

Alianza para el Desarrollo Tecnológico e Innovación en Eficiencia Energética e Hidrógeno

PROGRAMA:

Incremento del Grado de Madurez Tecnológico (TRL) de Sistemas Energéticos Sostenibles y Eficientes para la Transición Energética y la Reindustrialización del País

PROYECTO:

Evaluación del efecto combinado de la autorregeneración de calor y el uso de mezclas hidrógeno/gas natural sobre la eficiencia energética y descarbonización en procesos de fusión de materiales no ferrosos, para pasar de un TRL 8 a un TRL 9

Informe técnico:

Modelos de Machine Learning y Gemelo Digitales aplicados en sistemas de combustión: Revisión de la literatura

ELABORADO POR:

Jousef Karam Acevedo
Alejandro Restrepo Román
Diana Carolina Rodríguez
Iván Darío Bedoya
Andrés A. Amell Arrieta

Revisión y aprobación:

Iván Darío Bedoya Caro
Andrés A. Amell Arrieta

Contenido

	Pag.
1 Introducción.....	3
2 Contexto	4
3 Modelo de aprendizaje automático en sistemas de combustión	5
4 Gemelos digitales en sistemas de combustión.....	6
5 Sinergia entre el aprendizaje automático y los gemelos digitales	7
6 Conclusiones	9
7 Referencias	10

1 Introducción

En la “Convocatoria Ecosistemas en Energía Sostenible, Eficiente y Asequible-2023 – convocatoria 938”, se desarrolla el proyecto “Evaluación del efecto combinado de la autorregeneración de calor y el uso de mezclas hidrógeno/gas natural sobre la eficiencia energética y descarbonización en procesos de fusión de materiales no ferrosos”, con el propósito de avanzar del nivel de madurez tecnológica (TRL) 8 a un TRL 9. Dentro de este marco, se ha desarrollado un gemelo digital del sistema optimizado para predecir su comportamiento en condiciones normales de operación, su respuesta ante cambios en las variables de entrada, su respuesta ante modificaciones en la configuración geométrica y predicciones del comportamiento en escalas mayores o menores del prototipo intervenido.

El avance tecnológico ha impulsado una evolución significativa en la industria de la combustión, especialmente con la adopción de tecnologías emergentes como el Machine Learning y los Gemelos Digitales. Estas herramientas proporcionan nuevas perspectivas para mejorar el rendimiento, optimizar procesos, y aumentar la seguridad y eficiencia en sistemas de combustión, fundamentales en sectores industriales como la generación de energía, la producción de calor y la manufactura. El objetivo del presente informe es compilar el grado de avance en el desarrollo del gemelo digital que se desea desarrollar para el horno de crisol del grupo de investigación GASURE.

El Machine Learning, una rama de la inteligencia artificial ha demostrado ser una herramienta útil para la modelación, predicción y optimización de procesos complejos. En los sistemas de combustión, el Machine Learning contribuye significativamente a la detección temprana de anomalías, la predicción del comportamiento de la zona de reacción, la eficiencia del combustible y la reducción de emisiones contaminantes. Por su parte, los Gemelos Digitales representan modelos virtuales en tiempo real de sistemas físicos. En el contexto de la combustión, estos modelos permiten simular y analizar el rendimiento del sistema bajo diversas condiciones operativas, facilitando la gestión preventiva de los equipos.

El uso combinado de estas tecnologías no solo optimiza los sistemas de combustión, sino que también genera modelos predictivos y prescriptivos que permiten a las industrias mejorar su eficiencia energética, reducir costos operativos y cumplir con normativas ambientales cada vez más estrictas. Actualmente, la industria de la combustión enfrenta desafíos críticos relacionados con la sostenibilidad y la seguridad, y la adopción de Machine Learning y Gemelos Digitales puede ofrecer soluciones que permite abordarlos.

El presente documento abarca la revisión de la literatura académica y científica sobre el uso de Machine Learning y Gemelos Digitales en sistemas de combustión, analizando las principales investigaciones, enfoques metodológicos y casos de estudio aplicados en sistemas térmicos. Los resultados se plantean para ser extrapolados en las tecnologías desarrolladas por el grupo de investigación.

2 Contexto

En la búsqueda de mejorar la eficiencia y minimizar las emisiones en sistemas de combustión, la incorporación de modelos de aprendizaje automático y gemelos digitales ha mostrado un gran potencial. Los avances en la ciencia de datos han permitido desarrollar sistemas que no solo monitorizan, sino que también predicen el comportamiento de la combustión en tiempo real, lo que resulta esencial para optimizar condiciones operativas y mejorar la sostenibilidad [1]. La integración de técnicas como el uso de redes neuronales profundas para clasificar patrones de llama y el modelado basado en datos se ha demostrado efectiva para analizar datos complejos obtenidos de simulaciones y experimentos [2]. Asimismo, el uso de gemelos digitales para crear réplicas virtuales de procesos reales facilita la evaluación dinámica de diferentes configuraciones, permitiendo así una mejor comprensión de las interacciones entre variables [3]. Este enfoque multidisciplinario no solo redefine la forma en que se gestionan los sistemas de combustión, sino que también ofrece un camino claro hacia el cumplimiento de los objetivos de reducción de emisiones.

La integración de modelos de aprendizaje automático y gemelos digitales está revolucionando el ámbito de la combustión, facilitando la optimización de procesos y la reducción de emisiones. Este enfoque permite realizar simulaciones avanzadas que imitan el comportamiento de sistemas físicos en tiempo real, apoyándose en datos obtenidos de múltiples sensores y fuentes experimentales. Por ejemplo, los modelos de redes neuronales artificiales (ANN) han demostrado un rendimiento destacado en la predicción de variables termodinámicas y químicas en el contexto de la combustión, lo que permite mejorar la eficiencia operativa [1]. Asimismo, el uso de gemelos digitales proporciona una plataforma para realizar diagnósticos fiables, ajustando los parámetros operativos en función de las condiciones ambientales y de combustión, lo que resulta en una mejora significativa en la estabilidad y eficiencia de los sistemas combustibles, como se ha evidenciado en estudios recientes [4]. Estos avances no solo impulsan la innovación tecnológica, sino que también promueven prácticas más sostenibles dentro de la industria energética.

La revisión de la literatura presentada en este estudio busca proporcionar una visión comprensiva del estado actual en la aplicación de modelos de aprendizaje automático y gemelos digitales en sistemas de combustión. Este análisis es fundamental para entender cómo estas tecnologías pueden optimizar la eficiencia y la sostenibilidad en la industria energética, un enfoque respaldado por investigaciones previas que destacan el uso de redes neuronales artificiales (ANN) en la predicción de comportamientos termodinámicos complejos [5]. Además, se exploran los desafíos asociados con la implementación de gemelos digitales, como la necesidad de integrar datos provenientes de diversas fuentes y garantizar la precisión de los modelos [2]. Al sintetizar estos conocimientos, se espera no solo identificar vacíos en la investigación existente, sino también ofrecer recomendaciones para futuras direcciones de estudio que fomenten la innovación en procesos de combustión, contribuyendo así a la transición hacia tecnologías más limpias y eficientes [6].

La organización lógica del ensayo es fundamental para guiar al lector a través de los conceptos complejos vinculados al aprendizaje automático y los gemelos digitales en sistemas de combustión. En primer lugar, una introducción efectiva establece el contexto, presentando la relevancia del tema y los objetivos de la revisión. En el desarrollo, se deben abordar las metodologías empleadas en los estudios revisados, como el uso de redes neuronales profundas y técnicas de agrupamiento, destacando su eficacia en la clasificación y predicción de parámetros de combustión. Por ejemplo, el trabajo de Omiotek & Kotyra [4] muestra el potencial de las redes convolucionales para el monitoreo de procesos de combustión, lo que ilustra cómo estas tecnologías pueden contribuir a la sostenibilidad industrial. Finalmente, la conclusión cierra el ensayo con un resumen de los hallazgos más importantes y sugiere direcciones futuras, enfatizando la necesidad de investigación continua y la integración de enfoques innovadores para optimizar los sistemas de combustión.

3 Modelo de aprendizaje automático en sistemas de combustión

La integración de métodos avanzados de modelado en sistemas de combustión ha comenzado a transformar la forma en que se optimizan las operaciones y se reduce el impacto ambiental de estos procesos. Se ha demostrado que el uso de redes neuronales artificiales, junto con algoritmos de optimización como los algoritmos genéticos, mejora significativamente la clasificación y predicción de estados de combustión, logrando una precisión notable al exceder el 90% en algunas aplicaciones [2]. Asimismo, la aplicación de técnicas de aprendizaje automático, como el uso de máquinas de soporte vectorial, ha permitido evaluar con precisión la temperatura de llamas en mezclas de combustibles, destacando su eficacia para fomentar el uso de biocarburantes y reducir emisiones nocivas [7], [8]. A medida que la investigación avanza, la sinergia entre el aprendizaje automático y los modelos digitales promete ofrecer soluciones más robustas y sostenibles, optimizando así la gestión energética y reduciendo emisiones en el sector de la combustión [9].

El avance en los métodos de clasificación y análisis predictivo ha permitido mejorar significativamente la comprensión de los procesos de combustión, destacándose así la relevancia del aprendizaje automático en este campo. Las redes neuronales artificiales (ANNs), en particular, han demostrado ser herramientas eficaces para modelar los comportamientos termodinámicos y cinéticos durante la combustión, como se evidenció en estudios que utilizan algoritmos evolucionados para optimizar el rendimiento de la combustión y reducir emisiones nocivas [10]. Además, diversas investigaciones han señalado la efectividad del aprendizaje supervisado en la estimación de variables clave, como la temperatura de la llama y la relación equivalente, a través del análisis de señales quimioluminiscentes, lo que favorece un monitoreo en tiempo real [3]. Así, la integración del aprendizaje automático en los sistemas de combustión no solo mejora la eficiencia operativa, sino que también contribuye a la sostenibilidad al facilitar la operación de combustores que utilizan combustibles alternativos [11].

La creciente complejidad de los sistemas de combustión y las exigencias ambientales han impulsado el uso de modelos de Machine Learning (ML) para la predicción de parámetros clave en estos procesos. Estos modelos permiten analizar grandes volúmenes de datos, optimizando la identificación de patrones en combustión, como se evidencia en la investigación de Rubio-Rico et al. [1], donde se propone un modelo de gemelo digital que mejora la eficiencia energética y reduce los costos operativos. Además, se ha demostrado que las redes neuronales artificiales (ANN) superan a los métodos tradicionales en la predicción de temperaturas de llama, logrando una correlación significativa y bajos márgenes de error. Estas aplicaciones no solo facilitan un mejor monitoreo en tiempo real, como se discute en estudios sobre sistemas de combustión sin llama [2], sino que también abren nuevas posibilidades para el control y la optimización de procesos industriales, destacando la importancia del ML en la sostenibilidad energética.

A pesar de los avances significativos en la aplicación del Machine Learning (ML) en la investigación sobre combustión, persisten varios desafíos y limitaciones que obstaculizan su adopción generalizada. Uno de los problemas más críticos es la calidad y cantidad de los datos disponibles para entrenar modelos predictivos, ya que una escasez de datos relevantes y etiquetados afecta severamente la precisión de los algoritmos. Estudios como el de [10] destacan cómo la dependencia de datos experimentales limita la capacidad de los modelos para generalizar en diferentes condiciones de combustión. Además, la interpretación de los modelos de AA a menudo carece de transparencia, planteando retos en la validación y la confianza en las predicciones, lo que es fundamental para aplicaciones en sistemas de combustión industrial [2]. Por último, la integración de estos modelos con enfoques tradicionales de ingeniería en combustión es un proceso complejo que requiere más investigación para superar las barreras que limitan la efectividad y robustez de los sistemas de combustión modernos [3].

La implementación de modelos de aprendizaje automático ha demostrado su valía en diversas aplicaciones en sistemas de combustión, evidenciándose en varios estudios de caso. Por ejemplo, un enfoque basado en redes neuronales artificiales (ANN) optimizadas mediante algoritmos genéticos ha mostrado resultados prometedores en la clasificación de patrones de llama, lo cual es crucial para mejorar la eficiencia de la combustión y reducir emisiones contaminantes [1]. Asimismo, en investigación reciente, se desarrolló un sistema de monitoreo que utiliza algoritmos de soporte vectorial para predecir temperaturas de llama en quemadores que funcionan con mezclas de etanol y diésel, logrando una notable precisión en las predicciones [4]. Estos casos no solo subrayan la efectividad de las técnicas de aprendizaje automático, sino que también destacan la necesidad de una integración sólida entre modelos físicos y datos experimentales, un aspecto crítico para la formulación de gemelos digitales en sistemas de combustión [8].

4 Gemelos digitales en sistemas de combustión

La implementación de modelos de gemelos digitales en sistemas de combustión ha demostrado un potencial significativo para optimizar el rendimiento y la eficiencia energética. Este enfoque innovador, alineado con las tendencias actuales de Industry 4.0, permite la simulación en tiempo real de procesos de combustión, facilitando el análisis de variables críticas como las temperaturas y las concentraciones de especies en el gas de combustión, como se discute en [5]. Los gemelos digitales emplean algoritmos de aprendizaje automático para crear representaciones precisas de los sistemas físicos, integrando datos experimentales y simulaciones numéricas, lo que permite a los investigadores ajustar dinámicamente los modelos a las condiciones operativas cambiantes en entornos industriales [12]. Sin embargo, a pesar de sus ventajas, el desarrollo de gemelos digitales efectivos enfrenta desafíos relacionados con la integración de datos y la precisión del modelo [1]. Así, la investigación en esta área continúa siendo crucial para abordar cuestiones de sostenibilidad y eficiencia en la industria energética.

La evolución de la ingeniería moderna ha llevado a la integración de innovadoras tecnologías que optimizan los procesos industriales, destacando entre ellas el concepto de gemelos digitales. Este término se refiere a réplicas virtuales de sistemas físicos, que permiten simular y analizar el comportamiento de estos sistemas a través de la recopilación y análisis de datos en tiempo real. Dichas simulaciones son especialmente valiosas en la ingeniería de combustión, donde se requiere un profundo entendimiento de las dinámicas complejas involucradas. Según [5], los gemelos digitales facilitan la monitorización y el mantenimiento predictivo, mejorando la eficiencia operativa de los sistemas de combustión. A través del uso de datos provenientes de sensores y modelos computacionales, como los descritos en [1], los ingenieros pueden tomar decisiones informadas que impulsan la sostenibilidad en el sector energético. Este enfoque representa un avance significativo en la optimización de procesos, alineándose con los objetivos de la Industria 4.0.

La evolución de las tecnologías de monitoreo ha permitido un avance significativo en la gestión de sistemas de combustión, destacando la integración de gemelos digitales para mejorar la eficiencia operativa y la sostenibilidad. Estos modelos virtuales no solo replican las características físicas de los sistemas de combustión, sino que también permiten la recopilación y análisis de datos en tiempo real, lo que es crucial para la implementación de estrategias de mantenimiento predictivo. Según [5], los gemelos digitales facilitan la monitorización de condiciones operativas, lo que permite anticipar fallos y optimizar el rendimiento del sistema. Este enfoque proactivo reduce costos asociados con tiempos de inactividad no planificados y garantiza un funcionamiento más seguro y eficiente. Además, los modelos basados en inteligencia artificial, como se menciona en [3], pueden mejorar la precisión de las predicciones al analizar patrones complejos en los datos, consolidando aún más el papel vital de los gemelos digitales en la industria de la combustión.

La capacidad de las tecnologías avanzadas para optimizar procesos en sistemas de combustión se ve notablemente aumentada mediante la combinación de gemelos digitales y aprendizaje automático. Por medio de la fusión de datos en tiempo real y modelos predictivos, se logra un diagnóstico más preciso y un control más eficaz de las condiciones operativas. Este enfoque permite la identificación de comportamientos anómalos y la adaptación dinámica de los sistemas, como se observa en estudios donde se integran modelos de redes neuronales artificiales con gemelos digitales para lograr una mayor precisión en la predicción de variables termodinámicas [5]. Además, el uso de técnicas de descomposición adecuada y optimización de sensores ayuda a mejorar la reconstrucción de campos de temperatura, superando la falta de datos [12]. Esta simbiosis entre la simulación física y la modelación basada en datos no solo mejora la eficiencia operativa, sino que también contribuye a la sostenibilidad al reducir las emisiones contaminantes [1].

La implementación de tecnologías avanzadas en sistemas de combustión ha llevado a mejoras significativas en la eficiencia y sostenibilidad de estos procesos. Por ejemplo, el uso de gemelos digitales permite una monitorización en tiempo real y una modelización predictiva en motores de combustión interna, lo que facilita la optimización del rendimiento y el mantenimiento basado en condiciones [5]. Este visión se ha extendido a hornos de combustión flameless, donde los modelos basados en la reducción de orden han mostrado una precisión superior en la predicción de variables termoquímicas y emisiones contaminantes, logrando errores inferiores al 5% en ciertos parámetros [1]. Adicionalmente, en el ámbito de la co-combustión de carbón y biomasa, se ha demostrado que un sistema de monitoreo basado en imágenes de llamas, alimentado por redes neuronales convolucionales, puede clasificar diferentes regímenes de combustión con una precisión superior al 98% [3]. Esto ejemplifica cómo los gemelos digitales pueden mejorar tanto la seguridad como la eficiencia en aplicaciones industriales

5 Sinergia entre el aprendizaje automático y los gemelos digitales

En el contexto de la optimización de sistemas de combustión, la integración de modelos de aprendizaje automático y gemelos digitales ofrece prometedoras sinergias que pueden transformar la manera en que se gestionan y anticipan los procesos. Esta convergencia permite la creación de réplicas virtuales altamente precisas que reflejan el comportamiento real del sistema, como se observa en la investigación sobre la predicción de temperaturas de llama usando redes neuronales artificiales (ANN) [5]. Al combinar datos experimentales y simulaciones, los gemelos digitales facilitan el monitoreo en tiempo real, mientras que el aprendizaje automático proporciona las herramientas para analizar grandes volúmenes de datos e identificar patrones ocultos que afectan la eficiencia y las emisiones [1]. Estos abordajes pueden no solo mejorar la modelización de la combustión, sino también optimizar las estrategias de mantenimiento predictivo, haciendo que la operación de los sistemas sea más sostenible y rentable [8]. Este avance representa un paso significativo hacia la digitalización y la sostenibilidad en el ámbito industrial.

La integración del aprendizaje automático en los gemelos digitales representa un avance significativo en la optimización de sistemas, especialmente en el contexto de la combustión. Este rumbo se fundamenta en la capacidad de los modelos de aprendizaje automático para analizar conjuntos de datos masivos y complejos, permitiendo la identificación de patrones que serían difíciles de discernir mediante métodos tradicionales. Por ejemplo, el uso de redes neuronales artificiales y algoritmos evolutivos, como se discute en [4], permite a los gemelos digitales predecir el comportamiento de los sistemas de combustión bajo diferentes condiciones operativas. Además, el aprendizaje automático facilita la adaptación dinámica de los gemelos digitales a cambios en la configuración del sistema, mejorar la precisión y eficiencia, como se resalta en estudios sobre la optimización de la predicción de temperatura de llamas [8]. Al implementar algoritmos de optimización, los

gemelos digitales pueden mejorarse continuamente, lo que resulta en sistemas más robustos y sostenibles en la industria energética.

El desarrollo e implementación de tecnologías avanzadas en los sistemas de combustión ha demostrado un potencial significativo para transformar la eficiencia operativa y minimizar las emisiones contaminantes. La combinación de modelos de aprendizaje automático y gemelos digitales permite una optimización precisa de los procesos de combustión, lo que se traduce en una gestión más eficiente de los recursos energéticos y una reducción de los desechos generados. Por ejemplo, la investigación destaca que el uso de redes neuronales artificiales (ANN) y algoritmos evolutivos puede lograr una mejora en la clasificación de los regímenes de combustión, aumentando así la eficiencia [1]. Además, mediante el análisis de imágenes de llamas y el monitoreo en tiempo real de condiciones de operación, los sistemas integrados pueden ajustar dinámicamente los parámetros de combustión, contribuyendo a una reducción del 10% en las emisiones de NOx [4]. Esta sinergia tecnológica no solo aborda los desafíos ambientales contemporáneos, sino que también promueve un enfoque hacia la sostenibilidad industrial.

La convergencia de tecnologías emergentes como el aprendizaje automático y los gemelos digitales se perfila como una tendencia crucial en la optimización de sistemas de combustión. Este enfoque innovador no solo mejorará la eficiencia operativa, sino que también promoverá la sostenibilidad al reducir emisiones nocivas. La capacidad de los gemelos digitales para simular escenarios en tiempo real, combinada con modelos de aprendizaje automático que analizan grandes volúmenes de datos, puede conducir a pronósticos más precisos en procesos de combustión complejos [12]. Por ejemplo, los métodos de agrupamiento y las redes neuronales artificiales han demostrado su eficacia en la clasificación de patrones de llama, lo que es vital para el diagnóstico en tiempo real [1]. De cara al futuro, la integración de series temporales y la fusión de datos a partir de sensores remotos se consolidarán como herramientas vitales para mejorar la adaptabilidad y el rendimiento de los sistemas de combustión [4].

La efectividad de los modelos de aprendizaje automático en entornos industriales, especialmente en sistemas de combustión, depende en gran medida de cómo se integran los datos y de la precisión de los modelos utilizados. A pesar de los avances en la tecnología de gemelos digitales, como se menciona en [12], aún existen considerables desafíos relacionados con la sincronización y la alineación de conjuntos de datos provenientes de múltiples fuentes, lo que puede comprometer la validez del modelo. La variabilidad inherente a las condiciones de operación y la complejidad de los procesos físicos, tal como se resalta en [1], amplifican estas dificultades al requerir una representación precisa y dinámica del sistema. Además, el uso de algoritmos como el aprendizaje de máxima entropía y redes neuronales profundas, aunque prometedor, a menudo enfrenta obstáculos en la calibración debido a la escasez de datos etiquetados y a la complejidad computacional, lo que conlleva a limitaciones en la generalización y aplicabilidad de los modelos [11]. Por lo tanto, mejorar la integración de datos y la robustez del modelo se convierte en un aspecto fundamental para optimizar las aplicaciones de combustión y promover la sostenibilidad energética.

6 Conclusiones

El avance en la aplicación de modelos de aprendizaje automático y gemelos digitales en sistemas de combustión ha demostrado ser un campo prometedor que puede transformar la eficiencia y la sostenibilidad en la industria energética. Las investigaciones sugieren que la integración de métodos avanzados como las redes neuronales artificiales y la optimización mediante algoritmos genéticos ofrece mejoras significativas en la precisión y la reducción de costos operacionales en comparación con los métodos tradicionales [1]. Adicionalmente, la creación de gemelos digitales permite una representación precisa y dinámica de los procesos de combustión, facilitando la simulación y el análisis en tiempo real [4]. No obstante, persisten desafíos substanciales, tales como la necesidad de una mayor adaptabilidad y la integración de datos en entornos industriales complejos [2]. Con un enfoque en superar estas limitaciones, se proyecta que la combinación de estas tecnologías conducirá a un futuro más eficiente y menos contaminante en la gestión de sistemas de combustión.

La revisión de la literatura revela la prometedora integración de modelos de machine learning y gemelos digitales en sistemas de combustión, destacando su capacidad para optimizar procesos y reducir emisiones. Se ha demostrado que técnicas de aprendizaje automático, como las redes neuronales artificiales y los algoritmos de regresión, logran niveles de precisión superiores en la predicción de temperaturas de llama y propiedades de combustibles, como se explora en [8]. Además, la implementación de gemelos digitales permite una monitorización en tiempo real de parámetros operativos, facilitando una toma de decisiones más informada y adaptable, como se indica en [2]. Sin embargo, existen retos relacionados con la calidad y la disponibilidad de datos, así como la necesidad de una integración efectiva entre métodos tradicionales y algoritmos avanzados [2]. En conjunto, estos hallazgos subrayan el potencial inexplorado de estas tecnologías y la urgencia de abordar sus limitaciones para avanzar hacia sistemas de combustión más eficientes y sostenibles.

La creciente integración de modelos de aprendizaje automático y gemelos digitales en sistemas de combustión señala un cambio paradigmático en la industria energética, particularmente en la optimización de procesos y la reducción de emisiones. Las investigaciones futuras deben centrarse en la mejora de la calidad de los datos utilizados para entrenar estos modelos, específicamente en el desarrollo de técnicas de extracción de características que faciliten una mayor precisión en la predicción de comportamientos complejos de combustión, como se indica en [1]. Además, la implementación de métodos basados en densidad de datos como el mapeo de Kriging, utilizado en modelos de gemelos digitales, puede ofrecer nuevas oportunidades para la simulación en tiempo real de condiciones variadas en sistemas de combustión [8]. En términos de aplicaciones industriales, la capacidad de los modelos de aprendizaje automático para adaptarse dinámicamente a condiciones cambiantes puede transformar la gestión del rendimiento en aplicaciones industriales, desde la monitorización de la estabilidad de la llama hasta la optimización de la mezcla de combustible [4].

La integración de modelos de aprendizaje automático y gemelos digitales abre un horizonte prometedor para la optimización de sistemas de combustión en diversos contextos industriales. Este enfoque permite la creación de modelos predictivos que no solo mejoran la eficiencia operativa, sino que también reducen las emisiones contaminantes, contribuyendo a la sostenibilidad ambiental. Por ejemplo, [1] destaca cómo el uso de modelos de aprendizaje automático, como el Support Vector Machine (SVM), ha demostrado ser efectivo para predecir temperaturas de llama en mezclas de combustible, lo cual es fundamental para el control preciso de procesos de combustión. Asimismo, los gemelos digitales permiten la simulación en tiempo real y la calibración de sistemas, como se evidencia en [8], donde la implementación de modelos reducidos ofreció una precisión superior en la predicción de variables termodinámicas. Estos avances en la tecnología subrayan la necesidad de continuar investigando y desarrollando estrategias que integren estas herramientas para maximizar su impacto positivo en la industria.

7 Referencias

- [1] G. Aversano, M. Ferrarotti, and A. Parente, “Digital twin of a combustion furnace operating in flameless conditions: reduced-order model development from CFD simulations,” *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 38, no. 4, pp. 5373–5381, 2021, doi: 10.1016/j.proci.2020.06.045.
- [2] A. Rubio-Rico, F. Mengod-Bautista, A. Lluna-Arriaga, B. Arroyo-Torres, and V. Fuster-Roig, “The Industrial Digital Energy Twin as a Tool for the Comprehensive Optimization of Industrial Processes,” *Processes*, vol. 11, no. 8, p. 2353, Aug. 2023, doi: 10.3390/pr11082353.
- [3] S. Shin, M. Kwon, S. Kim, and H. So, “Prediction of Equivalence Ratio in Combustion Flame Using Chemiluminescence Emission and Deep Neural Network,” *Int J Energy Res*, vol. 2023, pp. 1–10, Sep. 2023, doi: 10.1155/2023/3889951.
- [4] J. C. Gómez, F. Hernández, C. A. C. Coello, G. Ronquillo-Lomelí, and A. Trejo, “Flame Classification through the Use of an Artificial Neural Network Trained with a Genetic Algorithm,” in *Mexican International Conference on Artificial Intelligence*, 2013. [Online]. Available: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:33382470>
- [5] A. A. Malozemov, V. N. Bondar, V. V. Egorov, and G. A. Malozemov, “Digital Twins Technology for Internal Combustion Engines Development,” in *2018 Global Smart Industry Conference (GloSIC)*, IEEE, Nov. 2018, pp. 1–6. doi: 10.1109/GloSIC.2018.8570162.
- [6] L. Zhou, Y. Song, W. Ji, and H. Wei, “Machine learning for combustion,” *Energy and AI*, vol. 7, p. 100128, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.egyai.2021.100128.
- [7] Z. Omiotek and A. Kotyra, “Flame Image Processing and Classification Using a Pre-Trained VGG16 Model in Combustion Diagnosis,” *Sensors*, vol. 21, no. 2, p. 500, Jan. 2021, doi: 10.3390/s21020500.
- [8] Y. JIN and Y. ZHU, “Application of machine learning algorithms for the prediction of flame temperature in small-scale burner fueled with ethanol-diesel fuel blends,” *Journal of Thermal Science and Technology*, vol. 17, no. 1, pp. 21–00390, 2022, doi: 10.1299/jtst.21-00390.
- [9] W. Yu, P. Patros, B. Young, E. Klinac, and T. G. Walmsley, “Energy digital twin technology for industrial energy management: Classification, challenges and future,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 161, p. 112407, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.rser.2022.112407.
- [10] P. Compais, J. Arroyo, M. Á. Castán-Lascorz, J. Barrio, and A. Gil, “Detection of slight variations in combustion conditions with machine learning and computer vision,” *Eng Appl Artif Intell*, vol. 126, p. 106772, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.engappai.2023.106772.
- [11] M. P. Tokarev, S. S. Abdurakipov, O. A. Gobyrov, A. V. Seredkin, and V. M. Dulin, “Monitoring of combustion regimes based on the visualization of the flame and machine learning,” *J Phys Conf Ser*, vol. 1128, p. 012138, Nov. 2018, doi: 10.1088/1742-6596/1128/1/012138.
- [12] A. Procacci, R. Amaduzzi, A. Coussement, and A. Parente, “Adaptive digital twins of combustion systems using sparse sensing strategies,” *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 39, no. 4, pp. 4257–4266, 2023, doi: 10.1016/j.proci.2022.07.029.

- [13] J. M. Reumschüssel, J. G. R. von Saldern, B. Ćosić, and C. O. Paschereit, “Multi-Objective Experimental Combustor Development Using Surrogate Model-Based Optimization,” in *Volume 3B: Combustion, Fuels, and Emissions*, American Society of Mechanical Engineers, Jun. 2023. doi: 10.1115/GT2023-102832.
- [14] J. M. Reumschüssel, J. G. R. von Saldern, B. Ćosić, and C. O. Paschereit, “Data-driven optimization of a gas turbine combustor: A Bayesian approach addressing NO_x emissions, lean extinction limits, and thermoacoustic stability,” *Data-Centric Engineering*, vol. 5, p. e32, Nov. 2024, doi: 10.1017/dce.2024.29.
- [15] F. Wu, H. Zhou, T. Ren, L. Zheng, and K. Cen, “Combining support vector regression and cellular genetic algorithm for multi-objective optimization of coal-fired utility boilers,” *Fuel*, vol. 88, no. 10, pp. 1864–1870, Oct. 2009, doi: 10.1016/j.fuel.2009.04.023.
- [16] M. Aravindan *et al.*, “Unlocking clean gas with hydrogen: A combustion optimization study,” *Results in Engineering*, vol. 23, p. 102363, Sep. 2024, doi: 10.1016/j.rineng.2024.102363.