la luz siendo transportada en paquetes discretos cuantizados. Posteriormente, en 1921 fue galardonado con el premio Nobel por su descubrimiento de la ley del efecto fotoeléctrico.(Chawla, 2015)

El láser, acrónimo para “*amplificación de luz estimulada por emisión de radiación*”, es esencialmente un rayo de radiación electromagnética coherente, convergente y monocromático con una longitud de onda en el rango de ultravioleta a infrarrojo. Un láser puede entregar desde una baja (~mW) a una extremadamente alta (1-100 kW) y concentrada cantidad de energía, en una posición espacial precisa con pulsos de tiempo ( $10^{-3}$  a  $10^{-15}$  s) en toda clase de sustratos a través de cualquier medio.(Dutta Majumdar & Manna, 2003a)

Un láser está compuesto por tres componentes llamados medio de ganancia o resonador, medios de excitación del medio de ganancia en su estado amplificado y sistema óptico de entrega-retroalimentación. Además, existen provisiones para el enfriamiento de componentes auxiliares como espejos, guías del rayo y manipulación del objetivo, que son igualmente importantes. El medio puede ser sólido, líquido o gas y en el caso de gases y láseres de diodos, la energía es alimentada mediante un flujo de corriente eléctrica. En este caso se crea un flash intenso o luz blanca producida por una lámpara incandescente que brinda la energía de exaltación en láseres de cristales de estado sólido.(Dutta Majumdar & Manna, 2003a)

Para mostrar de forma gráfica estos componentes se usará el ejemplo de un láser de CO<sub>2</sub>, el cual parece ser el más eficiente disponible comercialmente y se ilustra en la figura 1.(Dutta Majumdar & Manna, 2003b)



**Figura 1.** Configuración de un láser de CO<sub>2</sub> de onda continua, (a) Partes principales de la máquina, (b) estado inicial de bombeo de energía, (c) excitación y desexcitación de átomos en el medio dando pie a la emisión del láser y (d) emisión estimulada y formación del rayo láser. (Dutta Majumdar & Manna, 2003b)

Al igual que como se mencionó anteriormente, este tipo de láser consta de 3 componentes: el medio del láser, el resonador óptico o cavidad con dos espejos y el energizado o recurso de bombeo que suple la energía al medio (figura 1a). La especie química en el medio determina la longitud de onda de la salida óptica. De los dos espejos, uno es totalmente reflectante y el otro es parcialmente reflectante. Según el principio de mecánica cuántica, cuando una energía externa es entregada a un átomo, definido como átomo irradiado, este obtiene un estado excitado (figura 1b).

La figura 1c representa el fenómeno de emisión espontánea que se da cuando un átomo excitado retorna a su estado base emitiendo una diferencia de energía en forma de un fotón, fenómeno que se conoce como emisión espontánea y se describe con la siguiente ecuación.

$$\nu = (E_2 - E_1)/h \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde:

$\nu$  = Frecuencia del fotón

$E_2$  = Estado de alta energía

$E_1$  = Estado base

$h$  = Constante de Planck

En la figura 1c se muestra el proceso que da paso a la creación del láser producto de la excitación y desexcitación de los átomos dentro del medio de ganancia. Un fotón que interactúa con un átomo desexcitado puede ser absorbido por este y luego excitarlo a un estado de energía más alto, condición llamada “inversión de la población” que es creada por el recurso de bombeo. Los fotones moviéndose a lo largo del eje óptico interactúan con un gran número de átomos excitados, estimulándolos y mediante este proceso amplificados. Ellos son reflectados en ambas direcciones por el resonador y pasan a través del medio excitado creando más fotones. En cada ciclo, un porcentaje de estos fotones sale a través del espejo parcialmente transmisivo como un rayo láser intenso.(Dutta Majumdar & Manna, 2003a)

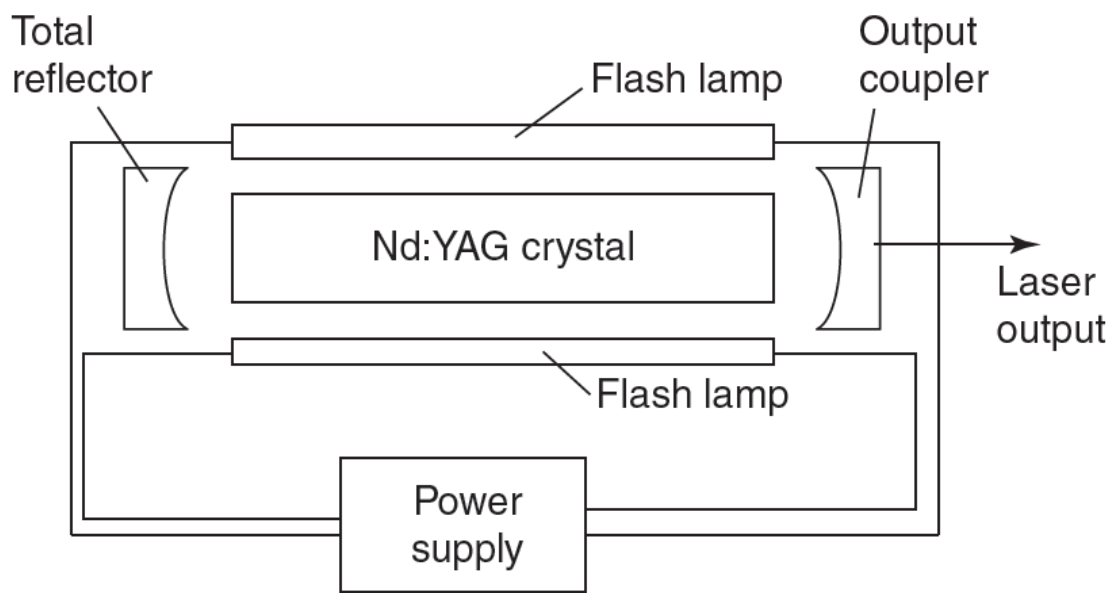
Otro tipo de láser también utilizados son los Nd: YAG (granate de itrio y aluminio dopado con neodimio) y láser de rubí. Estos láseres poseen longitudes de onda más pequeñas y son más apropiadas para el modo de pulso de aplicaciones que requieren una alta penetración, una cobertura de área más pequeña y tratamientos de precisión de materiales para propósitos específicos.(Dutta Majumdar & Manna, 2003a)

La configuración de este tipo de láser guarda una gran similitud con la del láser de CO<sub>2</sub>. Como se observa en la figura 2, su medio activo es un sólido, específicamente un cristal que

proporciona los átomos responsables de la emisión de radiación. El mecanismo de bombeo empleado puede ser una lámpara o un diodo capaz de generar luz infrarroja.

Los cristales de YAG presentan una conductividad térmica relativamente alta, lo que favorece una eficiente disipación de calor dentro de la cavidad del láser. Gracias a esta característica, es posible operar en régimen de onda continua con potencias de hasta varios cientos de vatios. El agente-son iones de  $\text{Nd}^{3+}$ , que han sido dopados dentro de un cristal de YAG. Este cristal es transparente y sin color, una vez dopado con aproximadamente 1% de Nd, el cristal obtiene un color azul claro.(Raghibir Singh Khandpur, 2019).

También es importante mencionar que, los láser Nd:YAG proveen un gran recurso de estabilidad, eficiencia, duración, consumen menos energía y espacio. (Raghibir Singh Khandpur, 2019)



**Figura 2 .** Diagrama esquemático del láser Nd:YAG(Raghibir Singh Khandpur, 2019)

### 6.1.2 Aplicaciones del láser en el procesamiento de materiales.

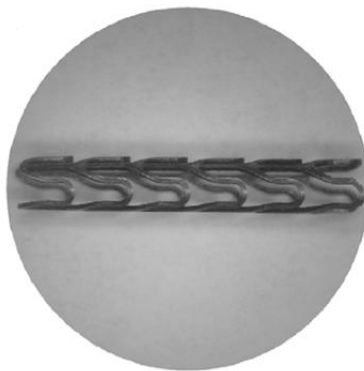
Son precisamente las características que se mencionaron anteriormente, las que hacen al láser una herramienta de trabajo sumamente útil. En efecto los láseres son ampliamente usados en

la industria como una máquina herramienta debido a su precisión de operación, bajo costo, procesamiento localizado y alta velocidad de operación.(Yilbas, 2018a)

Debido a la versatilidad de esta herramienta, su aplicación no se limita únicamente a procesos industriales convencionales, sino que también abarca tareas altamente especializadas que requieren materiales avanzados de ingeniería o el cumplimiento de exigentes especificaciones de diseño.

Tales tareas, que involucran desde un material muy específico con dimensiones inusuales a la cual se le debe asignar una forma compleja, están relacionadas con los “*procesos avanzados de maquinado*” (PAM). Actualmente muchos de los PAM son usados en la industria, tales como: mecanizado por electro descarga, procesos de maquinado por rayo (“*maquinado por rayo láser*”, MRL), maquinado por electroerosión y maquinado por rayo de plasma. El MRL es uno de los PAM que se usa para darle forma a casi todo el rango de materiales ingenieriles, siendo que el láser es ampliamente usado para corte, taladrado, marcado, soldadura, sinterizado y tratamientos térmicos. El láser también se emplea para realizar torneado, al igual que para operaciones de fresado, pero la mayor aplicación es principalmente en el corte de láminas metálicas y no metálicas. (Dubey & Yadava, 2008)

Una aplicación en donde el corte láser es importante es en la fabricación de endoprótesis cardiovasculares. Estos representan un tipo de dispositivo mecánico que se implanta dentro de arterias, con el propósito de expandir y servir de soporte en vasos sanguíneos que se han estrechado debido a la acumulación de placa. El principal material usado para este dispositivo es el acero inoxidable, el cual se encuentra como un cilindro hueco y se corta para obtener un patrón alargado, como se muestra en la figura 3.(Meng et al., 2009)



**Figura 3.** Endoprótesis de aceros inoxidable 316L.(Meng et al., 2009)

### 6.1.3 Dinámica de la remoción de material

El proceso de remoción de material que se da durante el MRL se relaciona con tres diferentes mecanismos, los cuales son fundición, vaporización y degradación química.

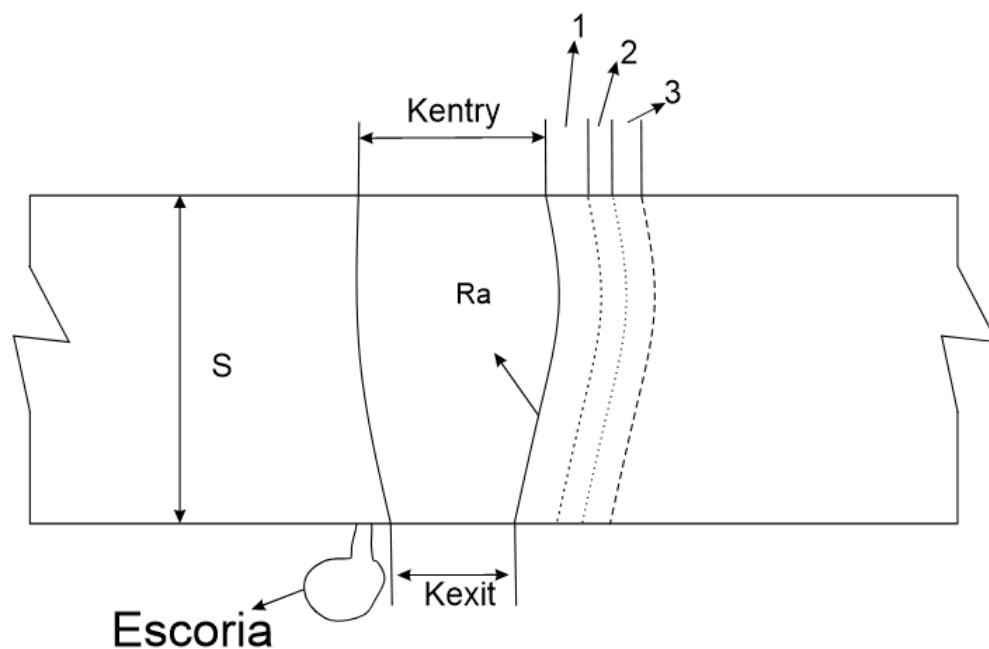
Cuando un láser de alta energía se focaliza sobre una superficie de trabajo de un material, la energía térmica absorbida calienta y transforma el volumen de trabajo hacia un estado fundido, sucesivamente creando vapor que puede fácilmente ser removido mediante un gas a presión y acelerando así la transformación del material.(Dubey & Yadava, 2008)

Para el caso del proceso de evaporación, el vapor se desprende de la superficie líquida generando una presión de retroceso a lo largo de la interfaz líquido-vapor. A medida que la evaporación de la superficie avanza, la presión de retroceso aumenta considerablemente influenciando la tasa de evaporación. La superficie líquida se mueve hacia la parte sólida formando una cavidad en el sustrato del material. Dependiendo de la longitud del pulso e intensidades del láser, se puede generar la expulsión de líquido de la cavidad. Esto es particularmente cierto para largos pulsos (aproximadamente longitudes de pulso de ms), aun así, la ablación de la superficie sin la eyección de líquido toma lugar en pulsos cortos (del orden de ns). Es importante destacar que la eyección de líquido optimiza la tasa de eliminación de material en la cavidad. En el caso de un láser de pulso corto, la presión de retroceso se incrementa significativamente debido a la elevada tasa de intercambio de momento generada durante el proceso de evaporación. En este caso, una alta presión en la interfase vapor/líquido actúa como una fuerza de presión generando esfuerzos en la superficie de la interfase líquido/sólido. Lo anterior resulta en una ola de presión propagándose en el sustrato del material, y dependiendo de la magnitud de la ola de presión, puede ocurrir deformación plástica a través de dislocaciones en la región de la superficie del sustrato.(Yilbas, 2018a)

El MRL es un proceso de naturaleza térmica cuya eficacia está determinada principalmente por las propiedades térmicas del material y, en cierta medida, por sus características ópticas, en mayor grado que por sus propiedades mecánicas. Debido a esto, los materiales que exhiben un alto grado de fragilidad o dureza y tienen propiedades térmicas favorables como baja difusividad térmica y conductividad, son particularmente una buena opción para el

maquinado láser. Dado que la transferencia de energía entre el láser y el material ocurre a través de irradiación, no se generan fuerzas de corte por el láser. Como resultado se tienen ausencia de daño mecánico inducido al material, desgaste de la herramienta y vibraciones en la máquina, además de que la “*tasa de remoción de materia*” (TRM) para maquinado láser no está limitada por factores como la fuerza máxima de la herramienta o la formación de bordes en la herramienta de corte.(Dubey & Yadava, 2008)

También se han realizado estudios experimentales que muestran el efecto de los parámetros operativos, como la potencia del láser, el tipo y presión del gas de asistencia, el espesor del material de corte y su composición, además de la velocidad y modo de operación. La característica de la calidad de interés en el MRL son la TRM, geometría a maquinar (el ancho de corte, diámetro del agujero y la conicidad), calidad de la superficie (rugosidad y morfología de la superficie), características metalúrgicas (refundición, zona afectada térmicamente, inclusiones, escoria) y propiedades mecánicas (figura 4).



**Figura 4.** Ilustración esquemática de importantes atributos de calidad, Kentry: es el ancho de la entrada del láser, Kexit es el ancho a la salida de láser, Ra es la rugosidad del láser, S el espesor del material, 1 la capa oxidada, 2 la capa refundida y 3 la zona afectada térmicamente.(Dubey & Yadava, 2008)

Respecto de la tasa de remoción de material, según (Dubey & Yadava, 2008), se ha encontrado que esta primeramente aumenta y, después de un valor crítico, decrece al aumentar la densidad de potencia del láser. Se ha observado que las bajas frecuencias de pulso combinadas con picos elevados de potencia favorecen las altas velocidades de corte. Asimismo, la tasa de remoción de material (TRM) se incrementa con la densidad de energía del rayo, independientemente de su velocidad. Además, el efecto de la intensidad de los pulsos (kW) influye directamente en la profundidad de corte, evidenciando un aumento en la tasa de remoción.

En el proceso de corte láser, hay varios parámetros que son esenciales para determinar el resultado a obtener. Los parámetros del láser como la potencia de salida, la frecuencia pulsante, la asistencia de gas a presión y la distancia focal determinan la calidad final del producto. (Yilbas, 2018a)

En concordancia con lo anterior, (Dubey & Yadava, 2008) mencionan diferentes estudios en los que se confirma que, para el uso de gases de asistencia, como oxígeno o aire, se provee un corte más amplio, mientras que el uso de un gas inerte, por el contrario, da como resultado un corte más pequeño. Además, aumentando la frecuencia del pulso el ancho del corte disminuye, con el mismo efecto que se da al aumentar el poder del láser y la velocidad de corte. Se ha visto que el espesor del corte se reduce al mínimo cuando el ajuste focal se mantiene en la pieza de trabajo de la superficie. Además, se sabe que una duración corta del pulso da una forma cónica más reducida comparada a una larga duración del pulso.

Durante el corte láser, al igual que en otros procesos térmicos de manufactura, se genera una zona afectada térmicamente. Es fundamental minimizar su extensión o, al menos, mantener un control preciso sobre sus efectos. (Dubey & Yadava, 2008), subraya que la disminución de la potencia y el aumento de la tasa de alimentación contribuye con esta reducción. Por otra parte, con pulsos de energía medios, alta frecuencia de pulso y una alta velocidad de corte, junto con una alta presión de gas de asistencia de argón, se obtienen mejores resultados en la reducción de una zona afectada térmicamente en comparación con el uso de nitrógeno y argón.

En relación con la influencia del calor en la pieza de trabajo, las propiedades mecánicas juegan un rol fundamental. Investigaciones han demostrado que el corte láser puede inducir

daños térmicos y la formación de grietas, comprometiendo la resistencia del material. Por ejemplo, se ha observado que la resistencia a la flexión se reduce hasta un 40 % del valor original tras el corte, mientras que la dureza de una aleación de titanio en la zona afectada térmicamente aumenta en un 10 %. Además, el uso de oxígeno o nitrógeno como gas asistente incrementa la probabilidad de aparición de grietas en comparación con el empleo de argón.(Dubey & Yadava, 2008)

#### 6.1.4 Consideraciones sobre el corte láser

En este capítulo, se exponen consideraciones adicionales que permiten comprender de manera más profunda la interrelación entre los parámetros de entrada del láser y sus efectos, destacando la versatilidad de esta tecnología para diversas aplicaciones.

Con relación a los parámetros, la calidad del láser se aumenta con el acortamiento del ancho del pulso, mientras que la duración del pulso también influye. El orden de los milisegundos es mayormente apropiado para la remoción de material en una escala macro, mientras que los nanosegundos brindan una calidad del proceso y precisión mejores que del orden de los milisegundos. Para el uso de picosegundo y femtosegundos, estos son más afines al procesamiento de estructura muy finas de los materiales.(Wang & Yang, 2021)

Por otra parte, la versatilidad del láser se demuestra con las diferentes combinaciones que este puede tener ya que, también puede utilizarse algún medio de asistencia durante el procesamiento. Por ejemplo, un medio líquido puede, de manera efectiva, reducir la escoria generada durante la remoción y obtener un proceso de calidad ideal comparado con el medio gaseoso, siendo el agua la opción más prometedora.(Wang & Yang, 2021). Además, se puede emplear junto a otros métodos de corte para precalentar la superficie de trabajo, lo que contribuye a reducir tanto los problemas potenciales como el tiempo requerido en el proceso.(Alsaadawy et al., 2024)

En cuanto a la comparación del láser con otros procesos no convencionales de maquinado, el láser es preferido sobre el uso de agua abrasiva a presión y al plasma, ya que posee un tiempo corto de operación y energía, además no es necesario endurecer el material antes del corte.(Alsaadawy et al., 2024)

Los láseres pueden ser empleados para cortar placas metálicas de espesor por encima de los 10cm, a pesar de que la energía total empleada por el láser es relativamente pequeña.(Sharma & Yadava, 2018)

Es claro que el uso del láser en diferentes aplicaciones puede representar la mejor alternativa, pero también hay condiciones, tanto en aplicaciones como en la misma tecnología, en las que aún se tienen brechas que impiden que este método se pueda expandir. Por ejemplo, en aplicaciones de corte para materiales compuestos, la interacción térmica entre el láser y la placa de material compuesto resulta en la presencia de desprendimiento de fibras de la matriz y degradación térmica de ambos. (Sharma & Yadava, 2018)

Con respecto a la automatización del corte láser, se tiene una considerable desventaja debido al alto costo del equipo, el alto costo de su operación y que la calidad del corte está grandemente influenciada por los parámetros operativos. Es necesario optimizar los parámetros de proceso para obtener una alta calidad de corte que no dependa de las propiedades del material, también es necesario el monitoreo del cambio de la microestructura de la superficie del material ya que el rápido enfriamiento produce efectos no deseados que pueden causar fallas.(Alsaadawy et al., 2024)

Con el objetivo de optimizar el proceso de corte láser y reducir, en la parte experimental, el tiempo y costo, la aplicación de la modelación computacional ha recibido una atención considerable. Más allá, los estudios con modelos computacionales dan énfasis en el proceso físico que se lleva a cabo durante el calentamiento. En comparación, los estudios experimentales que buscan medir las propiedades físicas durante la interacción del láser con la pieza de trabajo son difíciles y costosos porque el proceso requiere altas temperaturas, cortos tiempos y un calor localizado.(Yilbas, 2018a)

## 6.2 Fenómenos Físicos

El primer requisito que se deberá cumplir para lograr el corte láser es el calentamiento de la superficie por medio del rayo incidente, el calor aportado deberá ser tal que se pueda sobrepasar la temperatura de fusión del material y continuar a lo largo del espesor del material.

El proceso se puede escribir en términos de la ley Beer-Lambert, la cual es la siguiente:

$$\frac{dI}{dx} = -\alpha I \quad (\text{Ecuación 2})$$

donde  $x$  es la profundidad a lo largo de la dirección del láser, en unidades de m,  $I = I(x)$  es la intensidad del láser a una profundidad  $x$  en unidades de  $\text{W/m}^2$ ,  $\alpha$  es la absorptividad o el coeficiente de absorción del material, en unidades de  $\text{m}^{-1}$ . (Yilbas, 2018b)

La ecuación 2 también se puede integrar para determinar la intensidad del láser en cualquier punto (ecuación 2). Recurriendo a otra variable  $u$  y tomando los límites de integración desde 0 a  $L$ , se puede obtener la siguiente ecuación 3 luego de resolver y simplificar:

$$\frac{dI}{I} = -\alpha(u) dx \quad (\text{Ecuación 3})$$

$$I = I_0 e^{-\int_0^x \alpha(u) dx} \quad (\text{Ecuación 4})$$

En (Yilbas, 2018b) también se observa que cuando una capa delgada absorbe la energía del rayo láser, este genera calor. La tasa de generación del calor se define como:

$$S = -\frac{dI}{dx} \quad (\text{Ecuación 5})$$

Al sustituir la ecuación 4 en 5, el calor volumétrico generado por esta acción se puede expresar con una ecuación con términos similares a las anteriores, de la siguiente forma:

$$S = I_0 \alpha e^{-\int_0^x \alpha(u) du} \quad (\text{Ecuación 6})$$

En las siguientes secciones, se tomará como referencia el trabajo de (Bin-Mansoor & Yilbas, 2006) el cual ofrece una descripción exhaustiva de los mecanismos físicos que rigen el proceso de corte por láser. Asimismo, se retomará la explicación sobre la continuidad del

proceso de calentamiento previamente descrito, donde, una vez alcanzado esta condición, se da paso a la evaporación. Aunque la evaporación constituye el mecanismo predominante en el proceso de calentamiento, la formación de fases líquidas y la existencia de interfaces sólido-líquido y líquido-vapor resultan inevitables.

Durante el proceso de evaporación, la superficie que separa la región sólida se mueve hacia el interior del material con una velocidad que varía a lo largo de la superficie irradiada. Esto se relaciona con la tasa de evaporación, la cual varía a lo largo de la zona irradiada, así como con la variable tiempo debido a la distribución temporal y espacial del pulso de calentamiento del láser.

Si se considera que la intensidad del láser tiene una distribución Gaussiana, la ecuación para la transferencia de calor el calentamiento de la fase sólida, debido a la irradiación del pulso, puede escribirse de la siguiente forma:

$$\rho_s c_{Ps} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k_s}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + k_s \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + S_0 \quad (\text{Ecuación 7})$$

Con  $S_0$  siendo:

$$S_0 = I_0 \delta (1 - r_f) \exp(-\delta z) \exp\left(-\frac{r^2}{a^2}\right)$$

Donde:

$S_0$  = Fuente de poder, W

$I_0$  = pico de intensidad del láser, W/m<sup>2</sup>

$\delta$  = coeficiente de absorción, m<sup>-1</sup>

$r_f$  = Reflectividad

$\rho_s$  = Densidad, kg/m<sup>3</sup>

$c_{Ps}$  = Capacidad de calor específica, J/kg K

$t$  = tiempo, s

$r$  = Distancia radial, m

$k_s$  = Conductividad térmica, W/m K

$z$  = Distancia axial, m

$a$  = Parámetro Gaussiano, m

$T$  = Temperatura, °C

Se pueden asumir las siguientes condiciones iniciales:

$$\text{para el tiempo cero, } t = 0: T(r, z, 0) = T_0(\text{especificada})$$

Con el objetivo de resolver la ecuación 7, deben ser especificadas dos condiciones de borde para cada eje principal de referencia, por ejemplo, en coordenadas cilíndricas. Debido a la corta duración del pulso del láser, una frontera aislante debe ser asumida en la superficie y a una distancia considerablemente lejana. También se asume que el calentamiento no tiene efecto en la temperatura del sustrato. A una profundidad de infinito, la temperatura es asumida como constante e igual a la temperatura inicial del sustrato del material. Estas condiciones son:

$$z \text{ en infinito} \Rightarrow z = \infty : T(r, \infty, t) = T_0(\text{especificada})$$

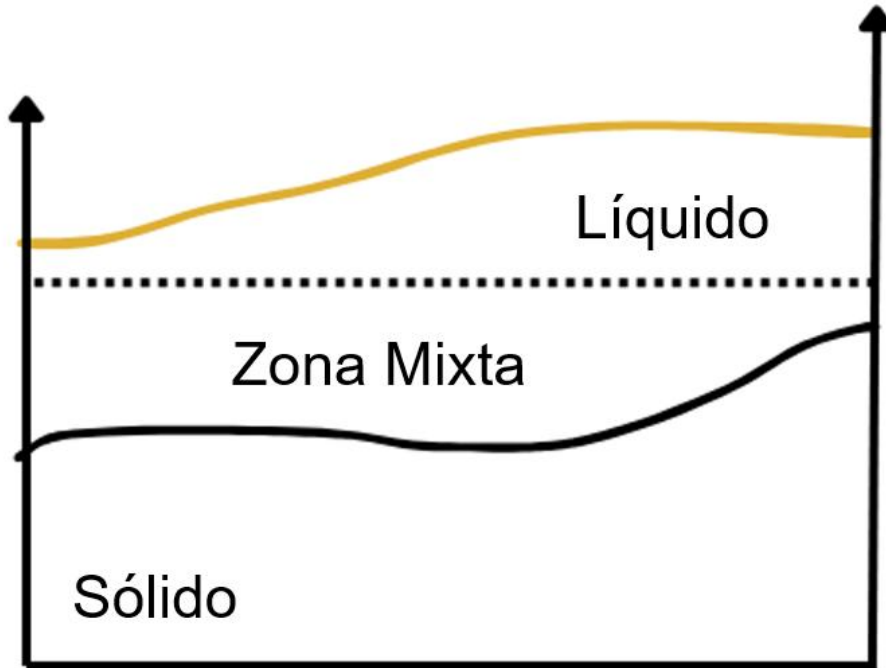
$$r \text{ en infinito} \Rightarrow r = \infty : T(r, \infty, t) = T_0(\text{especificada})$$

$$\text{En el eje de simetría} \Rightarrow r = 0: \frac{\partial T(0, z, t)}{\partial r} = 0$$

$$\text{En la superficie } z = 0: \frac{\partial T(r, 0, t)}{\partial r} = 0$$

Con el objetivo de modelar el proceso de cambio de fase, las ecuaciones de transferencia de calor para el sólido deben ser modificadas, usando un método de energía o entalpía.

En el cambio de fase, puede ser generada una zona mixta (parcialmente sólido y líquido o parcialmente líquido y vapor) a lo largo de la interfaz donde ocurre el cambio de fase, como se representa en la figura 5. En este caso durante el proceso de cambio de fase, incluida la zona mixta, la temperatura del sustrato permanece igual pero su entalpía cambia en esa región.



**Figura 5.** Esquema de la zona mixta producida durante el calentamiento. (Elaboración propia)

Para el análisis, se toma un elemento diferencial en la zona mixta, dejando  $x_m$  como la fracción de líquido presente en el elemento; luego la energía ( $\Delta U$ ) del elemento diferencial con un volumen  $\Delta V$  a la temperatura de fusión  $T_m$  puede ser escrita como:

$$\Delta U = P_m \Delta U \{x_m [L_m + C_{p_m} (T_m - T_{ref})] + C_{p_s} (1 - x_m) (T_m - T_{ref})\} \quad (\text{Ecuación 8})$$

donde

$$x_m = \frac{m_m}{m_m + m_s} = \text{calidad del líquido}$$

$m_s$  = Masa del sólido

$m_m$  = Masa del líquido

$T_{ref}$  = Temperatura de referencia para la entalpía.

Si se asume que el calor específico del fundido es el mismo que del sólido a la temperatura de fusión, ( $C_{p_s} = C_{p_m}$  a  $T = T_m$ ), la ecuación se reduce a lo siguiente:

$$\Delta U = \rho_m \Delta V [x_m L_m + C_p (T_m - T_{ref})] \quad (\text{Ecuación 9})$$

Haciendo la diferenciación con respecto al tiempo se obtiene:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \rho_m L_m \frac{\partial x_m}{\partial t} \quad (\text{Ecuación 10})$$

Dado que  $C_p (T_m - T_{ref})$  es una constante, si se sustituye la ecuación 10 en la ecuación 7, se obtiene la ecuación de energía para el diferencial de elemento sujeto al proceso de cambio de fase.

$$\rho_m L_m \frac{\partial x_m}{\partial t} = \frac{k_m}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + k_m \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + S_0 \quad (\text{Ecuación 11})$$

La ecuación 11 es aplicable a elementos diferenciales en la zona mixta cuando la temperatura alcanza la temperatura de fusión del sustrato del material ( $T = T_m$ ) y  $0 \leq x_m \leq 1$ . Cuando los valores de  $x_m$  exceden 1 ( $x_m \geq 1$ ), la ecuación 11 no es aplicable a los elementos diferenciales en la zona mixta. En este caso se usa la ecuación 7 para determinar el aumento de temperatura en el líquido durante el calentamiento, agregando las propiedades térmicas del líquido en la ecuación. El calentamiento del líquido continúa hasta que se alcanza el punto de ebullición en el sustrato del material.

De acuerdo con el trabajo de estos autores, a medida que el calentamiento del material aumenta, se crea una nueva zona mixta y esta debe ser considerada en el modelo. Para este caso la ecuación 11 puede ser modificada para un elemento diferencial que evapora, dando como resultado la ecuación 12.

$$\rho_b L_b \frac{\partial x_b}{\partial t} = \frac{k_b}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + k_b \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + S_0 \quad (\text{Ecuación 12})$$

Esta ecuación es aplicable para el rango de  $T = T_b$  y  $0 \leq x_b \leq 1$  para la zona mixta (parcialmente líquido, parcialmente vapor), donde  $x_b$  representa la fracción de la fase de vapor en el elemento diferencial.

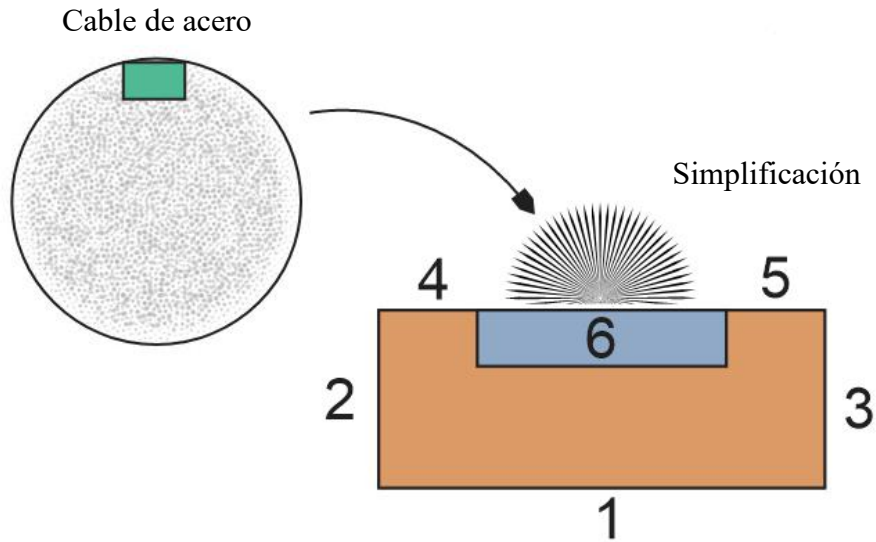
Una condición de borde en la superficie evaporada se requiere para la ecuación 12. En este caso la temperatura a lo largo de la superficie evaporada se mantiene igual a la temperatura de evaporación del sustrato, además las celdas en la región de evaporación presentan una temperatura cercana a la de evaporación, mediante la relación siguiente:

para  $z = z_b \Rightarrow T(r, z_b, t) = T_b$ , donde  $z_b$  representa la locación axial en la superficie evaporada.

Las ecuaciones 11 y 12, se pueden emplear para determinar la posición relativa de las interfases en el sustrato del material. La interfase líquido-vapor determina la forma y tamaño de la cavidad generada durante el proceso de evaporación. La mejor forma de resolver estas ecuaciones es mediante un método numérico, observando que la ecuación 7 es aplicable para el calentamiento líquido y sólido, la ecuación 11 es para la zona de mezcla sólido-líquido y la ecuación 12 es para la zona de mezcla de líquido-vapor.

Si el proceso de corte láser se desarrolla en una región del espacio como la de figura 6, se podrían asumir las siguientes fronteras:

- 1: Frontera opuesta de donde inicia el proceso.
- 2, 3, 4 y 5: Fronteras donde se da el enfriamiento natural convectivo y que están sujetas a condiciones ambientales.



**Figura 6.** Simplificación de la geometría para el corte láser. (Elaboración propia)

Las ecuaciones descritas hasta el momento se usan para la región central, sección 6, que es donde el láser impacta. Para delimitar el área de estudio se agregan las siguientes condiciones de borde en las superficies restantes, siguiendo el trabajo de (Vora et al., 2012).

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} = h[T - T_0] + \varepsilon\sigma[T^4 - T_0^4] \quad (\text{Ecuación 13})$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial y} = h[T - T_0] + \varepsilon\sigma[T^4 - T_0^4] \quad (\text{Ecuación 14})$$

Donde:

$k$  = Conductividad térmica (W/mK)

$h$  = Coeficiente de transferencia térmica (W/m<sup>2</sup> K)

$\varepsilon$  = Emisividad

$\sigma$  = Constante de Stefan–Boltzmann (W/m<sup>2</sup> K<sup>4</sup>)

$x$  = Coordenada x (m)

$y$  = Coordenada y (m)

Finalmente, la superficie 1 es una frontera aislada y se define como:

$$\frac{\partial T}{\partial y} = 0$$

### 6.3 Propiedades del material

En esta sección se brindan la definiciones y propiedades físicas del material necesarias para aplicar las ecuaciones vistas anteriormente.

El material seleccionado para trabajar es el acero inoxidable 304, es decir una aleación a base de hierro que contiene un mínimo aproximado de 11% de cromo (Cr), valor que permite crear una capa pasiva rica en cromo para prevenir la formación de oxido en la superficie.(Singh, 2016)

La especificación de la composición de aceros inoxidables austeníticos es variada, aun así, los grados más comunes son el tipo 304 y consiste en una familia de aleaciones: 304L (bajo carbono), 304N (reforzado con nitrógeno) ,304LN y otros.(Somerdar & San Marchi, 2008)

En la tabla 1 la composición química de varios aceros, entre ellos el 304, empleado en este trabajo.

**Tabla 1.** Composición química de varios aceros inoxidables (valores dados en porcentajes).(Lillard, 2010)

| Estándar SAE | Estándar UNS | Cr      | Ni       | C     | Mn  | Si   | P     | S     | N   |
|--------------|--------------|---------|----------|-------|-----|------|-------|-------|-----|
| 304          | S30400       | 18 – 20 | 8 – 10.5 | 0.08  | 2.0 | 0.75 | 0.045 | 0.030 | 0.1 |
| 304L         | S30403       | 18 – 20 | 8 – 12   | 0.03  | 2.0 | 0.75 | 0.045 | 0.030 | 0.1 |
| 304ULC       | —            | 19      | 13       | 0.015 | 0.1 | 0.14 | ns*   | ns*   | ns* |

ns\* = No especificado.

En la Tabla 2 se resumen los valores usados para cada parámetro relacionado a las ecuaciones antes desarrolladas.

**Tabla 2.** Parámetros del material usado para el desarrollo de la simulación.

| Parámetro                             | Símbolo           | Ecuación | Valor                         | Referencia                         |
|---------------------------------------|-------------------|----------|-------------------------------|------------------------------------|
| Coefficiente de absorción             | $\alpha - \delta$ | 2, 7     | 0.1~0.25 para baja intensidad | (Kuang et al., 2012)               |
| Densidad                              | $\rho_s$          | 7        | 8000                          | (Backhouse & Baddoo, 2021)         |
| Capacidad de calor específica         | $c_{ps}$          | 7        | Función de temperatura        | (Mills, 2002)                      |
| Conductividad térmica                 | $k_s$             | 7        | 15.0                          | (Backhouse & Baddoo, 2021)         |
| Reflectividad                         | $r_f$             | 7        | 69% a 400°C                   | (Louis De Canonville et al., 2023) |
| Calor latente de evaporación          | $L_m$             | 11       | $2.4 \times 10^5$             | (Yilbas & Naqvi, 2003)             |
| Calor latente de fusión               | $L_b$             | 11       | $6.26 \times 10^6$            | (Yilbas & Naqvi, 2003)             |
| Conductividad térmica (fusión)        | $k_m$             | 11       | 52                            | (Yilbas & Naqvi, 2003)             |
| Conductividad térmica (evaporación)   | $k_b$             | 12       | 52                            | (Yilbas & Naqvi, 2003)             |
| Conductividad térmica (sólido)        | $k_s$             | 7        | 14.92                         | (Graves et al., 1991)              |
| Coefficiente de transferencia térmica | h                 | 13-14    | 3                             | (Ninpetch & Kowitwarangkul, 2019)  |
| Emisividad                            | $\varepsilon$     | 13 - 14  | 0.2                           | (Y. F. Liu et al., 2013)           |
| Constante de Stefan– Boltzmann        | $\sigma$          | 13 - 14  | $5.6697 \times 10^{-8}$       | (Kambezidis, 2012)                 |

## 6.4 Modelación de fenómenos físicos

Para crear un modelo computacional que represente un fenómeno físico, es fundamental comprender la teoría necesaria para la modelación. Esto permite entender el modelo computacional y desarrollar una estructura o flujo adecuado que integre correctamente todos los parámetros necesarios para construir el modelo.

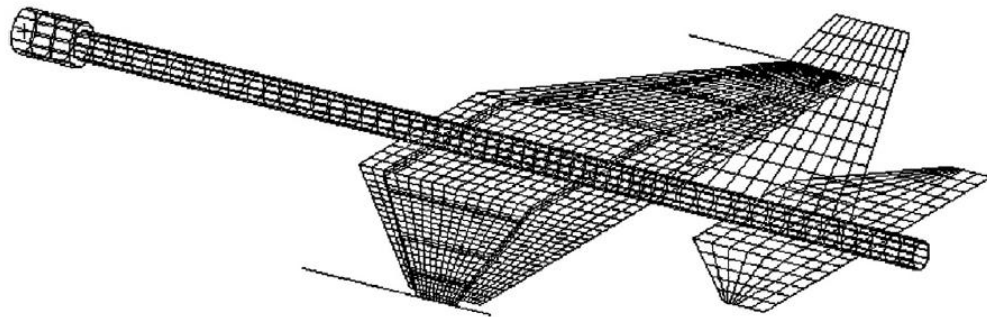
La modelación y su sucesiva simulación representan una imitación de la operación de un proceso del mundo real o sistema sobre el tiempo. Se consideran ser metodologías indispensables para la solución de problemas del mundo real y para describir y analizar el comportamiento de un sistema. (Banks Jerry, 1998)

Un concepto que acompaña los anteriores es el de modelo. En este caso el modelo es la representación física-matemática de un sistema real (Banks Jerry, 1998). La precisión y exactitud de un modelo dependen de toda la física apropiada que ha sido incluida. Es importante que todas las físicas sean incluidas para exactitud, mientras que la precisión va a depender del nivel de aproximación durante el cálculo. Cuando se desarrolla el modelo pueden surgir las siguientes preguntas: (Steen Willian & Mazumder Jyotirmoy, 2010)

- ¿Por qué se está construyendo el modelo?
- ¿Qué está siendo modelado?
- ¿Qué tan bien se entiende el proceso físico? Esto es crítico para determinar las ecuaciones apropiadas:
  - Elección de tasa de procesos
  - Condiciones de frontera/condiciones iniciales
  - Variables dependientes e independientes
- ¿Qué relaciones hay para describir el proceso de forma cuantitativa?
- ¿Cuáles técnicas de solución pueden ser usadas?
- ¿Cómo puede ser corroborada la solución?

Existen métodos para la solución de las ecuaciones diferenciales parciales empleadas en el modelo y los programas computacionales, como COMSOL Multiphysics, realizan esta tarea junto con la sucesiva representación gráfica de los resultados. Para la mayoría de las

geometrías y problemas, las ecuaciones diferenciales parciales no pueden ser resueltas con métodos analíticos, pero se puede construir una aproximación numérica de las soluciones. Se aproximan las ecuaciones diferenciales parciales con métodos numéricos, los cuales pueden ser resueltos usando algoritmos, obteniendo una aproximación de la solución real de las ecuaciones. Se puede recurrir al método de elementos finitos para calcular tales aproximaciones. (www.comsol.com, 2016). El método de elementos finitos es un método numérico que busca una solución aproximada de la distribución de un campo de variables en el dominio del problema, que es difícil de obtener de forma analítica. Se desarrolla dividiendo el dominio en pequeñas piezas llamadas elementos, usualmente de una geometría simple, luego se aplican a cada pequeño elemento las leyes de conservación basadas en principios físicos (G. R. Liu & Quek, 2014). Un ejemplo de cómo se plantea la segmentación de un problema se ve en la figura 7, en donde una geometría compleja como una aeronave se simplifica y secciona en pequeños dominios en los que se aplicarán las diferentes ecuaciones.



**Figura 7.** Mallado del diseño de un modelo a escala para una aeronave.(G. R. Liu & Quek, 2014)

En resumen, lo principal del método de elementos finitos es discretizar un dominio entero (región) del problema en un número finito de subdominios (subregiones). Por ejemplo, las regiones en 2 dimensiones pueden ser aproximadas por triángulos y rectángulos, mientras que, por otra parte, las regiones en tres dimensiones pueden ser aproximadas mediante bloques y pirámides. Se obtiene la matriz de rigidez y luego los elementos se ensamblan para obtener una matriz global para el dominio entero. A partir de la matriz de rigidez global y la

fuerza de carga para el dominio entero, se resuelven las ecuaciones algebraicas para obtener las variables de campo desconocidas.(Nayak & Chakraverty, 2018)

## 6.5 Estimación de costos

La competencia en todos los sectores de manufactura está aumentando y hay una presión constante para reducir costos y mejorar el manejo del costo. De hecho, el control del costo se considera como vital para el éxito de cualquier compañía manufacturera en todos los sectores.(Kent, 2018)

La estimación de costos es un proceso en donde el responsable del proyecto prevé la cantidad de dinero que necesita para financiar el proyecto. El proceso requiere costos directos e indirectos, estos costos pueden incluir utilidades, materiales, equipo, suplidores y compensación a los empleados.(Dave Lee, 2025)

Para el proyecto a desarrollar, la estimación del costo se centra en los componentes necesarios para poder crear un modelo que sirva como de referencia para simular el proceso de corte láser. Entre la literatura disponible se puede encontrar diferentes enfoques para realizar este cálculo, tal y como se ve en (Ayagi & Adam, 2024), por ejemplo, usando el CoC o Eficiencia de inversión (IE, en inglés).

Si bien en (Sinnott & Towler, 2020) se detallan los costos relacionados a una planta química, de igual forma se puede tomar este ejemplo de referencia para hacer el análisis de los costos que aplican al caso concreto de crear un modelo computacional. Para este caso, se contempla el capital fijo de inversión que es el costo del diseño, construcción e instalación y está compuesto de:

- 1) Costos de infraestructura.
- 2) Costos de mejoramiento de la infraestructura.
- 3) Costos ingenieriles.
- 4) Cargos de contingencia.

El primero incluye el costo de instalación del equipo como: instrumentos, equipos auxiliares o dedicados a ensayos, ítems usados para el funcionamiento de la planta, instalación y supervisión.

Los costos de mejoramiento consideran los costos adicionales que deben ser asumidos para crear una nueva planta que aumente su capacidad. Esto puede relacionarse a los costos necesarios para reemplazar alguna parte o sección que no tenga las mejores condiciones.

Seguidamente los costos ingenieriles, que están relacionados con el empleo de herramientas de ingeniería para el proyecto, implicando instalación de equipos, sistemas de control, diseño, etc. Los costos ingenieriles son estimados basados en los alcances del proyecto, ya que no son proporcionales al tamaño del proyecto. En términos aproximados, en proyectos pequeños los costos de ingeniería equivalen al 30% de los costos de infraestructura más los gastos de mejoramiento, mientras que en proyectos de mayor envergadura representan cerca del 10% de los costos de infraestructura sumados a los de mejoramiento.

Según (Lester, 2017) los costos de contingencia son costos extra agregados al presupuesto para permitir variaciones del costo estimado y son importantes. Dado que toda estimación de costos implica cierto grado de incertidumbre, el costo final del proyecto solo se conoce tras su implementación exitosa. Además de las imprecisiones propias de la estimación, los costos de contingencia son fundamentales para cubrir cambios en los objetivos del proyecto, variaciones en los precios de los productos, fluctuaciones en el tipo de cambio y cualquier otra eventualidad imprevista.

Una vez que el costo de un proyecto ha sido determinado, se debe realizar un análisis para comparar los costos con los beneficios percibidos. El primer análisis debe ser creado como parte de una inversión de negocio, pero en la práctica tal análisis debe ser tomado al final de cada fase del ciclo de vida para asegurar que el proyecto es aún viable. Este análisis brinda al director del proyecto la posibilidad de continuar o detener el mismo en caso de que se produzca una escalación inaceptable de costos motivo de factores externos fuera de su control.

El mismo autor hace la aclaración de que es fácil llevar a cabo un análisis de costo beneficio cuando hay un entregable tangible produciendo una ganancia predecible. En el caso de mejora en el servicio o satisfacción del cliente esto no se podría calcular tan fácilmente y se

podría necesitar desarrollar alguna serie de ensayos, análisis de datos o entrevistas para concluirlo.

El análisis del proyecto se fundamenta en la identificación y evaluación de los implementos necesarios para desarrollar el modelo computacional. Se consideran tanto las inversiones previas como las requeridas durante el proceso, asegurando que cada fase del desarrollo se lleve a cabo de manera óptima. Dado que el entregable final consiste en una modelación computacional, su naturaleza es tangible.

## **7. Metodología**

### 7.1 Investigación bibliográfica sobre trabajos relacionados

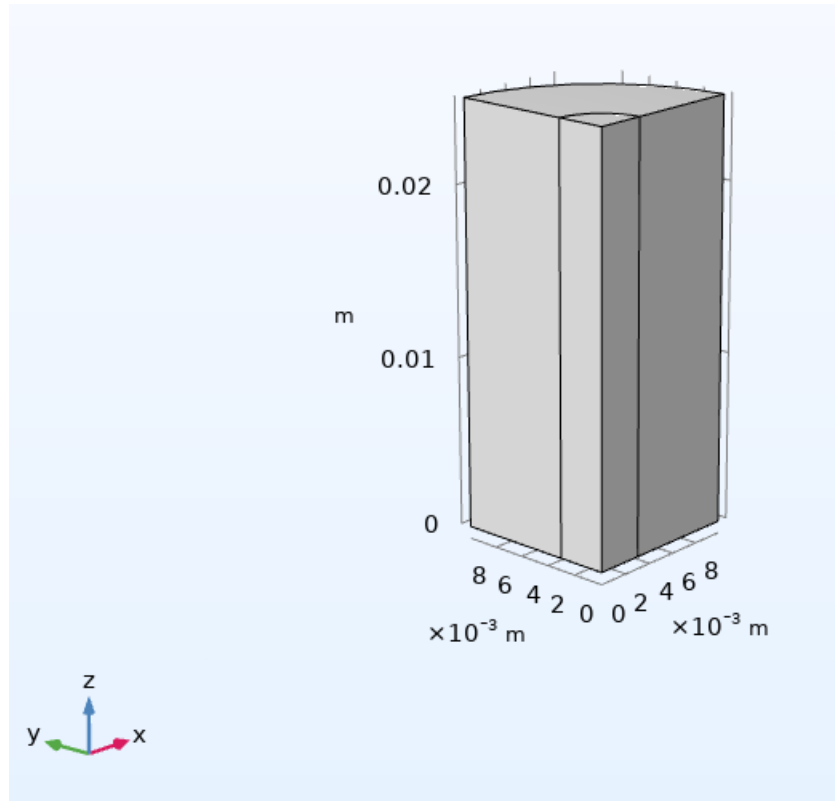
Con el propósito de desarrollar un trabajo de modelación y simulación para el proceso de corte láser, se llevó a cabo una revisión bibliográfica de investigaciones científicas enfocadas en el estudio de este proceso mediante métodos computacionales. También se analizaron trabajos que utilizaban el programa COMSOL Multiphysics, así como la información disponible en su biblioteca, relacionada con fenómenos que abarcan la transferencia de calor y la mecánica de fluidos.

En las secciones siguientes se describen los modelos computacionales preliminares analizados, que constituyen la base para el desarrollo de la modelación y simulación del mecanismo de corte láser.

#### 7.1.1 Modelo base 1: Modelado de la absorción de un rayo láser en un vidrio de sílice. (Modeling Laser Beam Absorption in Silica Glass with Beer-Lambert Law)

Este modelo (Comsol Multiphysics, 2025a) aplica dos mecanismos físicos para caracterizar el calentamiento de la sílice a lo largo del tiempo: la absorción del rayo láser en un medio absorbente y la transferencia de calor en el interior de un sólido.

La figura 8 ilustra la geometría del modelo, que corresponde a un volumen cilíndrico reducido a un cuarto mediante simetría. Este modelo consta de dos dominios concéntricos: uno interno y otro externo.



**Figura 8.** Geometría del primer modelo.(Comsol Multiphysics, 2025,a)

La acción del láser se aplica en la sección interna, posicionándose en la parte superior de la geometría interna, dirigiéndolo hacia el eje  $-z$ . Este láser, de tipo Gaussiano, se modela utilizando las ecuaciones que se describen a continuación.

Primeramente, la potencia inicial ( $P_0$ ) es de 8.9W, que junto con la función  $f$ , determinan la intensidad del láser ( $I_i$ ):

$$I_i = P_0 \cdot f(O, e) \quad (\text{Ecuación 15})$$

En este caso la función  $f$  incorpora las diferentes características del láser como su origen ( $O$ ) y orientación ( $e$ ):

$$f(O, e) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(\frac{-d^2}{2\sigma^2}\right), d = \frac{\|e \times (x-O)\|}{\|e\|} \quad (\text{Ecuación 16})$$

Según las hipótesis del modelo de COMSOL Multiphysics, las paredes de este dominio son transparentes a la radiación, lo que implica que todos los rayos que salen hacia el exterior de ese dominio dejan el medio sin depositar energía en la frontera.

La modelación de la transferencia de calor, usando el módulo respectivo de COMSOL Multiphysics, se aplica en toda la geometría, incluyendo los dos dominios, siendo que la ecuación del calor empleada en este caso es la siguiente:

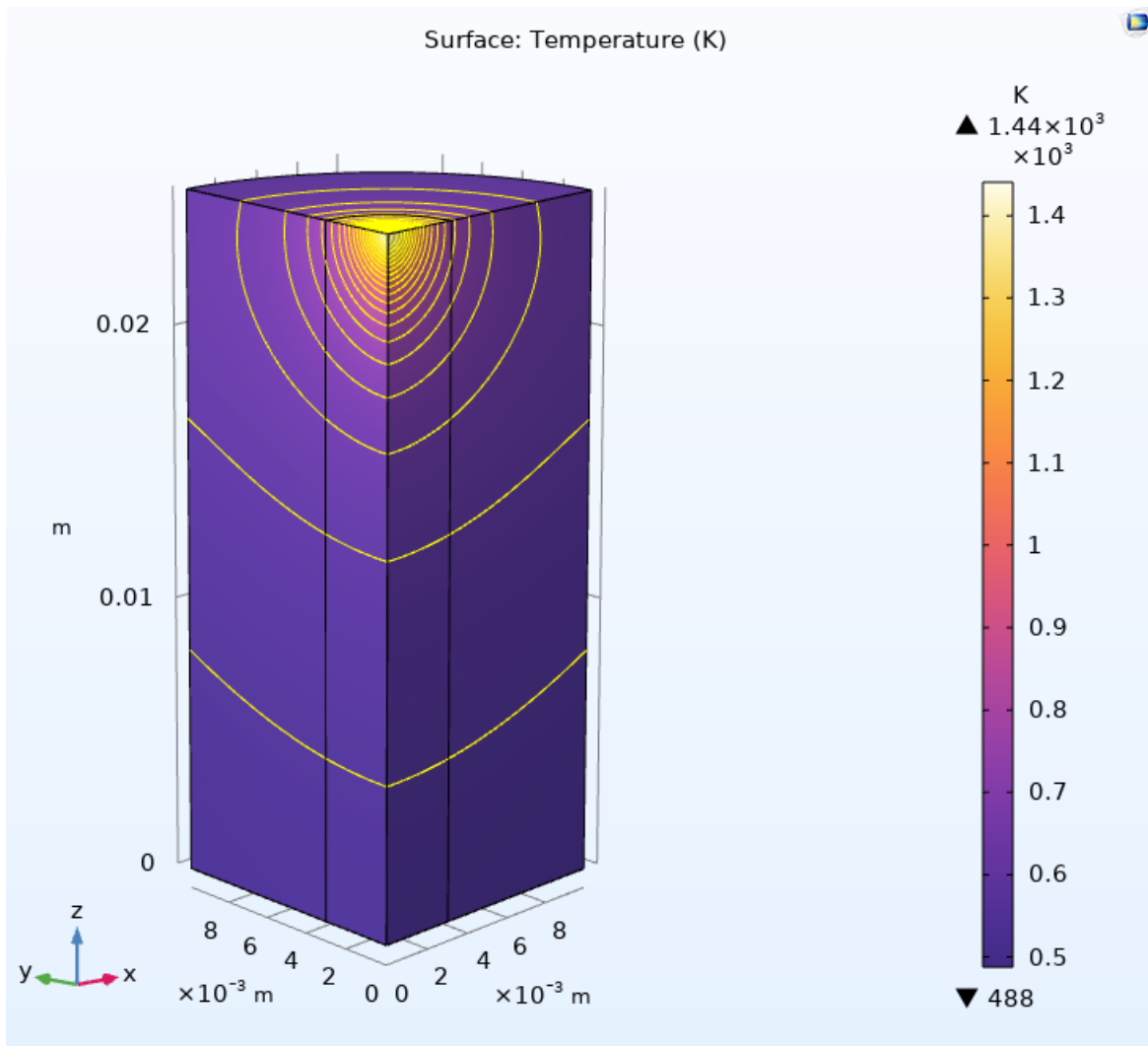
$$\rho C_p u \cdot \nabla T + \nabla \cdot q = Q + Q_{ted} \quad (\text{Ecuación 17})$$

$$q = -k\nabla T \quad (\text{Ecuación 18})$$

En este módulo se contempla la radiación aplicada a las paredes externas de la geometría con una emisividad de 0.8. La temperatura inicial del sistema es la temperatura ambiente (300 K), las propiedades del material como densidad, calor específico y conducción se obtienen directamente de la librería del software.

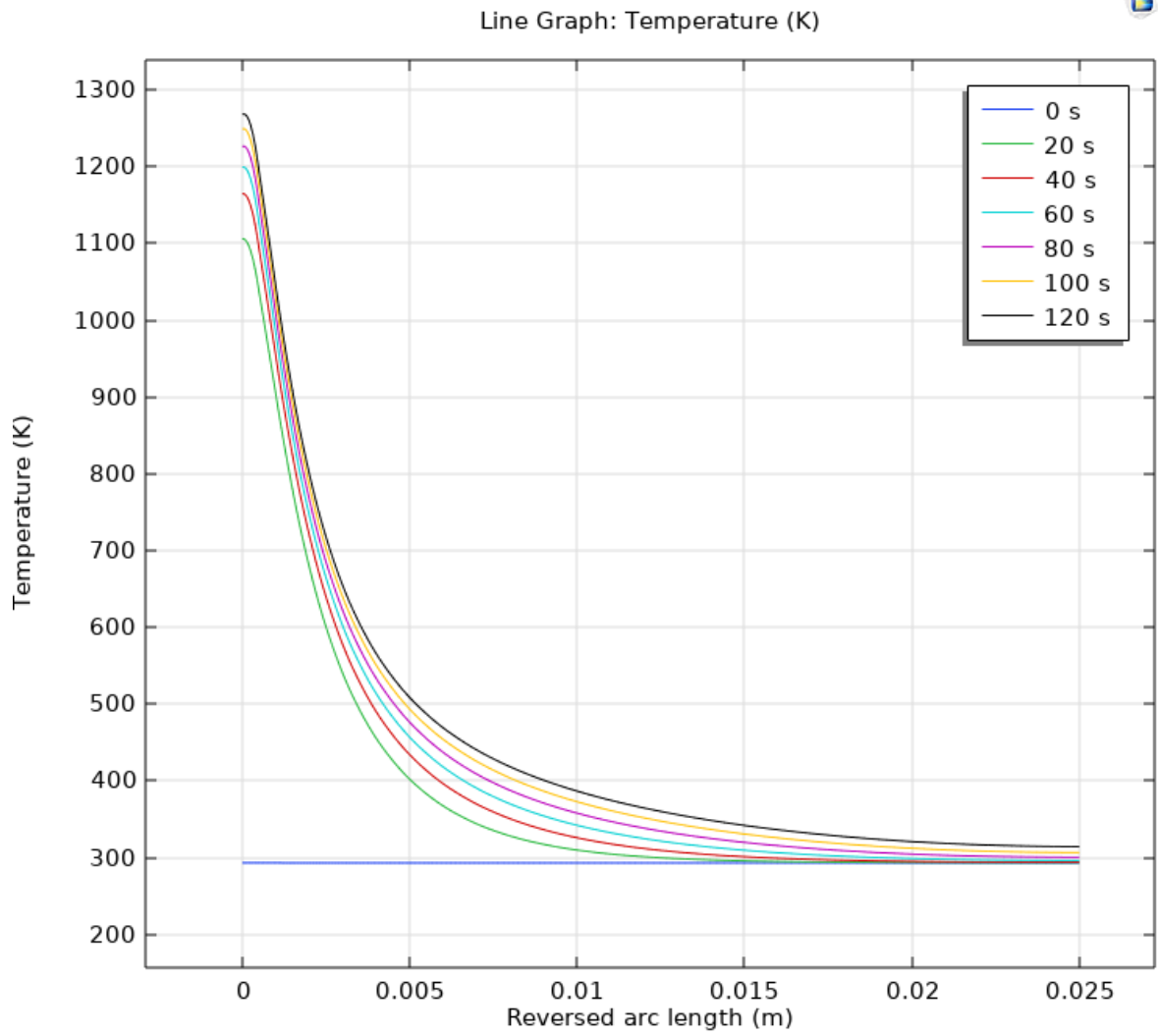
Para combinar ambas físicas, COMSOL Multiphysics utiliza su módulo de multifísica de transferencia de calor con rayo radiante en un medio absorbente, que integra la transferencia de calor y la acción del láser para representar el efecto en términos de temperatura e intensidad del láser sobre el medio absorbente.

Los datos computacionales revelan que la temperatura desciende de manera progresiva, partiendo desde el centro de la figura 9, donde se sitúa el origen del láser y se alcanza una temperatura de 1440 K, hacia las zonas periféricas del volumen de sílice.

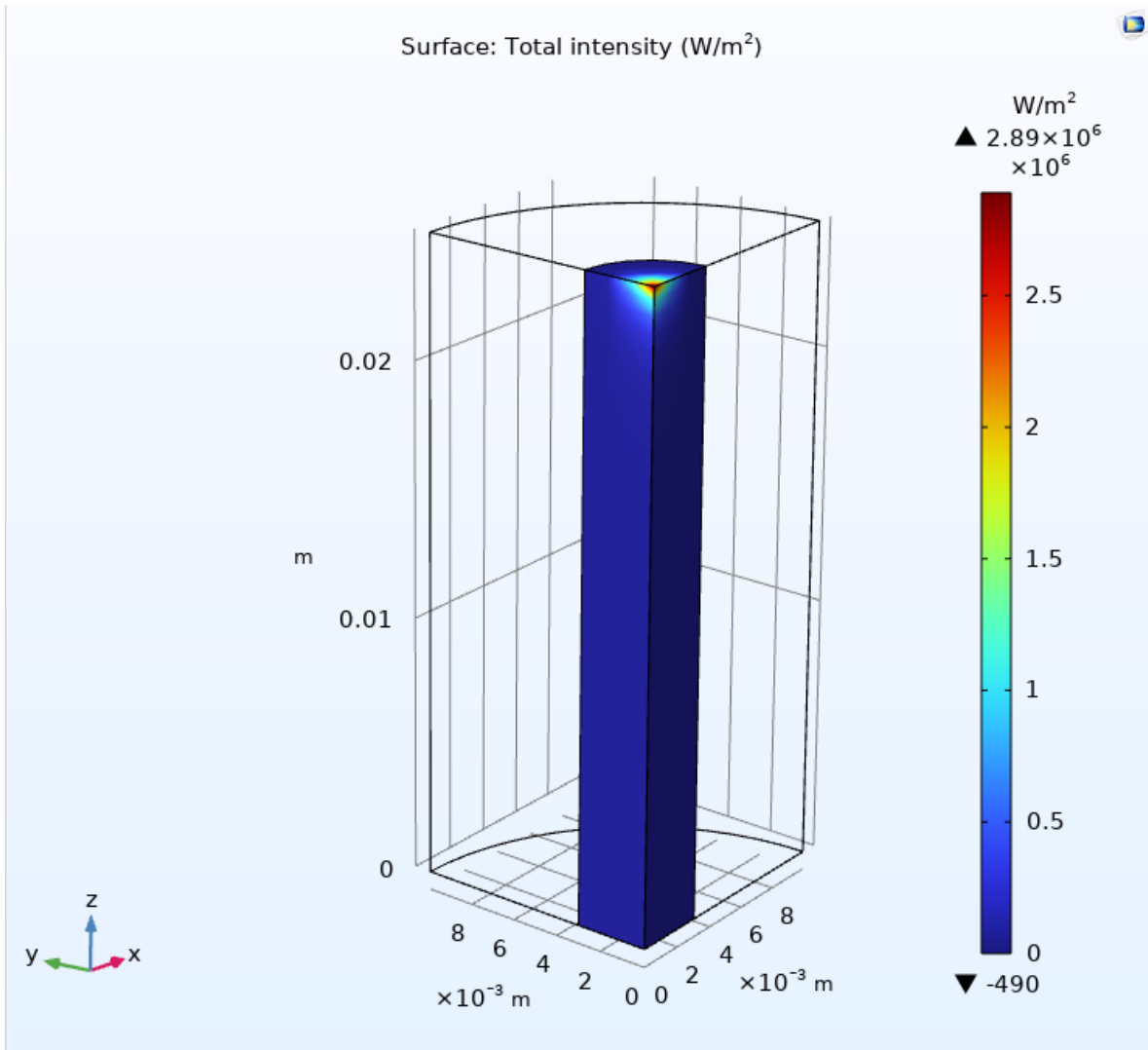


**Figura 9** . Resultados de perfil de temperatura del primer modelo.(Comsol Multiphysics, 2025a)

Los valores de la temperatura a través del tiempo se aprecian en la figura 10, la cual muestra las diferentes temperaturas obtenidas a lo largo del eje z central, en donde el láser se propaga con mayor intensidad. La figura 11 muestra los resultados de intensidad del láser aplicado al sistema.



**Figura 10.** Gráfico de temperatura a lo largo del eje central de la geometría, en función de diferentes tiempos, para el primer modelo descrito.(Comsol Multiphysics, 2025a).



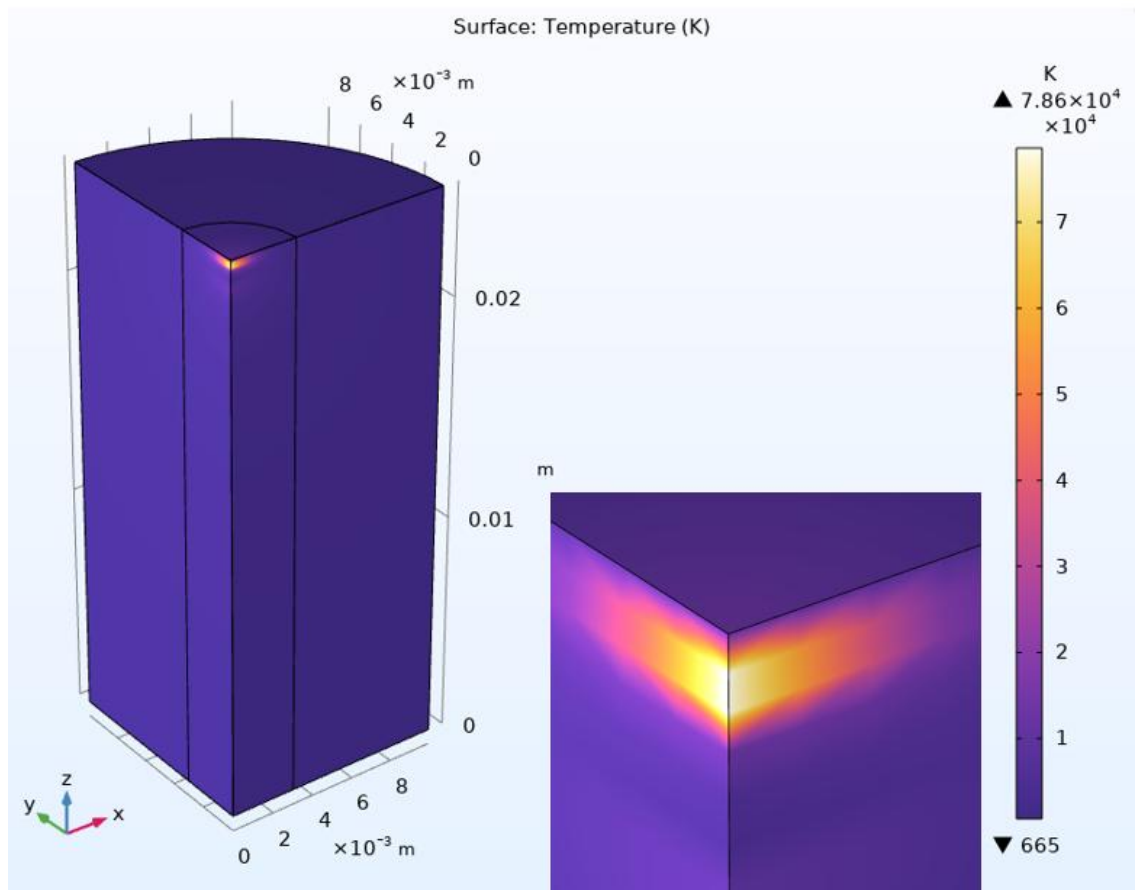
**Figura 11.** Resultados de intensidad del láser sobre el dominio central para el primer modelo descrito.(Comsol Multiphysics, 2025a)

#### 7.1.1.1 Modificaciones realizadas al modelo base 1.

Partiendo del modelo base inicial, se introdujeron algunas modificaciones para crear un escenario que refleje de manera más precisa lo que debería representar un modelo de corte láser. Dado que la dinámica del modelo base guarda una notable semejanza con la del corte láser, se implementaron únicamente dos cambios para analizar el posible comportamiento del sistema, siendo estos:

- Modificación de la potencia del rayo incidente, Modelo MB 1.1. Se introdujo este cambio con el fin de simular una potencia de referencia de 1700W, empleada en los procesos de corte láser de la industria. No obstante, los resultados evidenciaron que, en este primer modelo, la máxima potencia alcanzable era de alrededor de 600W, ya que valores superiores provocaban errores de convergencia.

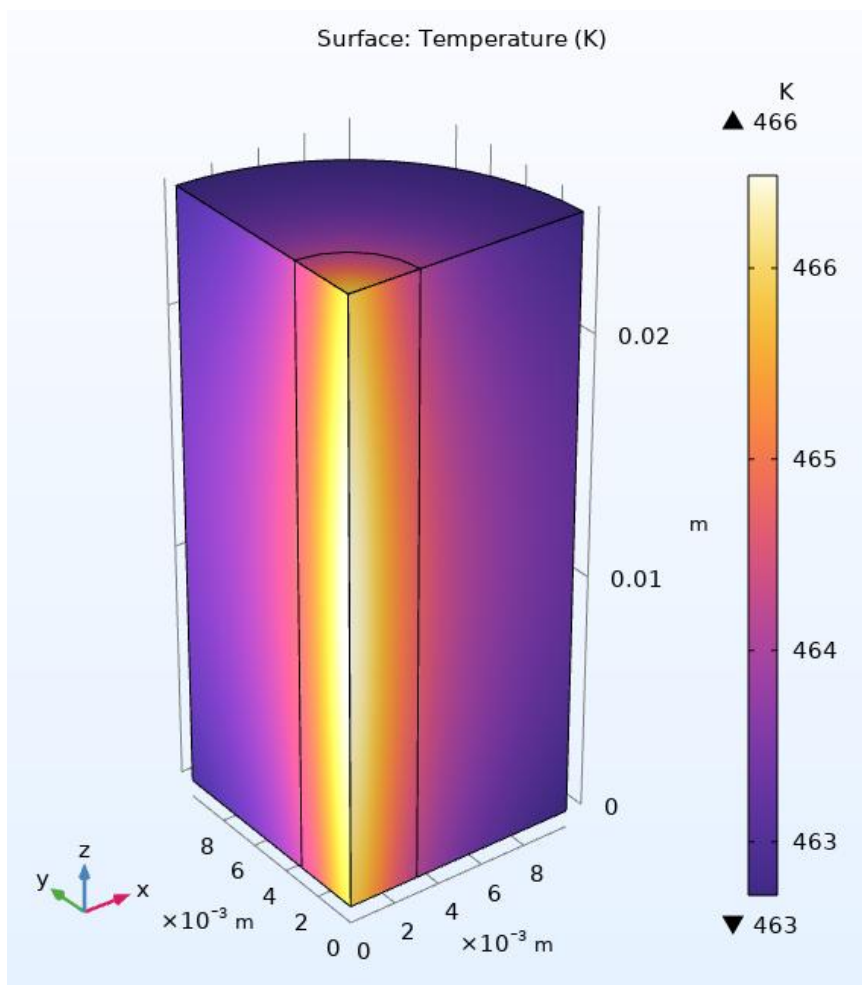
La figura 12 evidencia que la temperatura en la zona central y superior es extremadamente alta, superando los valores obtenidos en el modelo base, lo que se debe a la ubicación específica de la fuente térmica del láser. En este modelo, tanto el análisis estacionario como el dependiente del tiempo indicaron máximos de temperatura de  $7.86 \times 10^4$  K, valores que no se consideran realistas



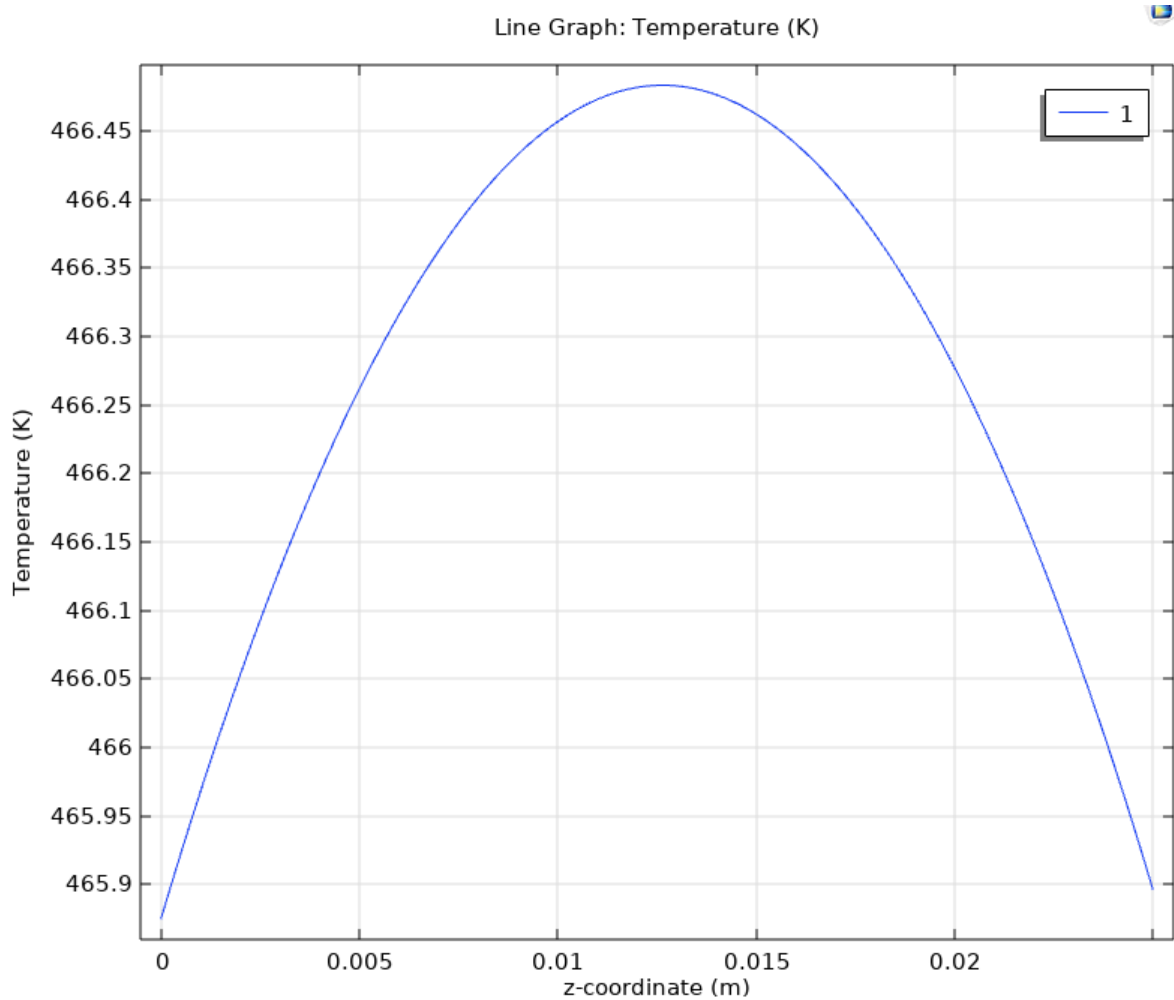
**Figura 12.** Modelo MB 1.1, resultados de temperatura para el estudio estacionario.

- Modificación del material, Modelo MB 1.2: Para este modelo se modificó únicamente el material, usando un acero inoxidable 304, cuyas propiedades se obtuvieron directamente de la librería de COMSOL Multiphysics.

La figura 13 muestra los resultados del perfil de temperatura, donde el nuevo modelo arrojó valores menores de temperatura, incluso de aquellos reportados para el modelo base 1, MB 1. Lo anterior se hace más visible en la figura 14 donde se muestra como a lo largo del eje central la temperatura aumenta desde los 463 K alcanzando un pico a 466.48 K en el centro de la geometría.



**Figura 13.** Resultados de temperatura modelo MB 1.2, geometría 3D.



**Figura 14.** Resultados de temperatura a lo largo del eje central, para el estudio estacionario, modelo MB.1.2

### 7.1.2 Modelo base 2: Enfriamiento y solidificación de metal (Cooling and Solidification of Metal)

Este modelo (Comsol Multiphysics, 2025b) representa un proceso de fundición en el cual metal líquido se deposita en un molde de sección transversal uniforme, donde las paredes del molde están frías y el metal solidifica a la vez que entra en el molde.

Cuando el metal deja el molde se encuentra completamente solidificado en las regiones exteriores, pero líquido internamente. La transición de la fase fundida a la sólida se modela vía la formulación del calor específico aparente.

Durante la transición de fase de líquido a sólido, el metal libera una cantidad significativa de calor latente, correspondiente al cambio de entalpía. De manera simultánea, su calor específico también experimenta variaciones. En el caso de una aleación metálica, es esencial considerar que dicha transición ocurre en un amplio rango de temperaturas, dentro del cual el material en estado líquido se encuentra en equilibrio con el sólido, conformando una región blanda (*mushy*, en inglés). A diferencia de los metales puros, las aleaciones presentan una transición de fase caracterizada por un intervalo térmico extenso, de varios kelvin (K), en el cual las fases sólida y fundida coexisten dentro de la zona de mezcla.

De acuerdo con la información recopilada, (COMSOL Multiphysics (b), 2025), el modelo aplica el método de capacidad térmica aparente, con el propósito de modelar computacionalmente la variación de entalpía durante el proceso de cambio de fase.

Se utilizan condiciones de axis-simetría y la geometría comprende dos regiones rectangulares: una representa la región del molde y otra la sección de enfriamiento fuera del molde. En esta sección se da un enfriamiento por radiación al ambiente, también se asume que el metal está en un estado hidrostático, en el que el único movimiento en el fluido es debido a la salida del metal fuera del molde.

Dado que es un proceso continuo y con movimiento del metal, la transferencia de calor se puede describir con la ecuación 19, aplicable a un estudio estacionario

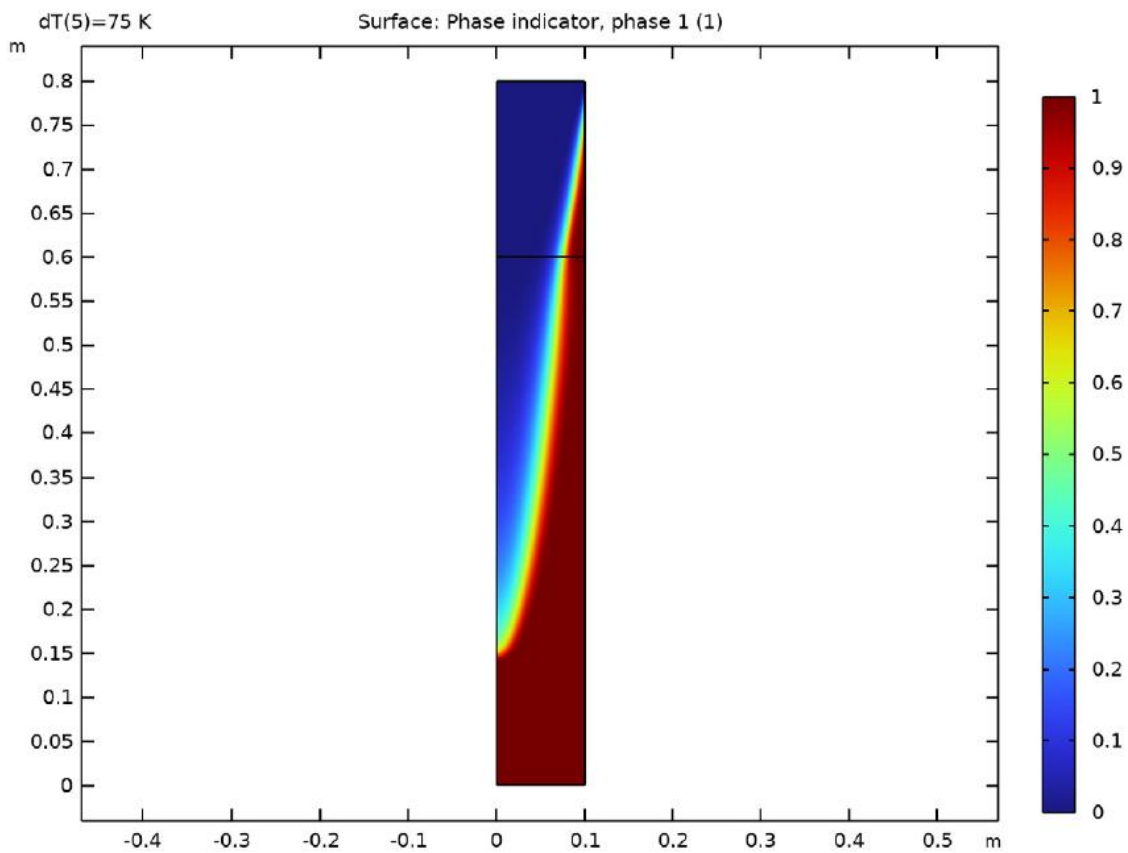
$$\rho C_p u \cdot \nabla T + \nabla \cdot (-k \nabla T) = 0 \quad (\text{Ecuación 19})$$

donde  $k$  y  $C_p$  denotan la conductividad térmica y el calor específico respectivamente, mientras que la velocidad,  $u$ , corresponde a la velocidad del proceso.

El modelo debe ser capaz de representar la posición espacial de la región de transición entre el metal fundido y el material sólido, cuya ubicación depende de la velocidad del proceso, la cinética del enfriamiento en el molde y en la región externa. Aunque la posición de esta interfaz en el espacio es desconocida, se requiere un mallado fino para capturar con precisión los altos gradientes de las magnitudes físicas que allí se generan.

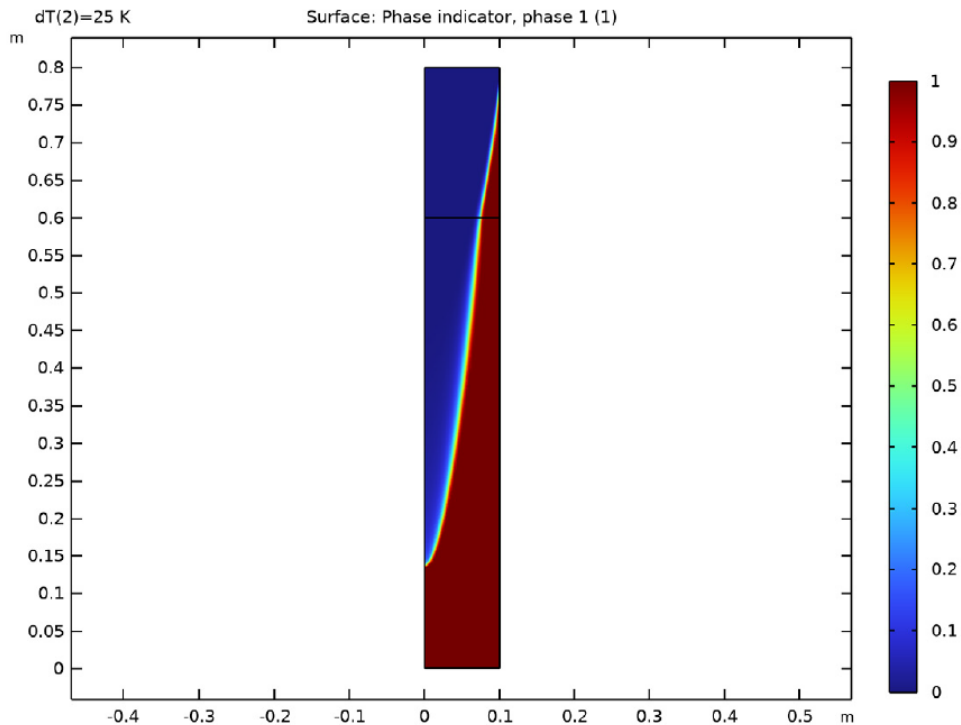
Para abordar este desafío, el modelo comienza con una primera solución computacional implementando una transición gradual entre la fase líquida y la sólida, con un mallado más grueso. Posteriormente, mediante un algoritmo iterativo, esta solución inicial sirve como punto de partida para obtener un resultado más preciso con una transición más definida.

Dentro del algoritmo, se establece que  $\nabla T$  representa la mitad del intervalo de temperatura de la transición. En la fase inicial del estudio,  $\nabla T$  varía de 300 K a 75 K, figura 15, y la solución obtenida se utiliza para un segundo cálculo, en el que el intervalo se reduce aún más, de 50 K a 25 K, logrando una representación más realista de la interfaz de cambio de fase, como se aprecia en la figura 16.



**Figura 15.** Gráfico del trazo del cambio de fases, líquido a sólido, para el segundo modelo,  $\nabla T$  de 75 K (1= Fase sólida – 0 = Fase Líquida).(COMSOL Multiphysics (b), 2025)

Aplicando esta metodología, al reducir el intervalo de temperatura ( $\nabla T$ ) de transición y acortar la zona de cambio gradual, se garantiza la convergencia del modelo mediante un mallado computacional más preciso.



**Figura 16.** Gráfico de la interfaz del cambio de fases, líquido a sólido, para el segundo modelo,  $\nabla T$  de 25 K (1= Fase sólida – 0 = Fase Líquida).(COMSOL Multiphysics (b), 2025)

#### 7.1.2.1 Modificaciones realizadas al modelo base 2.

Para evaluar la influencia de las diversas propiedades y parámetros en este modelo, se desarrollaron cuatro nuevas versiones, en los cuales se ajustaron algunas magnitudes físicas y se modificaron los valores iniciales de los mismos parámetros. La Tabla 3 resume los cambios aplicados en la modelación y cómo éstos impactaron en los resultados de la subsiguiente simulación.

Aquí se examina el comportamiento del material fundido mientras experimenta la transición de fase hacia el estado sólido al entrar en contacto con las paredes del molde. Se llevaron a cabo diversas pruebas con el objetivo de replicar lo más fielmente posible el efecto del láser

sobre el material acero, obteniendo información esencial sobre la modelación de la transición (interfaz) de sólido al líquido.

**Tabla 3.** Resumen de modelos generados con el modelo base 2.

| <b>Nombre del Modelo</b> | <b>Modificaciones</b>  | <b>Variación de los resultados respecto de los originales</b>  |
|--------------------------|--|--|
| Modelo Base 2 (MB 2)     | N/A  | Modelo base 2 obtenido de la librería de COMSOL Multiphysics.  |
| MB 2.1                   | Se modifica el nodo de Fluid 1 del estudio de Heat Transfer para usar las ecuaciones de un estudio dependiente del tiempo. Con el objetivo de permitir una velocidad inicial $v=0$ m/s, que va acorde al estado inicial de un proceso de corte en donde el material no posee una velocidad previa. | En los estudios estacionarios se registra únicamente el cambio a la fase 1 (sólida), mientras que en el estudio dependiente del tiempo se logra reproducir la transición de fases de modo similar al modelo original, aunque se aprecian ligeras variaciones en el perfil de enfriamiento, atribuibles a los cambios en las temperaturas registradas.  |
| MB 2.2                   | Se agrega una fuente de calor, modelada mediante un rayo láser del tipo Gaussiano de potencia igual a 1700W.   | En cuanto a los resultados estacionarios, estos registraron la permanencia de una fase líquida en el extremo superior del molde (0.2 m) y sólida para el resto de la geometría. El estudio dependiente del tiempo mostró el cambio de fases que empieza a notarse desde los 11 segundos donde ya es posible observar una zona de mezcla. En cuanto a los valores de temperatura, estos se separan notablemente de la versión original. En el presente caso, se observa la acción de un líquido en reposo, con una temperatura inicial de 1473 K, que es calentado por el láser. La temperatura |

|        |  |  |
|--------|--|--|
|        |  | máxima registrada, de $8.84 \times 10^3$ K, se encuentra justo en el centro del cilindro donde opera el láser.   |
| MB 2.3 | En los nodos del modelo correspondientes al análisis dependiente del tiempo, se ha incorporado el método de adaptación del mallado, con el propósito de optimizar la densificación de la malla en las regiones caracterizadas por la presencia de elevados gradientes, particularmente en la interfaz. | Esta modificación integra el nodo de cambio de fase del material en el estudio actual de transferencia de calor. No obstante, los resultados no han resultado favorables, pues las curvas de transición de fase no se suavizan y no generan un impacto positivo.   |
| MB 2.4 | Se efectuó una variación en la temperatura inicial del fluido, reduciéndola de 1473 K a 300 K.   | Los resultados revelaron un incremento en la temperatura, elevándose de 300 K a $5.13 \times 10^3$ K, concentrándose en la sección central de la geometría y únicamente en su superficie, donde asimismo se observaron cambios de fase. El efecto del método de reconstrucción del mallado se manifiesta de forma positiva en la simulación, al lograr que la distribución de la temperatura se mantiene coherente, mientras que las curvas registradas evidencian una progresión suave a lo largo del tiempo. |

#### 7.1.2.2 Modelo MB 2.4

Este modelo, derivado del modelo base 2, integra todas las modificaciones detalladas en la Tabla 3, logrando una representación más precisa para la modelación y simulación del corte láser.

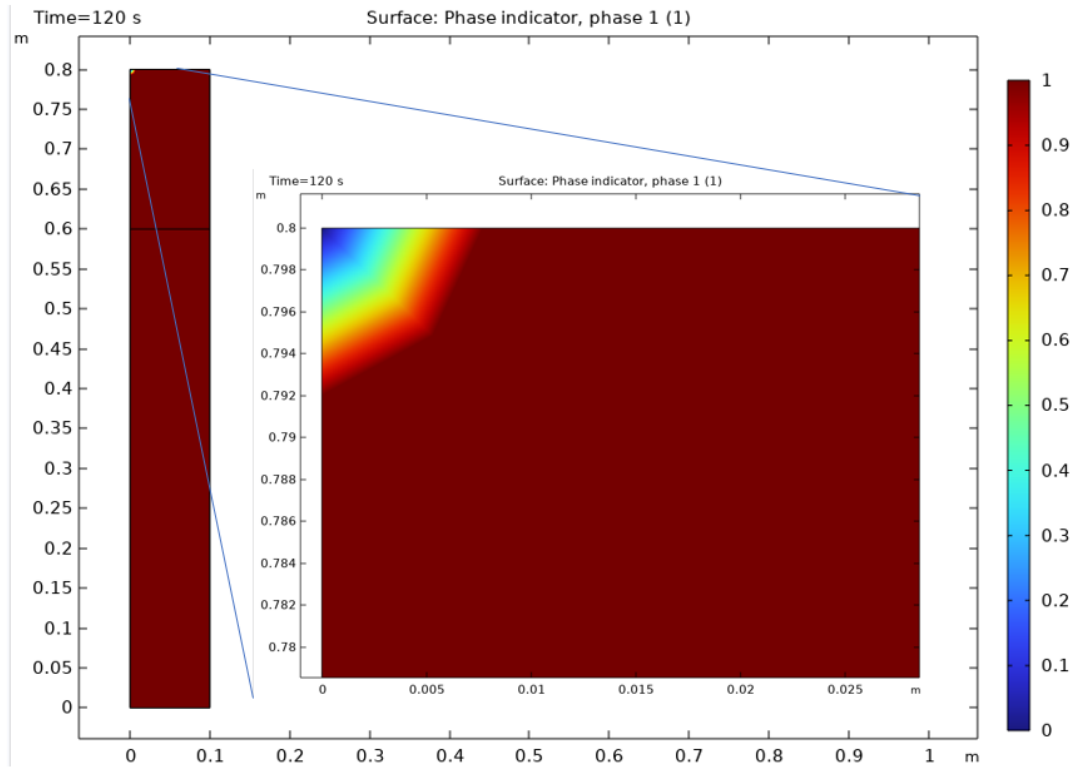
Como se mencionó en el modelo MB 2.1, una modificación clave es el cambio en las ecuaciones planteadas, pasando de un estudio estacionario a uno dependiente del tiempo. Sin esta modificación, no es posible partir de un modelo en estado inicial, como ocurre en las condiciones del corte láser de un material, donde se requiere que comience el calentamiento en un instante preciso. Por ello, las ecuaciones diferenciales que gobiernan la conservación de la energía térmica se reformulan de la siguiente forma:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p u \cdot \nabla T + \nabla \cdot q = Q + Q_p + Q_{vd} \quad (\text{Ecuación 20})$$

donde el flujo de calor por conducción, dado por la ley de Fourier y es igual a la ecuación 18 antes descrita.

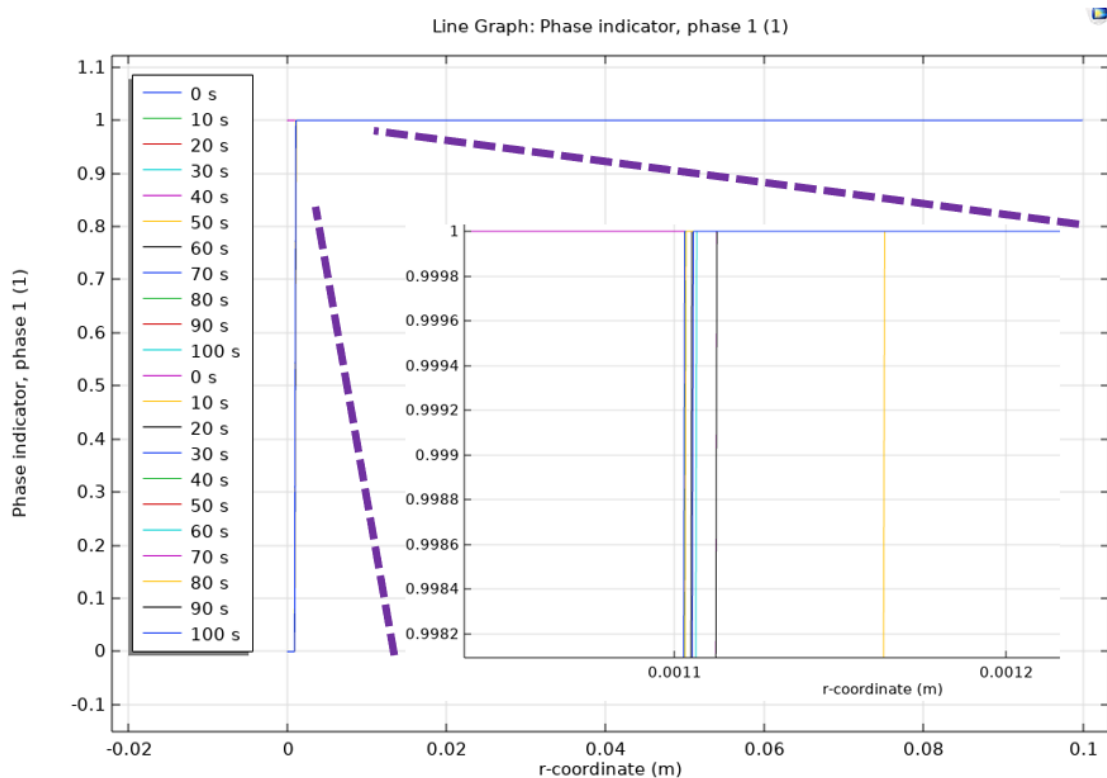
De esta forma pueden emplearse valores iniciales, por ejemplo, con velocidad inicial  $u = 0$  m/s, y modelar un fenómeno realmente transitorio que evoluciona en el tiempo.

La incorporación del láser se emplea para evaluar el comportamiento del sistema al ser calentado mediante este término fuente, usando el mismo valor de potencia del corte de 1700W. Puesto que la configuración de este modelo es considerablemente mayor que la del corte real de un cable, se prevé que la temperatura no experimente un aumento significativo en toda su extensión. A continuación, se presentan los resultados del estudio de transferencia de calor.



**Figura 17.** Resultados del modelo MB 2.4 para el cambio de fase (estudio dependiente del tiempo  $t=120$  segundos), con acercamiento a la sección de incidencia del láser. (1= sólido, 0= líquido).

En la figura 17 se observa cómo el material experimenta un cambio de fase conforme se calienta, concentrándose la fase líquida en la parte superior del molde, donde se ubica la fuente láser del proceso de corte.

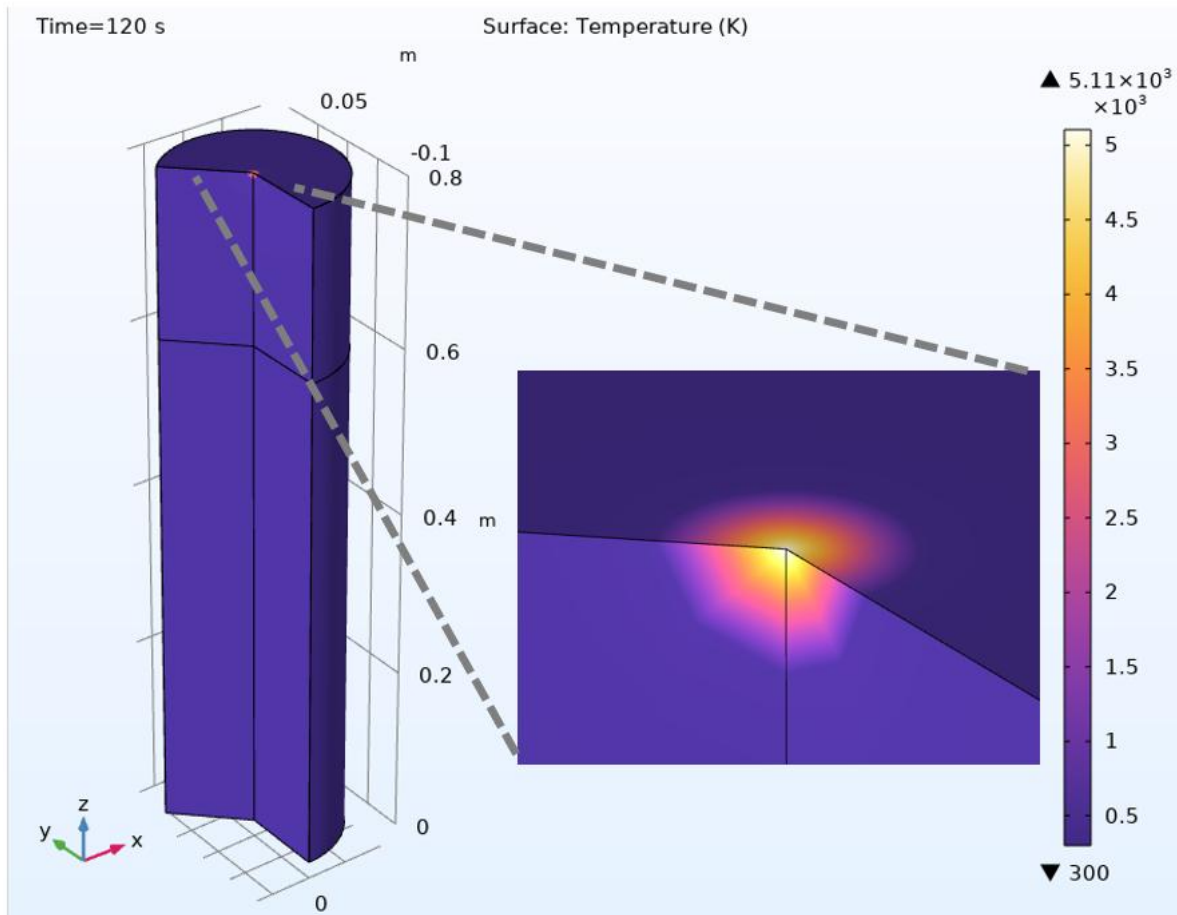


**Figura 18.** Gráfica del cambio de fase, para la superficie del modelo MB 2.4 en dirección radial (1= sólido, 0= líquido).

En la figura 18 se evidencia la presencia de la interfaz sólido-líquido, destacándose especialmente en la región superior de la geometría, se desplaza de forma radial conforme transcurre el tiempo, partiendo de su posición inicial ( $t = 0$  s) hasta llegar al tiempo final ( $t = 120$ s), con registros cada 10 segundos. Asimismo, se observa que, en la condición inicial ( $t = 0$ s), el material se halla en estado sólido; sin embargo, apenas a los 10 segundos y en las cercanías del punto de aplicación del láser, transita rápidamente al estado líquido (fase 0), mientras que en las áreas más alejadas se mantiene aún sólida (fase 1). Se prevé que la región de transición se profundice progresivamente en el interior del material a medida que éste absorbe el calor y la interfaz líquido-sólida se desplace hacia el interior.

No obstante, los valores de temperatura reflejados en la figura 19 indican que, incluso al finalizar el estudio, esta no ha aumentado de manera significativa en el resto de la geometría

ya que aún hay regiones considerables que se mantienen a temperatura ambiente. Se observa que la mayor temperatura alcanzada es de  $5.11 \times 10^3$  K.



**Figura 19.** Resultados de temperatura del modelo MB 2.4 en 3D, ampliación del centro de la pieza.

### 7.1.3 Modelo base 3: Modelado de remoción de material a través de ablación térmica (Modeling Material Removal through Thermal Ablation)

Este modelo desarrollado en COMSOL Multiphysics por (Frei, 2016), detalla el proceso de sublimación o ablación, el cual ocurre cuando un material en estado sólido es sometido a calor al punto en que su temperatura aumenta hasta producir un cambio de fase. Este proceso puede ocurrir de dos formas: el material puede alcanzar primero el estado líquido para posteriormente convertirse en gas, o bien pasar directamente de sólido a gas sin la fase

intermedia. En esta modelación se contemplan únicamente aquellos que cambian directamente a la fase gaseosa.

Para el desarrollo de la simulación se asumen las siguientes condiciones:

- El material se calienta de tal manera que la temperatura máxima se desarrolla en la superficie y no hay calentamiento interno.
- Una vez el material cambia a estado gaseoso, deja de ser considerado en el balance térmico.
- El flujo de calor a través del modelo es uniforme en tiempo y espacio.
- Las propiedades del material son constantes y no hay gradientes de temperatura.

Como condiciones de borde, se establece que el material al llegar a la temperatura de ablación cambia su estado a gas y es removido del dominio de modelación.

La condición de borde para la temperatura es un flujo de calor ablativo de la siguiente forma:

$$q_a = h_a(T - T_a) \quad (\text{Ecuación 21})$$

Donde  $q_a$  es el flujo de calor debido a la ablación,  $T_a$  es la temperatura de ablación, establecida a 773.15 K,  $h_a = h_a(T)$  siendo el coeficiente de transferencia térmica dependiente de la temperatura que es cero para  $T < T_a$  y aumenta de forma lineal cuando  $T > T_a$ . La pendiente de esta curva es muy pronunciada reforzando que la temperatura del sólido no puede exceder la temperatura de ablación.

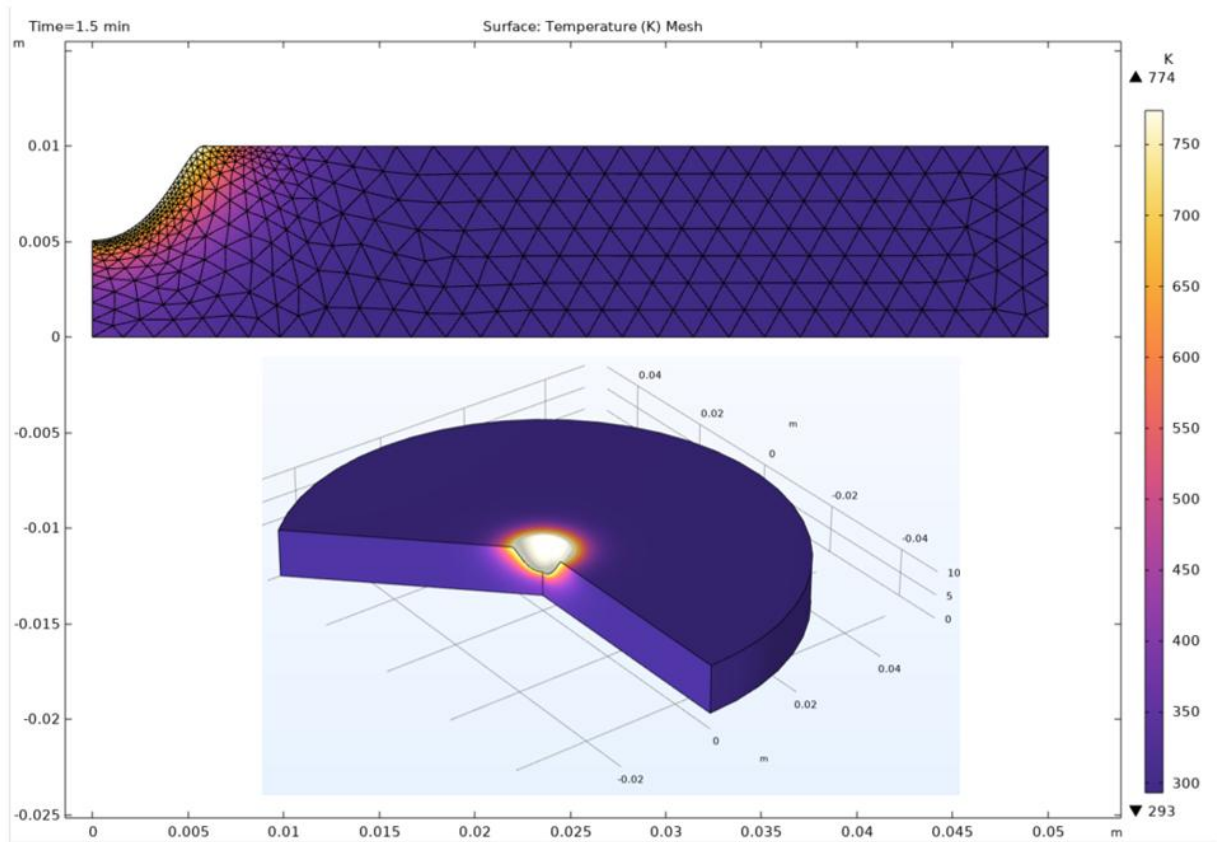
La tasa de remoción se define con:

$$v_a = q_a / \rho H_s \quad (\text{Ecuación 22})$$

donde  $v_a$  es la velocidad de ablación del material,  $\rho$  es la densidad del material y  $H_s$  es el calor de sublimación.

En lo que respecta a los resultados previstos para este modelo, se aclara que, aunque el objetivo es representar la remoción de material al alcanzar una temperatura definida

(temperatura de ablación), no es posible plasmar un cambio topológico, por ejemplo, la formación de un agujero a través de la geometría resultante del corte o "key hole" en inglés, debido a la utilización de la interfaz de Geometría Deformada de COMSOL Multiphysics.



**Figura 20.** Resultados del perfil de temperatura y geometría desarrollada en el modelo de remoción de material a través de ablación térmica.(Frei, 2016)

La figura 20 presenta los resultados del modelo, en el que se aprecia cómo la geometría se modifica debido a la remoción de material tras un cambio de fase, generándose un cráter en el centro de la pieza, donde el calor del láser tiene mayor impacto.

### 7.1.3.1 Modificaciones realizadas al modelo base 3

En relación con este modelo, se implementaron tres variantes distintas con el objetivo de ajustar el modelo a la representación del proceso de corte de un material mediante láser, e ilustrar la formación de un cráter resultante de la remoción de material ocasionada por el cambio de fases al calentar el material.

Para esto se modificaron propiedades y parámetros en el modelo, los cuales se detalla en la tabla 4, junto con sus resultados más significativos. Posteriormente se profundizará en el modelo que obtuvo mejores resultados.

**Tabla 4.** Resumen de modelos generados con el modelo base 3.

| <b>Nombre del Modelo</b> | <b>Modificaciones</b>   | <b>Variaciones de los resultados respecto a los originales</b>  |
|--------------------------|---|---|
| Modelo Base 3 (MB 3)     | N/A   | Modelo base 2 obtenido de la librería de COMSOL Multiphysics.   |
| MB 3.1                   | Se modifica el término fuente para introducir la acción de un láser sobre el material con una potencia de 5W. | Los rangos de temperatura mostrados son similares, valor máximo reportado de 787 K contra 774 K.<br>La deformación presente es más pronunciada y en cuanto a profundidad de alcance para el láser se observa que es mayor, 10% mayor. |
| MB 3.2                   | La temperatura de ablación, temperatura a la que el sistema pierde calor por la                               | La temperatura se aumenta considerablemente al alcanzar los $1.74 \times 10^3$ K, la  |

|        |   |  |
|--------|---|--|
|        | ablación, se modifica para representar la remoción de material por evaporación, establecida ahora en 1723.15 K.   | deformación del mallado disminuye en profundidad y amplitud cerca de la mitad para ambos valores.  |
| MB 3.3 | Se modifican las propiedades del material para incluir las correspondientes al acero inoxidable 304.<br>La potencia del rayo incidente también se aumentó a 170W. | En cuanto a su valor máximo de temperatura no se tuvo una gran variación, dada la misma configuración del modelo que establece limitantes en cuanto a sobrepasar la temperatura de ablación. En cuanto al mallado, el modelo disminuyó su deformación. |

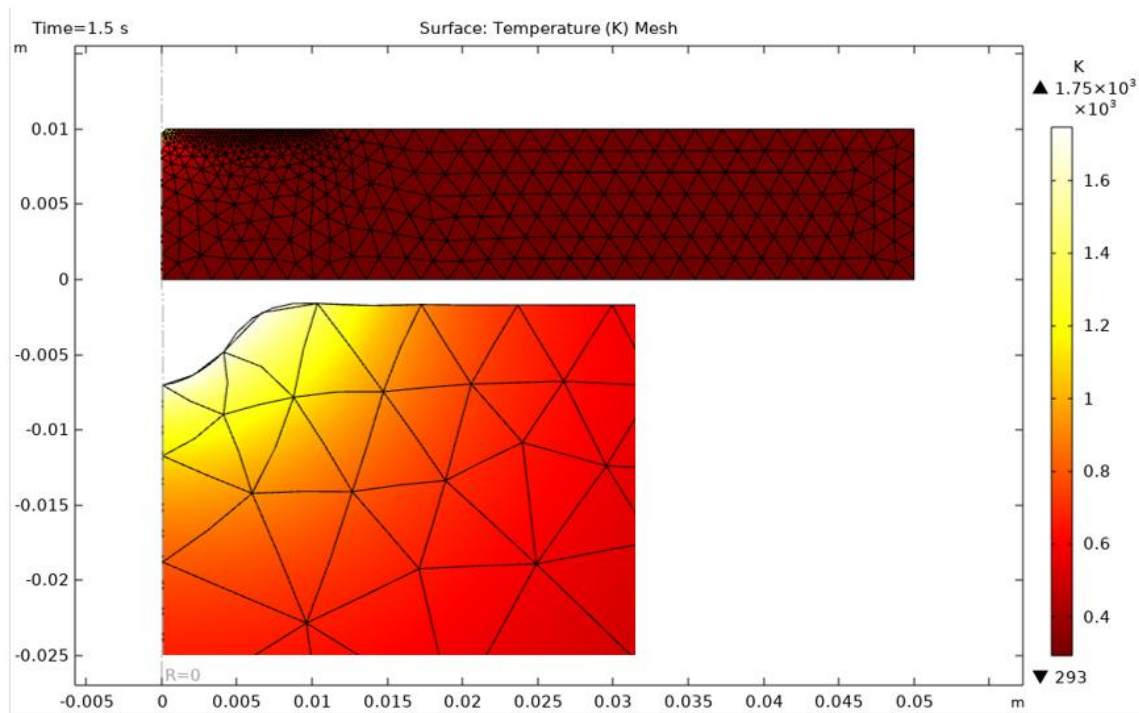
### 7.1.3.2 Modelo MB 3.3

Este modelo integró las características propias del corte láser, considerando el término fuente, las propiedades del material, las condiciones iniciales y los fenómenos físicos asociados. Además, para representar la formación del cráter generado por la remoción de material durante el proceso láser, como consecuencia del cambio de fase en el mismo, se estableció una temperatura de ablación comparable a la temperatura de fusión del acero,  $T=1723.15\text{ K}$ , lo que permitió simular la transición de sólido a líquido, por ende, la eliminación del material en el sistema.

Para la integración del láser como fuente de calor en el modelo, se siguió la misma metodología de los modelos bases anteriores en donde este se localiza en la superficie superior de la geometría y se dirige hacia el interior de esta. Para este caso, luego de la modificación en las propiedades del material se observó que la potencia del sistema podría

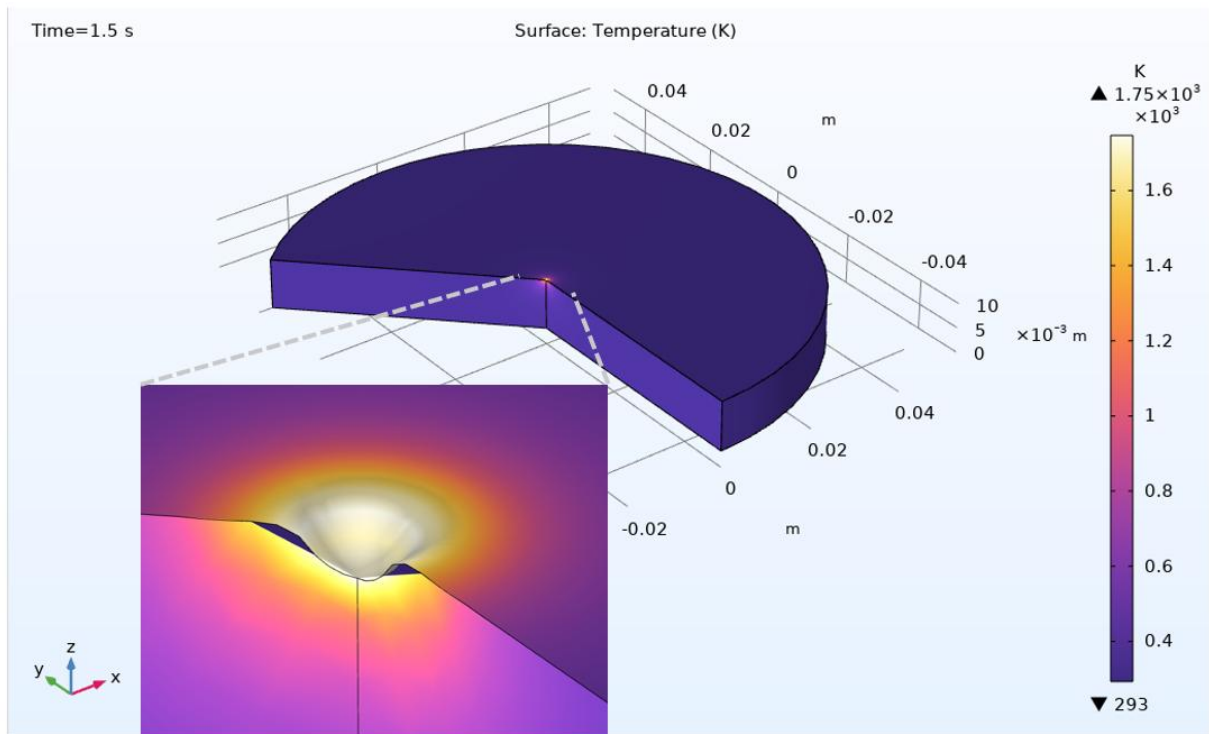
ser incrementada, al pasar de los 5W del modelo MB3.1 a 170W que, como se mencionó anteriormente, se estableció como 10% menos del valor de referencia de la industria, con el objetivo de ver una transición más suave en los resultados de la simulación.

Cabe señalar que este modelo es sensible al incremento de la temperatura. La deformación observada en la simulación, que actúa como representación de la pérdida de material, está estrechamente vinculada a la temperatura del sistema. Altos valores térmicos pueden afectar negativamente los nodos, provocando deformaciones excesivas y, en consecuencia, problemas de convergencia.



**Figura 21.** Resultados de temperatura y geometría para el modelo base 3.

En los resultados del modelo base 3, figura 21, se observa como producto de que el sistema alcanzara la temperatura de ablación, se inicia el proceso de eliminación de material que provoca la formación del cráter característico para este proceso. La figura 22 muestra estos mismos resultados empleando una geometría 3D.

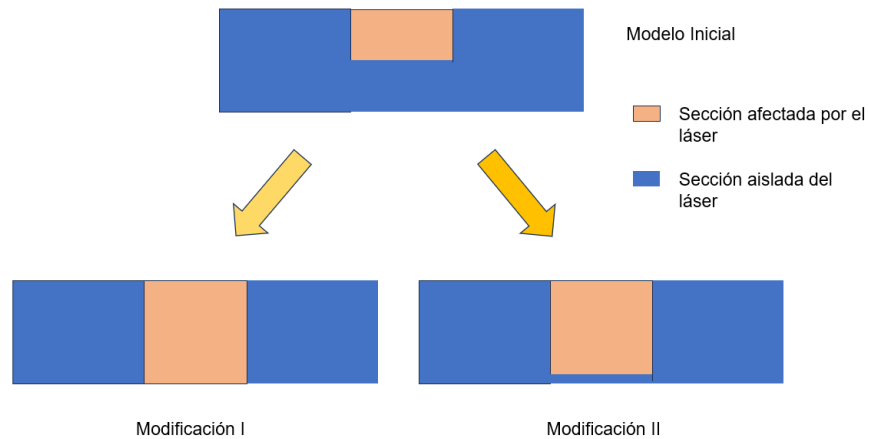


**Figura 22.** Resultados en 3D sobre temperatura y geometría para el modelo base 3.

## 7.2 Desarrollo de las geometrías

Para el desarrollo de esta sección se parte inicialmente de la geometría propuesta para la modelación del corte láser, descrita en la sección 6.2, donde la figura 6 presentaba una primera simplificación. Esta geometría inicial se puede ajustar para representar de manera más precisa el proceso, lo que deriva en dos nuevas regiones geométricas para el corte láser, que se ilustran en la figura 23.

La primera (Modificación I) se crea extendiendo hacia abajo la zona afectada por el láser hasta abarcar el espesor completo del cable, mientras que la segunda (Modificación II) también amplía dicha zona, pero la delimita con una frontera aislada, exagerada en la figura 24.



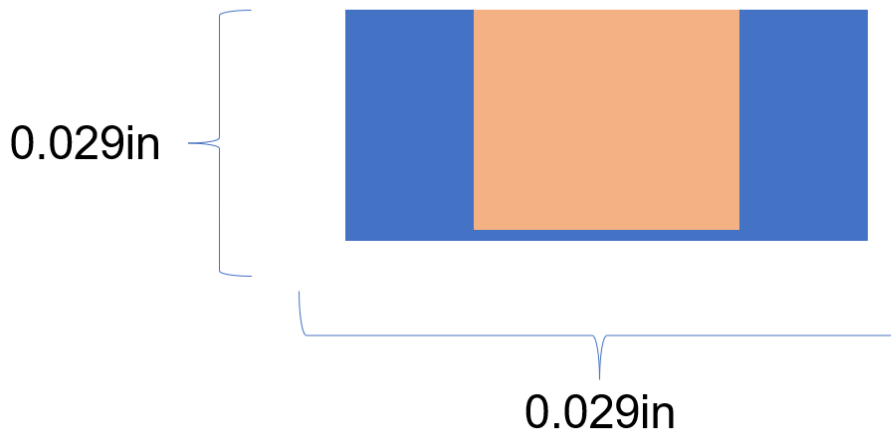
**Figura 23.** Geometrías planteadas para el modelo computacional del corte láser. (Elaboración propia)

Se elige la segunda región geométrica (Modificación II) para la simulación, basándose en las investigaciones del estado del arte y en la naturaleza del fenómeno físico a modelar.

En la figura 25 se muestra una imagen representativa de esta geometría, adaptada a partir de los valores técnicos provenientes de la industria nacional. Se plantea como un cuadrado de 0.029 in de lado, con una región central (área impactada por el láser) de 0.0087 in de base y 0.029 in de altura, que para el estudio en 3D tendría un volumen de  $1.91 \times 10^{-5} \text{ in}^3$ . Es importante destacar que, conforme a los requisitos del proceso de corte láser de la empresa, la tolerancia máxima permitida para el diámetro del cable es de 0.033 pulgadas. Este valor representa el límite superior, establecido debido a la formación de residuos de acero fundido en la zona de corte, los cuales, al solidificarse, pueden incrementar el diámetro del cable y provocar que no cumpla con los criterios de inspección.

Dado que el área afectada por el láser abarca la totalidad del espesor de la pieza y presenta una frontera aislada, resulta indispensable considerar este límite en la simulación. Además, se han adoptado las dimensiones del modelo en concordancia con los valores obtenidos de datos técnicos de la industria nacional.

El modelo seleccionado permite realizar simulaciones en 2D y, gracias a su simetría, puede extenderse a 3D mediante una revolución de  $360^\circ$ , lo que genera un dominio volumétrico de forma cilíndrica. Asimismo, se planifica evaluar otras modificaciones una vez analizados los primeros resultados computacionales obtenidos.



**Figura 24.** Geometría inicial para el modelo de corte láser, cuadrado de 0.029 in de lado, con una región central (área impactada por el láser) de 0.0087 in de base y 0.029 in de altura (no a escala). (Elaboración propia)

Para el mallado computacional, se toma como referencia los trabajos de (Vora et al., 2012) y (Vora et al., 2013) en donde se estableció un rango para los tamaños de los elementos finitos, con un máximo de  $14 \times 10^{-6}$  m y un mínimo de  $2 \times 10^{-6}$  m. En la región central del dominio computacional, que son de mayor interés, se opta por emplear este rango de valores.

### 7.3 Modelación de los fenómenos físicos que gobiernan el proceso de corte láser

Para este caso se sigue el trabajo de (Vora et al., 2012), el cual establece una metodología para la creación de una estrategia integral de modelado y simulación diseñada para describir de forma precisa el proceso de corte por láser. En ese trabajo, la modelación del corte láser abarca la transición de fases y los efectos relacionados con la topografía del material. Durante el calentamiento, el incremento de temperatura provoca el cambio del estado sólido al líquido y, posteriormente, al vapor. La porción del material que supera la temperatura de evaporación se elimina mediante este mecanismo, mientras que, de manera análoga, el material fundido retorna al estado sólido durante el ciclo de enfriamiento.

El desarrollo del modelo computacional se lleva a cabo en dos etapas, las cuales contemplan respectivamente el mecanismo de transferencia de calor y el de la dinámica de fluidos.

### 7.3.1 Modelación de la transferencia de calor

En la primera etapa de la simulación se usa la geometría en 2D de la figura 24 incorporando la transferencia de calor, aquí se considera la pérdida de material debido a la evaporación mediante fenómenos multifásicos (sólido-líquido-vapor). El principal objetivo de esta etapa es predecir la geometría de un cráter producido por la evaporación y pérdida de material.

El calor consumido o liberado por el cambio de fase afecta el perfil de temperatura, la profundidad de la superficie fundida y el flujo del líquido. La ecuación para la transferencia de calor en 2 dimensiones usada es la ecuación 7 y para el cambio de fase se emplea la ecuación 11.

En esta misma etapa se incorpora el método level-set, que es empleado para mapear las interfases entre el líquido-sólido y el vapor-líquido de la siguiente manera:

$$\left. \begin{aligned} B &= 1, & \text{para } (T > T_x + \Delta T) \\ B &= \frac{T - T_x + \Delta T}{2\Delta T} & \text{para } (T_x - \Delta T) \leq T \leq (T_x + \Delta T) \\ B &= 0 & \text{para } (T < T_x - \Delta T) \end{aligned} \right\} \text{(Ecuación 23)}$$

Aquí se usa  $T_b$  en lugar de  $T_x$  para distinguir la fase de vapor del líquido y  $T_m$  para diferenciar la fase líquida de la sólida. Para B, cuyo rango de valores oscila entre 0 y 1, asumiendo que  $T_x = T_b$ , un valor de  $B = 1$  indica una fase de vapor completa (100%) y  $B = 0$  implica una fase líquida total (100%). De esta forma, se pueden trazar las interfaces entre los valores  $B = 0$  y  $B = 1$ . Las demás ecuaciones de fronteras se definen de acuerdo con la descripción expuesta en la sección 6.2, haciendo uso de la figura 6 como referencia.

### 7.3.2 Modelación de la transferencia de calor acoplado a la dinámica de fluidos

Posteriormente se integra el flujo multifásico junto con la transferencia de calor. La geometría se diseña considerando la pérdida de material, y su modelación se basa en las ecuaciones fundamentales de conservación de masa, impulso y energía. En el caso 2D, estas ecuaciones describen el régimen bidimensional de un flujo laminar incompresible acoplado al efecto de convección natural, las cuales en coordenadas rectangulares son:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (\text{Ecuación 24})$$

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left[ \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right] \quad (\text{Ecuación 25})$$

$$\rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left[ \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right] + \rho g a (T - T_m) \quad (\text{Ecuación 26})$$

$$\rho C_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = k \left[ \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right] \quad (\text{Ecuación 27})$$

## 8. Resultados y Análisis

### 8.1 Descripción general de los modelos

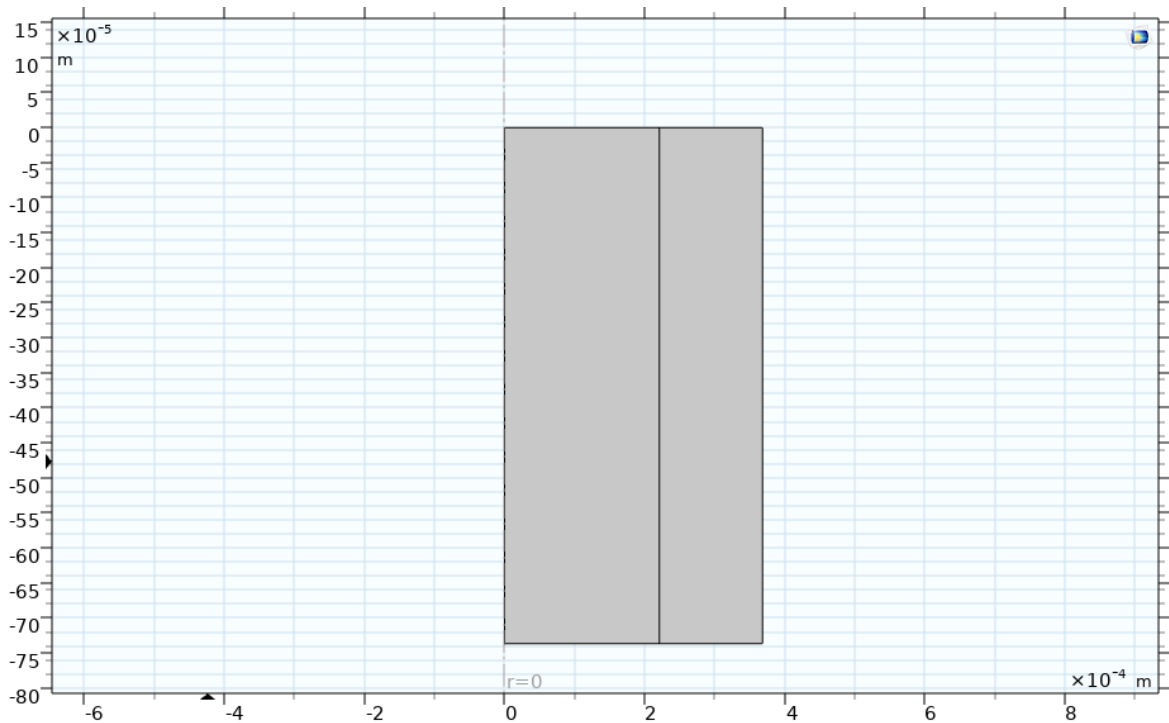
Con base en el trabajo desarrollado en las secciones anteriores, se han implementado dos modelos iniciales en el software COMSOL Multiphysics, tomando como referencia únicamente el modelo base 1, descrito en la sección 7.1.1, junto con sus respectivas modificaciones. Estos modelos se identifican como IT1.MB.1 e IT2.MB.1, donde la nomenclatura MB.1 indica su origen en el modelo base 1. Posteriormente, se ha desarrollado un tercer modelo, IT1. MB. (1-2), que integra los elementos de los modelos base 1 y 2. Este último modelo representa la interfaz sólido-líquido en un mecanismo de cambio de fase de un metal, sometido al calentamiento mediante láser.

Por su parte, el modelo base 2, detallado en la sección 7.1.2, aborda el proceso térmico de enfriamiento y solidificación de una aleación, cuyos componentes resultan esenciales para el desarrollo de simulaciones computacionales aplicadas al corte láser.

Estas iteraciones sirvieron como base para la evolución de los modelos finales (modelos A, B y C) que surgieron posteriormente tras la realización de estudios experimentales.

#### 8.1.1 Geometría

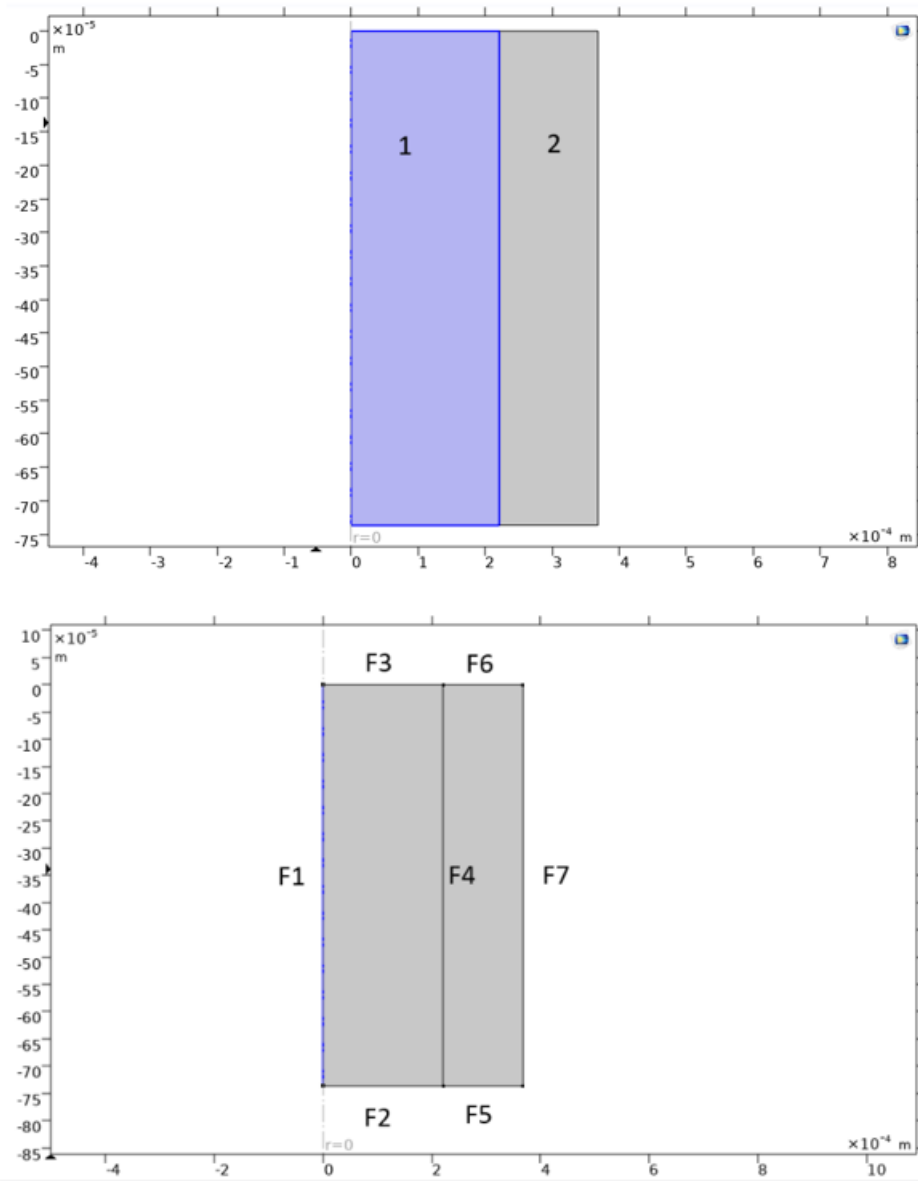
En los modelos presentados más adelante se emplea una geometría 2D, representada en la figura 24. Se ha aplicado una simplificación basada en la simetría respecto al eje z, dado que en el proceso de corte láser el sólido se modela como un cable con sección transversal circular. Como resultado, se obtiene la geometría computacional ilustrada en la figura 25, donde el área afectada por el láser corresponde al rectángulo interno y abarca el 60% de la geometría final por simetría. El material utilizado en la simulación es acero inoxidable 304, cuyas propiedades físicas se han obtenido directamente de la biblioteca de materiales de COMSOL Multiphysics.



**Figura 25.** Geometría empleada en los modelos IT.MB.1, IT.MB.2 e IT1. MB. (1-2).

### 8.1.2 Dominios y fronteras

La figura 26 representa el modelo dividido en distintos dominios. En la parte superior de la imagen, el dominio 1 corresponde a la región central del sistema, donde se concentra la energía del láser y se desarrollan los principales mecanismos de transferencia de calor, especialmente por conducción. Por otro lado, el dominio 2 abarca una zona exterior que comparte frontera con el dominio 1 y está sujeto a condiciones de transferencia de calor por conducción y radiación. El calor generado por el calentamiento del láser se disipa hacia el ambiente a través de las fronteras, señaladas en la parte inferior de la misma figura 26.

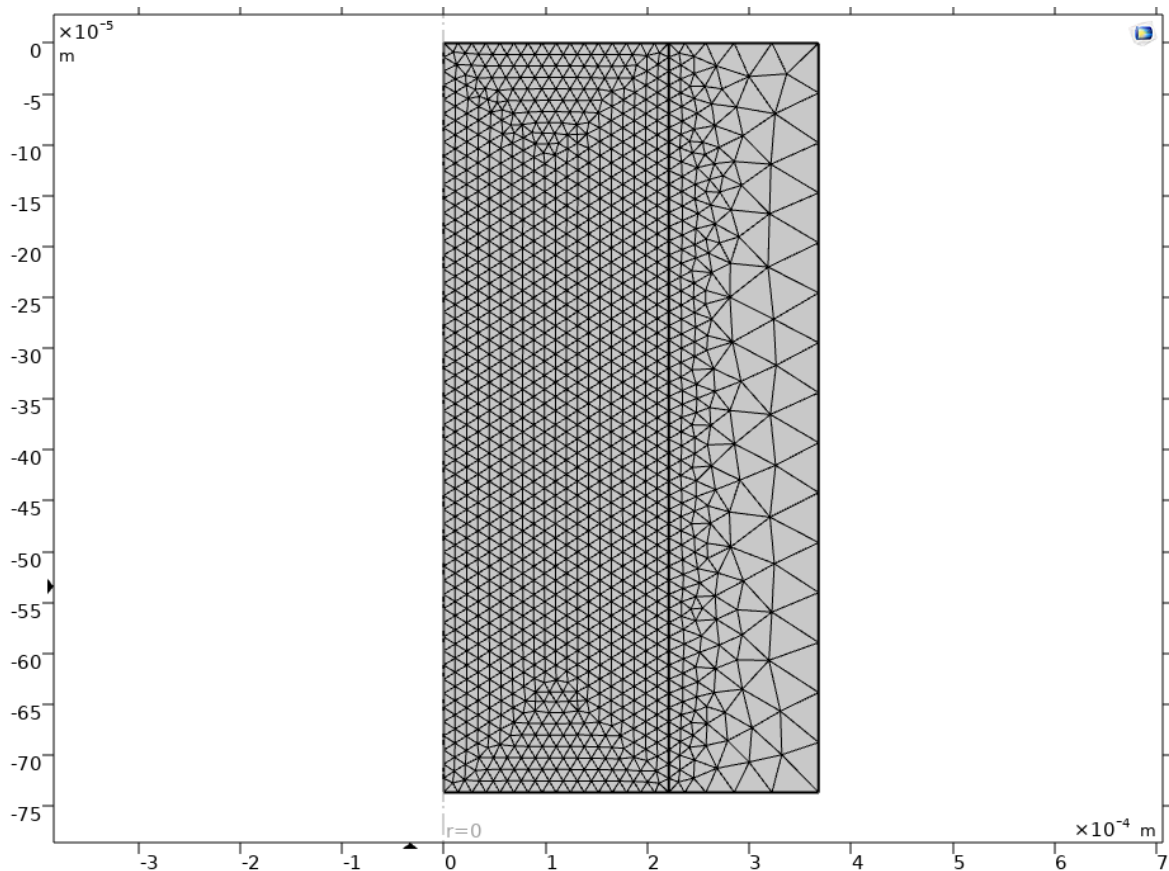


**Figura 26.** Dominios (parte superior) y fronteras del modelo (numeradas de la F1 a la F7).

### 8.1.3 Mallado

El mallado se desarrolló conforme a lo recomendado en la sección 7.2 y se ilustra en la figura 27. De acuerdo con las estadísticas obtenidas, en el dominio 1 se generaron 2142 elementos triangulares, aplicándose el rango recomendado, que oscila entre un tamaño mínimo de  $2 \times 10^{-6}$  m y un máximo de  $14 \times 10^{-6}$  m. En el dominio 2, en cambio, se obtuvo un total de 458

elementos, habiéndose generado el mallado de forma automática sin control específico sobre el tamaño de los elementos.



**Figura 27.** Mallado del modelo 1 para los dos diferentes dominios.

## 8.2. Modelo IT1.MB.1

El objetivo de este modelo es determinar de forma exclusiva el perfil de calentamiento de la pieza sometida al corte por láser. Para ello, se emplea la interfaz "Transferencia de Calor en Sólidos" de COMSOL Multiphysics, implementándose un estudio en régimen estacionario e incorporando directamente en esta interfaz la acción del láser mediante el nodo de rayo de potencia depositado.

Este modelo conserva las características descritas en la sección de descripción general del modelo, sus dimensiones, mallado, dominio, fronteras y propiedades del material, las

ecuaciones que se emplean en la transferencia de calor, para ambos dominios, son las siguientes:

$$\rho C_p u \cdot \nabla T + \nabla \cdot q = Q + Q_{ted} \quad (\text{Ecuación 28})$$

$$q = -k \nabla T \quad (\text{Ecuación 29})$$

En donde los valores para la conductividad térmica ( $k$ ), la densidad ( $\rho$ ) y calor específico ( $C_p$ ) son obtenidos directamente de las propiedades del material de la librería de COMSOL Multiphysics, que es el acero inoxidable SS 304 *solid.tested* a 482°C.

Para las condiciones de borde, se agregó un eje de simetría en la frontera 1 (F1), un aislante a las fronteras 2,3 y 5, (F2, F5, F5). La superficie 6 e estableció como una frontera en la que ocurre la convección. Dado que la pieza estará expuesta a otras formas de energía se agregó el nodo de superficie expuesta a radiación ambiente para las fronteras 6 y 7, (F6 y F7).

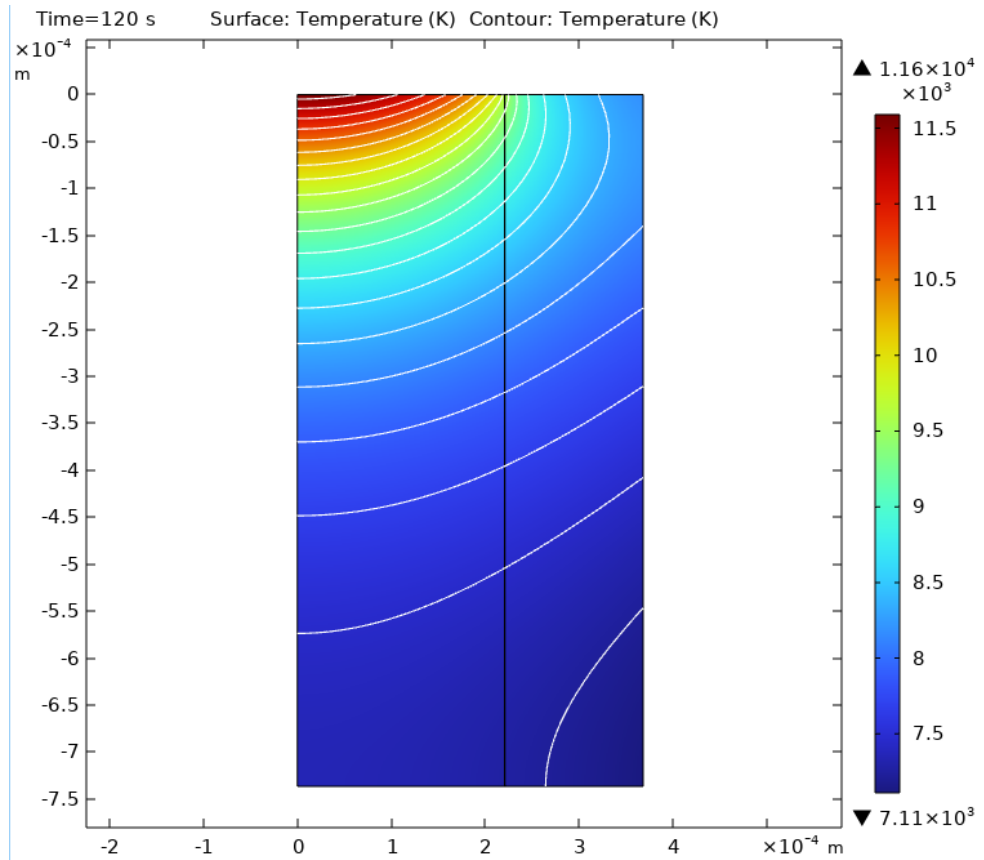
Finalmente se agrega la acción del láser incidente, definiendo la intensidad del rayo incidente en la frontera F3, mediante las ecuaciones:

$$-n \cdot q = P_0 \cdot f(o, e) \quad (\text{Ecuación 30})$$

$$f(O, e) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(\frac{-d^2}{2\sigma^2}\right), d = \frac{\|e \times (x-O)\|}{\|e\|} \quad (\text{Ecuación 31})$$

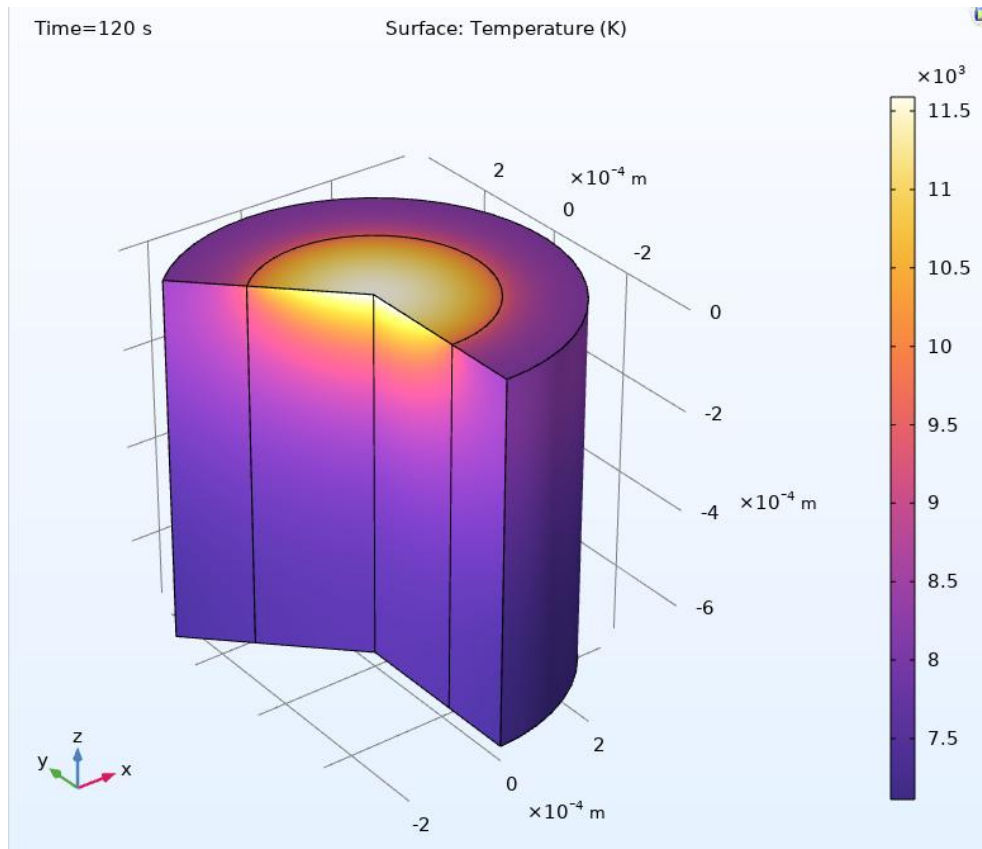
Donde  $O$  y  $e$  definen los vectores del origen y dirección del rayo, estos vectores se evalúan en la función  $f$  la cual está definida en la ecuación 31. El rayo incidente tiene una distribución del tipo Gaussiana y una potencia inicial de 1700W, que representa el valor medio de referencia en la manufactura industrial con corte láser.

En la Figura 28 se exponen los resultados computacionales correspondientes a la distribución de temperatura del primer modelo, obtenidos en un análisis estacionario. Se evidencia una diferencia de aproximadamente 4490 K entre el extremo de incidencia del láser y la zona opuesta, que constituye la región más fría de la geometría.



**Figura 28.** Perfil de temperatura modelo IT1.MB.1.

Estos primeros resultados muestran un rango de temperaturas muy elevando, del orden de los mega kelvin, con un mínimo de  $7.11 \times 10^3$  Kelvin. Tales resultados deben al tiempo del estudio, que, en conjunto con la característica de la geometría del estudio, somete el material a un total de  $89005235.6 \text{ W/in}^3$  en los dos minutos que transcurre la simulación, por lo que no serían valores posibles de obtener en la realidad. Dado que el modelo tiene una simetría respecto al eje z vertical, el programa COMSOL Multiphysics puede generar la representación 3D de los resultados vistos en la imagen anterior, manteniendo el mismo patrón de temperaturas, como se observa en la figura 29.



**Figura 29.** Perfil de temperatura modelo IT1.MB.1.

### 8.3 Modelo IT2.MB.1

Otro modelo computacional, elaborado a partir del modelo base 1 e incorporando los aspectos generales descritos en la sección 8.1, es el IT2.MB.1. En este caso, se integra la física del Haz de Radiación en un medio absorbente (Radiative Beam in Absorbing Media) para modelar el rayo incidente junto con el proceso de transferencia de calor en un medio sólido. Siguiendo la figura 26, el dominio 1 se define como el medio que absorbe la intensidad del rayo. Posteriormente, se establece la simetría axial en la frontera F1, junto con las superficies transparentes F2 y F4, las cuales se emplean para modelar la interfaz de un medio absorbente en el que no se produce absorción de la intensidad radiactiva. En este caso, toda la energía del láser que, mediante su propagación desde el interior, se irradia hacia el exterior, abandona la superficie correspondiente del sólido sin depositar energía en dichas fronteras.

La intensidad de la radiación incidente sobre la frontera F3 se introduce mediante las ecuaciones siguientes:

$$I_i = P_0 \cdot f(o, e) \quad (\text{Ecuación 32})$$

$$f(O, e) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(\frac{-d^2}{2\sigma^2}\right), d = \frac{\|e \times (x-O)\|}{\|e\|} \quad (\text{Ecuación 33})$$

Donde  $O$  y  $e$  definen los vectores del origen y dirección del rayo, estos vectores se evalúan en la función  $f$  la cual está definida en la ecuación 33. El rayo incidente tiene una distribución del tipo Gaussiana y una potencia inicial de 1700W.

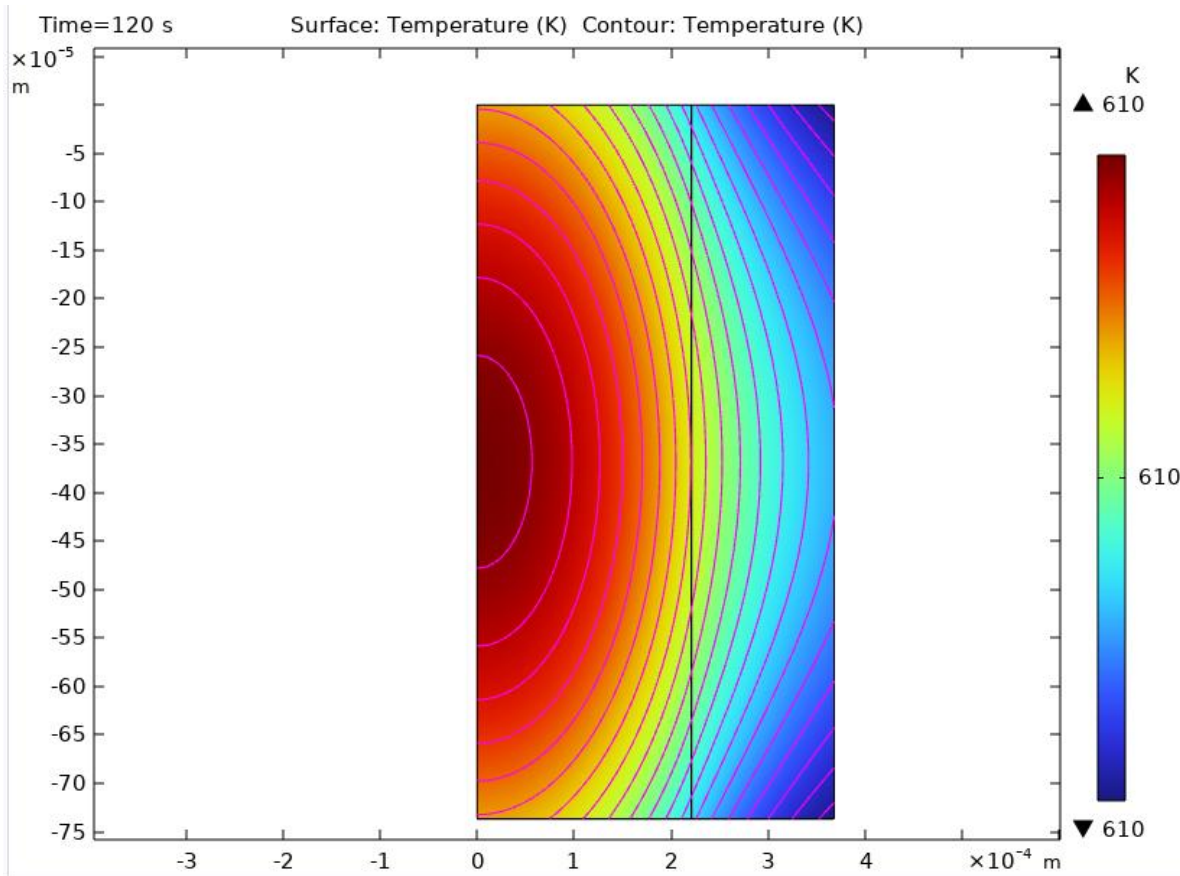
La física de la Transferencia de Calor en Sólidos (Heat Transfer in Solids) de COMSOL Multiphysics, emplea la siguiente ecuación para describir conservación de la energía térmica en condiciones no estacionarias:

$$\rho c_P \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_P u \cdot \nabla T = \nabla \cdot q = Q + Q_{Tot}, q = -k\nabla T \quad (\text{Ecuación 34})$$

donde  $q$  representa el flujo de calor y los valores para la conductividad térmica, la densidad y calor específico son obtenidos directamente de las propiedades del material.

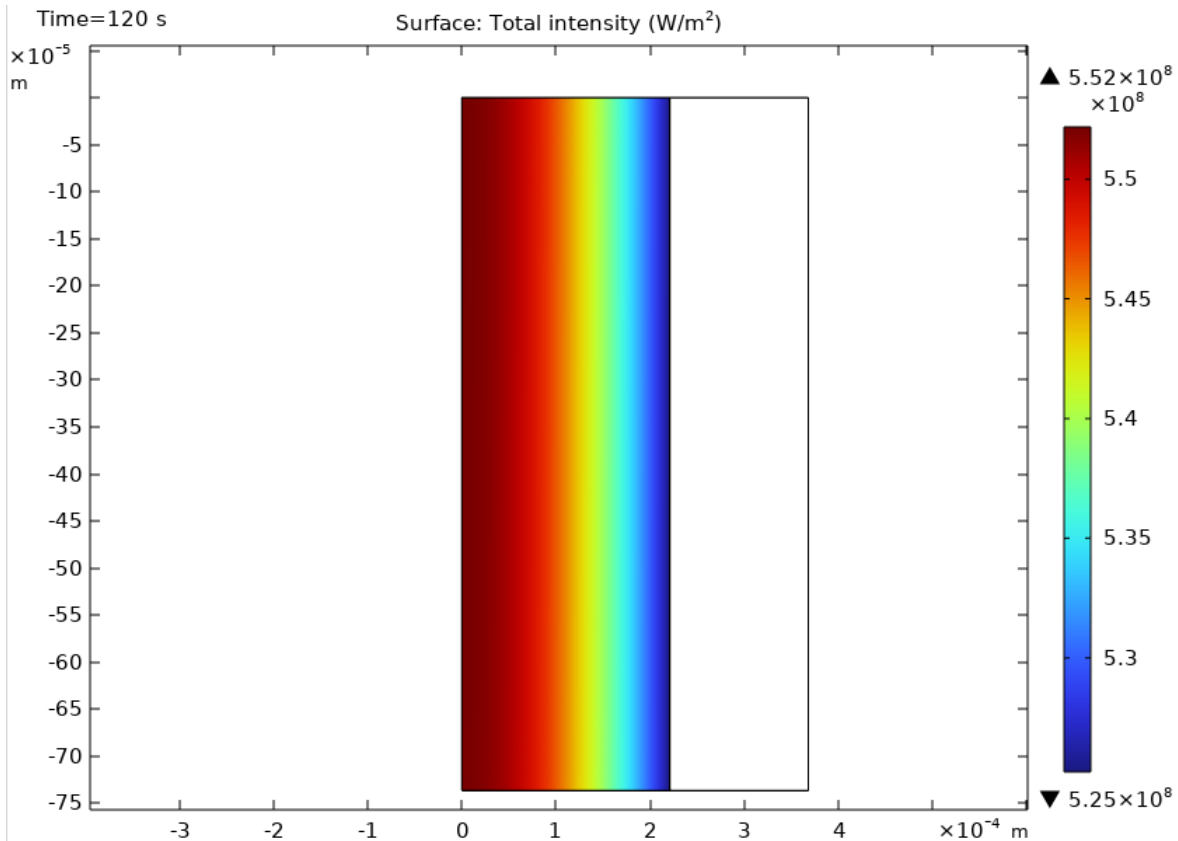
Para las condiciones de borde, la frontera F3 es donde actúa la incidencia del rayo láser. También se agregó la especificación para las fronteras sujetas a radiación ambiental en las fronteras F2, F3, F5, F6 y F7.

Finalmente, la interfaz multifísica integra los mecanismos de interacción térmica del modelo computacional. A continuación, se exponen los resultados obtenidos en relación con los valores de temperatura y la intensidad de radiación del segundo modelo.



**Figura 30.** Valores de temperatura del modelo IT2.MB.1

En este modelo, a diferencia del anterior, las temperaturas son relativamente bajas, apenas unos cientos de grados por encima de la temperatura ambiente. Bajo estas condiciones, el material no experimenta un cambio de fase, ya que dicho fenómeno ocurre cerca de los 1400 K. Además, se observa que, al finalizar el estudio a los 120 segundos, la mayor concentración de temperatura se encuentra en el centro de la geometría.



**Figura 31.** Valores de intensidad de radiación del modelo IT2.MB.1.

En cuanto a la intensidad del láser, como era de esperarse debido a las especificaciones del modelo, los valores registrados corresponden exclusivamente a la zona de impacto, alcanzando un máximo de  $5.52 \times 10^8$  W/m<sup>2</sup>. A diferencia de las mediciones de temperatura, la intensidad del láser no parece estar restringida a un valor fijo; por el contrario, muestra una tendencia al incremento, lo cual es consistente con las expectativas.

#### 8.4 Modelo IT3.MB.1-2

Se desarrolló un tercer modelo implementando los conceptos expuestos en las librerías de COMSOL Multiphysics, según lo detallado en la sección 7.1. Este modelo integra la representación del rayo radiactivo en el medio absorbente, la transferencia de calor en sólidos y, de manera destacada, el cambio de fase en el material descrito en el modelo base 2. Para reflejar que se basa en ambos modelos, se le asigna la terminación MB.1-2.

El objetivo del presente modelo es determinar el campo de temperatura generado por la acción del láser y correlacionarlo con el cambio de fase del material, es decir, la transición de sólido a líquido, provocada por el incremento de temperatura en la pieza sometida al corte. Este modelo difiere de los anteriores, ya que contempla el acero inoxidable también en estado líquido para representar, dentro del contexto de transferencia de calor en sólidos, el mecanismo de cambio de fase del material.

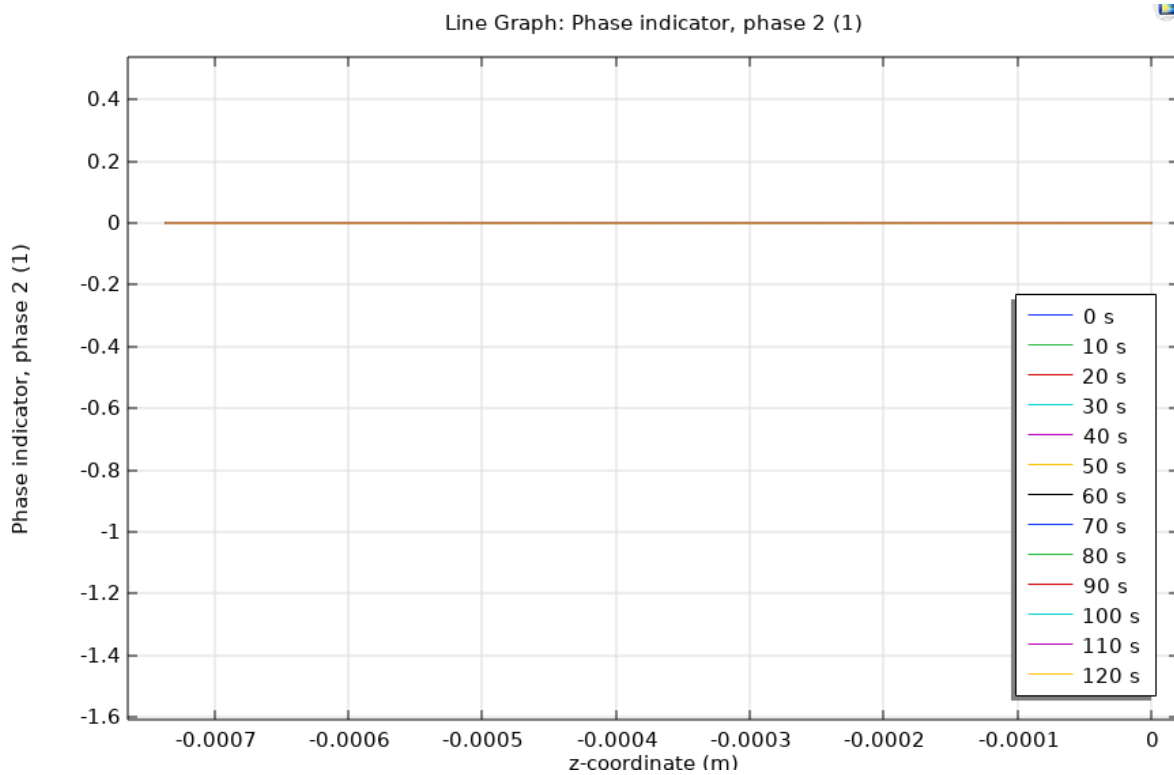
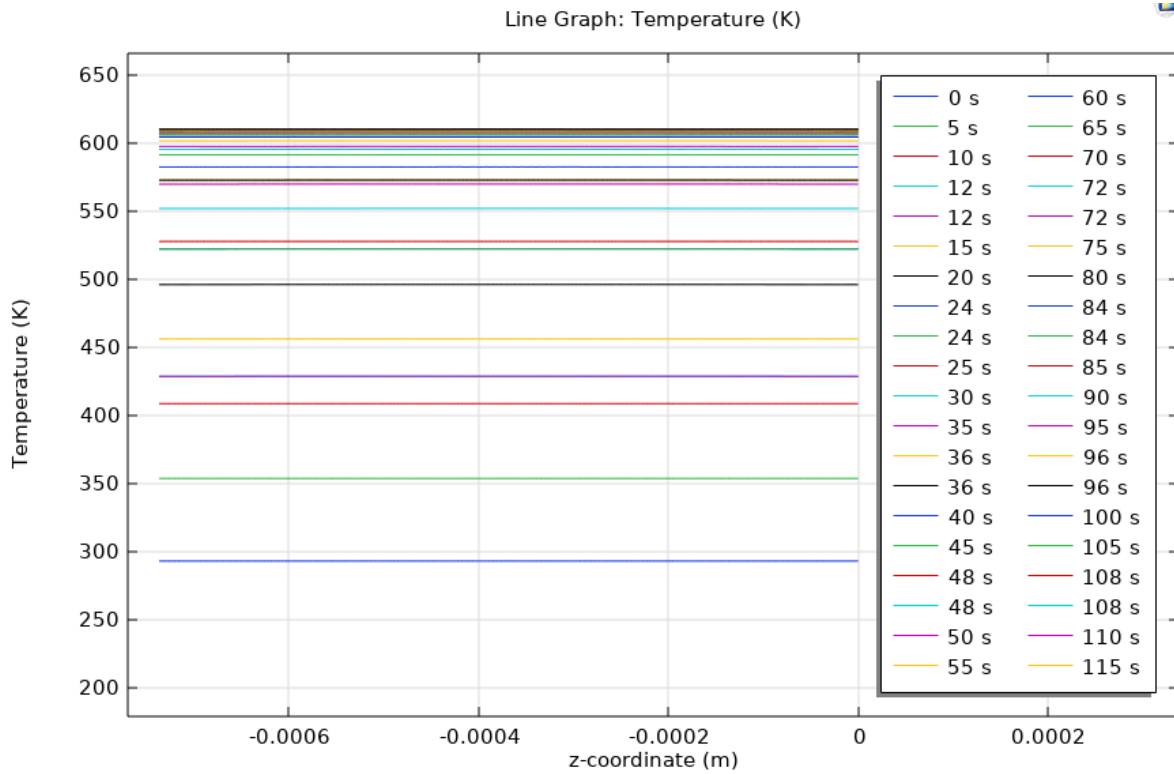
Se establece una temperatura de 1425 K como valor de transición de fase, correspondiente a la temperatura de fusión del acero utilizado. Conforme a lo indicado en el párrafo 7.1.2, se emplea un  $\Delta T$  para definir con precisión la zona de transición, en conjunto con la implementación del método de adaptación para la reconstrucción del mallado en el estudio estacionario. Debido a que este procedimiento puede demandar un elevado consumo de recursos computacionales, se opta por un valor de  $\Delta T$  mayor, fijado en 100 K.

El calor latente del cambio de fase se estableció en 205 kJ/kg, los valores para la conductividad térmica y calor específico de ambas fases se obtuvieron directamente de la librería de materiales de COMSOL Multiphysics.

Se opta por considerar ambos regímenes en los estudios: uno dependiente del tiempo, abarcando un rango de 0 s a 120 s en intervalos de 5 s, y otro estacionario, con el fin de analizar las variaciones.

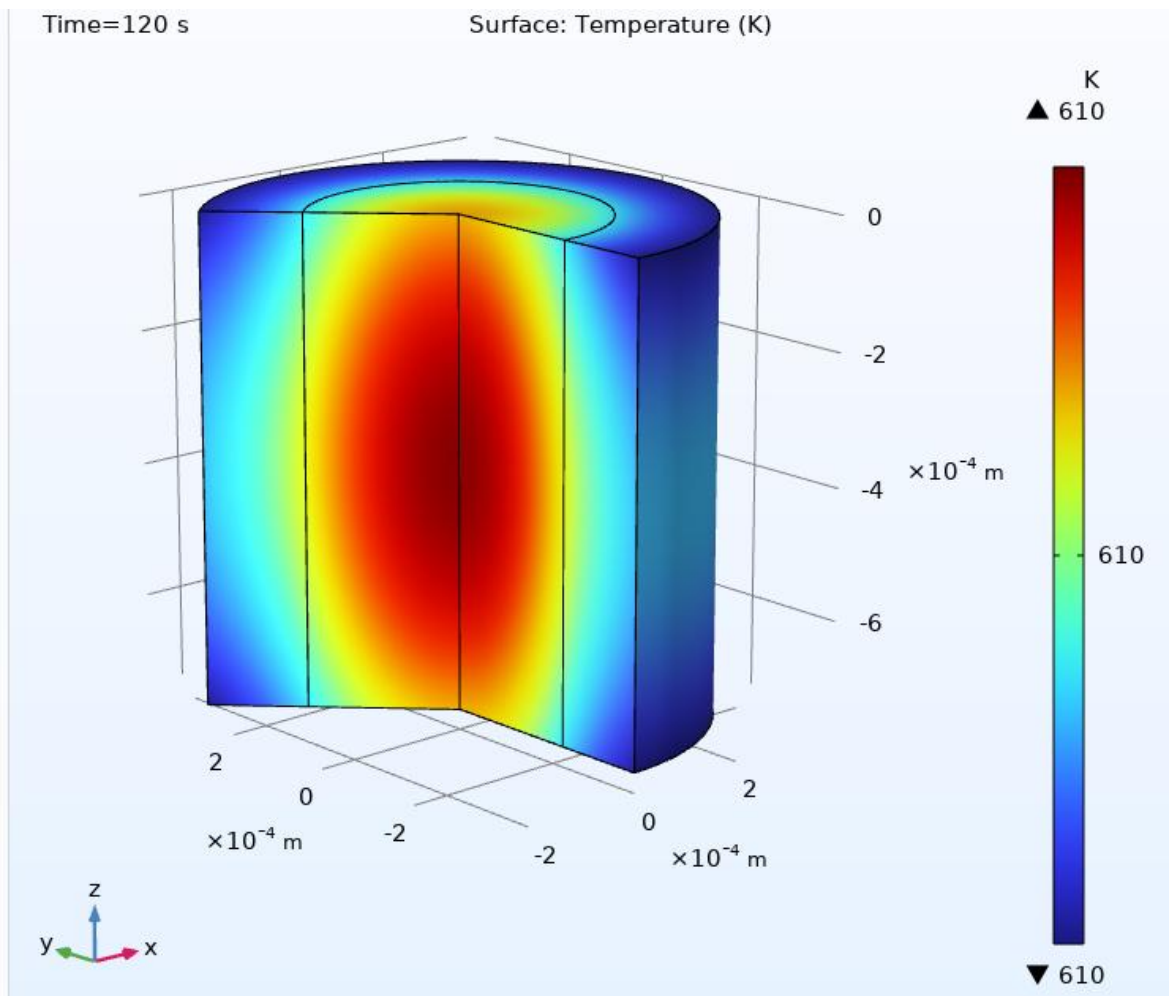
En el estudio dependiente del tiempo se evidencia que la temperatura es considerablemente menor en comparación con los modelos previos. Específicamente, la figura 33 ilustra la variación de la temperatura a lo largo del eje central de la geometría, donde los valores aproximados no superan los 610 K.

Como era de esperarse, la baja temperatura registrada no permite transmitir suficiente energía al medio para inducir un cambio de fase. Esto se evidencia en el gráfico de la figura 32 (superior), ya que, durante los 120 segundos del estudio transitorio, no se observa la aparición de la fase líquida (fase 1) en el sólido (fase 0).



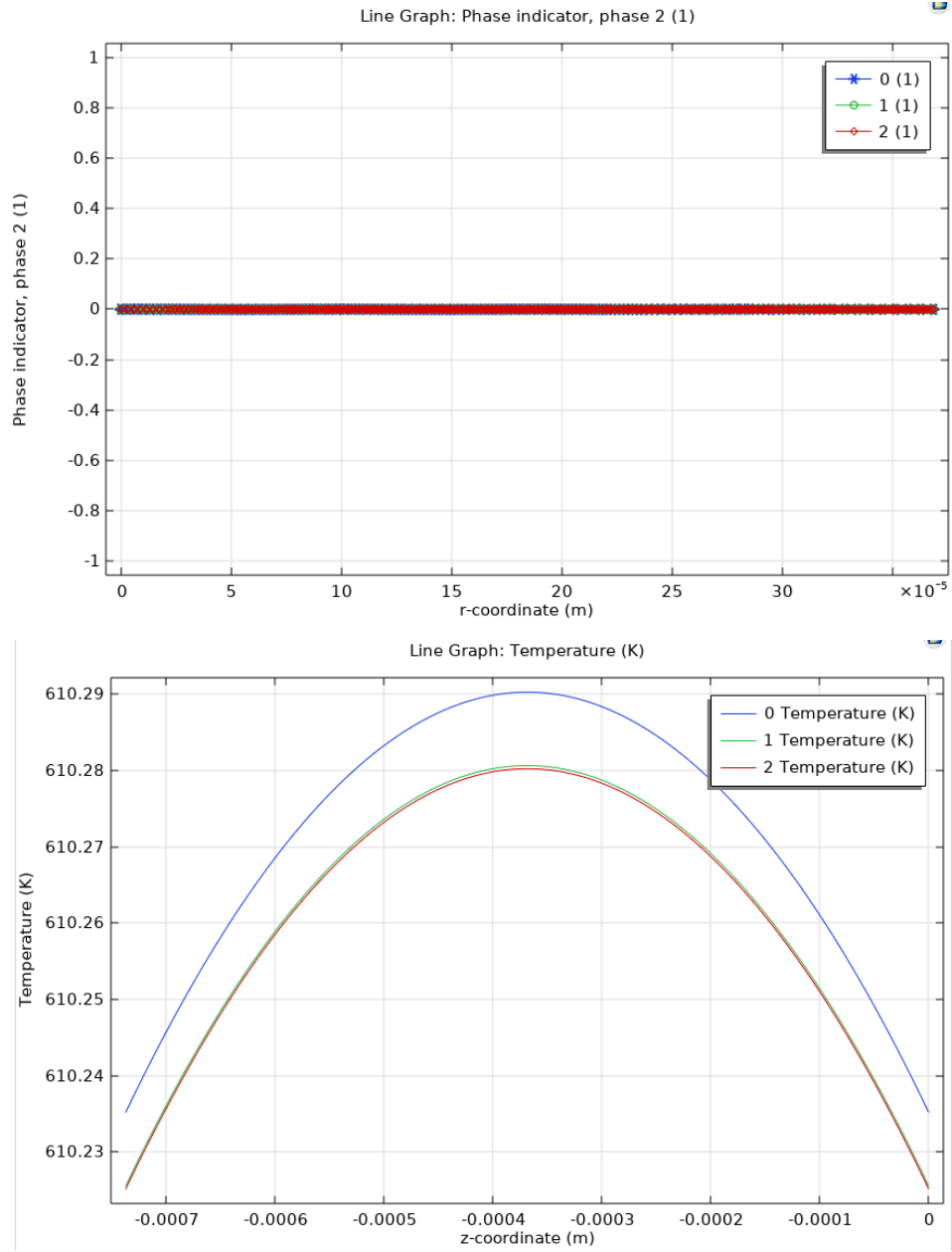
**Figura 32.** Resultados de: Superior) Perfiles de temperatura sobre la superficie de la geometría, Inferior) Cambio de fases sobre el eje central.

La Figura 33 reporta los resultados de temperatura en el estudio dependiente del tiempo para un tiempo de 120 segundos, donde se aprecia un valor de prácticamente 610 K, igual en todo el volumen de la muestra sujeta a la energía térmica del láser.



**Figura 33.** Resultados de temperatura en el estudio dependiente del tiempo (120 segundos).

En lo que respecta al estudio estacionario, la condición observada en cuanto a la temperatura registrada resulta análoga a la previamente descrita. Los valores a lo largo del eje z permanecen prácticamente constantes, mostrando sólo una ligera variación que oscila entre aproximadamente 610.225 K y 610.29 K, alcanzando el valor máximo en el centro de la geometría.



**Figura 34.** Resultados del estudio no dependiente del tiempo para: Superior) Cambio de fase sobre el radio de la superficie, Inferior) Temperatura sobre el eje z.

## 8.5 Modelos finales

### 8.5.1 Modelo A

Con base en los resultados obtenidos previamente, se realizaron ajustes en la guía de trabajo de los modelos, a continuación, se detallan las modificaciones aplicadas con el modelo A.

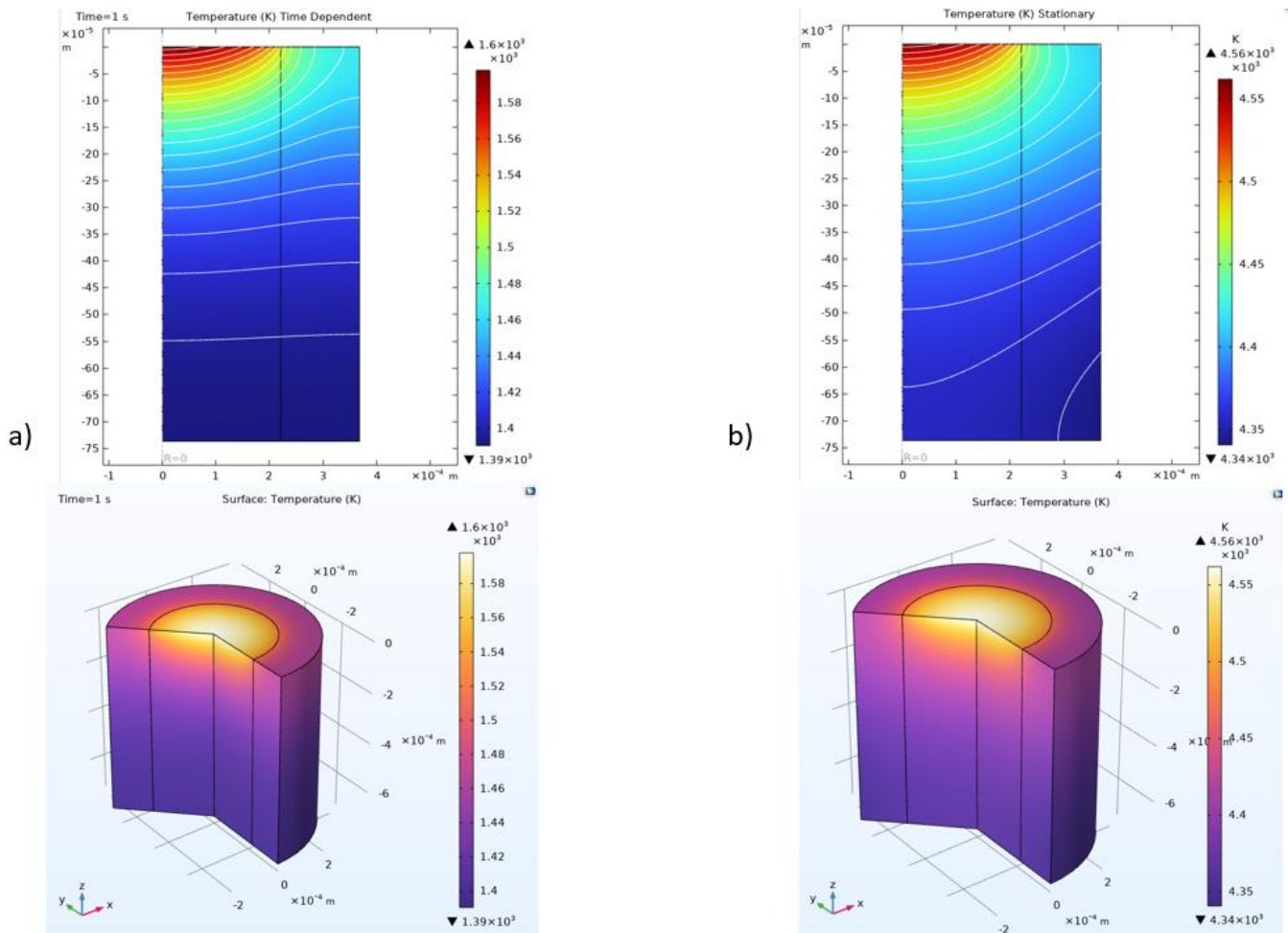
El primer ajuste corresponde a la variación en la combinación de físicas utilizadas, debido a los resultados de temperatura, en este modelo no se consideró la física de rayo radiactivo en un medio absorbente. En su lugar, se incorporó directamente la fuente de calor dentro de la física de transferencia de calor en sólidos, empleando potencia depositada mediante un rayo. Se mantuvieron los mismos parámetros respecto a la posición del láser, el cual está ubicado en el origen del eje de coordenadas y orientado en la dirección -z.

Considerando que la potencia utilizada en el proceso real es de 1700 W, se decidió reducirla a 170 W, es decir, diez veces menos, con el propósito de estudiar el modelo en mayor detalle. Esta disminución tiene como objetivo facilitar el registro de una transición más suave entre las dos fases durante la fusión del material.

Para el nodo de cambio de fase de material se usó la temperatura de fusión de 1425 K, un intervalo de transición,  $\Delta T$ , de 150 K el cual es amplio ya que no se contempló el uso del método de reconstrucción del mayado, un calor latente de 6260 kJ/kg, conductividad térmica de 52 W/mK, la capacidad térmica estaba definida directamente del material de la lista de COMSOL Multiphysics.

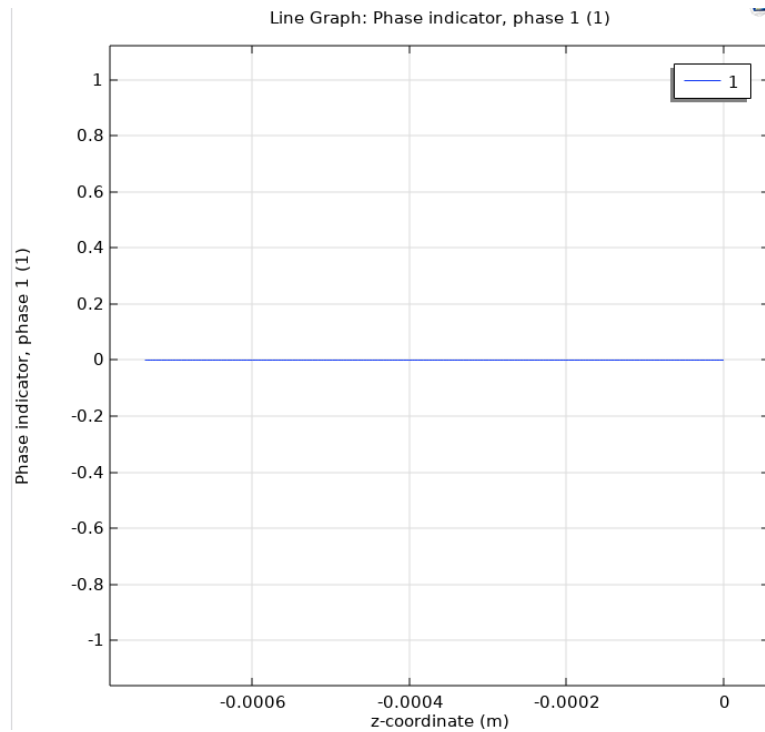
Para los estudios, el dependiente del tiempo se cambió a un rango más corto con pasos más pequeños, el cual va de 0s a 1s con un cambio de 0.05s, todos los demás parámetros se conservan.

Los resultados del perfil de temperatura de figura 35 muestran una similitud con los primeros modelos, IT.MB.1 e IT.MB.2. En ambos estudios, se alcanzan temperaturas elevadas que superan el punto de fusión del acero, lo que indica que hay suficiente calor para representar el cambio de fases en el proceso.



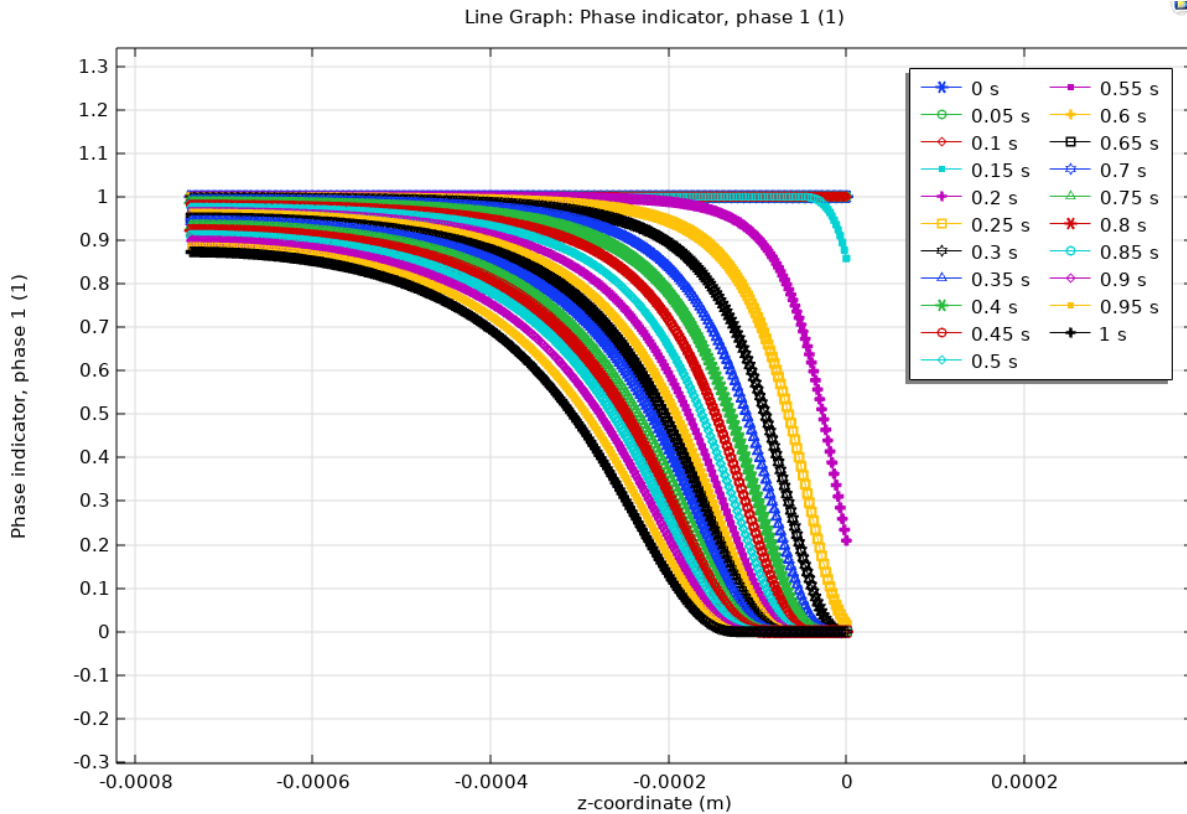
**Figura 35** . Resultados del perfil de temperatura en 2D y 3D para los estudios: a) Dependiente del tiempo, b) Estacionario.

En cuanto a los gráficos de fase a lo largo del eje central z, los valores de temperatura registrados en el estudio estacionario de figura 36 indican la presencia de una única fase, la líquida. Esto se debe a que el gráfico representa la fase sólida (fase 1) con un valor de 1, pero dado que las temperaturas superan el punto de fusión del material ( $T_m$ ), los datos obtenidos corresponden exclusivamente a la fase líquida (0).



**Figura 36.** Gráfico de fase para el estudio estacionario.

En figura 37 que se refiere al estudio dependiente del tiempo, se logra captar la transición entre las fases y cómo, en distintos instantes, se determinan las proporciones de los estados sólido y líquido. A medida que el tiempo avanza, las líneas reflejan un alejamiento de la fase sólida (1) y una mayor incursión en la fase líquida (0). Esto confirma la existencia de una transición entre las fases del material, provocada por el aumento de temperatura generado por la acción del láser.

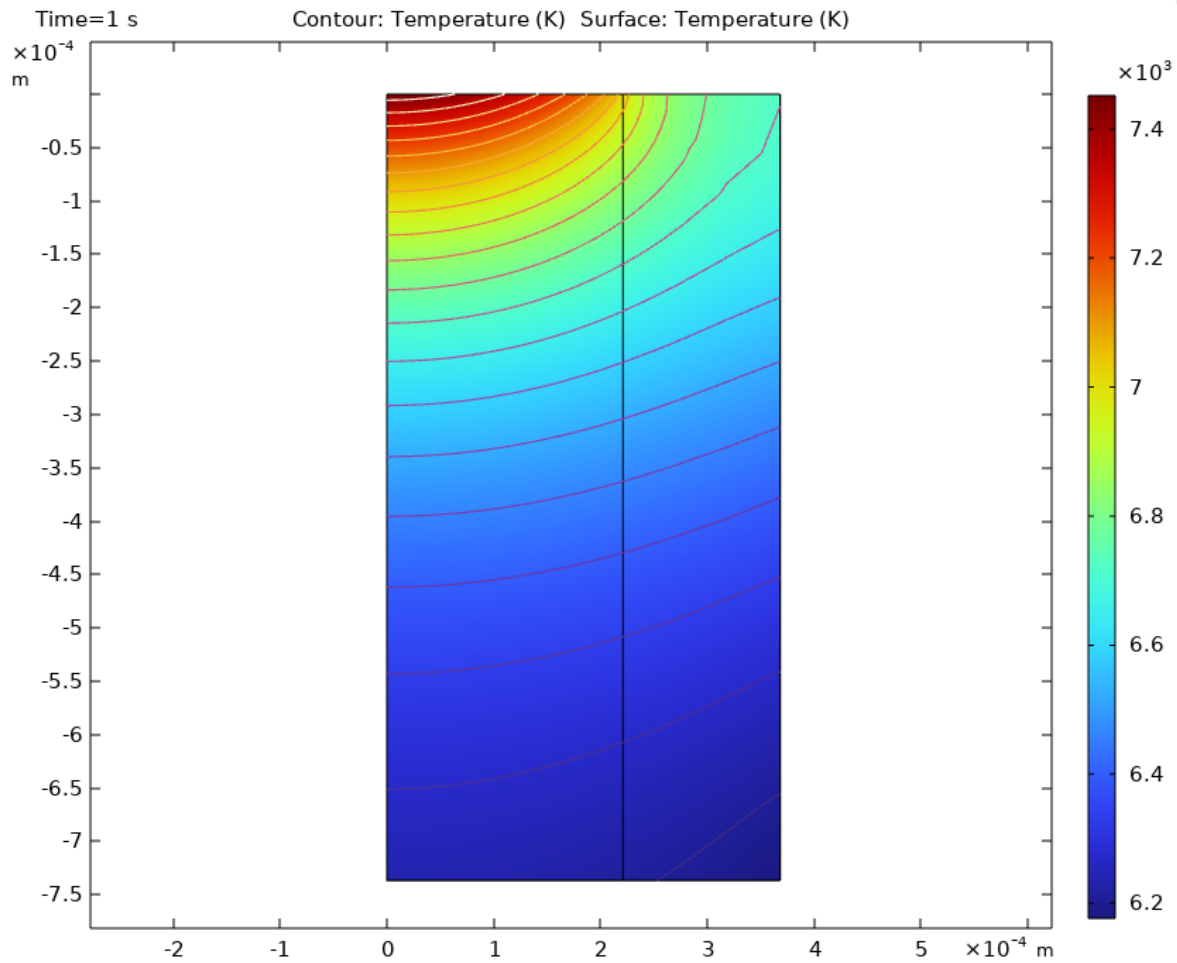


**Figura 37.** Gráfico de fases para el estudio dependiente del tiempo.

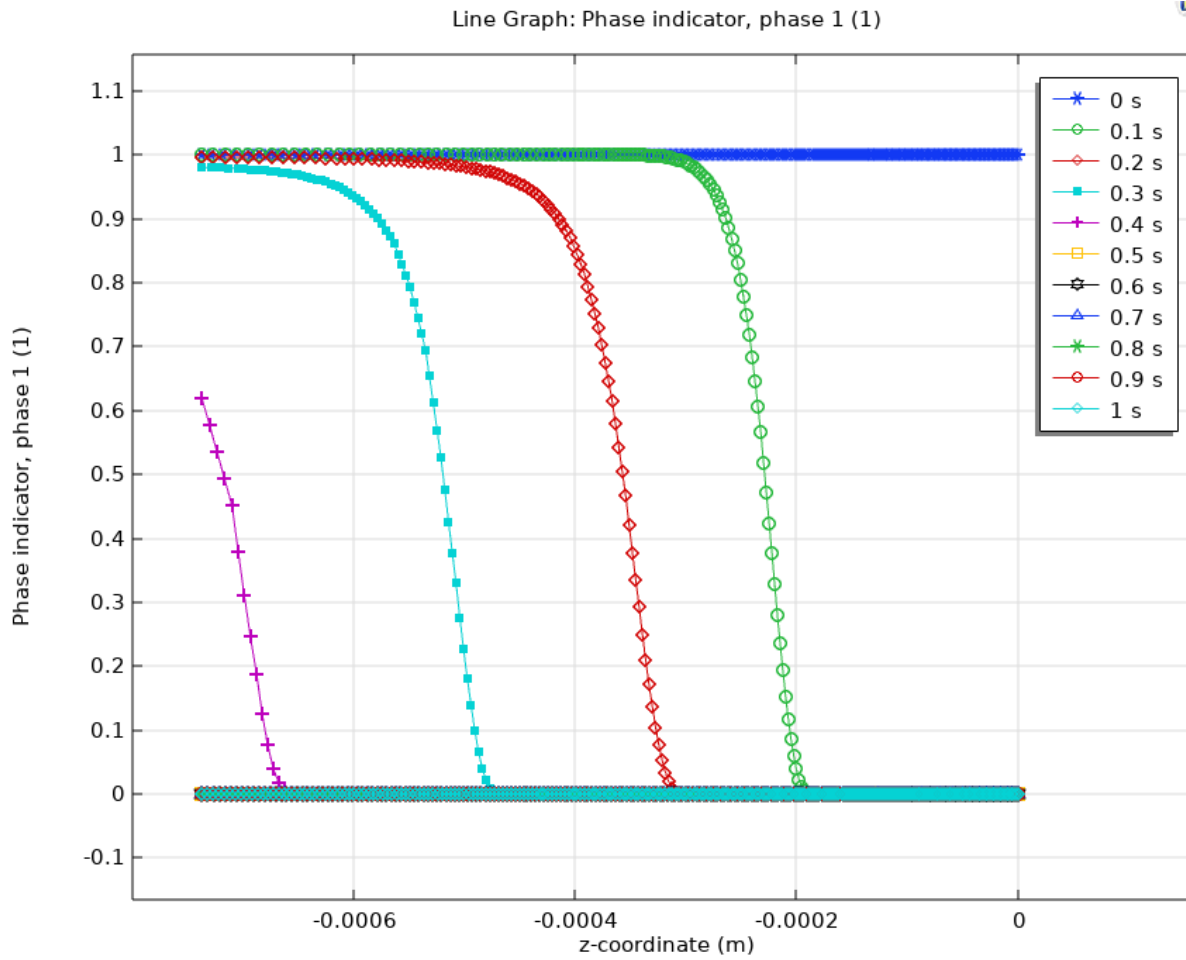
### 8.5.2 Modelo B

Este modelo toma las referencias de los modelos creados a partir del modelo base 2, emplea la transferencia de calor en líquidos e integra en este mismo estudio la acción del calentamiento por láser. También busca determinar la trazabilidad del cambio de fases tomando el estado sólido a temperatura ambiente y un líquido con una temperatura de transición (fase líquida) que está definida como la temperatura de fusión del acero.

El modelo emplea una configuración similar al modelo MB 2.4 y en esta sección se muestran los resultados obtenidos.

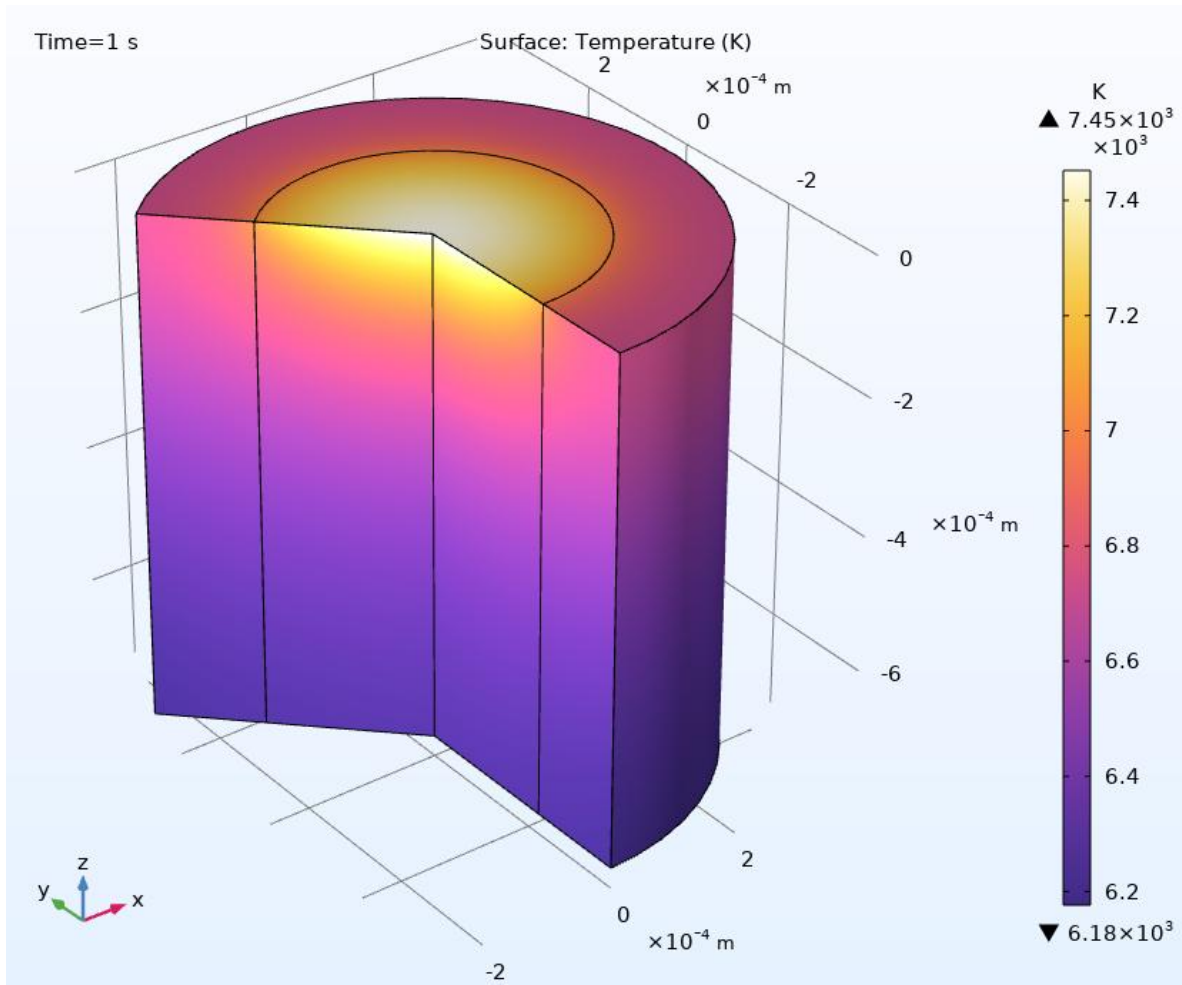


**Figura 38.** Modelo B; resultados de temperatura obtenida en el modelo.



**Figura 39.** Modelo B; Trazabilidad del cambio de fase, mostrando solo los intervalos de cada 0.1 segundos (1= sólido, 0 = líquido).

Como se ve en la figura 39, el modelo logra trazar los cambios de fases a partir de la temperatura obtenida en el eje central de la geometría.



**Figura 40.** Resultados de temperatura obtenidos, versión en 3D, modelo B.

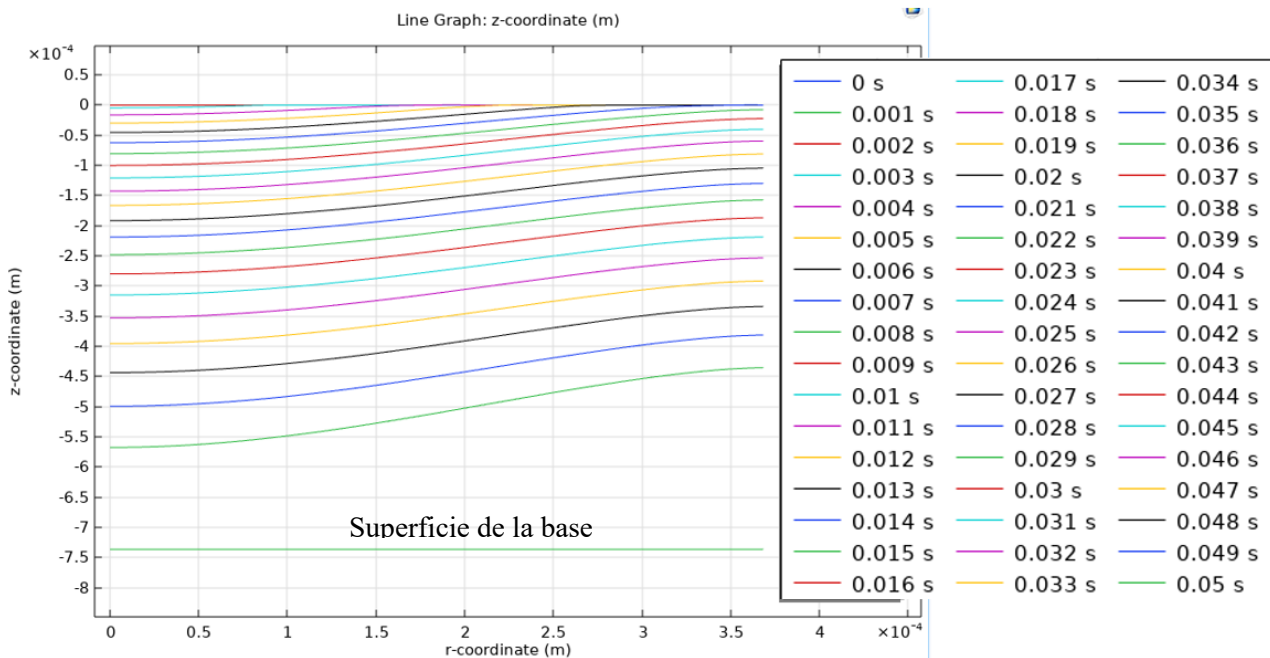
Los resultados de temperatura obtenidos en este modelo, figuras 38 y 40, son mayores a los reportados para el modelo A, ya que el máximo alcanzado es de  $7.45 \times 10^5$  K.

Estos resultados se explican porque, en un principio, el modelo se inicia en estado líquido, con una temperatura preestablecida acorde al material. A partir de allí, la temperatura sigue aumentando hasta alcanzar el cambio de fase a gas (como se observa en la figura 39), sin que se pierda masa, lo que provoca que el sistema continúe acumulando calor debido a la constante potencia del láser que provocó el cambio de estado.

### 8.5.3 Modelo C

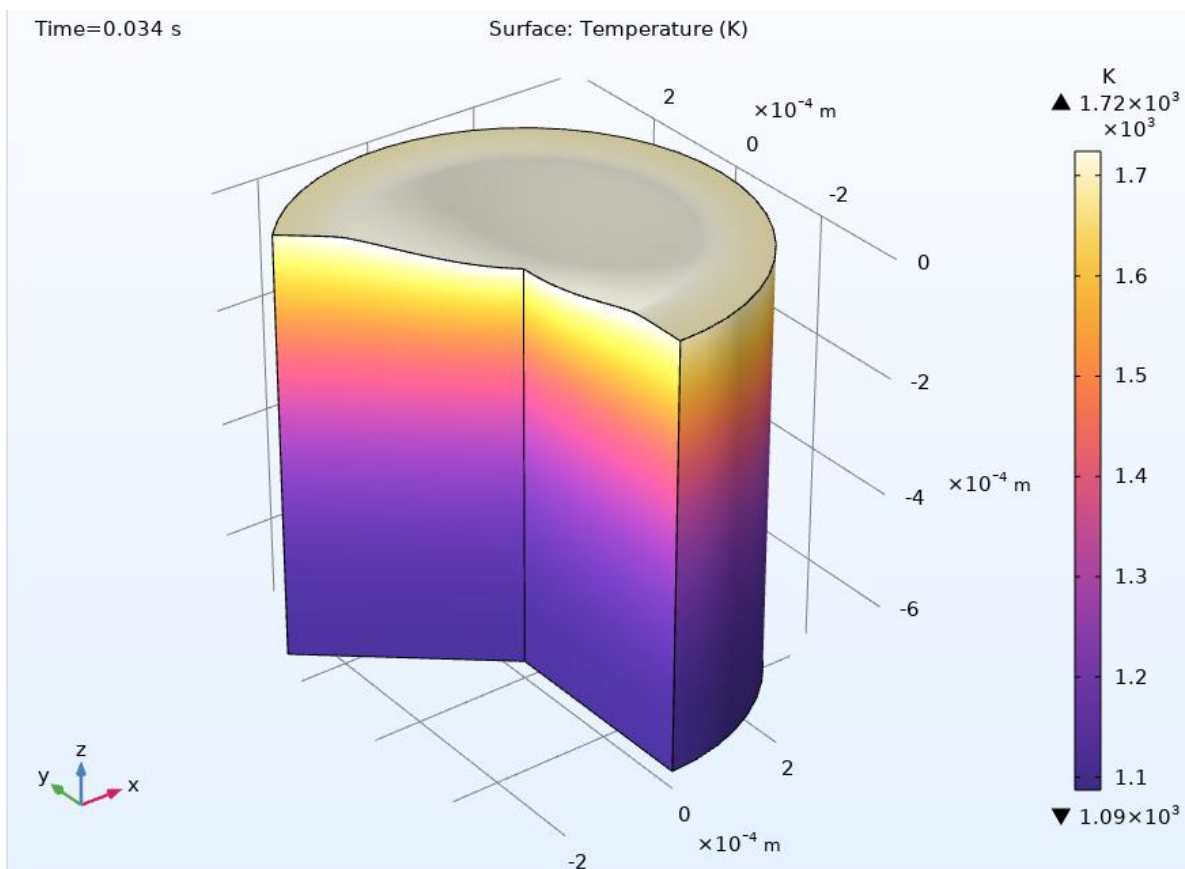
Este modelo incorpora las características previamente descritas para el modelo MB.3 y sus modificaciones correspondientes. La principal diferencia reside en las proporciones de la geometría utilizada en la región del haz del láser: mientras que el volumen total del modelo base 3 es de  $7.85 \times 10^{-5} \text{ m}^3$ , el empleado en el modelo C es de  $3.14 \times 10^{-10} \text{ m}^3$ . Dicha diferencia en las dimensiones hace imprescindible ajustar la potencia aplicada en el sistema para la modelación del corte láser. Por ello, se llevaron a cabo pruebas con el fin de determinar el valor máximo permitido de potencia láser en el modelo sin ocasionar problemas de convergencia, alcanzándose un valor de 75 W, lo que representa un 55% menos que la potencia empleada en el modelo MB.3.

Simultáneamente, se acotó el estudio transitorio a un rango de 0 a 0.05 segundos, utilizando intervalos de 0.001 segundos para seguir con mayor detalle la acción del láser en el modelo y observar de forma precisa los cambios en la geometría. Al no modificarse la temperatura de ablación, se registraron valores térmicos cercanos a la misma, es decir, aproximadamente  $1.72 \times 10^3 \text{ K}$ .



**Figura 41.** Cambios de geometría para la superficie expuesta a la acción del láser.

La figura 41 ilustra el desplazamiento y avance de la superficie superior de la geometría hacia el lado opuesto, como resultado de la remoción de material durante 0.05 segundos. En este mismo gráfico se incluye la superficie de la base para servir de referencia al movimiento. Como detalle relevante, los resultados indican que la superficie final no sobrepasa el punto de partida en la superficie exterior. En los casos analizados, el cambio de fase a líquido y su posterior enfriamiento no producen variaciones en las dimensiones del material que causen que el modelo se salga de los límites de especificación para el diámetro final de la pieza cortada por láser.



**Figura 42.** Visualización 3D del modelo C en el que muestra el avance en la formación del cráter.

En la figura 42 se presenta el modelo C en 3D, donde a partir del segundo 0.34 se observa la formación del cráter en la geometría, junto al perfil de temperatura que se sitúa en torno a  $1.72 \times 10^3$  K, un valor que se esperaba conforme a las modificaciones previamente descritas.

## 8.6 Cálculo de inversión

El cálculo de la inversión de este proyecto, a nivel empresarial, involucra la compra de una licencia computacional, equipo de cómputo y horas de trabajo de un ingeniero para desarrollar una simulación funcional que represente de manera concisa el corte láser para un cable de acero.

En primer lugar, se debe identificar claramente la necesidad y el propósito del proyecto, determinando el alcance y las especificaciones de la simulación a desarrollar. Esto permitirá estimar con precisión los recursos y costos necesarios para llevarlo a cabo. Para este proyecto, la principal razón se basa en la oportunidad de tener un punto inicial, con resultados sobre los valores de tiempo, potencia y calidad de un corte láser determinado.

Como se vio en la sección del marco teórico, las aplicaciones del láser son variadas en diferentes partes de la industria de manufactura. La aplicación de la modelación y simulación puede ayudar a agilizar un proceso de validación para los parámetros requeridos para implementar un dispositivo o nuevo diseño, potenciando la parte experimental con pruebas computacionales y reduciendo las pruebas destructivas.

Una vez definido el proyecto, se procede a desglosar los costos en sus respectivas categorías. La compra de la licencia computacional de COMSOL Multiphysics, es esencial para el desarrollo de la simulación. Este costo puede ser fijo o basado en suscripciones periódicas, lo cual influye en la inversión total y es fundamental considerar versiones, actualizaciones y soporte técnico que pueda incluir la licencia.

Según la página oficial de COMSOL Multiphysics estas son las licencias disponibles:

- Licencia de usuario único nombrado (NSL): permite que un usuario designado instale el software en hasta cuatro computadoras y lo use en dos simultáneamente.
- Licencia bloqueada a CPU (CPU-Locked): se instala en una sola computadora y puede ser utilizada por múltiples usuarios, pero solo uno a la vez.
- Licencia de red flotante (FNL): permite la instalación en múltiples máquinas dentro de una red y el uso simultáneo por varios usuarios.

- Licencia COMSOL Server™ (CSL): diseñada para alojar aplicaciones de simulación y permitir el acceso remoto.
- Licencia Class Kit (CKL): exclusiva para instituciones académicas, permite el uso en múltiples computadoras dentro de un aula.
- Licencia Academic Server (ASL): similar a la CSL, pero destinada a entornos académicos.

Cada licencia puede adquirirse de forma perpetua (sin fecha de expiración) o por término (válida por un período determinado) y estas parten de los \$5.498 para un paquete básico en la licencia NSL y CPU o \$10 995 en el tipo FNL, ambas para un periodo de 1 año.

El equipo de cómputo representa otra inversión significativa, ya que el rendimiento del hardware influye en la eficiencia del desarrollo del programa. Se deben evaluar las especificaciones técnicas necesarias, considerando procesadores, memoria RAM, almacenamiento y tarjetas gráficas si es pertinente. Además, hay que incluir costos adicionales como mantenimiento, accesorios y posibles mejoras futuras.

El mercado puede ofrecer precios entre los \$1.500 - \$2.500 para estos propósitos.

El tercer elemento en el cálculo de la inversión es el costo de las horas de trabajo de ingeniero. Se debe estimar la cantidad de horas necesarias para el diseño, programación, pruebas y optimización del software. La tarifa por hora del ingeniero dependerá de su experiencia, especialización y ubicación. Es recomendable prever posibles retrasos y ajustes en el desarrollo para garantizar una planificación financiera adecuada. Según el Colegio Federado de Ingenieros y de Arquitectos (CFIA) el costo el costo de la hora de un ingeniero en Costa Rica varía según la especialización, experiencia y el tipo de trabajo requerido. En este caso el costo mínimo de la hora profesional puede rondar los \$73.66, por lo que en una jornada de 8 horas por un periodo aproximado de 2 meses, tiempo estimado para completar el proyecto, al final se obtendría un valor de \$188 584.71.

Finalmente, al sumar los tres factores mencionados, se obtiene el costo total del proyecto, el cual es de \$196082.71, para una licencia de COMSOL Multiphysics básica, un equipo computacional de \$2 000 y el tiempo de un ingeniero para completar el proyecto. Sin

embargo, es importante considerar aspectos adicionales como impuestos, capacitación para el uso del programa, costos operativos y la cobertura de cualquier eventualidad.

## 9. Conclusiones

Se ha llevado a cabo un estudio de modelación y simulación computacional con el objetivo de analizar el proceso de corte láser aplicado a un cable de acero inoxidable que se manufactura en la industria médica. Para ello, se empleó el software COMSOL Multiphysics, mediante el cual se desarrollaron modelos específicos que permiten representar de manera computacional los mecanismos físicos involucrados en dicho proceso.

Mediante los modelos finales desarrollados, modelos A, B y C, se han obtenido los perfiles de temperatura para el proceso de corte láser con valores realistas esperados para el tipo de proceso. También se logra integrar de manera efectiva la trazabilidad del cambio de fase del material, por medio del cambio de temperatura, en localizaciones específicas de la geometría. En consecuencia, se infiere que la combinación de los modelos A y C ofrece una representación más precisa del proceso de corte láser, pues integran datos experimentales, tanto de las geometrías iniciales como de las resultantes, junto con las propiedades de los materiales empleados en la industria, además de brindar las ecuaciones que describen la transferencia de calor por conducción y convección. Los rangos reportados de temperatura en estos modelos finales tienen un promedio de 1660 K lo cual son valores consistentes para el proceso.

Para las simulaciones realizadas se ha constatado el aumento de temperatura producto de la acción del láser, tanto para la geometría básica 2D como para la 3D en donde los resultados pueden ser extendidos producto de la formulación de un modelo con simetría axial.

En el caso del estudio del cambio de geometría, modelo final C, se logra describir el proceso de cambio de la misma debido a la remoción del material al cambiar de fase, los resultados muestran que el diámetro sigue dentro de la especificación según el proceso real. Sin embargo, este modelo tiene la oportunidad de mejora y de ser más completo al integrar otras físicas que interactúan en este proceso.

## 10. Recomendaciones

Inicialmente, se recomienda poder contar con trabajos de carácter experimental, con el fin particular de recabar datos de potencias del láser, geometrías específicas, características de los materiales, campos de temperatura, etc. con los cuales contrastar y mejorar los modelos computacionales iniciales. Si bien se tenían valores de referencia de la potencia empleada y se lograron obtener resultados realísticos, característicos del proceso de corte láser, sería conveniente poder contar con datos operativos más específicos, como los valores de pulsos del láser y otros parámetros de referencia de la industria de dispositivos médicos.

En una segunda etapa, para representar más fielmente el proceso térmico de corte láser, se sugiere añadir la modelación de los fenómenos de dinámica de fluidos ligados al efecto Marangoni y a la presión de retroceso los cuales afectan directamente los resultados obtenidos en perfiles de temperatura y cambio de geometría de los modelos finales B y C. La incorporación de estos mecanismos, que se originan en el baño líquido del material una vez que se crea la fase metálica líquida y posteriormente la fase metálica vapor, es necesaria para reproducir con mayor detalle las superficies finales del corte.

Finalmente, una oportunidad de mejora radica en la implementación de una metodología de simulación que integre simultáneamente los cambios geométricos y los cambios de fase del material. Esto permitiría consolidar un único enfoque que abarque los fenómenos anteriores de manera coherente, considerando la complejidad y posible demanda de recursos computacionales que esto implique.

## 11. Bibliografía

- Alsaadawy, M., Dewidar, M., Said, A., Maher, I., & Shehabeldeen, T. A. (2024). A comprehensive review of studying the influence of laser cutting parameters on surface and kerf quality of metals. In *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* (Vol. 130, Issues 3–4, pp. 1039–1074). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. <https://doi.org/10.1007/s00170-023-12768-1>
- Ayagi, S. R., & Adam, U. M. (2024). Cost of Capital and Investment Efficiency: A Critical Review of Empirical Literature. *Gusau International Journal of Management and Social Sciences*, 7(1), 23–37. <https://doi.org/10.57233/gijmss.v7i1.02>
- Backhouse, A., & Baddoo, N. (2021). *Recent developments of stainless steels in structural applications*. <https://doi.org/10.1002/cepa>
- Baison. (2023). How to Use a Laser Cutting Machine in the Medical Device Industry - Baison. <https://Baisonlaser.Com/>. <https://baisonlaser.com/blog/use-laser-cutter-in-medical-device/>
- Banks Jerry. (1998). *Handbook of Simulation Principles, Methodology, Advances, Applications, and Practice*. John Wiley & Sons, Inc. <https://doi.org/10.1002/9780470172445>
- Bin-Mansoor, S., & Yilbas, B. S. (2006). Laser pulse heating of steel surface: Consideration of phase-change process. *Numerical Heat Transfer; Part A: Applications*, 50(8), 787–807. <https://doi.org/10.1080/10407780600669159>
- Brenda Camarillo. (2024, August 1). *Empresas de dispositivos médicos lideran en crecimiento e innovación, revela estudio de la Cámara de Industrias - Periódico La República*. <https://www.larepublica.net/noticia/empresas-de-dispositivos-medicos-lideran-en-crecimiento-e-innovacion-revela-estudio-de-la-camara-de-industrias>
- Chawla, M. K. (2015). Optically Stimulated Electron Emission. In *Developments in Surface Contamination and Cleaning* (pp. 69–107). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-323-31303-2.00003-0>

- Comsol Multiphysics (a). (2025). *Modeling Laser Beam Absorption in Silica Glass with Beer-Lambert Law*. <https://www.comsol.com/model/modeling-laser-beam-absorption-in-silica-glass-with-beer-lambert-law-56101>
- COMSOL Multiphysics (b). (2025). *Cooling and Solidification of Metal*. <https://www.comsol.com/model/cooling-and-solidification-of-metal-12701>
- Dave Lee. (2025, March 26). *11 Cost Estimating Methods (With Formulas and Examples) | Indeed.com*. <https://www.indeed.com/career-advice/career-development/cost-estimating-methods>
- Dubey, A. K., & Yadava, V. (2008). Laser beam machining-A review. In *International Journal of Machine Tools and Manufacture* (Vol. 48, Issue 6, pp. 609–628). <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2007.10.017>
- Dutta Majumdar, J., & Manna, I. (2003a). Laser processing of materials. In *S<sup>-</sup>adhan<sup>-</sup>a* (Vol. 28). <https://doi.org/https://link.springer.com/article/10.1007/BF02706446#citeas>
- Dutta Majumdar, J., & Manna, I. (2003b). Laser processing of materials. *Springer Nature*, 28, 495–562. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/BF02706446>
- Frei, W. (2016, March 30). *Modeling Thermal Ablation for Material Removal | COMSOL Blog*. <https://www.comsol.com/blogs/modeling-thermal-ablation-for-material-removal/>
- Graves, R. S., Kollie, T. G., Mcelroy, D. L., & Gilchrist, K. E. (1991). The Thermal Conductivity of AISI 304L Stainless Steel. In *International Journal of Thermophysics* (Vol. 12, Issue 2).
- Kambezidis, H. D. (2012). The Solar Resource. In *Comprehensive Renewable Energy* (pp. 27–84). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-087872-0.00302-4>
- Kent, R. (2018). Cost management. In *Cost Management in Plastics Processing* (pp. 3–44). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102269-6.50001-X>
- Kuang, J. H., Hung, T. P., Lai, K., Hsu, C. M., & Lin, A. Der. (2012). The surface absorption coefficient of S304L stainless steel by Nd: YAG micro-pulse laser. *Advanced Materials Research*, 472–475, 2531–2534. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.472-475.2531>
- Lester, E. I. A. (2017). Investment Appraisal. In *Project Management, Planning and Control* (pp. 29–36). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-102020-3.00006-1>

- Lillard, R. S. (2010). A review of corrosion issues related to uranyl nitrate base aqueous homogeneous reactors. *Corrosion Engineering Science and Technology*, 45(3), 194–203. <https://doi.org/10.1179/147842210X12659647007121>
- Liu, G. R., & Quek, S. S. (2014). Computational Modeling. In *The Finite Element Method* (pp. 1–11). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-098356-1.00001-1>
- Liu, Y. F., Hu, Z. L., Shi, D. H., & Yu, K. (2013). Experimental investigation of emissivity of steel. *International Journal of Thermophysics*, 34(3), 496–506. <https://doi.org/10.1007/s10765-013-1421-3>
- Louis De Canonville, C., Minissale, M., Romero-Lairado, F., Salomon, E., Giacometti, G., Angot, T., Bisson, R., & Gallais, L. (2023). *Optical properties, surface composition and desorption of Stainless Steel (316L) studied from ambient temperature to 1000 K in vacuum*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352492823015568>
- Meng, H., Liao, J., Zhou, Y., & Zhang, Q. (2009). Laser micro-processing of cardiovascular stent with fiber laser cutting system. *Optics and Laser Technology*, 41(3), 300–302. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2008.06.001>
- Mills, K. C. (2002). Fe-304 Stainless Steel. In *Recommended Values of Thermophysical Properties for Selected Commercial Alloys* (pp. 127–134). Elsevier. <https://doi.org/10.1533/9781845690144.127>
- Nayak, S., & Chakraverty, S. (2018). Interval Finite Element Method. In *Interval Finite Element Method with MATLAB* (pp. 7–17). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-812973-9.00002-3>
- Ninpetch, P., & Kowitwarangkul, P. (2019). A numerical study on the thermal transient model with moving laser heat source of AISI 304 stainless steel plate. In *Materials Today: Proceedings* (Vol. 17). [www.sciencedirect.com/www.materialstoday.com/proceedings2214-7853](https://www.sciencedirect.com/www.materialstoday.com/proceedings2214-7853)
- Raghubir Singh Khandpur. (2019). Compendium of Biomedical Instrumentation. In *2020 John Wiley & Sons, Ltd.* (Vol. 2). <https://doi.org/https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/9781119288190.ch216>

- Sharma, A., & Yadava, V. (2018). Experimental analysis of Nd-YAG laser cutting of sheet materials – A review. In *Optics and Laser Technology* (Vol. 98, pp. 264–280). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2017.08.002>
- Singh, R. (2016). Stainless Steels. In *Applied Welding Engineering* (pp. 83–90). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804176-5.00008-6>
- Sinnott, R., & Towler, G. (2020). Costing and Project Evaluation. In *Chemical Engineering Design* (pp. 275–369). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-102599-4.00006-0>
- Somerday, B. P., & San Marchi, C. (2008). Hydrogen containment materials. In *Solid-State Hydrogen Storage: Materials and Chemistry* (pp. 51–81). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1533/9781845694944.1.51>
- Steen Willian, & Mazumder Jyotirmoy. (2010). Theory, Mathematical Modelling and Simulation. In *Laser Material Processing* (pp. 251–294). Springer London. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-1-84996-062-5>
- Vora, H. D., Santhanakrishnan, S., Harimkar, S. P., Boetcher, S. K. S., & Dahotre, N. B. (2012). Evolution of surface topography in one-dimensional laser machining of structural alumina. *Journal of the European Ceramic Society*, 32(16), 4205–4218. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2012.06.015>
- Vora, H. D., Santhanakrishnan, S., Harimkar, S. P., Boetcher, S. K. S., & Dahotre, N. B. (2013). One-dimensional multipulse laser machining of structural alumina: Evolution of surface topography. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 68(1–4), 69–83. <https://doi.org/10.1007/s00170-012-4709-8>
- Wang, H. J., & Yang, T. (2021). A review on laser drilling and cutting of silicon. In *Journal of the European Ceramic Society* (Vol. 41, Issue 10, pp. 4997–5015). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2021.04.019>
- www.comsol.com. (2016, March 15). *Detailed Explanation of the Finite Element Method (FEM)*. <https://www.comsol.com/multiphysics/finite-element-method>
- Yilbas, B. S. (2018a). The Laser Cutting Process Analysis and Applications. In *The Laser Cutting Process* (pp. 1–4). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-812982-1.00001-1>

- Yilbas, B. S. (2018b). Thermal analysis of the laser cutting process. In *The Laser Cutting Process* (pp. 5–51). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-812982-1.00002-3>
- Yilbas, B. S., & Naqvi, I. Z. (2003). Laser heating including the phase change process and thermal stress generation in relation to drilling. In *Part B: J. Engineering Manufacture* (Vol. 217).