



# Desarrollo e implementación de una metodología para mallado de modelos de CAD de forma automatizada en simulaciones de procesos de soldadura por FEM

Rojo Martinez Uriel<sup>1</sup>, Rodríguez González José Miguel<sup>1</sup> (✉), Morán Hernández Juan<sup>2</sup>.

Tecnológico Nacional de México / TES de Valle de Bravo

✉ jose.rg@vbravo.tecnm.mx

## Resumen

*Las simulaciones de soldadura han avanzado significativamente en el análisis de configuraciones de laboratorio y aplicaciones de ingeniería reales durante las últimas tres décadas, es una herramienta poderosa para predecir distorsiones de soldadura y estrés residual. No obstante, se necesitan estrategias de modelado específicas para reducir el tiempo del modelado de la malla de elemento finito. A medida que aumentan el tamaño de del componente a simular, aumenta la necesidad de crear mallas completamente libres de elementos inutilizables o distorsionados geoméricamente. Se necesitan procedimientos automáticos para minimizar el tiempo que el usuario requiere para validar la calidad de la malla. Los retrasos en el tiempo de preprocesamiento pueden deberse a muchos factores, incluido el tamaño del modelo, las áreas de astilla, esquinas afiladas, áreas pequeñas, agujeros y áreas de gran curvatura. Las técnicas propuestas se basan en el control automático del refinamiento de la malla a través de la zona afectada por el calor y alrededor de los orificios, creando una malla gruesa y que posteriormente es refinada en las zonas críticas. Esta estrategia permite una reducción significativa en el tiempo de mallado y la cantidad de elementos requeridos sin afectar sus parámetros de calidad geométricos. Este artículo se centra en herramientas y técnicas automatizadas y cómo se integran con otros métodos para facilitar el modelado de mallas para simulaciones de soldadura por arco en ingeniería. Se analizó la eficacia de las técnicas propuestas empleando pruebas de modelado manuales y automáticas para su validación. Estos desarrollos han llevado a la creciente aplicación de simulaciones de soldadura en la industria y tienen una importancia orientativa importante para el preprocesamiento de la simulación de soldadura por arco.*

**Palabras clave:** Soldadura por arco, Mallado, Elemento finito, Automatización.

## Abstract

*Welding simulation has advanced from the analysis of laboratory setups to real engineering applications during the last three decades, is a powerful tool to predict welding distortions and residual stresses. Nevertheless, specific modeling strategies are needed to reduce the pre-processing time of the mesh generation. As mesh sizes increase, the need to create meshes completely free of unusable or geometrically distorted elements increases. Automatic procedures are needed to minimize the user time required to validate that the mesh is acceptable. Pre-processing time delays can be caused by many things, including model size, sliver areas, sharp corners, small areas, holes, and areas of high curvature. The proposed techniques are based on automatic control of the mesh's coarsening across the heat-affected zone and around the holes, creating a coarse mesh and subsequently refined to a suitable finite element mesh. This strategy allows a significant reduction in the meshing time and the*



---

*number of elements required without affecting their geometric quality parameters. This paper is focused on automatized tools and techniques and how they are integrated with other methods to facilitate the modeling of meshes for arc welding simulations in engineering. We have tested the effectiveness of the proposed technique employing manual and automatic modeling tests for validation. These developments have led to the increasing application of welding simulations in the industry and have important guiding significance for arc welding simulation pre-processing.*

**Keywords:** Arc Welding, Meshing, Finite Element, Automatization.

## 1. Introducción

La soldadura por arco es una técnica de fabricación que presenta varios problemas complejos a la comunidad de diseño y fabricación. En ninguna parte es esto más evidente que en la industria aeroespacial, automotriz y de fabricación, con su énfasis en el rendimiento y la confiabilidad, sin embargo, donde los materiales rara vez se seleccionan por su soldabilidad, el crecimiento exponencial en el rendimiento de los sistemas computacionales, combinado con desarrollos igualmente rápidos en métodos numéricos y geométricos. El modelado ha permitido a la mecánica computacional de soldadura llegar a la etapa en la que puede resolver un número creciente de problemas que interesan a la industria, especialmente en tuberías, plantas de energía, refinerías y recipientes a presión, reactores nucleares, edificios, puentes, camiones y trenes, barcos, estructuras costa afuera, estructuras aeroespaciales, microelectrónica y muchos otros [1].

En las simulaciones de soldadura por arco que utilizan el método de elementos finitos (FEM, por sus siglas en inglés), el factor más crítico que determina el tiempo de cálculo siempre sigue siendo la densidad de la malla, el tiempo de cálculo total aumenta cuadráticamente con el número de elementos [2]. Se prefieren los elementos de bloque porque tienden a ser más precisos, fáciles de usar e interpretar a comparación de los elementos tetraédricos. Sin embargo, es más difícil nivelar una malla con pequeños elementos cerca del arco de soldadura para capturar los cambios rápidos de temperatura y con elementos de mayor tamaño lejos del arco donde la temperatura varía lentamente [3-5].

Dado que hasta el 90% del tiempo y el costo de un análisis del método de elementos finitos de una estructura compleja puede ser absorbido por el preprocesamiento, el progreso en la generación de mallas es un factor crítico que está marcando el ritmo del desarrollo de procesos computacionales en la mecánica de soldadura, esto es particularmente importante en este proceso donde se necesita una malla fina cerca del baño fundido y una malla gruesa lejos de esta, así se podría reducir los costos y mejorar el rendimiento en varios órdenes de magnitud, la elección del tamaño del elemento también tiene una fuerte influencia en los resultados [6-8].

Este proyecto tiene el objetivo de desarrollar algoritmos eficientes que automaticen este proceso, al definir de manera rápida la zona afectada por el calor y que los elementos dentro de esta se distribuyan ordenadamente usando hexaedros, al mismo tiempo poder crear las condiciones de contorno para comenzar la transición de elementos pequeños a elementos de mayor tamaño conforme la malla se aleja de la soldadura hacia partes del modelo menos críticas, pudiendo reducir el tiempo de mallado hasta en un 80%, manteniendo en todo momento un equilibrio entre calidad y cantidad de elementos para la efectividad de los resultados.

Así pues, el consumo de energía asociado al uso cotidiano de la infraestructura que hace posible esta tecnología pueda ser minimizado con un uso más consciente y sostenible.



## 2. Metodología y Diseño

### 2.1 Técnicas propuestas para el modelado de las mallas

Estas técnicas están basadas en el control automático del refinamiento de la malla cerca de la zona afectada por el calor y alrededor de los agujeros, desarrolladas por medio del dibujo asistido por computadora (CAD, por sus siglas en inglés) 2D y 3D creando inicialmente una malla gruesa que se refinara de manera gradual cerca de las zonas críticas del modelo. Estas estrategias nos permiten alcanzar una reducción significativa en el tiempo de mallado y el número de elementos requeridos sin afectar la calidad de la geometría de los elementos. Primero el modelo de la malla es generado como una superficie media a la que posteriormente se le asigna un espesor. Técnicas y herramientas automatizadas fueron integradas al proceso como se puede observar en la Figura 1, para facilitar el modelado de las mallas 2D en modelos de simulación de soldadura por arco.

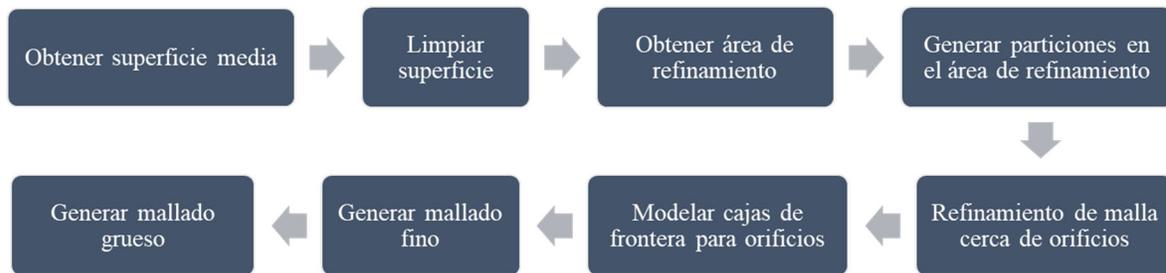


Figura 1. Diagrama de flujo de las técnicas de modelado automático de mallas de elemento finito para simulaciones de soldadura por arco.

### 2.2. Obtener la superficie media del modelo

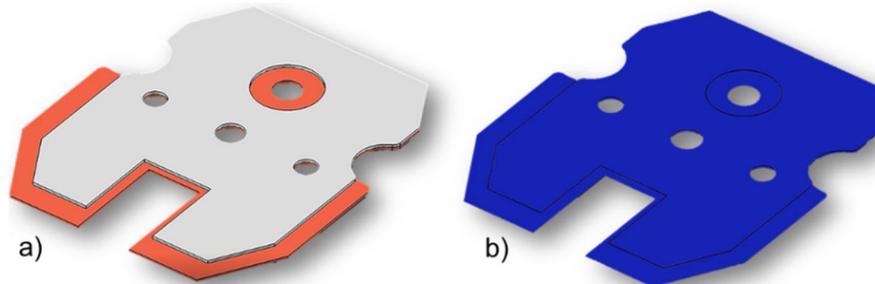
Este algoritmo ejecuta el primer filtro de los componentes en base a la generación de una superficie media del modelo, la cual permite crear superficies entre pares de caras seleccionadas en los sólidos en formato. Standard for the Exchange of Product Data (STEP, por sus siglas en inglés), los pares de caras adecuados deben ser equidistantes entre sí para buscar y extraer las superficies en 2D de una geometría sólida de espesor único, el reemplazo de partes por superficies medias incrementa la rapidez de mallado ya que solo se trabajaría en una superficie con elementos bidimensionales a los que posteriormente se les puede aplicar un espesor determinado. Para que un componente pueda ser mallado por el método 2D partiendo de una superficie media, las partes deben ser sólidas y tener un espesor único.

Esta herramienta no se puede utilizar en secciones en T ni en geometrías similares con espesor variable o que contengan chaflanes y o bisels, por lo que si al componente no se le puede extraer una superficie media o requiere de dos o más superficies para poder ser generada el método de mallado 2D por superficie media no podrá ser aplicado y el algoritmo sugerirá que el componente debe ser mallado de manera manual por el método 3D. (ver Figura 2).

### 2.3 Algoritmo de limpieza de superficies

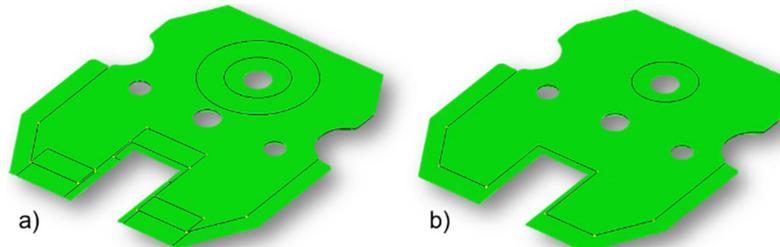
Este algoritmo permite eliminar vértices y aristas no necesarias en el modelo, la elección de los elementos a suprimir en el modelo son basados en su topología (Aristas libres, Vértices libres, Aristas de unión, Aristas de frontera y Aristas suprimidas), solo las aristas y vértices de frontera son considerados como necesarios en este punto, cualquier otro tipo puede ser ocultado del modelo, limpiar la superficie

nos ayuda a mantener una correcta distribución y alineación de los elementos al mismo tiempo contribuye a la reducción de nodos y elementos dentro del modelado de la malla.



**Figura 2. Generación automática de superficie media a) Componentes 3D, b) Superficies generadas.**

El algoritmo guarda en una lista cada uno de los vértices y las aristas del modelo para después analizar a qué tipo de objeto pertenece dentro de la topología, si esta pertenece al grupo de aristas o vértices de frontera las mantiene en el modelo, en caso contrario son suprimidas para ser ignoradas al momento de generar la malla, el algoritmo limpia todos los componentes de tipo superficie que se muestran en la pantalla de inicio del programa de mallado, el modelo ya procesado con el algoritmo se muestra en la Figura 3, suprimir las aristas y los vértices no influyen en la estructura del modelo por lo que es seguro ignorarlas.



**Figura 3. Limpieza de superficies, a) Modelo Original, b) Superficie procesada.**

#### **2.4 Algoritmo para delimitar la zona de refinamiento**

Este algoritmo ayuda a delimitar las trayectorias por donde se colocarán los cordones de soldadura al modelo 3D (ver Figura 4), permite obtener elementos alineados al flujo de la fuente de calor con las dimensiones definidas por el usuario en la zona de refinamiento de malla (M-HAZ, por sus siglas en inglés), las trayectorias son delimitadas mediante cortes a la superficie del modelo 3D que se quiere mellar, cada una de estas líneas este distribuida respetando los parámetros de la fuente calor que el usuario defina.

El cálculo del valor del M-HAZ se realiza con la Ecuación 1

$$MHAZ = \left( \left\lceil \frac{\max([a \ b]) + HAZ}{h} \right\rceil + 1 \right) \quad (1)$$

Donde:

$a$  = Pata vertical del cordón de soldadura  
 $b$  = Pata horizontal del cordón de soldadura  
 $h$  = Altura del elemento 2D de la malla  
HAZ = Zona afectada por el calor

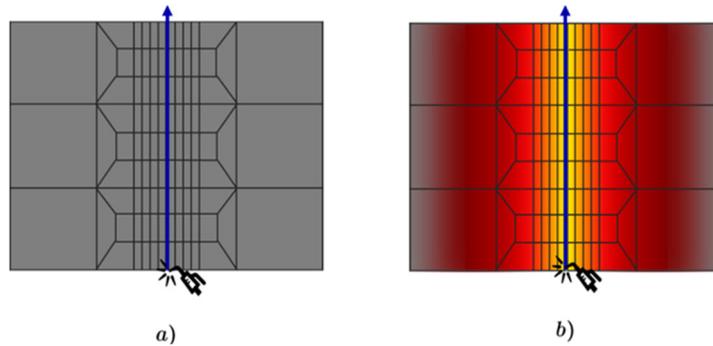


Figura 4. Modelado óptimo para simulaciones de soldadura, a) Modelo antes de la simulación, b) Modelo al completar la simulación.

### 2.5 Algoritmo de refinamiento de malla

Este algoritmo ayuda a refinar la malla dentro de la zona afectada por el calor, manteniendo el tamaño de los elementos definidos por el usuario y alineando la malla en el sentido en el que se coloca la soldadura, el mallado se genera barriendo los elementos a lo largo de la trayectoria por donde se desplaza la fuente de calor al mismo tiempo se genera una malla de menor densidad en las zonas del modelo donde no hay una gran concentración de calor como se puede observar en la **Figura 5**, manteniendo la geometría de los elementos conforme a los parámetros que se soliciten. Este algoritmo genera una partición de la superficie alrededor de las perforaciones en el modelo para refinar y alinear la malla, además está preparada para orificios con geometrías circulares cuadradas, rectangulares y hexagonales.

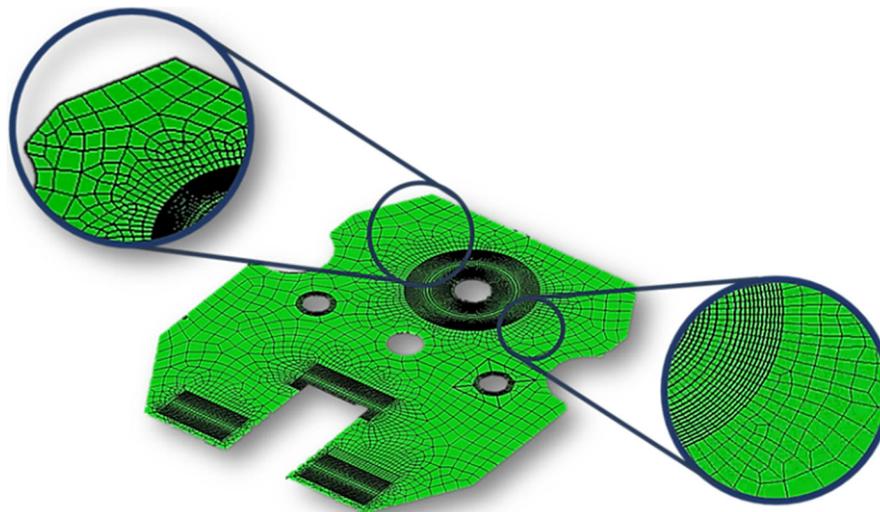


Figura 5. Malla tipo superficie con elementos finos en la zona afectada por el calor con transición a elementos de mayor tamaño en zonas poco críticas.

## 2.6 Modelo de implementación y evaluación

Para evaluar los resultados de los algoritmos de automatización se utilizó un componente que es muy similar a los soportes de montaje que se utilizan en la maquinaria pesada o de movimiento de tierra como lo son los tractores agrícolas, de construcción o minería, este componente está dividido en cinco subsistemas los cuales habían sido mallados de manera manual previamente. Además de estos se seleccionó un componente de soporte de un automóvil.

La primera evaluación consistió en mallar cada uno de los componentes con los algoritmos de automatización registrando el tiempo de mallado de cada uno para poder ser comparados con los tiempos de mallados manuales, además de tiempo de evaluación la cantidad de nodos, y la calidad de elementos en subgrupos.

Tabla 1: Tiempo de mallado y número de elementos para el modelado de la malla (manual y automático).

No.	Cantidad de componentes	Distancia lineal de soldadura [m]	Tiempo de mallado manual [h]	Tiempo de mallado automático [h]	Cantidad de elementos (Mallado manual)	Cantidad de elementos (Mallado automático)
1	16	5.32	121.2	32.56	36,437	37,256
2	3	2.56	36.5	4.2	15,218	14,187
3	3	3.02	52.12	5.39	18,456	16,589

Como se puede observar en la Tabla 1, se realizaron 3 experimentos con diferentes componentes, cada uno de ellos con una cantidad lineal de soldadura diferente, y diferente número de piezas dentro del ensamble.

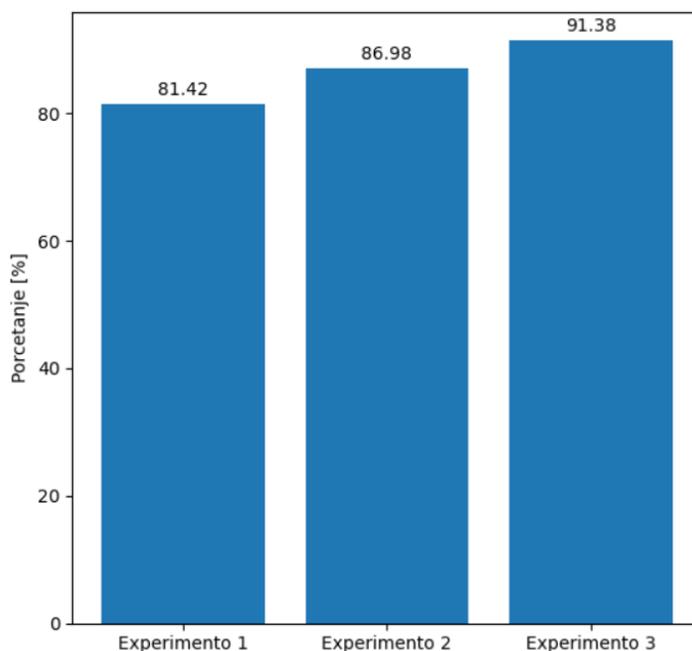
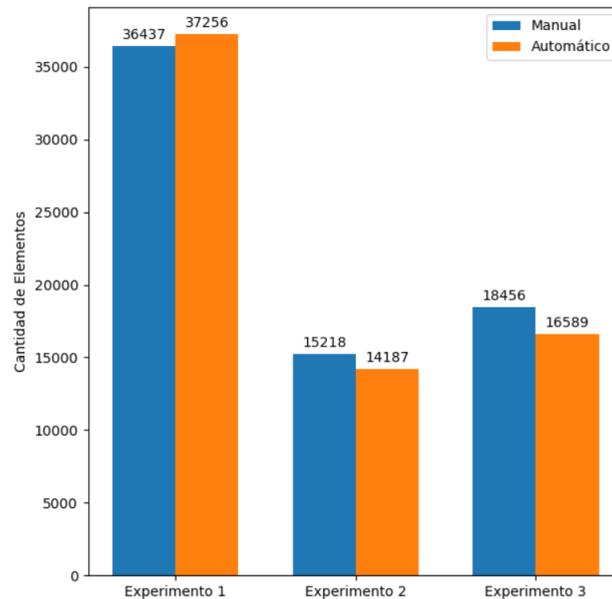
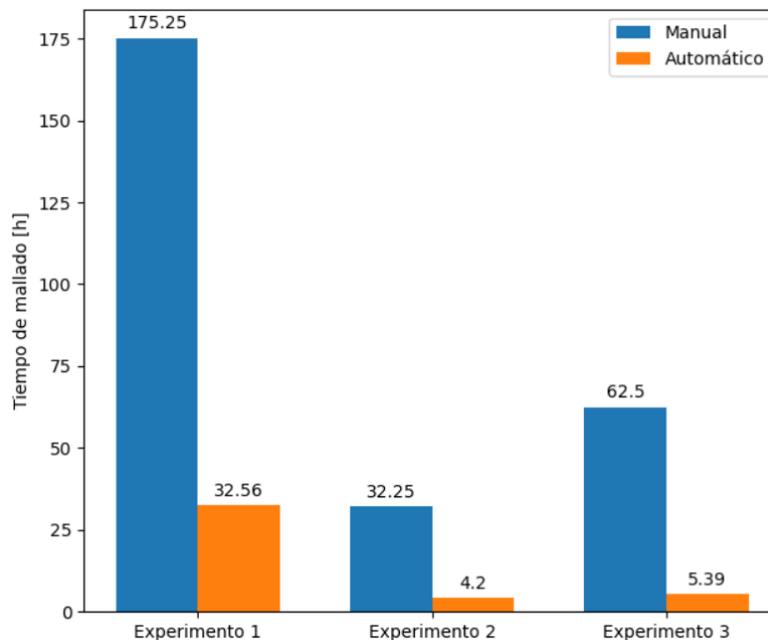


Figura 6. Reducción del tiempo de mallado.

Después de correr los experimentos los resultados mostrados en la **Figura 6**. Nos muestran que se obtuvo una reducción significativa en el tiempo de mallado llegando a obtener hasta un 91.38% utilizando los algoritmos de mallado automatizado. Si se compara la cantidad de nodos generados tanto en el método manual como en automático podemos observar que la diferencia de la cantidad total de elementos no varía en gran cantidad por lo que el uso de los algoritmos no impactara en el cambio de la cantidad final de elementos y tiempo de mallado como se puede observar en la **Figura 7** y **Figura 8**.



**Figura 7. Comparativa de cantidad de elementos entre el mallado automatizado y manual.**



**Figura 8. Comparación de tiempo de mallado entre el método automático y manual.**



### 3. Conclusiones

Los resultados derivados de los experimentos determinaron que el método presentado reduce el tiempo de preprocesamiento de simulación de elementos finitos para procesos de soldadura por arco y los algoritmos son capaces de adaptarse versátilmente a cada una de las piezas por mallar por lo cual se determina que:

- El tiempo de preprocesamiento se puede llegar a reducirse en promedio un 86.5%, obteniendo una malla con áreas de concentración de calor remalladas con elementos alineados, una transición de elementos de mayor tamaño en áreas donde no existe una gran concentración de calor.
- El uso de un método automático de mallado no genera un gran impacto en la cantidad de elementos final del modelo, por lo que la calidad de malla se mantendrá con los resultados de un modelo manual, pero con un ahorro significativo de tiempo.
- El correcto funcionamiento de los algoritmos dependerá de manera directa de los datos ingresados por el usuario ya que la inconsistencia de estos comparados con los datos reales del proceso podría ocasionar que se genere una malla con elementos de mayor o menor tamaño a los deseados por el usuario.
- Los algoritmos son capaces de adaptarse versátilmente a cada una de las piezas por mallar gracias a que nos permite introducir de manera manual los parámetros de soldadura necesarios en el proceso real y la trayectoria por donde se colocaran los cordones de soldadura.

### Referencias

- [1] Schenk, T., Richardson, I. M., Kraska, M., & Ohnimus, S. (2009). Modeling buckling distortion of DP600 overlap joints due to gas metal arc welding and the influence of the mesh density. *Computational Materials Science*, 46(4), 977–986. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2009.05.003>
- [2] C.T., K. (1989). Finite element analysis of temperatures and stresses in a single-pass butt-welded pipe—influence of mesh density and material modelling. *Engineering Computations*, 6(2), 133–141. <https://doi.org/10.1108/eb023767>
- [3] Pu, X., Zhang, C., Li, S., & Deng, D. (2017). Simulating welding residual stress and deformation in a multi-pass butt-welded joint considering balance between computing time and prediction accuracy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 93(5), 2215–2226. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0691-5>
- [4] Hughes, T. J. R. (2012). *The Finite Element Method: Linear Static and Dynamic Finite Element Analysis*. Dover Publications. [https://books.google.com.mx/books?id=cHH2n%5C\\_qBK0IC](https://books.google.com.mx/books?id=cHH2n%5C_qBK0IC)
- [5] Murthy, Y. V. L. N., Rao, G. V., & Iyer, P. K. (1996). Numerical simulation of welding and quenching processes using transient thermal and thermo-elasto-plastic formulations. *Computers & Structures*, 60(1), 131–154. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0045-7949\(95\)00359-2](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0045-7949(95)00359-2)
- [6] Capriccioli, A., & Frosi, P. (2009). Multipurpose ANSYS FE procedure for welding processes simulation. *Fusion Engineering and Design*, 84(2), 546–553. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2009.01.039>
- [7] Goldak, J. A., & Akhlaghi, M. (2006). *Computational Welding Mechanics*. Springer US. <https://books.google.com.mx/books?id=p-JVviPoylUC>
- [8] Jia, X., Xu, J., Liu, Z., Huang, S., Fan, Y., & Sun, Z. (2014). A new method to estimate heat source parameters in gas metal arc welding simulation process. *Fusion Engineering and Design*, 89(1), 40–48. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2013.11.006>



## **Autores**

**Rojo Martínez Uriel.** Ingeniero Mecatrónico, Egresado de la carrera de Ingeniería Mecatrónica del Tecnológico Nacional de México / TES de Valle de Bravo, Estado de México. [uri\\_rood@hotmail.com](mailto:uri_rood@hotmail.com)

**Rodríguez González José Miguel.** Ingeniero Mecánico, por la UAEMex. Profesor de Asignatura "A" del Tecnológico Nacional de México / TES de Valle de Bravo, Estado de México. [jose.rg@vbravo.tecnm.mx](mailto:jose.rg@vbravo.tecnm.mx)

**Morán Hernández Juan.** Dr. en C. por la UNAM. Miembro del Sistema Nacional de Investigadores del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT, México). Profesor de Asignatura "A" del Tecnológico Nacional de México / TES de Valle de Bravo, Estado de México. [juan.mh@vbravo.tecnm.mx](mailto:juan.mh@vbravo.tecnm.mx)