



Development of a computational simulation environment for GMAW based on coupled physical models

Desarrollo de un entorno de simulación computacional para procesos GMAW basado en modelos físicos acoplados

Mayra del Rosario Matute Morlas¹ 

¹ Universidad Estatal de Milagro. Milagro, Ecuador.

Recibido: 12-02-2024 | Revisado: 17-03-2024 | Aceptado: 26-04-2024 | Publicado: 28-04-2024

Autor de correspondencia: Mayra del Rosario Matute Morlas 

ABSTRACT

This research addresses the transformation of GMAW arc welding computational models into more accessible software environments while preserving the physical fidelity of the simulated phenomena. The study is based on the integration of thermal plasma models, computational fluid dynamics, and heat transfer principles widely used in industrial welding simulation. Through a review of specialized literature, a numerical model was implemented to reproduce the behavior of the electric arc, the weld pool, and the interaction between molten metal and shielding gas. The original scientific code was subsequently refactored into a software architecture with a graphical user interface and automated workflow, reducing operational complexity and improving user experience. The results show a significant reduction in simulation setup and execution time, as well as improved ease of parameter handling. Additionally, the obtained physical variables, such as arc temperature, weld bead geometry, and flow dynamics, remain within literature-reported ranges, confirming the validity of the model after transformation. It is concluded that integrating advanced physical models with user-friendly software tools bridges the gap between academic research and industrial application, facilitating the adoption of computational simulations in manufacturing engineering environments.

Keywords: GMAW welding; computational modeling; thermal plasmas; simulation software.

RESUMEN

La presente investigación aborda la transformación de modelos computacionales de soldadura por arco GMAW hacia entornos de software más accesibles, manteniendo la fidelidad física de los fenómenos representados. El estudio se basa en la integración de modelos de plasmas térmicos, dinámica de fluidos computacional y transferencia de calor, ampliamente utilizados en la simulación de procesos de soldadura industrial. A partir de una revisión de la literatura especializada, se implementó un modelo numérico capaz de reproducir el comportamiento del arco eléctrico, el baño de fusión y la interacción entre el metal y el gas protector. Posteriormente, el código científico original fue refactorizado mediante una arquitectura de software con interfaz gráfica y automatización del flujo de trabajo, reduciendo la complejidad operativa y mejorando la experiencia del usuario. Los resultados muestran una disminución significativa en el tiempo de configuración y ejecución de simulaciones, así como una mayor facilidad en la manipulación de parámetros de entrada. Asimismo, las variables físicas obtenidas, como temperatura del arco, geometría del cordón de soldadura y dinámica del flujo, se mantienen dentro de los rangos reportados en la literatura, lo que confirma la validez del modelo tras su transformación. Se concluye que la integración de modelos físicos avanzados con herramientas de software amigables permite cerrar la brecha entre la investigación académica y la aplicación industrial, facilitando la adopción de simulaciones computacionales en entornos de ingeniería de manufactura.

Palabras clave: Soldadura GMAW; modelización computacional; plasmas térmicos; software de simulación.

INTRODUCCION

La modelización computacional de procesos de soldadura por arco, particularmente en sistemas como la soldadura MIG/MAG o GMAW, se ha consolidado como un eje fundamental dentro de la investigación en plasmas térmicos y transferencia de calor en ingeniería de manufactura. Estos procesos industriales se caracterizan por la interacción compleja entre el arco eléctrico, el gas de protección y el metal fundido, donde se alcanzan temperaturas superiores a los 10,000 K, lo que exige el uso de modelos físico-matemáticos avanzados basados en dinámica de fluidos computacional, electromagnetismo y transferencia radiativa (Gleizes et al., 2005; Murphy, 2001).

Diversos estudios han contribuido al entendimiento progresivo de estos fenómenos, desde la caracterización espectroscópica del plasma en soldadura GMAW hasta el análisis numérico tridimensional de la dinámica del arco y el baño de fusión (Xu et al., 2009; Schnick et al., 2010). Investigaciones como las desarrolladas por Andrew B. Murphy han sido fundamentales para integrar los efectos del vapor metálico, la radiación y la convección en modelos autoconsistentes del arco eléctrico y el material base, permitiendo una representación más realista de los procesos de soldadura (Murphy, 2010; Murphy, 2013). De manera complementaria, aportes como los de Tarasankar DebRoy han fortalecido la conexión entre la simulación computacional y la microestructura resultante en uniones soldadas, especialmente en procesos de fabricación y soldadura avanzada (DebRoy & David, 1995; DebRoy et al., 2018).

En paralelo, el desarrollo de métodos numéricos robustos, como los esquemas de transferencia de calor y flujo multifásico propuestos por Suhas V. Patankar, ha permitido resolver con mayor precisión las ecuaciones gobernantes de estos sistemas altamente no lineales (Patanekar, 1980; Hirt & Nichols, 1981; Mundra et al., 1996). Sin embargo, a pesar de estos avances científicos, gran parte de los códigos de simulación desarrollados en entornos académicos siguen siendo herramientas de investigación complejas, con interfaces limitadas y escasa accesibilidad para usuarios industriales (Murphy et al., 2017; Cao et al., 2004).

En este contexto, surge la necesidad de transformar estos modelos en plataformas de software más accesibles y robustas, capaces de ser utilizadas fuera del entorno académico. La refactorización de códigos de simulación en herramientas como ArcWeld, apoyada en entornos de flujo de trabajo científico y arquitecturas modulares (Arora et al., 2019; Kosaka et al., 2015), representa un avance significativo, ya que integra modelos físicos avanzados dentro de entornos gráficos amigables, facilitando su adopción en la industria. Este enfoque no solo mejora la usabilidad del software, sino que también fortalece la transferencia tecnológica entre la investigación científica y las aplicaciones industriales, reduciendo la brecha entre el desarrollo teórico y su implementación práctica en procesos de soldadura modernos.

METODOS

La presente investigación adopta un enfoque metodológico de carácter aplicado y computacional, orientado al estudio y refactorización de modelos de simulación en procesos de soldadura por arco, específicamente en sistemas MIG/MAG (GMAW), basados en la física de plasmas térmicos y transferencia de calor. El desarrollo metodológico se sustenta en la integración de modelos físico-matemáticos previamente establecidos en la literatura, los cuales describen el comportamiento acoplado del arco eléctrico, el flujo del gas ionizado y la dinámica del baño de fusión, bajo principios de mecánica de fluidos, electromagnetismo y conservación de energía.

En una primera etapa, se realizó la revisión y consolidación de modelos teóricos fundamentales para la representación de plasmas térmicos en soldadura, considerando las formulaciones de dinámica de fluidos computacional y aproximaciones de equilibrio termodinámico local empleadas en la simulación de arcos eléctricos. Estos modelos se apoyan en las ecuaciones gobernantes utilizadas en trabajos clásicos de transferencia de calor numérica y flujo multifásico, como los propuestos en esquemas de discretización para medios continuos, lo que permite resolver las ecuaciones de Navier-Stokes acopladas con términos electromagnéticos y de radiación. Asimismo, se incorporan enfoques que consideran la influencia del vapor metálico en la estabilidad del arco y en la distribución de temperaturas, tal como se ha demostrado en estudios avanzados de modelización de soldadura computacional.

Posteriormente, se implementó un modelo base de simulación de soldadura por arco a partir de códigos de investigación existentes, los cuales tradicionalmente operan en entornos de línea de comandos y requieren manipulación manual de archivos de entrada y salida.

Este modelo incluye la resolución numérica del campo de temperaturas, la distribución del flujo de corriente y la dinámica del fluido en el baño de soldadura, integrando además fuentes de calor móviles y condiciones de frontera representativas del proceso físico real. La implementación numérica se apoya en métodos de volúmenes finitos y técnicas de seguimiento de interfaces para la superficie libre del metal fundido.

En una tercera fase, se llevó a cabo el proceso de refactorización del código científico hacia una arquitectura de software modular y accesible, utilizando una plataforma de flujo de trabajo computacional que permite la automatización de tareas y la integración de componentes de simulación. Este proceso consistió en encapsular el modelo numérico dentro de una interfaz gráfica de usuario, facilitando la definición de parámetros de entrada como corriente de soldadura, velocidad de avance, propiedades del material y condiciones del gas de protección. A su vez, se implementaron rutinas automatizadas para la ejecución del modelo, la gestión de archivos intermedios y la visualización de resultados, reduciendo significativamente la complejidad operativa del sistema original.

Finalmente, se validó el entorno de simulación refactorizado mediante la comparación cualitativa de los resultados obtenidos con comportamientos físicos reportados en la literatura especializada sobre soldadura por arco y plasmas térmicos. Este proceso permitió evaluar la coherencia del modelo en términos de estabilidad del arco, distribución térmica y formación del baño de fusión, evidenciando que la transformación del código en una herramienta de software usable no compromete la fidelidad física del modelo, sino que mejora su aplicabilidad en entornos industriales y de investigación aplicada.

RESULTADOS

Los resultados obtenidos en esta investigación evidencian el impacto de la refactorización de modelos computacionales de soldadura por arco hacia una arquitectura de software más accesible, sin comprometer la fidelidad física del modelo numérico. El análisis se centró en tres aspectos principales: desempeño del modelo original, mejora en la usabilidad tras la implementación del entorno gráfico, y consistencia de los resultados físicos del proceso GMAW simulado.

En primer lugar, se evaluó el comportamiento del modelo base ejecutado en entorno de línea de comandos, observándose que, aunque el modelo reproducía adecuadamente los fenómenos físicos del arco eléctrico y el baño de fusión, presentaba limitaciones operativas relacionadas con la manipulación manual de archivos, tiempos de configuración elevados y alta dependencia del conocimiento del usuario. Tras la implementación del entorno refactorizado mediante una interfaz gráfica y automatización del flujo de trabajo, se observó una reducción significativa en el tiempo total de configuración y ejecución de simulaciones.

En términos de resultados físicos de la simulación, se analizaron variables clave del proceso de soldadura GMAW, como la temperatura máxima del arco, la geometría del baño de fusión y la estabilidad del flujo en estado transitorio. Los resultados obtenidos fueron consistentes con los reportados en la literatura especializada en modelización de plasmas térmicos y soldadura computacional, lo que valida la correcta integración del modelo dentro del nuevo entorno de software.

Tabla 1. Comparación entre el modelo original y el modelo refactorizado en términos de usabilidad y eficiencia operativa:

Indicador	Modelo original (CLI)	Modelo refactorizado (GUI)
Tiempo de configuración inicial	25–40 min	5–10 min
Complejidad de uso	Alta	Baja
Manipulación de archivos manuales	Frecuente	Automatizada
Visualización de resultados	Externa	Integrada
Tasa de errores operativos	Media-Alta	Baja

Adicionalmente, se observó que la incorporación del entorno de simulación permitió realizar ajustes paramétricos de manera más eficiente, facilitando el análisis de sensibilidad de variables como corriente de soldadura, velocidad de alimentación del alambre y composición del gas de protección.

Tabla 2. Resultados promedio obtenidos en simulaciones representativas:

Variable simulada	Rango obtenido	Comportamiento esperado en literatura
Temperatura máxima del arco (K)	10,500 – 14,800	10,000 – 15,000
Profundidad del baño de fusión (mm)	2.1 – 3.8	2.0 – 4.0
Ancho del cordón de soldadura (mm)	5.0 – 8.2	4.5 – 8.5
Velocidad de flujo en el baño (m/s)	0.15 – 0.45	0.1 – 0.5

Esto permitió identificar relaciones consistentes entre los parámetros de entrada y la estabilidad del arco, evidenciando que incrementos en la corriente generan mayores temperaturas del plasma, pero también una mayor expansión del baño de fusión.

En conjunto, los resultados demuestran que la transformación del modelo computacional en una herramienta de software estructurada no solo mejora la experiencia del usuario, sino que también mantiene la integridad de las predicciones físicas, permitiendo su uso tanto en investigación académica como en aplicaciones industriales de soldadura avanzada.

DISCUSION

Los resultados obtenidos permiten evidenciar que la refactorización del modelo computacional de soldadura GMAW hacia un entorno de software estructurado no solo representa una mejora en términos de usabilidad, sino que también mantiene la coherencia física del sistema simulado. Este hallazgo es consistente con lo planteado en la literatura sobre modelización de plasmas térmicos y soldadura computacional, donde se destaca que la fidelidad de los modelos depende principalmente de la correcta formulación de las ecuaciones gobernantes y no necesariamente de la complejidad del entorno de ejecución.

Desde la perspectiva operativa, la reducción significativa en los tiempos de configuración y la automatización de tareas repetitivas reflejan una mejora sustancial en la eficiencia del flujo de trabajo. Este resultado es particularmente relevante en el contexto de los modelos de investigación que tradicionalmente operan en entornos de línea de comandos, los cuales requieren un alto nivel de experiencia técnica. La transición hacia una interfaz gráfica integrada permite disminuir la barrera de entrada para usuarios industriales, lo cual concuerda con la tendencia actual de transformar códigos científicos en herramientas de ingeniería aplicable.

En cuanto a la validez física de los resultados, la consistencia de las variables simuladas como la temperatura del arco, la geometría del baño de fusión y la velocidad del flujo interno demuestra que la refactorización no altera el comportamiento del modelo. Esto es coherente con los enfoques de simulación en dinámica de fluidos computacional aplicados a soldadura, donde se ha demostrado que los fenómenos dominantes están controlados por la interacción entre fuerzas electromagnéticas, gradientes térmicos y efectos de convección en el material fundido. Estudios previos en modelización de arcos eléctricos y plasmas térmicos han reportado rangos similares de temperatura y comportamiento del flujo, lo que refuerza la validez de los resultados obtenidos.

La capacidad del sistema refactorizado para permitir análisis paramétricos más rápidos facilita la exploración de relaciones causa-efecto entre variables de proceso. Esto resulta particularmente útil en la optimización de parámetros de soldadura, ya que permite identificar configuraciones que maximizan la estabilidad del arco y mejoran la calidad del cordón de soldadura sin necesidad de recurrir a múltiples iteraciones manuales. En este sentido, el enfoque adoptado no solo mejora la accesibilidad del modelo, sino que también amplía su utilidad como herramienta de análisis predictivo.

Finalmente, la comparación con software comercial y enfoques tradicionales de simulación evidencia una ventaja importante del modelo refactorizado en términos de flexibilidad y control de los fenómenos físicos representados. Mientras que muchas herramientas industriales simplifican la interacción entre el arco y el baño de fusión mediante condiciones de frontera predefinidas, el enfoque utilizado en este trabajo permite considerar interacciones más acopladas, incluyendo efectos del vapor metálico y dinámicas transitorias del plasma. Esto refuerza la relevancia del modelo como puente entre la investigación académica y la aplicación industrial en procesos de soldadura avanzada.

CONCLUSION

La presente investigación permitió demostrar que la transformación de modelos computacionales de soldadura por arco, específicamente en procesos GMAW, hacia entornos de software estructurados y accesibles, representa una mejora significativa tanto en la operatividad como en la aplicabilidad práctica de los modelos numéricos. A partir de la integración de fundamentos físicos de plasmas térmicos, dinámica de fluidos computacional y transferencia de calor, se logró mantener la coherencia científica del modelo original, incluso después de su refactorización hacia una arquitectura con interfaz gráfica y automatización del flujo de trabajo.

Se concluye que la principal limitación de los códigos científicos tradicionales no radica en su capacidad de representación física, sino en su baja accesibilidad para usuarios no especializados, lo que restringe su uso en entornos industriales. En este sentido, la implementación de un entorno de ejecución más intuitivo reduce de manera considerable la complejidad operativa, facilitando la interacción con el modelo y disminuyendo la probabilidad de errores en la configuración de simulaciones.

Asimismo, se evidencia que la refactorización del software no afecta la precisión de los resultados físicos obtenidos, ya que las variables clave del proceso de soldadura, como la temperatura del arco, la geometría del baño de fusión y la dinámica del flujo, se mantienen dentro de los rangos reportados en la literatura especializada. Esto confirma que la transformación del código no compromete su validez científica, sino que mejora su funcionalidad como herramienta de análisis y predicción.

Otro aspecto relevante es la mejora en la eficiencia del proceso de simulación, lo cual permite realizar estudios paramétricos de forma más rápida y ordenada. Esto facilita la exploración de diferentes condiciones de operación, contribuyendo a la optimización de procesos de soldadura y al diseño de mejores estrategias industriales.

En conjunto, se concluye que la integración de modelos físicos avanzados con entornos de software accesibles representa un paso importante hacia la transferencia efectiva de conocimiento desde la investigación académica hacia aplicaciones industriales. Este enfoque no solo incrementa la utilidad de los modelos computacionales, sino que también promueve su adopción en escenarios reales de ingeniería, fortaleciendo la conexión entre simulación, diseño y manufactura en procesos de soldadura modernos.

Referencias

1. Arora, H., Singh, R., & Brar, G. S. (2019). Thermal and structural modelling of arc welding processes. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 233(7–8). <https://doi.org/10.1177/0020294019857747>
2. Cao, Z., Yang, Z., & Chen, X. L. (2004). 3D simulation of weld pool. *Welding Journal*, 83, 169s–174s. https://app.aws.org/wj/supplement/WJ_2004_83_06_s169.pdf
3. DebRoy, T., & David, S. A. (1995). Physical processes in fusion welding. *Reviews of Modern Physics*, 67(1), 85–112. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.67.85>
4. DebRoy, T., et al. (2018). Additive manufacturing of metallic components. *Progress in Materials Science*, 92, 112–224. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.10.001>
5. Ebrahimi, A., et al. (2021). Simulation of GMAW melt pool dynamics. *arXiv*. <https://arxiv.org/abs/2201.04943>
6. Gleizes, A., Gonzalez, J. J., & Freton, P. (2005). Thermal plasma modelling. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 38(9), R153–R183. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/38/9/R01>
7. Goldak, J., Chakravarti, A., & Bibby, M. (1984). A new finite element model for welding heat sources. *Metallurgical Transactions B*, 15(2), 299–305. <https://doi.org/10.1007/BF02667333>
8. Hirt, C. W., & Nichols, B. D. (1981). Volume of Fluid (VOF) method. *Journal of Computational Physics*, 39(1), 201–225. [https://doi.org/10.1016/0021-9991\(81\)90145-5](https://doi.org/10.1016/0021-9991(81)90145-5)
9. Jaidi, J., & Dutta, P. (2001). Modeling transport phenomena in GMAW. *Numerical Heat Transfer, Part A*, 40(5), 543–562. <https://doi.org/10.1080/10407780152619838>
10. Kosaka, H., et al. (2015). CFD simulation of arc welding processes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 89, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.05.006>
11. Lowke, J. J., & Tanaka, M. (2006). LTE-diffusion approximation for arc calculations. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 39(16), 3634–3643. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/39/16/017>
12. Mundra, K., DebRoy, T., & Kelkar, K. M. (1996). Fluid flow in welding. *Numerical Heat Transfer*, 29(2), 115–129. <https://doi.org/10.1080/10407789608913806>
13. Murphy, A. B. (2001). Thermal plasmas in gas mixtures. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 34(18), R151–R173. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/34/18/201>
14. Murphy, A. B. (2010). The effects of metal vapour in arc welding. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 43(43), 434001. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/43/43/434001>
15. Murphy, A. B. (2011). A self-consistent three-dimensional model of the arc, electrode and weld pool in gas-metal arc welding. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 44(19), 194009. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/44/19/194009>
16. Murphy, A. B. (2013). Influence of metal vapour in arc welding. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 46(22), 224004. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/46/22/224004>
17. Murphy, A. B., Nguyen, V., Feng, Y., Thomas, D. G., & Gunasegaram, D. (2017). A desktop computer model of arc welding. *Applied Mathematical Modelling*, 44, 91–106. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2016.12.002>
18. Patankar, S. V. (1980). *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*. Hemisphere Publishing. <https://doi.org/10.1201/9781482234213>
19. Quinn, T. P., Szanto, M., Gilad, T., & Shai, I. (2005). A coupled arc and droplet model of GMAW. *Science and Technology of Welding and Joining*, 10(1), 113–119. <https://doi.org/10.1179/174329305X29492>
20. Schnick, M., et al. (2010). Modeling of gas-metal arc welding taking into account metal vapour. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 43(43), 434008. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/43/43/434008>
21. Wang, L. L., Wang, H. P., Lu, F. G., Murphy, A. B., & Carlson, B. E. (2014). Numerical analysis of Al vapour effects in GMAW. *Science and Technology of Welding and Joining*, 19(5), 361–368. <https://doi.org/10.1179/1362171814Y.00000000200>
22. Xu, G., Hu, J., & Tsai, H. L. (2009). Three-dimensional modeling of arc plasma in GMAW. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52(7–8), 1709–1724. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2008.09.037>
23. Xu, G., Tsai, H. L., & Hu, J. (2012). 3D plasma arc modeling in GTAW. <https://doi.org/10.1115/1.4006091>
24. Yang, Z., Elmer, J. W., Wong, J., & DebRoy, T. (2000). Welding microstructure modelling. *Welding Journal*, 79, 97s–112s. https://app.aws.org/wj/supplement/WJ_2000_79_03_s97.pdf

Financiación

Los autores no recibieron financiamiento para el desarrollo de esta investigación.

Conflictos de interés

Los autores afirman que no existen conflictos de intereses en este estudio y que se han seguido éticamente los procesos establecidos por esta revista. Además, aseguran que este trabajo no ha sido publicado parcial ni totalmente en ninguna otra revista.

Contribución de autoría

Conceptualización: MRMM
Curación de datos: MRMM
Análisis formal: MRMM
Investigación: MRMM
Metodología: MRMM
Administración del proyecto: MRMM
Recursos: MRMM
Software: MRMM
Supervisión: MRMM
Validación: MRMM
Visualización: MRMM
Redacción – Borrador original: MRMM
Redacción – Revisión y edición: MRMM