

Análisis bibliométrico: Carburización

Bibliometric analysis: Carburizing

Ángel J. Morales Robles ^a, Martín Ortiz Domínguez ^b, Edgar Cardoso Legorreta ^c, Arturo Cruz Avilés ^d, Quirino Estrada ^e

Abstract:

Thermochemical carburizing treatment is a surface hardening process employed to enhance wear resistance in various steel and ferrous alloys. This article presents a comprehensive literature review on the subject, encompassing publications from 1967 to 2024. The metadata of 4,590 publications, extracted from Scopus, were meticulously analyzed. A statistical examination of this data was conducted using the R environment, employing the Bibliometrix, Biblioshiny, and TALL AI platforms, which facilitate the exploration of research trajectories through bibliometric indicators. An annual growth rate of 6.6% was noted, with China (1,485 articles), India, and the United States recognized as the most prolific countries. Additionally, J. G. Li emerged as the leading author with a total of 43 articles. The foremost journals identified in this field include Materials Science Forum, JMRT, and Surface and Coatings Technology. Furthermore, thematic analysis, supported by artificial intelligence, was instrumental in identifying the predominant topics within the literature, focusing on industrial techniques, tribological properties, and computational modeling of the carburizing process. These topics serve as a foundation for recognizing current research trends. The findings of this review provide a thorough overview of the scientific and technological advancements in carburization, its industrial applications, and the emerging trends that shape present-day research endeavors.

Keywords:

Carburizing, Scopus, Bibliometrix, Tall AI

Resumen:

El tratamiento termoquímico de carburización es un proceso de endurecimiento superficial empleado para aumentar la resistencia al desgaste en diferentes aceros y aleaciones ferrosas. Este artículo presenta una revisión bibliográfica sobre el tema de la literatura publicada entre 1967 y 2024, para lo cual se analizaron los metadatos de 4590 publicaciones extraídos de Scopus. Se realizó un análisis estadístico de los datos en el entorno R mediante las plataformas Bibliometrix, Biblioshiny y TALL AI las cuales permiten estudiar el desarrollo de las líneas de investigación mediante indicadores bibliométricos. Se observó un crecimiento anual del 6.6 %, destacando China (1485 artículos), India y EE. UU. como países más productivos, y J. G. Li como autor más prolífico (43 artículos). Las revistas líderes fueron Materials Science Forum, JMRT y Surface and Coatings Technology. El análisis temático asistido por inteligencia artificial permitió identificar los principales tópicos abordados en la literatura, con énfasis en técnicas industriales, propiedades tribológicas y modelado computacional del proceso, temas que se tomaron como referencia para identificar las tendencias actuales de investigación. Los resultados ofrecen una visión integral del desarrollo científico y tecnológico de la carburización, sus aplicaciones industriales y las tendencias emergentes que orientan la investigación actual.

Palabras Clave:

^a Autor de Correspondencia, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Área Académica de Ciencias de la Tierra | Pachuca de Soto-Hidalgo | México, <https://orcid.org/0009-0003-6810-6565>, Email: mo298963@uaeh.edu.mx

^b Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Escuela Superior de Ciudad Sahagún | Ciudad Sahagún-Hidalgo | México, <https://orcid.org/0000-0003-4475-9804>, Email: martin_ortiz@uaeh.edu.mx

^c Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Área Académica de Ciencias de la Tierra | Pachuca de Soto-Hidalgo | México, <https://orcid.org/0000-0003-2893-2064>, Email: edgarc@uaeh.edu.mx

^d Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Escuela Superior de Ciudad Sahagún | Ciudad Sahagún-Hidalgo | México, <https://orcid.org/0000-0003-0455-1646>, Email: arturo_cruz8085@uaeh.edu.mx

^e Universidad Autónoma de Ciudad Juárez | Instituto de Ingeniería y Tecnología | Ciudad Juárez-Chihuahua | México, <https://orcid.org/0000-0003-0623-3780>, Email: quirino.estrada@uacj.mx

Introducción

Las ciencias de los materiales han mostrado avances importantes en las últimas décadas, impulsados por la preocupación global por el cambio climático, el consumo energético y la necesidad de mejorar la eficiencia en los procesos de producción. Se reporta que aproximadamente el 30 % de la energía generada en todo el mundo se pierde por efectos de la fricción y el desgaste. Estas pérdidas han representado cerca de 100 000 millones de euros (Holmberg, K., & Erdemir, 2017). Debido a esta preocupación se han impulsado avances en ingeniería de superficies (PVD, nitruración, borurización) orientados a desarrollar materiales y procesos que mejoren la resistencia al desgaste y minimicen la fricción entre piezas en contacto. En este trabajo se presenta una revisión de la literatura basada en una metodología novedosa de análisis de datos bibliográficos mediante plataformas digitales especializadas en bibliometría.

Existen diversas técnicas de endurecimiento superficial que incrementan la resistencia al desgaste de los materiales de ingeniería. En este trabajo se aborda el estudio de los tratamientos termoquímicos, los cuales modifican la composición química de la superficie mediante la incorporación de elementos como el carbono, el boro o el nitrógeno, formando compuestos con propiedades mecánicas superiores. Entre estos procesos, la carburización es ampliamente utilizada para mejorar la resistencia al desgaste y a la fatiga en componentes fabricados con aleaciones ferrosas. El mecanismo de endurecimiento se basa en la saturación de la superficie con átomos de carbono, los cuales difunden y ocupan sitios intersticiales en la red cristalina del acero en su fase austenítica. Este proceso genera un gradiente de concentración de carbono que penetra progresivamente hacia el interior del material, o que favorece la formación de estructuras duras durante el tratamiento térmico posterior.

En un proceso industrial típico, el componente se expone a un ambiente rico en carbono, utilizando gases como metano o propano dentro de hornos que alcanzan temperaturas entre 850 y 950 °C, como se ilustra en la Figura 1a. A estas temperaturas, el acero se transforma en austenita, fase que presenta una elevada difusividad para el carbono (Cermak & Kral, 2014). Simultáneamente, el gas carburante se disocia, liberando átomos de carbono que se adsorben sobre la superficie del material, tal como se muestra en la Figura 1b. La combinación de gradientes de potencial y energía térmica impulsa la difusión de los átomos hacia el interior del sustrato, estableciendo un

perfil de concentración que se desarrolla con el tiempo de tratamiento (Liang et al., 2021).

En una segunda etapa se realiza el endurecimiento a partir de un temple, que consiste en enfriar rápidamente la pieza bajo condiciones controladas utilizando diferentes medios como el aceite tal como se ilustra en la **Figura 1c**. Este enfriamiento induce la transformación de la austenita enriquecida en carbono en martensita, una fase extremadamente dura que define la capa endurecida en función del perfil de carbono (Zhang et al., 2017).

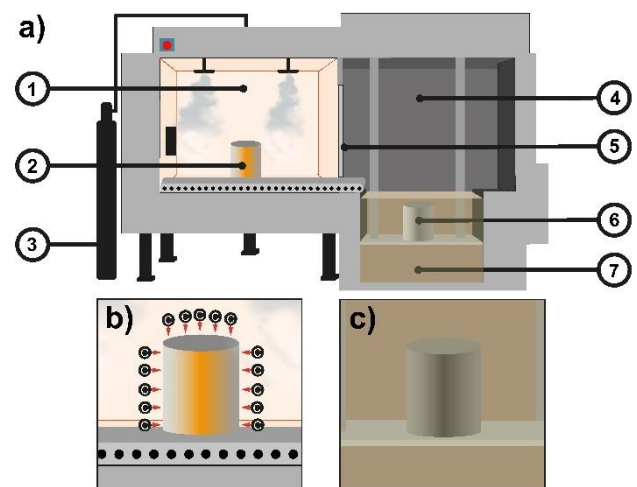


Figura 1. Esquema del proceso de carburización y temple en etapas: a) horno de dos etapas (1) cámara de carburización, (2) pieza de trabajo, (3) fuente de gas carburante, (4) cámara de enfriamiento, (5) compuerta, (6) pieza enfriada, (7) aceite; (b) Saturación de átomos de carbono en la superficie del componente; (c) muestra templada en aceite. Fuente: Elaboración propia.

Durante el proceso de endurecimiento por carburización y temple el material tratado experimenta una serie de transformaciones microestructurales que dependen del contenido de carbono y de las condiciones térmicas. Inicialmente según se ilustra en la Figura 2a, el sustrato presenta una microestructura, compuesta por ferrita (α), perlita y cementita típica de un acero de bajo carbono. En la Figura 2b se aprecia que, al elevar la temperatura del sustrato hasta la región austenítica (generalmente entre 727 °C y 912 °C, según la composición), toda la estructura se transforma en austenita (γ) (Pohjonen et al., 2018). Asimismo, cuando el sustrato está en contacto con un medio saturado en carbono, se inicia la difusión de átomos de carbono desde la superficie hacia el interior (Höglund & Ågren, 2010).

En la Figura 2c se observa la zona de difusión en la que se forma un gradiente de concentración en el que las capas externas del sustrato se enriquecen en carbono formando austenita carburizada, mientras que el núcleo conserva la concentración de carbono inicial. Finalmente, en la Figura 2d se observa la transformación derivada del enfriamiento rápido o temple, en donde la austenita de alta concentración en carbono en la superficie se transforma en martensita, una fase dura y frágil de estructura

tetragonal centrada en el cuerpo (BCT), mientras que, en el núcleo, donde la concentración de carbono es menor, se puede formar martensita de menor dureza o incluso bainita y austenita retenida. Esta evolución da lugar a una microestructura con un recubrimiento superficial endurecido y un núcleo tenaz, mejorando significativamente la resistencia al desgaste y a la fatiga del componente tratado (Liu et al., 2024).

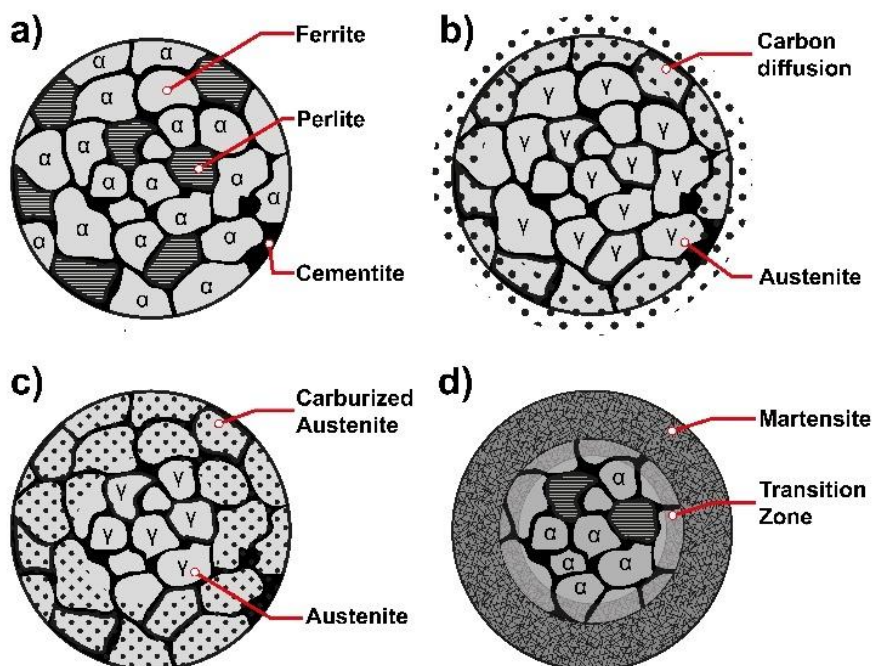


Figura 2. Evolución esquemática de las fases durante el tratamiento de carburización: (a) microestructura original del acero (ferrita, perlita, cementita), (b) difusión de carbono en fase austenítica, (c) formación de austenita enriquecida en carbono, y (d) microestructura final tras el temple, con martensita en la superficie y una zona de transición hacia el núcleo. Fuente: Elaboración propia.

Durante el temple, las trayectorias térmicas experimentadas por las distintas regiones del componente determinan el tipo de transformación de fase que ocurre a partir de la austenita previamente estabilizada durante la carburización. Tal como se observa en la Figura 3, la superficie enfría rápidamente, evitando las regiones de transformación difusional del diagrama TTT y alcanzando directamente la zona de formación de martensita. Este enfriamiento abrupto, sumado al alto contenido de carbono en esa región, favorece la formación de una martensita dura y frágil, responsable del incremento en la resistencia al desgaste. En contraste, el núcleo presenta una velocidad de enfriamiento menor, lo que permite el cruce parcial por las zonas de transformación difusional, originando microestructuras mixtas que pueden incluir bainita o incluso pequeñas cantidades de ferrita y perlita, dependiendo de la severidad del enfriamiento y del

gradiente de carbono (Liscic et al., 2013). Esta diferenciación microestructural está en consonancia con el diseño funcional de piezas tratadas por carburización y temple, ya que la dureza superficial obtenida por la formación de martensita se complementa con un núcleo más dúctil y tenaz, capaz de absorber impactos y evitar la propagación de grietas (Wallis, 2010).

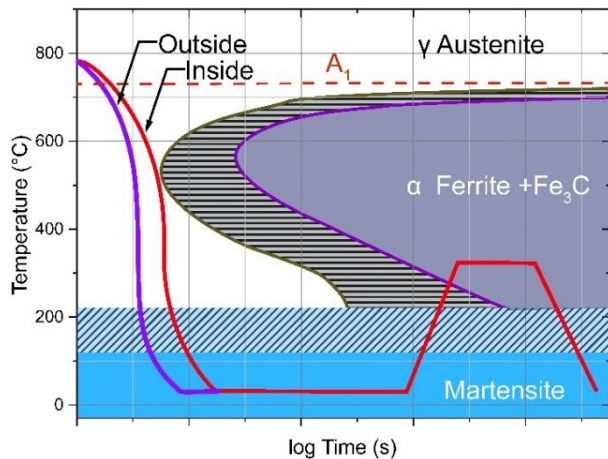


Figura 3. Diagrama TTT con curvas de enfriamiento correspondientes a la superficie (línea negra) y al núcleo (línea magenta) durante el proceso de temple. Debido a la mayor concentración de carbono, la superficie presenta una temperatura de inicio de martensita (M_s) más baja y una velocidad de enfriamiento suficiente para transformarse directamente en martensita. En contraste, el núcleo, con menor contenido de carbono y enfriamiento más lento, puede atravesar las regiones de transformación difusional, dando lugar a la formación parcial de perlita o bainita antes de la aparición de martensita (Liscic et al., 2013).

Técnicas de carburización

El proceso de carburización comprende diversos procesos con aplicaciones industriales, clasificados según el medio enriquecido en carbono: sólido, líquido, gaseoso o plasma.

Entre los métodos realizados en medios sólidos, se encuentra el de carburización por empaquetamiento, en donde las piezas de acero se colocan en un contenedor resistente a altas temperaturas junto con una mezcla de carbón activado y activadores como carbonatos de calcio, bario o sodio (Hosseini & Li, 2016). Posteriormente, el sistema se somete a un calentamiento hasta alcanzar temperaturas en el rango de estabilidad de la austenita (850–950 °C) durante periodos de hasta 10 horas. A estas temperaturas, los activadores se descomponen generando CO_2 , el cual reacciona con el carbón para formar monóxido de carbono (CO). Este gas se disocia al contacto con la superficie metálica, liberando átomos de carbono que saturan la superficie y difunden hacia el interior del material impulsados por la energía térmica, incrementando la concentración de carbono superficial. En una etapa posterior, el componente carburización se enfría rápidamente desde la temperatura austenítica, provocando la transformación de la capa superficial en martensita, lo que confiere alta dureza y resistencia al

desgaste (Dossett & Totten, 2013). La proporción de activador en la mezcla carburante afecta su rendimiento y esto se demostró empleando combinaciones alternativas con residuos orgánicos carbonizados, como cáscara de coco, han mostrado buena eficacia en carburización sólida, incrementando la dureza superficial al usarse junto con activadores como Na_2CO_3 (Santoso et al., 2024).

Una alternativa a la técnica de empaquetamiento es la carburización en pasta, la cual consiste en recubrir las superficies de acero con una mezcla densa que contiene una fuente de carbono, un aglutinante y un activador. En un estudio con acero ASTM A516, se empleó una pasta formulada con carbonatos y agua, alcanzándose durezas de hasta 70 HRB y espesores de capa entre 23 y 105 μm tras un tratamiento a 700–800 °C durante 6 horas, mostrando la eficacia del proceso incluso a temperaturas moderadas (Alias et al., 2013). Esta técnica resulta especialmente útil para tratar componentes de gran tamaño o para aplicar el tratamiento de forma localizada, cuando no se requiere carburizar todo el componente.

Dentro de los procesos de carburización en medios líquidos, destaca el de carburización por baño de sales fundidas, que emplea mezclas de compuestos iónicos inorgánicos que, al fundirse a alta temperatura, forman un medio conductor compuesto por iones libres. Estas sales actúan como vehículo y fuente reactiva de carbono, favoreciendo la saturación superficial y su difusión en el acero. Se utilizan mezclas de CaCl_2 , Na_2CO_3 o NaCl con fuentes de carbono como CaC_2 o SiC , fundidas a temperaturas superiores a 900 °C. En estas condiciones, se generan especies reactivas de carbono, como C_2^{2-} , que se disuelven en el baño y se transportan eficazmente hacia la superficie metálica, promoviendo una difusión uniforme y acelerada, lo que permite formar capas endurecidas de alta calidad (Chan & Singh, 2020). Este tratamiento se realiza entre 850 y 900 °C en atmósfera inerte, utilizando mezclas eutécticas de sales como CaCl_2 , Na_2CO_3 y NaCl , combinadas con agentes carbonosos como CaC_2 o SiC (Ren et al., 2021). En un estudio reciente, se carburizó un acero AISI 1018 en un baño de sales compuesto por 75 % Na_2CO_3 , 15 % NaCl y 10 % SiC , para posteriormente realizar un temple alcanzando dureza superficial de 795 HV y una profundidad de 0.95 mm en 3 horas (Hasan et al., 2020). En otro estudio se empleó una mezcla de CaCl_2 con 2 % en peso de CaC_2 para carburizar titanio puro, logrando capas de TiC de hasta 105 μm en 8 horas y durezas superficiales mayores a 1200 HV. El crecimiento de la capa siguió una ley parabólica con una energía de activación de 1058 kJ/mol, lo que indica que el proceso está gobernado por la difusión de carbono en la capa formada (Zhao et al., 2023).

Los procesos de carburización en gas son ampliamente utilizados en la industria por su viabilidad en producción a gran escala. Esta técnica emplea gases como CO , CO_2 o CH_4 a temperaturas entre 850 y 950 °C, donde se disocian en especies reactivas de carbono (átomos, radicales o iones como C_2^{2-}). Estas se adsorben en la superficie del acero y se difunden al interior mediante un mecanismo intersticial (Rowan & Keil, 2013). En un estudio sobre el acero AISI 8620, carburización en atmósferas de CO , H_2 y CH_4 a 850–950 °C durante 4–10 horas se generaron capas endurecidas de hasta 1.3 mm después de realizar un temple, obteniendo una microestructura compuesta por martensita y austenita retenida con durezas mayores a 698 HV, mientras que el núcleo conservó su tenacidad debido al bajo contenido de carbono (Kwietniewski et al., 2013).

Evaluación tribológica de aceros y aleaciones tratadas termoquímicamente

El tratamiento termoquímico de carburización busca mejorar propiedades como la dureza superficial, la resistencia al desgaste y a la fatiga en componentes mecánicos. Diversos estudios han evaluado su comportamiento tribológico mediante ensayos en condiciones controladas, generando datos que respaldan su aplicación en elementos sometidos a fricción, cargas cíclicas o medios abrasivos. La tribología, centrada en el estudio del desgaste, la fricción y la lubricación entre superficies, emplea técnicas como el ensayo lineal recíproco, pin-on-disk y pruebas disco-plano, que simulan contactos reales y permiten cuantificar parámetros como el coeficiente de fricción, la profundidad de desgaste y la pérdida de volumen.

Ensayo de desgaste

El ensayo de desgaste lineal recíproco es una técnica tribológica empleada para evaluar la resistencia al desgaste y el comportamiento por fricción de materiales bajo condiciones de deslizamiento alternante. Consiste en aplicar una carga normal constante sobre una bola dura que oscila repetidamente sobre la superficie del material, permitiendo simular condiciones de fricción en seco o con lubricación. En un estudio sobre un acero En 353 carburización, se evaluaron tres tratamientos térmicos: enfriamiento en aceite, criogenia superficial (193 K, 5 h) y criogenia profunda (77 K, 24 h). Los resultados mostraron que la criogenia superficial incrementó la resistencia al desgaste en un 85 % respecto al tratamiento convencional, mientras que la criogenia profunda mejoró este valor en un 372 % y 152 % frente al convencional y superficial, respectivamente. Estas mejoras se atribuyeron a la transformación completa de la austenita retenida en martensita y a una distribución más fina de carburos. Las

pruebas se realizaron en seco con cargas de 60–80 N y velocidades de 1.94–4.44 m/s (Bensely et al., 2005).

En otro estudio tribológico se utilizó el método pin-on-disk, para evaluar el desgaste adhesivo del acero AISI 1020 carburización con diferentes formulaciones orgánicas. Las probetas se ensayaron contra un disco de acero de 58 HRC, con una carga de 1 kg, velocidad de 7.1 m/s y condiciones variables de carga y tiempo. La mezcla con 90 % de hueso de res y 10 % de carbonato de calcio mostró el mejor desempeño, con una dureza superficial de 720 HV, capa de 2.32 mm y baja tasa de desgaste. En contraste, el carbón vegetal puro generó capas más delgadas (1.1 mm) y menor dureza (530 HV), aumentando la pérdida de material. Se observó que el desgaste crece con el tiempo y la carga, pero disminuye al aumentar la dureza superficial (Hassan, 2015).

Además, se realizó un ensayo de deslizamiento recíproco en seco mediante tribómetro bola sobre disco, empleando una bola AISI 52100 como contra-cuerpo para estudiar el comportamiento de un hierro sinterizado carburización por plasma a 500 °C durante 3 h en atmósfera de H_2/CH_4 , en el que se generó una capa de cementita ($\sim 0.70 \mu\text{m}$) que redujo la porosidad y la rugosidad ($S_q \approx 0.02 \mu\text{m}$) y alcanzó una dureza de 1264 HV, con incrementos de 2.85 y 23.9 veces en H/E^* y H^3/E^{*2} , respectivamente, una disminución del 45 % en la tasa de desgaste y un coeficiente de fricción estabilizado en 0.40 (de Souza Lamim et al., 2022). Se evaluó el comportamiento tribológico de un acero de bajo carbono antes y después de una carburización por empaquetamiento a 950 °C durante 1 h, mediante ensayo de deslizamiento alternante con bola 440C (6 mm), cargas de 10–25 N, frecuencia de 10 Hz y recorridos de 5–10 mm por 30 minutos. Tras el tratamiento, se observó una reducción notable en el coeficiente de fricción (de 0.079 a 0.048) y en la profundidad de desgaste (de $56.2 \mu\text{m}$ a $3.8 \mu\text{m}$) bajo lubricación esto se atribuyó a la capa superficial carbonizada y al efecto protector del lubricante (Vellanki et al., 2022).

Finalmente se evaluó la resistencia al desgaste de la aleación Zr-2.5Nb tratada por carburización y borurización mediante ensayo tribológico lineal recíproco en seco, usando una bola de Si_3N_4 (6.35 mm), 20 N de carga, 2 Hz de frecuencia, carrera de 5 mm y duración de 900 s. Las capas carburizadas, compuestas por ZrC y NbC, alcanzaron durezas de 308 HV_{0.2} y redujeron la profundidad de desgaste de $119 \mu\text{m}$ a $58 \mu\text{m}$, con una pérdida volumétrica de solo 0.012 mm^3 . Las capas boruradas mostraron mejor resistencia ($<46 \mu\text{m}$, 337 HV_{0.2}), aunque con mayor rugosidad y variabilidad en

el coeficiente de fricción, atribuida a la heterogeneidad de la capa (Song et al., 2024).

Evaluación de dureza superficial

En la caracterización de tratamientos termoquímicos como el de carburización, la medición de dureza superficial es esencial para analizar las propiedades mecánicas de la capa formada. Técnicas como la microindentación y la nanoindentación permiten evaluar la resistencia a la deformación plástica aplicando cargas controladas mediante indentadores de diamante. Aunque existen múltiples geometrías, los más utilizados son los de tipo piramidal: Vickers (base cuadrada) en microdureza y Berkovich (base triangular) en nanoindentación. Mientras que la técnica Vickers requiere observar ópticamente la huella residual, la nanoindentación registra en tiempo real la curva carga-desplazamiento, lo que permite además estimar el módulo elástico (Qian et al., 2005).

Un estudio evidenció que en aceros para cementación NiCrMo2-2, NiCrMo7 y NiCr6-4, la microdureza aumentó con el contenido perlítico, alcanzando hasta 171 HV tras un recocido a 945 K por 15 horas. Mediante microscopía óptica y microindentación Vickers, se observó que los aceros con menor contenido de azufre (30 y <20 ppm) presentaron mayor desgaste por craterización durante el torneado. En cambio, el acero con 280 ppm de azufre, más blando, facilitó la fragmentación de la viruta y mejoró la vida útil del filo de corte (Ånmark & Björk, 2016). En otro estudio se evaluó el tratamiento de carburización al vacío de acero a 950 °C combinada con tratamientos térmicos previos al temple para ajustar la microestructura del núcleo sin afectar la superficie. Se aplicaron ciclos intercríticos a 775 °C (0, 5 y 15 min) y austenización completa a 860 °C. La dureza se midió mediante microindentación Vickers aplicando una carga de 500 gf durante 15 segundos a lo largo de secciones transversales pulidas. Los resultados indicaron que todos los tratamientos mantuvieron una dureza superficial cercana a 700 HV, mientras que la del núcleo varió entre 220 y 270 HV, dependiendo de la proporción de ferrita, bainita y martensita generada. Esta estrategia permitió mejorar la tenacidad sin comprometer la resistencia al desgaste (Farivar et al., 2019).

También se estudió un acero 16CrMnH cementado y austenitizado entre 820–920 °C, seguido de temple en aceite a 180 °C. La capa endurecida presentó martensita, carburos y hasta 30 % de austenita retenida con partículas de 2–3 µm. La microdureza disminuyó de 800 HV_{0.2} en la superficie a 450 HV_{0.2} en el núcleo, en concordancia con valores de nanodureza entre 12 y 7 GPa. En zonas con ≈5.5 GPa se observaron eventos pop-in durante

nanoindentación, asociados a transformaciones de fase inducidas por carga, lo que evidencia la influencia de la austenita retenida en la respuesta mecánica localizada (Chen et al., 2022). El fenómeno pop-in, se observa como un salto en la curva carga-desplazamiento, señala el inicio de la deformación plástica y, en materiales frágiles como el GaAs, se vincula con la aparición repentina de dislocaciones inducidas por tensiones concentradas (Leipner et al., 2001). En un estudio reciente, se evaluaron las propiedades de dureza de capas obtenidas por carburización y borurización en aleaciones Zr-2.5Nb. Los resultados mostraron que la carburización generó durezas en el rango de 234 a 308 HV_{0.2}, mientras que la borurización alcanzó valores superiores, llegando hasta 337 HV_{0.2}. Sin embargo, esta última presentó mayor variabilidad, lo que sugiere una menor uniformidad en la capa tratada (Song et al., 2024).

Simulación de procesos

En el estudio de procesos termoquímicos por difusión, como la carburización, el modelado computacional ha evolucionado mediante enfoques matemáticos avanzados que describen el comportamiento de átomos intersticiales (C, N, B), considerando factores como temperatura, tiempo de tratamiento, composición del sustrato, presión parcial y potencial químico. Estos modelos suelen basarse en las ecuaciones de Fick para representar la difusión, integrándose con análisis estructurales y térmicos a través de simulaciones multifísicas por elementos finitos (FEM). Herramientas especializadas como DICTRA, DANTE, SimCarb y COSMAP, junto con plataformas como ANSYS, ABAQUS y COMSOL Multiphysics, permiten llevar a cabo estos análisis.

Recientemente, la inteligencia artificial se ha incorporado como complemento predictivo y de optimización, empleando redes neuronales, máquinas de soporte vectorial y algoritmos evolutivos para estimar propiedades como dureza, fases, espesor de capa y para afinar parámetros de proceso, reduciendo así los ensayos físicos requeridos. En el estudio se integró un modelo de difusión con análisis por elementos finitos para simular tratamientos de carburización y nitruración en aceros. Se evaluaron muestras de acero AISI 5115 y 1020 tratadas a 930 °C, así como aceros aleados nitrurados entre 500 y 540 °C en atmósferas de NH₃-H₂-N₂.

El modelo incluyó la resolución de ecuaciones de difusión, transformación de fases, y estimación de tensiones internas y perfiles de microdureza. Los resultados simulados mostraron buena concordancia con los datos experimentales, permitiendo identificar zonas

martensíticas y capas de nitruros como Fe_4N y Fe_{2-3}N , lo que demuestra la utilidad del enfoque para anticipar propiedades superficiales en procesos difusivos complejos (Cavaliere et al., 2009). En un estudio sobre carburización a baja presión (LPC), se modeló la difusión de carbono y la evolución microestructural en un acero martensítico 14Cr14Co13Mo4 tratado a 890 °C con acetileno como gas carburizante. El análisis experimental incluyó microscopía óptica, EBSD y difracción de rayos X, mientras que la simulación se llevó a cabo mediante Thermo-Calc y DICTRA, resolviendo ecuaciones de difusión multicomponente bajo equilibrio termodinámico local.

El modelo consideró una matriz austenítica con carburos dispersos y aplicó un factor de corrección para la movilidad del carbono. La simulación reprodujo con precisión la distribución de carbono y la precipitación de carburos observadas experimentalmente, evidenciando la capacidad del enfoque para optimizar parámetros del proceso (Yin et al., 2019). Un enfoque multifísico para simular la carburización al vacío en acero 20CrMo fue implementado mediante COSMAP, integrando transferencia de calor, difusión de carbono, transformación de fases y evolución de dureza. El modelo empleó la segunda ley de Fick, la ecuación de Koistinen–Marburger para la formación de martensita y una función empírica que relaciona dureza con contenido de carbono y microestructura.

Se consideraron tanto la etapa de austenización como el enfriamiento asistido por gas. La validación experimental, realizada a 930 °C con C_2H_2 a 3 kPa, mostró una desviación menor al 6 % en profundidad de capa y al 5 % en dureza respecto a los datos simulados. El ciclo óptimo identificado consistió en 42 min de carburización y 105 min de difusión, con una concentración superficial de 0.80 %C y una capa endurecida de 0.90 mm (Guo et al., 2021). Un estudio reciente modeló numéricamente el proceso de carburización en vacío y temple en gas a alta presión aplicado al acero Pyrowear 53, integrando cálculos termodinámicos con CALPHAD (JMatPro) y simulaciones multifísicas en Simufact Forming y DEFORM3D.

El modelo consideró la movilidad del carbono en función de la temperatura y composición, así como el ajuste

inverso de los coeficientes de intercambio térmico durante el enfriamiento gaseoso. Las simulaciones replicaron con precisión los perfiles térmicos, microestructurales y de dureza, mostrando una dureza superficial de 760 $\text{HV}_{0.5}$ y una profundidad endurecida de 1.1 mm, sin diferencias relevantes entre temple en gas y en aceite (Iżowski et al., 2023). En un enfoque reciente, se utilizó una red neuronal profunda entrenada con datos generados mediante simulaciones en COSMAP, las cuales modelaron fenómenos acoplados como difusión de carbono, transformaciones de fase y desarrollo de tensiones internas. A partir de 213 entradas iniciales, se construyó una base expandida con más de dos millones de combinaciones, lo que permitió reducir significativamente los tiempos de cálculo respecto al método por elementos finitos, pasando de siete horas a aproximadamente una. Las predicciones del modelo mostraron errores inferiores al 5 %, lo que confirma la eficacia del aprendizaje profundo para optimizar procesos termoquímicos (Honghao Jia et al., 2023).

Como ejemplo, se presenta una simulación multifísica desarrollada en COMSOL Multiphysics 6.3 mediante el módulo *Metal Processing*, en la que se modelan las etapas de carburización (Figura 4a) y temple (Figuras 4b–d) de un engranaje de acero AISI 5115. En la primera etapa (Figura 4a), se simula la difusión de carbono a 930 °C durante 12 horas, generando un perfil de concentración que alcanza hasta 1.25 % C en la superficie y desciende hasta 0.17 % en el núcleo. Posteriormente, se simula el enfriamiento en aceite a 70 °C. En la Figura 4b, se observa la transformación martensítica dependiente del contenido local de carbono, con una fracción de martensita superior al 95 % en la superficie y del 50–60 % en el centro.

La Figura 4c muestra la variación espacial de la temperatura de inicio de martensita (M_s), que oscila entre 310 °C (zonas ricas en carbono) y 420 °C (zonas internas). Finalmente, la Figura 4d ilustra el campo de esfuerzos residuales tras el temple, destacando una zona superficial en compresión de hasta –720 MPa, concentrada en la raíz de los dientes, lo cual resulta beneficioso para mejorar la resistencia a la fatiga (Salama et al., 2025).

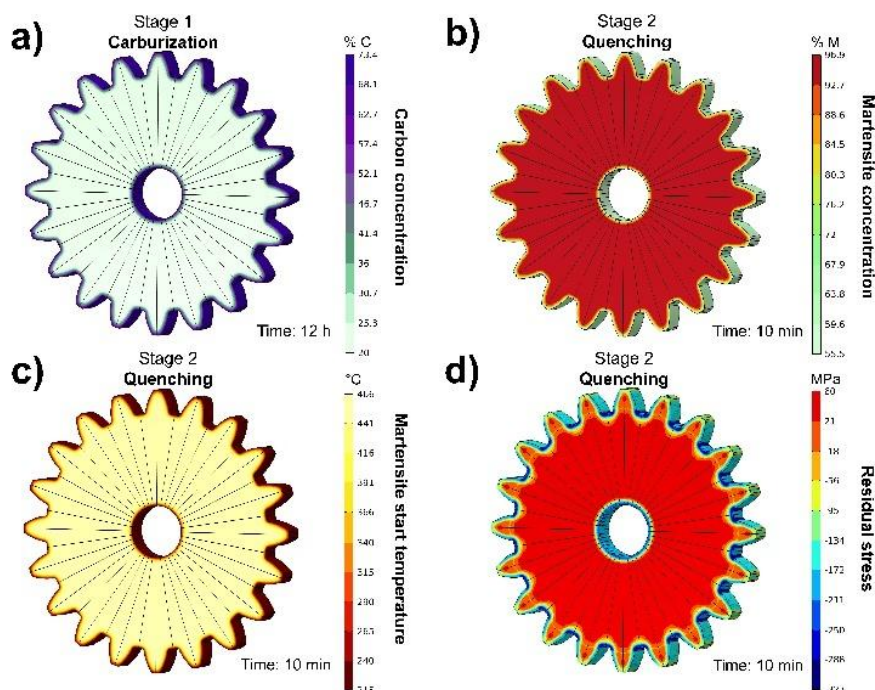


Figura 4. Simulación multifísica del proceso de carburización y temple de un engranaje de acero AISI 5115, realizada en COMSOL Multiphysics 6.3 utilizando el módulo Metal Processing. (a) Distribución del carbono tras 12 h a 930 °C, con una concentración superficial de hasta 1.25 % C. (b) Fracción de martensita generada tras el enfriamiento en aceite, con valores >95 % en la superficie. (c) Distribución espacial de la temperatura de inicio de martensita (M_s), influenciada por el gradiente de carbono. (d) Campo de esfuerzos residuales, con zonas superficiales en compresión superiores a -700 MPa, lo cual mejora la resistencia a la fatiga. Fuente: Elaboración propia.

Este artículo revisa de manera detallada el tratamiento termoquímico de carburización, abarcando los fundamentos fisicoquímicos, las técnicas industriales aplicadas, efectos microestructurales y tribológicos generados y los avances destacados en simulación y optimización del proceso. Además, se incorpora un análisis bibliométrico para identificar las principales tendencias de investigación, autores relevantes y tecnologías emergentes en el área. De forma complementaria, se emplean herramientas de inteligencia artificial para realizar un análisis léxico y temático del corpus científico, lo que permite una comprensión más detallada y actual del desarrollo y las perspectivas de esta técnica en el campo de la ingeniería de superficies.

Materiales y métodos

Esta sección describe los fundamentos metodológicos del estudio enfocado en el análisis bibliométrico y temático de la literatura científica relacionada con el tratamiento termoquímico de carburización y cuyo objetivo es examinar de manera integral la evolución histórica y el desarrollo de las publicaciones más relevantes en el

campo. Con este objetivo, se cuantificó la producción científica y se analizaron las tendencias temporales, se identificaron de las principales áreas temáticas, y se exploraron las redes de colaboración académica que se han establecido entre autores, instituciones y países. Además, se intentaron identificar líneas de investigación abiertas, vacíos temáticos y tendencias de investigación recientes.

En este estudio se adoptó un enfoque metodológico mixto que combina técnicas cuantitativas de análisis bibliométrico, mediante *Bibliometrix* y *Biblioshiny*, con métodos cualitativos de minería de texto y análisis semántico asistido por inteligencia artificial, a través de modelos de lenguaje a gran escala (LLM) integrados en *TALL AI*. Estas herramientas de código abierto han sido desarrolladas en el entorno de programación R y funcionan como interfaces interactivas que facilitan la exploración, visualización e interpretación de datos bibliográficos y textuales mediante enfoques complementarios.

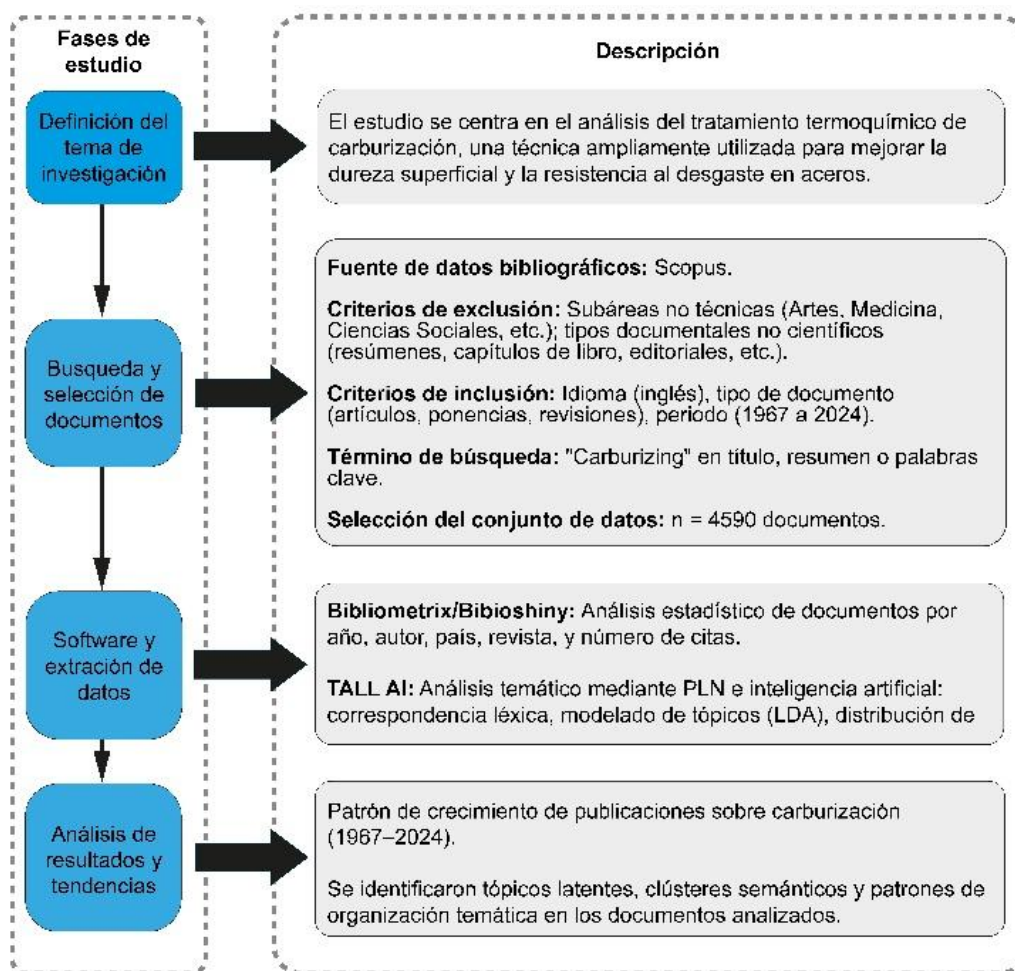


Figura 5. Fases metodológicas del estudio bibliométrico y temático sobre carburización. Fuente: Elaboración propia.

La metodología de trabajo se puede resumir en cuatro fases principales que se muestran en la Figura 5, a continuación, se describe a detalle cada etapa:

1. **Definición del enfoque temático:** se delimitó el campo de investigación en torno al tratamiento termoquímico de carburización, utilizado para aumentar la dureza superficial y la resistencia al desgaste en diferentes aleaciones ferrosas.
2. **Búsqueda y selección de documentos:** se construyó un corpus bibliográfico a partir de la base de datos Scopus, mediante una ecuación de búsqueda a partir de la palabra "carburizing" considerando títulos, resúmenes o palabras clave. A través de la plataforma de Scopus se filtraron únicamente artículos científicos publicados en idioma inglés en el periodo de 1967 a 2024. Finalmente se excluyeron subáreas no relacionadas con la ingeniería y ciencias de los materiales como medicina, ciencias sociales, artes y biología molecular. Como resultado se obtuvo un conjunto final de **4590 documentos**.
3. **Extracción y análisis de datos:** Se empleó el paquete Bibliometrix en el entorno RStudio y su interfaz Biblioshiny para calcular indicadores bibliométricos como el crecimiento anual de publicaciones, el promedio de citas por documento, los autores más productivos y el grado de colaboración internacional. Además, se utilizó la plataforma TALL AI para realizar un análisis de correspondencia léxica, con el fin de identificar clústeres semánticos; un modelado de temas mediante Latent Dirichlet Allocation (LDA) para detectar tópicos latentes; y un análisis de distribución temática de los documentos a partir de los valores de probabilidad θ , que reflejan su pertenencia a cada tópico identificado.
4. **Evaluación de resultados y tendencias:** se estudiaron los patrones de evolución científica en el tema de carburización, considerando indicadores cuantitativos como la tasa de crecimiento anual, el número de citas por publicación, las coautorías internacionales, así como la producción por afiliaciones y países. De

forma complementaria, a través de la plataforma **TALL AI**, se identificaron las líneas temáticas predominantes y tendencias semánticas emergentes mediante técnicas de modelado de tópicos y agrupación de términos clave, enriqueciendo el análisis cuantitativo con una caracterización estructural del contenido investigado.

Recolección de datos

Para la recolección de datos se realizó una consulta en Scopus, una base bibliográfica multidisciplinaria en línea desarrollada por la editorial Elsevier, la cual es considerada una de las más grandes y fiables del mundo, y en ella se indexan citas, resúmenes y metadatos de artículos científicos, conferencias, libros y revisiones revisadas por pares de todas las áreas de conocimiento. La interfaz permitió diseñar una estrategia de búsqueda centrada en el término “carburizing”, aplicado en campos específicos como el título, el resumen y las palabras clave de los documentos indexados.

En esta etapa se buscó mejorar la calidad del corpus aplicando criterios de exclusión mediante los filtros de Scopus. Se consideraron solamente artículos científicos, capítulos de libro y libros completos, publicados en el idioma inglés en el periodo de 1967 a 2024. Y se excluyeron áreas temáticas no relacionadas de forma objetiva con el campo de estudio como publicaciones en áreas temáticas de medicina, biología, ciencias sociales, artes, psicología, farmacología y veterinaria. Como resultado se obtuvo un corpus de **4590** documentos con los metadatos de cada publicación, fue exportado en un archivo BibTex para su procesamiento en Bibliometrix y Biblioshiny. Cabe señalar que el análisis se basa únicamente en la base de datos Scopus, lo cual puede excluir trabajos relevantes publicados en otras fuentes.

Análisis bibliométrico con Bibliometrix y Biblioshiny

Bibliometrix es un paquete de código abierto en el entorno estadístico R; fue desarrollado por Massimo Aria con colaboración con Corrado Cuccurullo en 2017 y está diseñado para realizar análisis bibliométricos y estudios de mapeo científico de forma flexible y compatible con otros paquetes estadísticos programados en R (Aria & Cuccurullo, 2017). Esta herramienta permite importar, limpiar, analizar y visualizar datos bibliográficos provenientes de bases como Scopus, Web of Science o PubMed, e incluye funciones para calcular indicadores de productividad científica, colaboración, citas, análisis de palabras clave, coautorías, co-citación y acoplamiento

bibliográfico. La interfaz Biblioshiny, basada en Shiny, facilita el uso interactivo de este paquete para usuarios sin amplios conocimientos en programación, lo que lo vuelve una herramienta accesible para investigadores de diversas disciplinas.

Para este estudio, se procesó el archivo en formato BibTeX exportado desde la base de datos Scopus, el cual contenía un total de 4590 documentos relacionados con el tratamiento termoquímico de carburización. Este archivo fue cargado e interpretado en la plataforma Biblioshiny. Como parte del análisis cuantitativo inicial, se identificaron 4590 documentos científicos publicados entre 1967 y 2024, distribuidos en 963 fuentes (revistas, libros, capítulos y congresos). La base de datos mostró una tasa de crecimiento anual del 6.6 %, una edad promedio de los documentos de 19.8 años y un promedio de 12.32 citas por publicación, lo cual evidencia un crecimiento continuo en la literatura especializada. Se contabilizaron 8816 autores únicos, con un promedio de 3.48 coautores por documento y un 10.31 % de coautorías internacionales, reflejando un nivel moderado de colaboración global. Además, se extrajeron 15,499 palabras clave adicionales (Keywords Plus) y 5649 palabras clave asignadas por los autores, que sirvieron como insumo para los análisis temáticos y semánticos posteriores (ver Tabla 1).

Tabla 1. Resumen de resultados del análisis bibliométrico.

Descripción	Resultados
Intervalo de tiempo	1967:2024
Fuentes (Revistas, Libros, etc.)	963
Documentos	4590
Tasa de crecimiento anual (%)	6.6
Edad promedio de los documentos	19.8
Citas promedio por documento	12.32
Palabras clave adicionales (Keywords Plus)	15499
Palabras clave del autor	5649
Autores	8816
Autores de documentos con un solo autor	464
Documentos con un solo autor	737
Coautores por documento	3.48
% de coautorías internacionales	10.31

Análisis temático asistido por inteligencia artificial con TALL AI

Para complementar el análisis bibliométrico cuantitativo, se llevó a cabo un análisis temático asistido por inteligencia artificial utilizando la plataforma TALL AI. Esta herramienta forma parte de la familia de análisis textual en R, y está diseñada para ofrecer una interfaz interpretativa avanzada basada en modelos de lenguaje de gran escala (LLM) y técnicas de procesamiento de lenguaje natural (PLN). TALL AI está integrado en el entorno estadístico R a través de su arquitectura basada en Shiny, y puede trabajar archivos generados por Bibliometrix y Biblioshiny, lo que permite una continuidad metodológica.

Mediante la plataforma Biblioshiny se procesó el archivo BibTeX para generar un corpus de datos compatible con TALL AI, con los 4590 documentos exportados de Scopus. Una vez cargado en la plataforma TALL AI, se aplicó un filtro interno títulos de los documentos como unidad de análisis. Posteriormente, se efectuó un muestreo aleatorio simple del 30 %, equivalente a 1377 registros, con el propósito de optimizar el procesamiento computacional sin comprometer la representatividad temática.

Este nuevo subconjunto textual fue sometido a un análisis lingüístico, que incluyó tres etapas fundamentales: (i) tokenización, para segmentar el texto en unidades léxicas mínimas o tokens; (ii) lematización, que transformó cada palabra a su forma base para eliminar variaciones morfológicas; y (iii) etiquetado gramatical (PoS tagging), que asignó una categoría sintáctica a cada término, permitiendo una interpretación contextual más precisa. Estos procedimientos garantizaron una estructura semántica clara para los análisis temáticos desarrollados a continuación.

Una vez estructurado y preprocesado el corpus, se aplicaron técnicas de análisis semántico asistidas por inteligencia artificial. En particular, se realizó un modelado temático con el algoritmo Latent Dirichlet Allocation (LDA), el cual permitió identificar tópicos latentes en la literatura sobre carburización, agrupando documentos y palabras según patrones de coocurrencia semántica. Cada tópico se definió por un conjunto representativo de términos clave, mientras que cada documento fue asociado a dichos tópicos con base en su contenido, facilitando así la delimitación de líneas de investigación predominantes en el campo estudiado.

Resultados y discusión

En esta sección se presentan los principales hallazgos encontrados a partir del análisis bibliométrico y temático aplicado al corpus de 4590 documentos sobre el

tratamiento termoquímico de carburización, extraídos de la base de datos Scopus. Los resultados se organizaron en dos bloques complementarios:

1. **Análisis cuantitativo:** mediante *Bibliometrix* y su interfaz *Biblioshiny*, orientado a caracterizar la producción científica, los actores más relevantes y las dinámicas de colaboración; y
2. **Análisis temático:** asistido por inteligencia artificial, realizado con la plataforma *TALL AI*, que permitió identificar patrones semánticos, tópicos de investigación y clústeres temáticos mediante técnicas avanzadas de procesamiento de lenguaje natural.

Estos indicadores **permiten** al lector comprender no solo la evolución del área, sino también identificar las temáticas con mayor dinamismo, el impacto y la organización del conocimiento, así como las principales líneas que estructuran la literatura científica sobre carburización.

Como resultado de la estrategia de búsqueda aplicada en la base de datos Scopus, se obtiene un corpus compuesto por 4590 documentos científicos relacionados con el tratamiento termoquímico de carburización, publicados en el periodo de 1967 a 2024. Estos documentos abarcan una amplia gama de disciplinas dentro del ámbito de la ciencia e ingeniería de materiales. La distribución temática se presenta en la Figura 6 y muestra que la mayoría de las publicaciones se concentran en el área de Ciencias de los Materiales (1483 documentos), seguida de Metalurgia (1078), Mecánica (514), Física (489), Recubrimientos (347) y Físico química (241). Además, un subconjunto de 296 documentos fue clasificado en categorías diversas bajo la etiqueta "Otros". Esta clasificación temática permite contextualizar el enfoque multidisciplinario del estudio y fundamenta los análisis posteriores tanto a nivel bibliométrico como semántico.

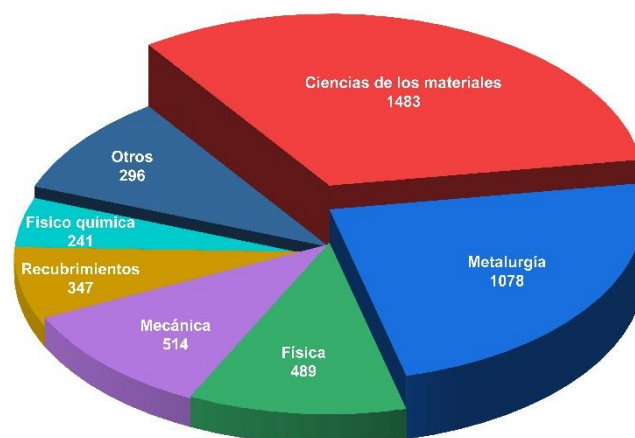


Figura 6. Distribución de los artículos por área temática.
Fuente: Elaboración propia.

Evolución de la producción científica por año

El desarrollo de la investigación científica sobre el tratamiento termoquímico de carburización muestra una tendencia sostenida al alza entre 1967 y 2024 (ver Figura 7). En las primeras décadas, la producción anual fue limitada, con menos de 50 publicaciones por año. A partir de la década de 1990 se observa un crecimiento progresivo, alcanzando un primer pico en 2007 con 168

publicaciones. En las últimas dos décadas, la producción se ha mantenido relativamente constante, con un promedio de 125 artículos por año, aunque con una aceleración notable a partir de 2016, culminando en 191 publicaciones en 2024. En conjunto, el área presenta una tasa de crecimiento anual promedio del 6.6 %, lo que demuestra un interés creciente y sostenido por parte de la comunidad científica.

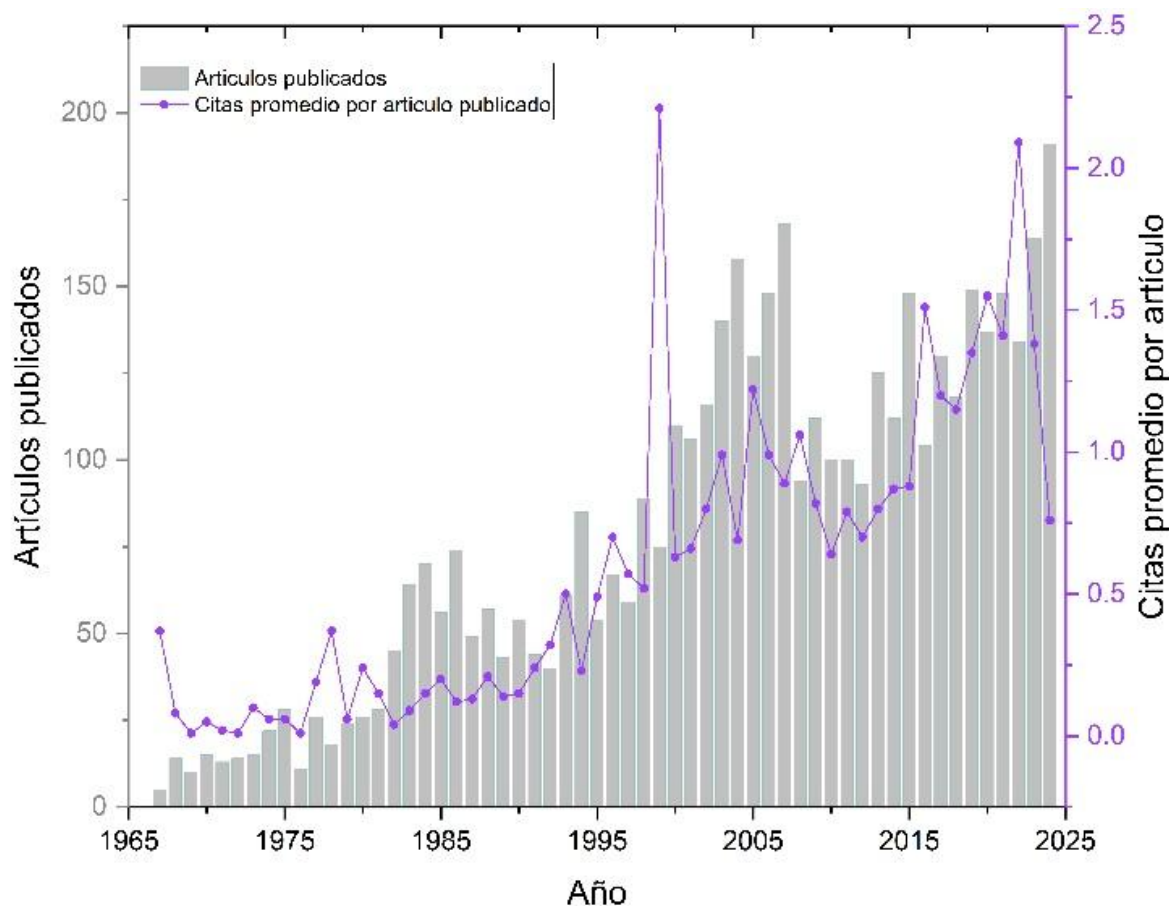


Figura 7. Evolución anual de publicaciones sobre carburización (1967–2024). En gris: número de artículos publicados; en púrpura: citas promedio por artículo. Fuente: Elaboración propia.

Además de la producción también se consideró el impacto de las publicaciones; en la Figura 7 se muestra la variabilidad en el número de citas promedio por artículo publicado, con valores que oscilan entre 0.5 y 2.2 citas por artículo. Se observa un pico inusual en 1999, con un promedio superior a 2.2 citas por publicación, lo cual sugiere la publicación de trabajos importantes ese año. Un caso representativo es el artículo de revisión que introdujo de forma sistemática el concepto de plasma electrolytic deposition (PED) y detalló los fundamentos físicos, electroquímicos y tecnológicos de procesos como la oxidación electrolítica por plasma (PEO) y la saturación electrolítica por plasma (PES) (Yerokhin et al., 1999). Este

trabajo se convirtió en una de las referencias más citadas en el área, consolidando terminología, normalizando metodologías y abriendo nuevas líneas de investigación. La elevada citación de este artículo es un ejemplo claro de cómo ciertas publicaciones, por su carácter fundacional y su relevancia interdisciplinaria, pueden influir de forma desproporcionada en las métricas bibliométricas anuales y en la evolución temática del campo.

La Figura 8 muestra un análisis comparativo entre el número de publicaciones y el índice h de las principales revistas científicas en el campo de la ingeniería de superficies. Las barras grises representan la cantidad total

de artículos publicados, mientras que las moradas indican el índice h asociado. Los datos muestran que *Surface and Coatings Technology* destaca como la revista con mayor productividad (175 publicaciones) y el índice h más alto (43), seguida por *Materials Science and Engineering: A* (44 publicaciones, $h=25$) e *ISIJ International* (68 publicaciones, $h=20$). Este gráfico permite identificar las revistas más influyentes y utilizadas en investigaciones relacionadas con tratamientos superficiales como la carburización, nitruración y recubrimientos, siendo una herramienta útil para orientar futuras publicaciones científicas.

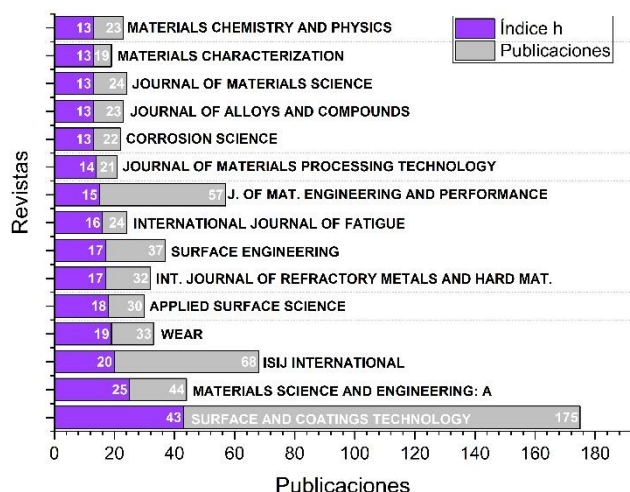


Figura 8. Revistas con mayor número de publicaciones en carburización (1967–2024). En gris: total de artículos; en púrpura: índice h . Fuente: Elaboración propia.

Autores más productivos

La Figura 9 presenta a los diez autores más productivos en el estudio de la carburización, destacando a Li Y (43 publicaciones), Grabke HJ y Zhang J (41), seguidos de Zhang Y, Wang X, Wang J, Liu Y, Wang Z, Li Z y Sun Y, con entre 31 y 38 artículos. Además del volumen de publicaciones, se muestra el índice h , que refleja el impacto sostenido de cada investigador. En este aspecto, destacan Grabke HJ, Li Y y Sun Y, esto sugiere su liderazgo y relevancia en la generación de conocimiento sobre tratamientos termoquímicos.

La productividad científica en el área del tratamiento termoquímico de carburización ha estado concentrada en un conjunto de investigadores que destacan por su volumen de publicaciones.

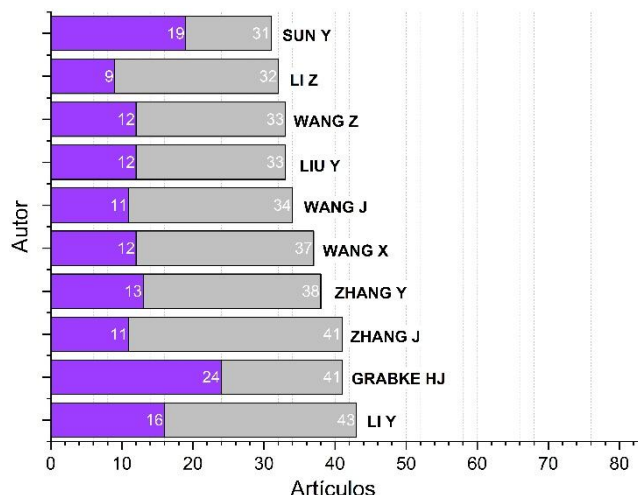


Figura 9. Autores más productivos en el campo de la carburización (1967–2024). Las barras grises indican el número total de artículos publicados, mientras que las barras moradas representan el índice h , que refleja la cantidad de artículos con al menos h citas. Fuente: Elaboración propia.

Además de identificar a los autores más productivos, se evaluó la distribución general de la productividad científica mediante la ley de Lotka (Figura 10). Esta distribución muestra que aproximadamente el 70 % de los autores han publicado un solo artículo sobre carburización, mientras que solo una fracción muy pequeña ha contribuido con más de diez publicaciones. Este patrón refleja una concentración típica del conocimiento, donde pocos investigadores lideran el campo y la mayoría realiza contribuciones puntuales.

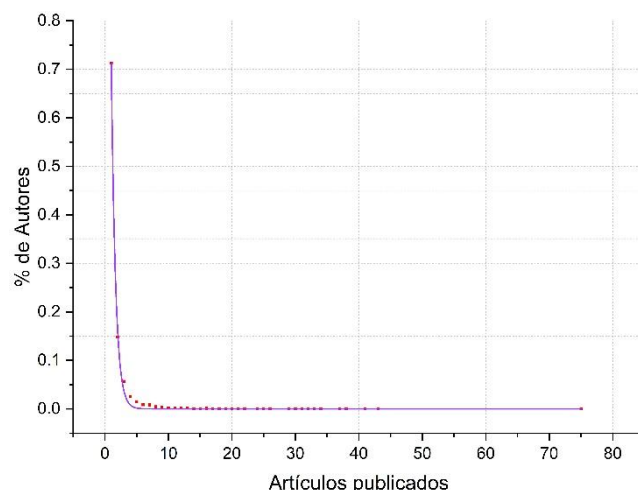


Figura 10. Distribución de productividad de los autores en el campo de carburización, de acuerdo con la ley de Lotka. La mayoría de los investigadores han publicado un solo artículo, mientras que solo un pequeño porcentaje

presenta una producción elevada. Fuente: Elaboración propia.

Con el fin de complementar el análisis de productividad, se examinó la evolución temporal de la actividad científica de los autores más relevantes, considerando tanto la continuidad de sus publicaciones como su impacto académico. La Figura 11 representa esta trayectoria en el campo de la carburización entre 1978 y 2024. Cada burbuja corresponde a una publicación; su tamaño refleja el número de artículos publicados por año, mientras que la intensidad del color azul indica el promedio de citas anuales, lo que permite visualizar simultáneamente la productividad y el impacto relativo en el tiempo.

La Figura 12 muestra el mapa de coautoría generado a partir de los documentos seleccionados, donde cada nodo

representa un autor individual y los enlaces indican relaciones de colaboración entre ellos. El tamaño de los nodos refleja la productividad científica (número de publicaciones), mientras que los colores agrupan a los autores en comunidades de colaboración, determinadas mediante algoritmos de detección de clústeres. Se observa una red central densa (en verde) que agrupa a los autores más activos y colaborativos del campo, junto con varios clústeres periféricos menos conectados, demostrando la existencia de núcleos de investigación consolidados y otros grupos más aislados. Esta configuración sugiere que el tema ha sido abordado principalmente por un conjunto de investigadores que mantienen vínculos estrechos entre sí, mientras que otros grupos trabajan de manera más independiente.

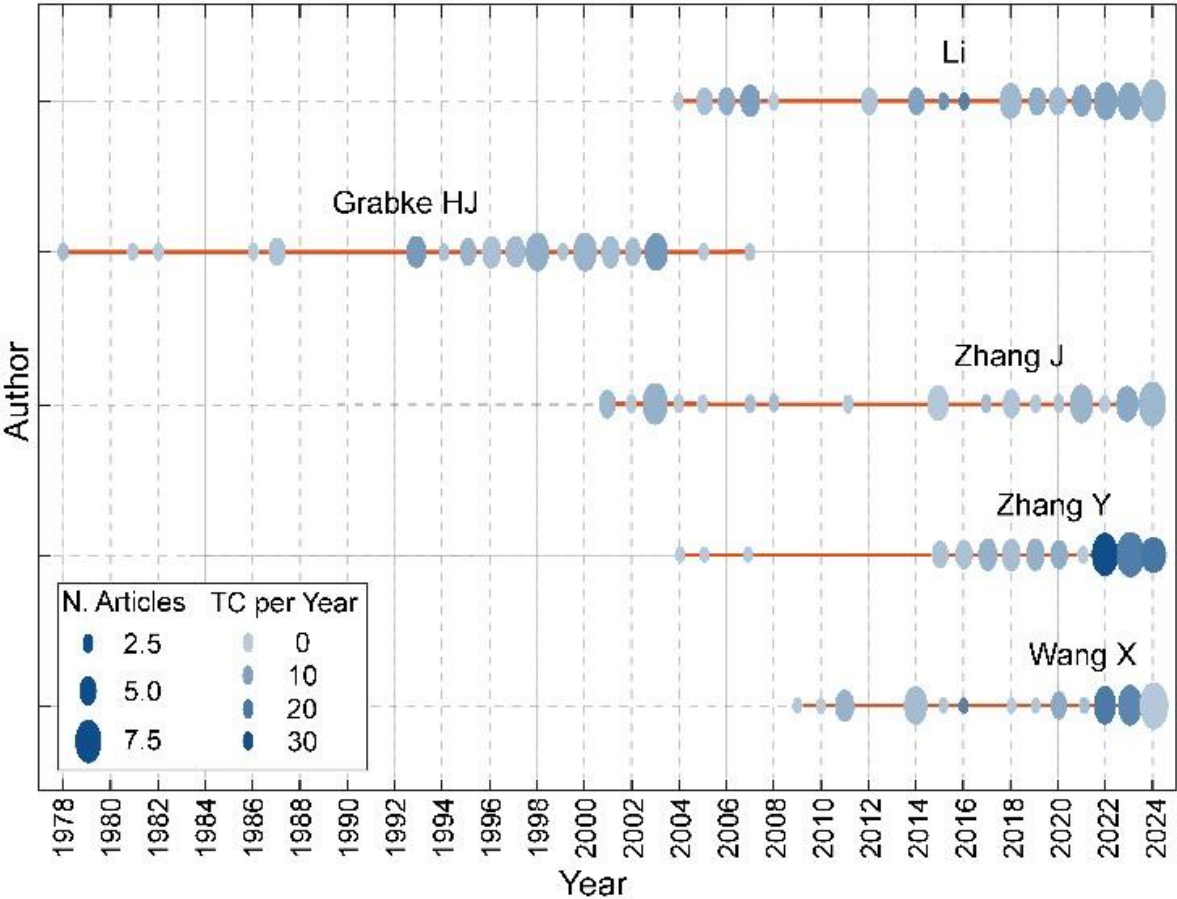


Figura 11. Trayectoria temporal de los autores más productivos en el campo de la carburización. El tamaño de las burbujas representa el número de publicaciones por año y el color indica el promedio de citas anuales. Fuente: Elaboración propia.

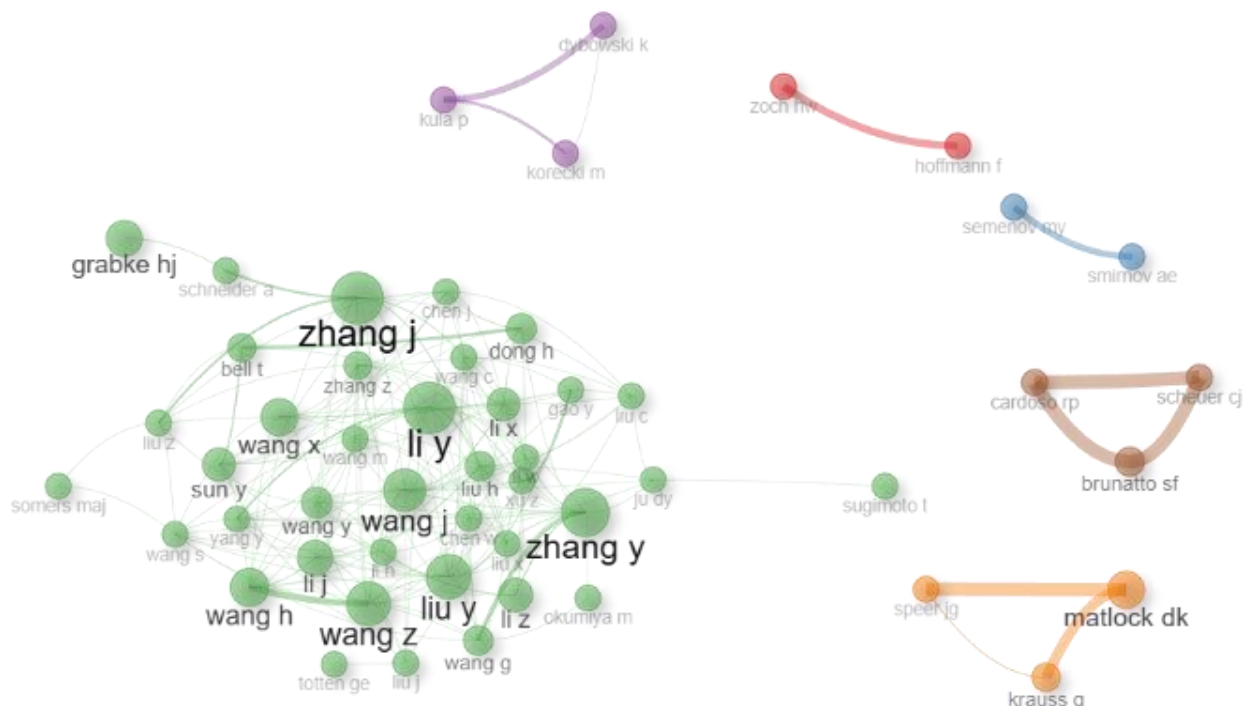


Figura 12. Mapa de coautoría. Nodos: autores (tamaño según productividad); enlaces: coautorías. Colores: comunidades (Louvain). Red normalizada por asociación. Fuente: Elaboración propia.

Afiliaciones institucionales

La producción científica sobre carburización está concentrada en un conjunto de instituciones con alto nivel de especialización en materiales y tratamientos superficiales. La **Figura 13** muestra las cuatro instituciones más activas del periodo 1967–2024.

La University of Science and Technology Beijing lidera la producción acumulada con más de 60 publicaciones, con un crecimiento sostenido a partir de 2010 y una aceleración marcada desde 2018. Le siguen Tohoku University y Colorado School of Mines, ambas con trayectorias activas desde los años noventa y más de 50 artículos publicados. También destaca la Lodz University of Technology, que, si bien comenzó su actividad más tarde, ha mostrado un crecimiento continuo y acelerado en los últimos años.

Estos resultados reflejan la consolidación de centros de investigación en Asia, Europa y Norteamérica, y evidencian la distribución geográfica del conocimiento en torno al tratamiento termoquímico de carburización.

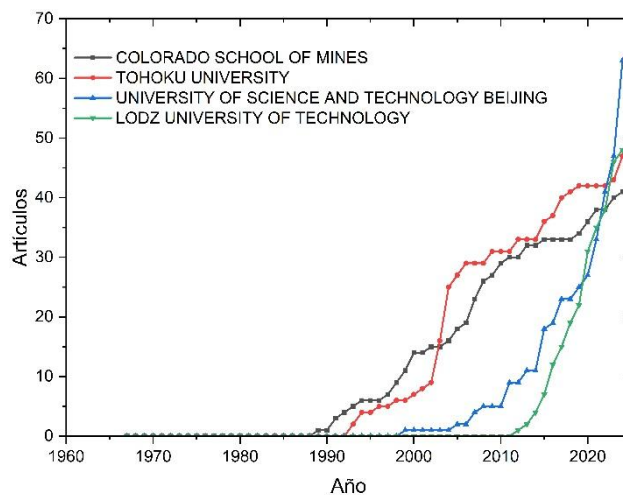


Figura 13. Evolución temporal del número de publicaciones de las instituciones con mayor producción científica sobre carburización. Fuente: Elaboración propia.

Producción científica por países

La distribución geográfica de la producción científica en el tratamiento termoquímico de carburización refleja una fuerte concentración en países de Asia, Europa y América

del Norte. La Figura 14 muestra los países con mayor número de publicaciones en este campo.

China encabeza el listado con 1,485 artículos, consolidándose como el principal país productor. Le siguen Japón con 976 artículos y Estados Unidos con 946, ambos con trayectorias históricas consolidadas en investigación de materiales. Otros países con contribuciones destacadas son Alemania (517), Francia (310), Polonia (279) e India (252), lo que evidencia la relevancia del tema en contextos industriales y académicos diversos.

En América Latina, Brasil se posiciona como el principal contribuyente con 232 publicaciones, seguido por México con 67. En Medio Oriente y Asia occidental, destacan Irán (196) y Corea del Sur (155). En África, la producción es más limitada, aunque se observan contribuciones relevantes de Nigeria y Argelia.

Esto sugiere una distribución amplia de la investigación, aunque con fuerte liderazgo de países asiáticos, principalmente China y Japón, impulsados por la necesidad de desarrollar tecnologías de superficie para aplicaciones industriales avanzadas.



Figura 14. Mapa mundial de producción científica sobre carburización. Se muestra el número de artículos por país según el total acumulado en el periodo analizado (1967–2024), utilizando una escala de color proporcional a la productividad. Fuente: Elaboración propia.

Palabras clave y evolución temática

El análisis de la evolución temática se realizó a partir del seguimiento acumulado de las palabras clave más frecuentes en el corpus bibliográfico (Figura 15). Esta visualización permite identificar los temas predominantes y su comportamiento temporal dentro del campo de estudio.

El término "carburizing" se posiciona como el más utilizado, con una tendencia creciente desde la década de 1990 y un incremento exponencial a partir del año 2000, alcanzando más de 1,900 ocurrencias acumuladas. Otros términos relevantes en frecuencia son "steel", "microstructure", "carbon", "hardness", "wear resistance" y "heat treatment", todos asociados a propiedades mecánicas y fenómenos metalúrgicos clave en el tratamiento termoquímico.

También se observa la presencia de conceptos como "quenching", "carbides", "nitriding" y "resistance", lo que indica una interrelación con procesos complementarios a la carburización, así como un enfoque en el análisis microestructural y la mejora de propiedades superficiales.

Estos resultados evidencian una evolución temática sostenida hacia el estudio de materiales avanzados y técnicas de modificación superficial, con énfasis en el desempeño mecánico, la ingeniería microestructural y el desarrollo de procesos híbridos o multietapa.

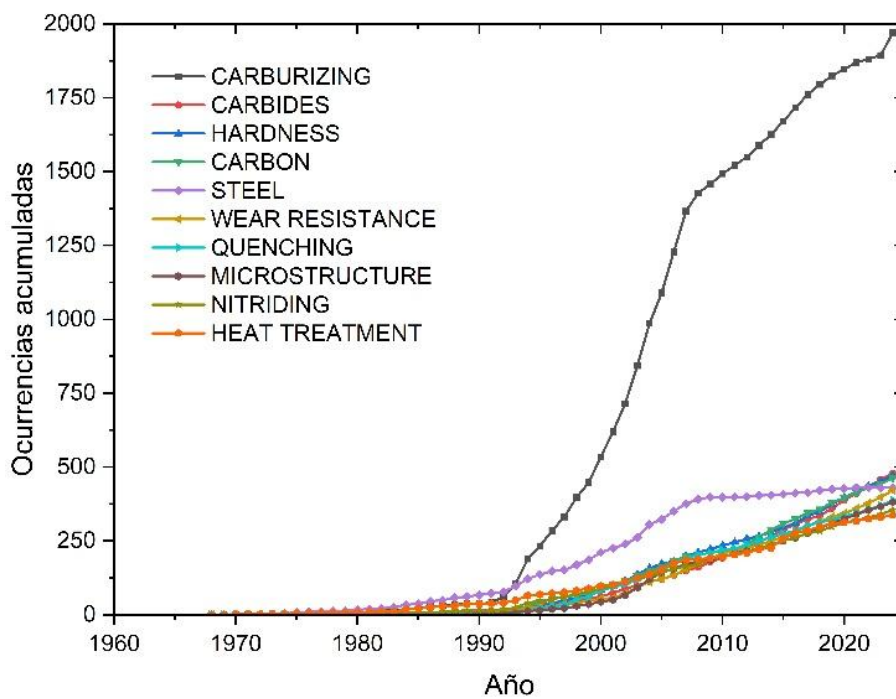


Figura 15. Evolución acumulada de palabras clave en la literatura sobre carburización entre 1967 y 2024. Se observa un crecimiento sostenido en términos asociados a procesos termoquímicos, materiales y propiedades superficiales. Fuente: Elaboración propia.

Diagrama de tres campos: institución–autor–tema

El diagrama de tres campos (Figura 16) permite visualizar las relaciones entre instituciones, autores e intereses temáticos en la investigación sobre carburización. Este tipo de visualización facilita la identificación de líneas de trabajo consolidadas y la vinculación entre centros académicos, investigadores y palabras clave.

Entre las instituciones con mayor producción y conexión temática destacan la University of Science and Technology Beijing, la Colorado School of Mines, la Universidad del Noreste y la RWTH Aachen University, cuyos investigadores han contribuido significativamente al desarrollo del campo. Autores como Sun Y, Zhang J,

Matlock DK y Liu Y aparecen como nodos centrales que vinculan múltiples temas y universidades.

En cuanto a los temas más frecuentes, destacan términos como carburizing, microstructure, wear resistance, stainless steel y plasma carburizing, lo que confirma el enfoque dominante en propiedades mecánicas, mecanismos de difusión, tipos de aceros y tecnologías de tratamiento.

Este análisis permite identificar una fuerte especialización temática por institución y autor, y que ciertas universidades están directamente asociadas con desarrollos específicos como vacuum carburizing, retained austenite o residual stress, lo que lo que podría favorecer futuras colaboraciones o revisiones sistemáticas.

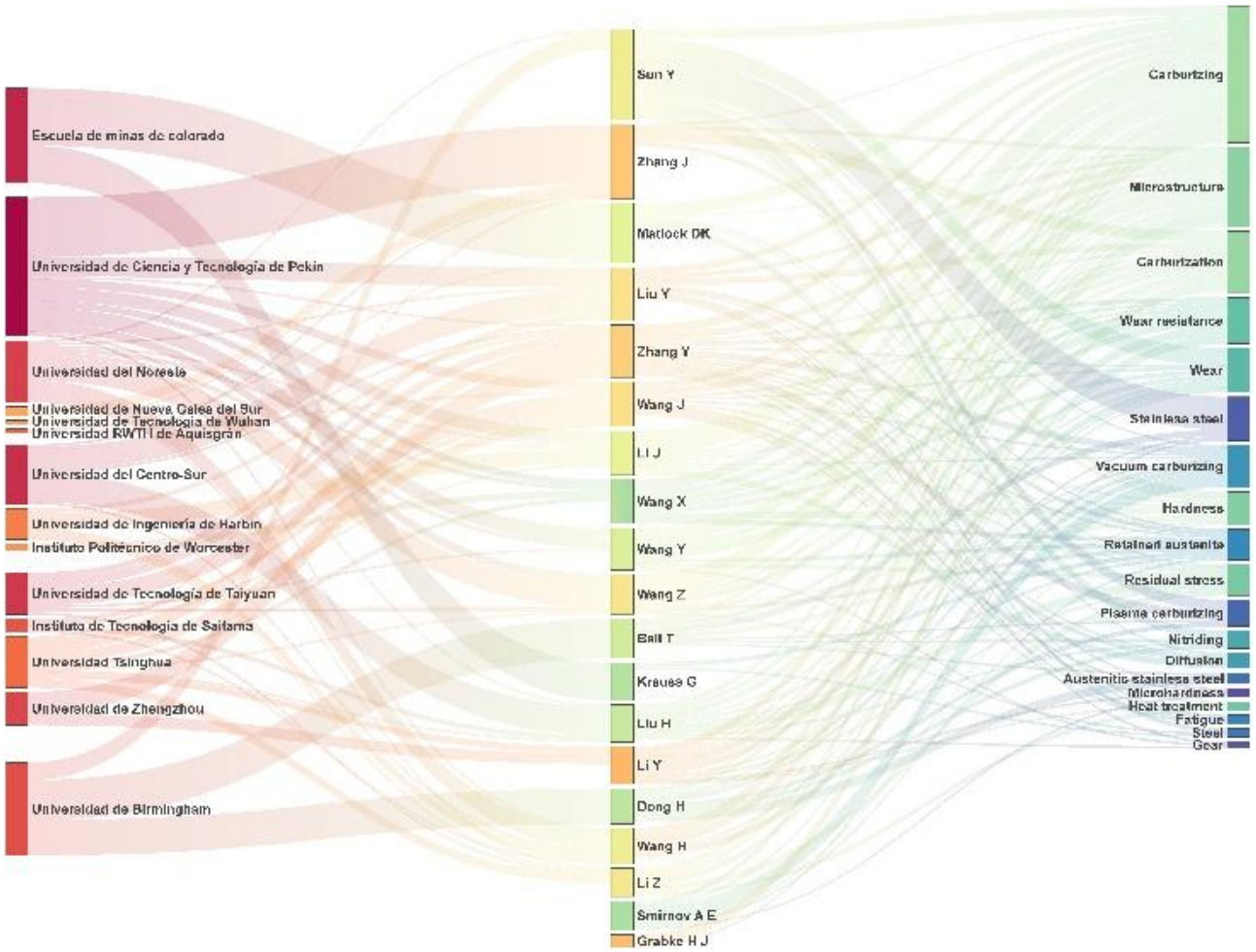


Figura 16. Diagrama de tres campos que vincula instituciones, autores y temas clave en la investigación sobre carburización. La intensidad del trazo representa la fuerza de asociación entre elementos de cada campo. Fuente: Elaboración propia.

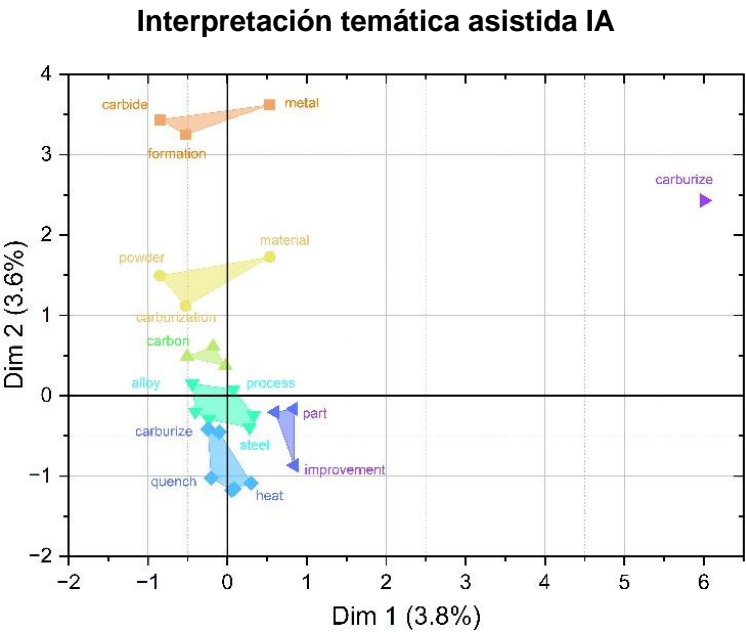


Figura 17. Análisis de correspondencia léxica basado en títulos, resúmenes y palabras clave de artículos sobre carburización. Los clústeres muestran agrupaciones temáticas relacionadas con materiales, procesos y formación de

carburos. El término “carburize” aparece aislado, indicando un uso semántico diferenciado dentro del corpus. Fuente: Elaboración propia.

Se presentan los resultados del análisis léxico realizado en la plataforma TALL AI; en primer lugar, se presenta un análisis de correspondencia léxica el cual permitió identificar grupos temáticos mediante la concurrencia de los términos. En la Figura 17 se presenta un diagrama factorial bidimensional, en el que cada punto corresponde a una palabra clave cuya posición define su relación semántica con otras; gracias a este análisis, se identificaron agrupaciones de palabras con sentidos afines (clústeres), lo cual facilita entender cómo se estructuran los temas en la literatura sobre carburización.

Se pueden observar cinco grupos bien definidos que han sido identificados por colores: (naranja) relacionado con la formación de carburos en metales, con términos como carbide, metal y formation; (amarillo) centrado en materiales y carburización en polvo, con términos como powder, material, carburization y carbon; (verde) abordando específicamente los procesos de carburización en aleaciones, representado por alloy, process y carbon; (azul claro) enfocado en tratamientos térmicos aplicados a los aceros, incluyendo términos como steel, heat, carburize y quench; y (morado) vinculado a la mejora en propiedades y piezas mediante carburización, con términos como carburize, part e improvement. Adicionalmente, aparecen términos aislados como carburize, que, aunque relevantes, muestran menor integración semántica. Este análisis resulta útil para visualizar de forma clara cómo se ha ido consolidando el conocimiento científico en torno al tratamiento termoquímico de carburización, desde la formación de carburos hasta la optimización de tratamientos térmicos y la mejora de propiedades superficiales.

La Figura 18 muestra los tres tópicos predominantes identificados, junto con sus términos más representativos y la probabilidad β , que indica el peso de cada palabra dentro de un tópico específico. Por ejemplo, el Tópico 1 agrupa términos como heat, process, corrosion y wear,

sugiriendo un enfoque relacionado con el tratamiento térmico y propiedades de resistencia y desgaste. El Tópico 2 se relaciona con la carburización y composición del acero, destacando términos como steel, carburize, carbon y temperature. Por último, el Tópico 3 presenta términos como iron, carbide, quench y carburization, asociados principalmente a la formación de carburos y efectos relacionados con procesos específicos.

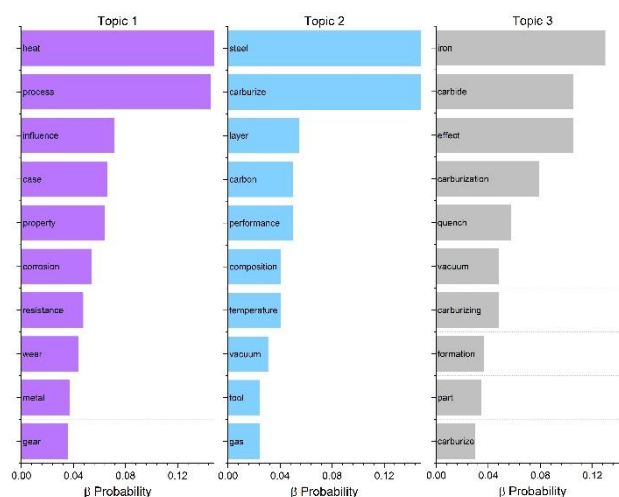


Figura 18. Gráfico de barras de los términos más representativos por tópico temático según probabilidad β identificado mediante LDA.

Es relevante destacar que los artículos mostrados en la Figura 19 no solo resumen bien cada tópico, sino que también reflejan enfoques distintos que enriquecen el panorama general del campo. de cada tópico, en función de su probabilidad θ , que indica el grado de pertenencia de cada artículo a uno de los tres tópicos. Esta visualización permite identificar claramente cuáles son las publicaciones que mejor representan cada línea temática, facilitando así la organización conceptual del campo de investigación sobre carburización.

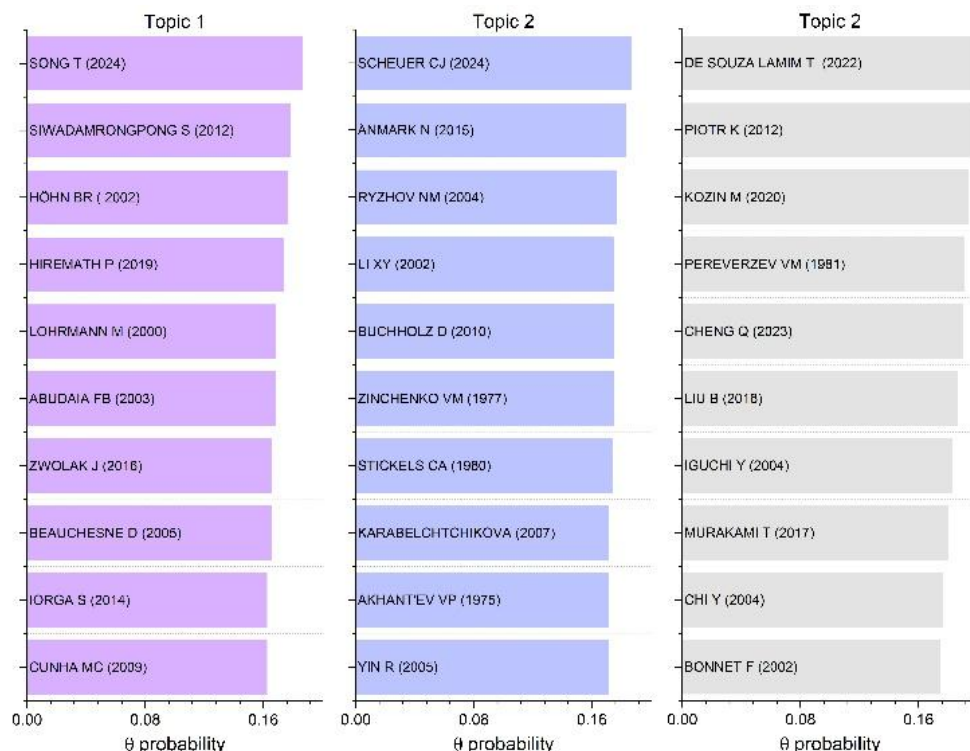


Figura 19. Artículos más representativos por tópico temático según probabilidad θ identificados mediante LDA. Fuente: Elaboración propia.

Conclusiones

A partir de los resultados del análisis bibliométrico y temático realizado sobre las publicaciones científicas sobre el tema de carburización publicadas entre 1967 y 2024, así como de la revisión técnica de procesos, propiedades y modelos de simulación, las principales conclusiones son:

- El tratamiento de carburización se mantiene como una tecnología fundamental en la modificación superficial de aceros, permitiendo mejorar significativamente propiedades como la dureza, el desgaste y la resistencia a la fatiga en componentes industriales.
- El estudio bibliométrico revela un crecimiento sostenido del 6.6 % anual en las publicaciones, con un dominio de la investigación en China, India y Estados Unidos. Las principales revistas de publicación fueron *Materials Science Forum*, *JMRT* y *Surface and Coatings Technology*.
- La selección temática asistida por inteligencia artificial permitió organizar esta revisión en torno a tres áreas prioritarias: técnicas industriales de carburización, estudios tribológicos y modelado computacional, reflejando los ejes de mayor impacto en la literatura actual.
- Las simulaciones multifísicas y los modelos predictivos, apoyados en herramientas como DICTRA, COSMAP y redes neuronales

profundas, han permitido optimizar parámetros de tratamiento con alta precisión (errores <5 %), reduciendo costos y tiempos experimentales.

- Se identifican tendencias emergentes como la carburización por plasma, el uso de mezclas sostenibles con residuos orgánicos y la aplicación de inteligencia artificial para el diseño de tratamientos avanzados, abriendo nuevas posibilidades para optimizar los procesos.

Referencias

- Alias, S. K., Abdullah, B., Jaffar, A., Latip, S. A., Kasolang, S., Izham, M. F., & Ghani, M. A. A. (2013). Mechanical Properties of Paste Carburized ASTM A516 Steel. *INTERNATIONAL TRIBOLOGY CONFERENCE MALAYSIA 2013*, 68, 525–530. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.12.216>
- Ånmark, N., & Björk, T. (2016). Effects of the composition of Ca-rich inclusions on tool wear mechanisms during the hard-turning of steels for transmission components. *Wear*, 368–369, 173–182. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.09.016>
- Aria, M., & Cuccurullo, C. (2017). bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. *Journal of informetrics*, 11(4), 959–975.
- Bensely, A., Prabhakaran, A., Mohan Lal, D., & Nagarajan, G. (2005). Enhancing the wear resistance of case carburized steel (En 353) by cryogenic treatment. *Cryogenics*, 45(12), 747–754. <https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2005.10.004>

- Cavaliere, P., Zavarise, G., & Perillo, M. (2009). Modeling of the carburizing and nitriding processes. *Computational Materials Science*, 46(1), 26–35. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2009.01.024>
- Cermak, J., & Kral, L. (2014). Carbon diffusion in carbon-supersaturated ferrite and austenite. *Journal of Alloys and Compounds*, 586, 129–135. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2013.10.058>
- Chan, K. J., & Singh, P. M. (2020). Carburization of metals by a chemical mechanism of carbon transport through molten fluoride salts. *Journal of Nuclear Materials*, 539, 152307. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2020.152307>
- de Souza Lamim, T., Anselmo, L. M., Bendo, T., Bernardelli, E. A., Binder, C., Nelmo Klein, A., & Biasoli de Mello, J. D. (2022). Effect of low-temperature plasma carburizing on surface topography, mechanical and tribological properties of sintered iron and nitrided sintered iron. *Tribology International*, 168, 107452. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2022.107452>
- Dossett, J. L., & Totten, G. E. (Eds.). (2013). Pack Carburizing. En *Steel Heat Treating Fundamentals and Processes* (Vol. 4A, p. 0). ASM International. <https://doi.org/10.31399/asm.hb.v04a.a0005765>
- Farivar, H., Deepu, M. J., Hans, M., Phanikumar, G., Bleck, W., & Prahl, U. (2019). Influence of post-carburizing heat treatment on the core microstructural evolution and the resulting mechanical properties in case-hardened steel components. *Materials Science and Engineering: A*, 744, 778–789. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.12.061>
- Guo, J., Deng, X., Wang, H., Zhou, L., Xu, Y., & Ju, D. (2021). Modeling and Simulation of Vacuum Low Pressure Carburizing Process in Gear Steel. *Coatings*, 11(8). <https://doi.org/10.3390/coatings11081003>
- Hasan, M. Z., Hussein, A. A., Hasan, A. S., & Ali, O. M. (2020). Improvement of AISI 1018 Carbon Steel Gr 1018 mechanical properties by liquid carburizing in salt bath. *Materials Today: Proceedings*, 20, 512–516.
- Hassan, K. S. (2015). Comparative of wear resistance of low carbon steel pack carburizing using different media. *International Journal of Engineering & Technology*, 4(1), 71.
- Höglund, L., & Ågren, J. (2010). Simulation of Carbon Diffusion in Steel Driven by a Temperature Gradient. *Journal of Phase Equilibria and Diffusion*, 31(3), 212–215. <https://doi.org/10.1007/s11669-010-9673-0>
- Holmberg, K., & Erdemir, A. (2017). Influence of tribology on global energy consumption, costs and emissions. *Friction*, 5(3), 263–284. <https://doi.org/10.1007/s40544-017-0183-5>
- Honghao Jia, Dongying Ju, & Jianting Cao. (2023). Machine learning based optimization method for vacuum carburizing process and its application. *Journal of Materials Informatics*, 3(2), 9. <https://doi.org/10.20517/jmi.2022.43>
- Hosseini, S. R. E., & Li, Z. (2016). Pack carburizing: Characteristics, microstructure, and modeling. *Encyclopedia of Iron, Steel, and Their Alloys (Online Version)*, 1–24.
- Iżowski, B., Wojtyczka, A., & Motyka, M. (2023). Numerical Simulation of Low-Pressure Carburizing and Gas Quenching for Pyrowear 53 Steel. *Metals*, 13(2). <https://doi.org/10.3390/met13020371>
- Kwietniewski, C. E. F., Tentardini, E. K., & Totten, G. E. (2013). Carburizing and Carbonitriding. En Q. J. Wang & Y.-W. Chung (Eds.), *Encyclopedia of Tribology* (pp. 298–306). Springer US. https://doi.org/10.1007/978-0-387-92897-5_722
- Leipner, H. S., Lorenz, D., Zeckzer, A., Lei, H., & Grau, P. (2001). Nanoindentation pop-in effect in semiconductors. *International Conference on Defects in Semiconductors*, 308–310, 446–449. [https://doi.org/10.1016/S0921-4526\(01\)00718-9](https://doi.org/10.1016/S0921-4526(01)00718-9)
- Liang, R., Wang, Z., Yang, S., & Chen, W. (2021). Study on hardness prediction and parameter optimization for carburizing and quenching: An approach based on FEM, ANN and GA. *Materials Research Express*, 8(11), 116501.
- Liscic, B., Tensi, H. M., & Luty, W. (2013). *Theory and technology of quenching: A handbook*. Springer Science & Business Media.
- Pohjonen, A., Somani, M., & Porter, D. (2018). Modelling of austenite transformation along arbitrary cooling paths. *Computational Materials Science*, 150, 244–251. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2018.03.052>
- Qian, L., Li, M., Zhou, Z., Yang, H., & Shi, X. (2005). Comparison of nano-indentation hardness to microhardness. *Surface and Coatings Technology*, 195(2), 264–271. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2004.07.108>
- Ren, S., Chen, Y., Ye, X.-X., Jiang, L., Yan, S., Liang, J., Yang, X., Leng, B., Li, Z., Chen, Z., & Dai, Z. (2021). Corrosion behavior of carburized 316 stainless steel in molten chloride salts. *Solar Energy*, 223, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.05.057>
- Salama, H., Shchyglo, O., & Steinbach, I. (2025). The interplay between the martensitic transformation rate and the rate of plastic relaxation during martensitic transformation in low-carbon steel, a phase-field study. *npj Computational Materials*, 11(1), 43.
- Song, T., Liu, Q., Liu, S., Yang, T., Li, Q., Xia, C., & Zhang, X. (2024). Wear and corrosion resistance behavior of Zr-2.5Nb by pack carburizing and boronizing. *Surface and Coatings Technology*, 482, 130720. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2024.130720>
- Vellanki, C., Choudhury, S., Kumar, S., Vimson, G., & Paul, G. (2022). Influence of Lubrication on the Friction and Wear Characteristics of Low Carbon Steel under Sliding Reciprocation Conditions. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1248(1), 012033. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1248/1/012033>
- Wallis, R. A. (2010). Modeling of Quenching, Residual-Stress Formation, and Quench Cracking. En D. U. Furrer & S. L. Semiatin (Eds.), *Metals Process Simulation* (Vol. 22B, p. 0). ASM International. <https://doi.org/10.31399/asm.hb.v22b.a0005530>
- Yerokhin, A., Nie, X., Leyland, A., Matthews, A., & Dowe, S. (1999). Plasma electrolysis for surface engineering. *Surface and coatings technology*, 122(2–3), 73–93.
- Yin, L., Ma, X., Tang, G., Fu, Z., Yang, S., Wang, T., Wang, L., & Li, L. (2019). Characterization of carburized 14Cr14Co13Mo4 stainless steel by low pressure carburizing. *Surface and Coatings Technology*, 358, 654–660. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.11.090>
- Zhang, X., Tang, J., & Zhang, X. (2017). An optimized hardness model for carburizing-quenching of low carbon alloy steel. *Journal of Central South University*, 24(1), 9–16.
- Zhao, M., Ma, Y., Zhang, Y., Liu, X., Sun, H., Liang, R., Yin, H., & Wang, D. (2023). An efficient salt-thermo-carburizing method to prepare titanium carbide coating. *Surface and Coatings Technology*, 465, 129546. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2023.129546>