

## Nitruración: del conocimiento científico a su aplicación en la ingeniería de superficies

### Nitriding: From Scientific knowledge to its application in surface Engineering

Martín Ortiz Domínguez <sup>a</sup>

---

#### Abstract:

Nitriding is one of the most important thermochemical treatments in the history of surface engineering. Its development made it possible to selectively harden the surface of metal components without resorting to severe volumetric transformations or subsequent tempering, making it a strategic technology for parts subjected to wear, fatigue, and mechanical contact. This article provides a comprehensive review of the history of nitriding, its technological milestones, its scientific foundations, and its industrial relevance. Furthermore, it discusses how knowledge of composite layers, the diffusion zone, and the iron-nitrogen system helped establish nitriding as a mature technology that remains relevant in contemporary engineering.

#### Keywords:

Nitriding, thermochemical treatments, diffusion, composite layer, diffusion zone, plasma nitriding, surface engineering

---

#### Resumen:

La nitruración es uno de los tratamientos termoquímicos más importantes en la historia de la ingeniería de superficies. Su desarrollo permitió endurecer selectivamente la superficie de componentes metálicos sin recurrir a transformaciones volumétricas severas ni a temple posterior, lo que la convirtió en una tecnología estratégica para piezas sometidas a desgaste, fatiga y contacto mecánico. El presente artículo revisa de forma amplia la historia de la nitruración, sus hitos tecnológicos, sus fundamentos científicos y su relevancia industrial. Además, se discute cómo el conocimiento de las capas compuestas, la zona de difusión y el sistema hierro-nitrógeno permitió consolidar a la nitruración como una tecnología madura y aún vigente dentro de la ingeniería contemporánea.

#### Palabras Clave:

Nitruración, tratamientos termoquímicos, difusión, capa compuesta, zona de difusión, plasma nitriding, ingeniería de superficies

---

### Introducción

Desde sus primeras formulaciones industriales a comienzos del siglo XX hasta las rutas modernas de nitruración por plasma y procesos de baja temperatura, la nitruración ha evolucionado desde una técnica empírica basada en atmósferas reactivas hasta una disciplina sustentada en la difusión, la termodinámica y la cinética de crecimiento de fases (ScienceDirect, 1997; National Bureau of Standards, 1950; Machlet y Fry, 1913; ScienceDirect, 2025; Epstein et al., 1923). La nitruración ocupa un lugar singular dentro de los tratamientos superficiales de aceros y aleaciones ferrosas. A diferencia de la carburización, que suele requerir temperaturas más elevadas y tratamientos posteriores de

temple para desarrollar la dureza final, la nitruración puede realizarse a temperaturas moderadas, en general alrededor de 500 a 550°C, permitiendo formar una superficie endurecida con mínima distorsión dimensional y sin necesidad de enfriamientos bruscos posteriores (National Bureau of Standards, 1950; ScienceDirect, 2025).

Esta característica le dio desde muy temprano una enorme ventaja para componentes de alta precisión, como engranes, ejes, husillos, moldes, válvulas y piezas aeronáuticas (National Bureau of Standards, 1950; ScienceDirect, 2025). Desde el punto de vista científico, la nitruración es un proceso de incorporación de nitrógeno a la superficie metálica y posterior difusión hacia el

---

<sup>a</sup> Autor de Correspondencia, 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

interior del sustrato. Lo que en un inicio fue visto como un endurecimiento químico superficial, hoy se comprende como un fenómeno complejo que involucra adsorción, disociación de especies gaseosas, transporte atómico, formación de nitruros y evolución de gradientes de concentración (ScienceDirect, 2025; Epstein et al., 1923). Esa transición, desde la práctica hacia la explicación científica, es precisamente lo que vuelve tan interesante su historia. En el presente trabajo se revisa la historia de la nitruración desde sus antecedentes industriales hasta sus expresiones modernas, integrando los desarrollos históricos con los fundamentos científicos del proceso. Se presta especial atención al papel de Adolf Machlet y Adolf Fry, al establecimiento del sistema hierro-nitrógeno, a la aparición de los aceros que podrían ser nitrurados y al surgimiento de la nitruración por plasma como una de las variantes más influyentes del siglo XX (Machlet y Fry, 1913; ScienceDirect, 2025; Epstein et al., 1923; ASM International, 1932).

### Antecedentes y nacimiento de la nitruración industrial

La nitruración es relativamente joven si se la compara con otros tratamientos termoquímicos como la carburización. Diversas fuentes históricas señalan que el primer gran antecedente patentado en Estados Unidos fue el trabajo de Adolph Machlet, quien presentó una solicitud relacionada con el tratamiento de hierro y acero en atmósferas de amoníaco en 1908; dicha patente fue concedida en 1913 (Machlet y Fry, 1913). En paralelo, la tradición técnica europea atribuye a Adolf Fry un papel decisivo en la consolidación de la nitruración como

tecnología práctica, especialmente por sus investigaciones en Alemania y sus aportaciones al entendimiento del sistema hierro-nitrógeno y de los aceros susceptible a ser nitrurados (Epstein et al., 1923; ASM International, 1932.). Más allá de la disputa historiográfica sobre quién debe ser considerado el "padre" de la nitruración, lo cierto es que la tecnología emergió en un contexto industrial muy específico: la necesidad de endurecer superficies sin comprometer el núcleo del componente.

La posibilidad de obtener una capa superficial muy dura, conservando al mismo tiempo un interior tenaz, resultó especialmente atractiva para piezas sometidas a esfuerzos cíclicos, fricción y contacto repetido (National Bureau of Standards, 1950; ScienceDirect, 2025). A diferencia de los tratamientos que modificaban profundamente la estructura del acero, la nitruración ofrecía una solución más estable dimensionalmente, lo que favoreció su adopción en aplicaciones de precisión (National Bureau of Standards, 1950; ScienceDirect, 2025). En sus formas iniciales, la nitruración se desarrolló principalmente como nitruración gaseosa, usando amoníaco como fuente de nitrógeno. El principio era aparentemente simple: exponer el acero a una atmósfera rica en  $\text{NH}_3$  a temperaturas moderadas para favorecer la absorción de nitrógeno en la superficie. Sin embargo, detrás de esa simplicidad operativa se ocultaba un problema metalúrgico de gran complejidad, pues el resultado final dependía tanto de la actividad del nitrógeno en la atmósfera como de la composición del acero y de la respuesta del sistema hierro-nitrógeno (ScienceDirect, 2025; Epstein et al., 1923).

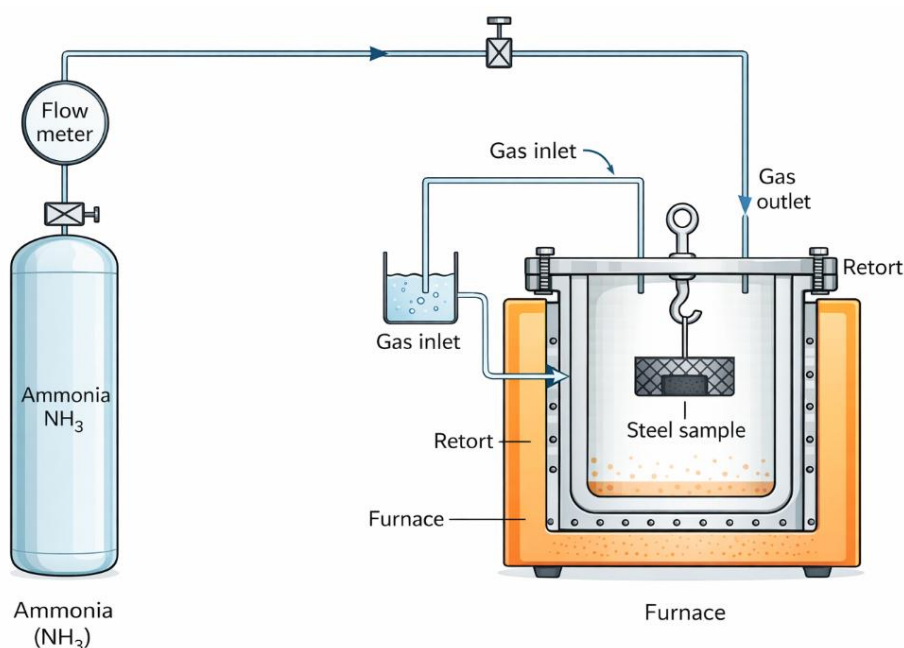


Figura 1. Primeras referencias históricas del equipo empleado para la nitruración y sus protagonistas, Adolf Machlet y Adolf Fry. Fuente: Elaboración propia.

## Fundamentos científicos: del empirismo al sistema hierro-nitrógeno

Uno de los pasos más importantes en la consolidación científica de la nitruración fue la comprensión del sistema hierro-nitrógeno. En 1923, Epstein, Cross, Groesbeck y Wymore publicaron en el Bureau of Standards de Estados Unidos un trabajo fundamental sobre el sistema Fe-N, señalando que la constitución de este diagrama era esencial para comprender la nitruración de aceros especiales (Epstein et al., 1923). Ese estudio, además, discutía los diagramas previos de Sawyer y Fry y mostraba que el comportamiento del nitrógeno en hierro no podía abordarse únicamente desde observaciones empíricas, sino que requería un marco metalúrgico formal (Epstein et al., 1923). La importancia de este avance radica en que permitió interpretar la nitruración como un problema de formación de fases y de difusión. En la superficie de un acero nitrurado pueden formarse nitruros de hierro como  $\gamma\text{-Fe}_4\text{N}$  y  $\epsilon\text{-Fe}_{2-3}\text{N}$ , mientras que por debajo aparece una zona en la que el nitrógeno se

encuentra en solución sólida o como precipitados finos asociados a elementos aleantes (Epstein et al., 1923; Schneider et al., s.f.).

Esa diferenciación entre una capa compuesta y una zona de difusión es hoy básica en la ingeniería de superficies, pero fue posible gracias al desarrollo de estudios metalográficos y de diagramas de equilibrio a comienzos del siglo XX (Epstein et al., 1923; Schneider et al., s.f.). Desde una perspectiva moderna, la nitruración está gobernada por la difusión del nitrógeno, por lo que puede describirse conceptualmente mediante la segunda ley de Fick. Esto explica por qué la profundidad nitrurada depende del tiempo, la temperatura y la afinidad química del sustrato por el nitrógeno (ScienceDirect, 2025; Epstein et al., 1923). En otras palabras, el endurecimiento superficial ya no se entiende solo como una "reacción" superficial, sino como un proceso cinético en el que la entrada de nitrógeno y la formación de fases evolucionan conjuntamente (ScienceDirect, 2025; Epstein et al., 1923).

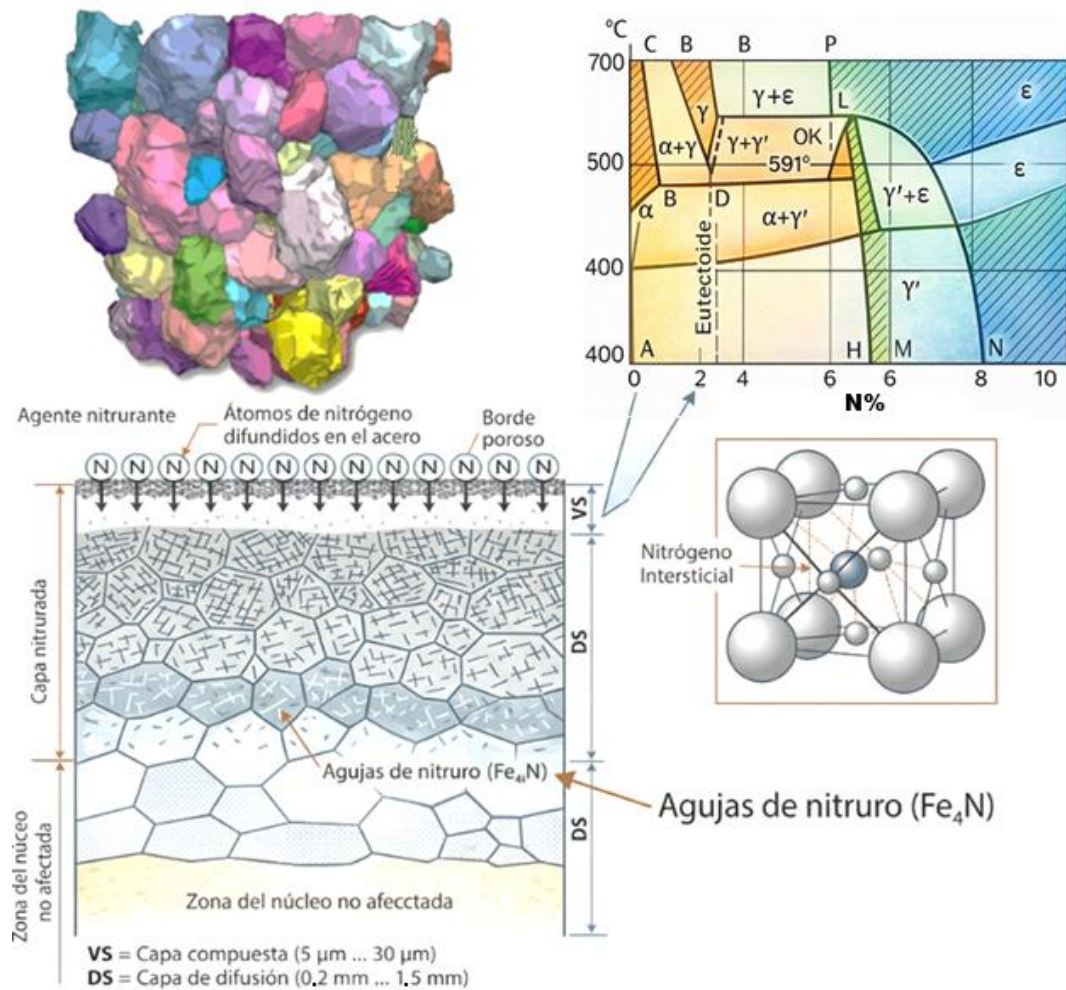


Figura 2. Esquema conceptual de una capa nitrurada con sus regiones principales: capa compuesta y zona de difusión. Fuente: Elaboración propia.

## La nitruración gaseosa y la consolidación de los aceros susceptibles a la nitruración

La nitruración gaseosa fue la ruta original y durante décadas la más difundida. El Circular 495 del National Bureau of Standards describía la nitruración como un proceso en el que piezas mecanizadas y previamente tratadas térmicamente se someten a una atmósfera nitrogenada usualmente de amoníaco con aproximadamente 930 a 1000°F, es decir, cerca de 500 a 540°C, obteniéndose una superficie muy dura sin necesidad de tratamiento térmico posterior (National Bureau of Standards, 1950). Asimismo, señalaba que la duración del tratamiento era relativamente larga, normalmente de uno a dos días, y que la profundidad nitrurada usualmente permanecía por debajo de 0.020 pulgadas (National Bureau of Standards, 1950). Ese mismo documento subrayaba otro aspecto decisivo: el desarrollo de aceros de baja aleación específicos para nitruración, que incorporaban elementos con elevada

afinidad por el nitrógeno, particularmente aluminio, cromo y vanadio, además de molibdeno y níquel para ajustar resistencia y tenacidad (National Bureau of Standards, 1950). Este punto es central en la historia de la nitruración, porque muestra que el proceso no avanzó solo mejorando hornos o atmósferas, sino también mediante el diseño deliberado de materiales compatibles con el tratamiento. En cierto sentido, la nitruración impulsó una nueva manera de pensar el acero: no únicamente como base estructural, sino como sustrato activo de ingeniería superficial (National Bureau of Standards, 1950; Epstein et al., 1923). Con el tiempo, la nitruración gaseosa evolucionó hacia controles más finos del potencial nitrurante, de la disociación del amoníaco y de la composición de la atmósfera. Esto permitió modular el espesor de la capa compuesta, reducir fragilidad superficial y adaptar el proceso a distintas geometrías y requisitos de desempeño (ScienceDirect, 2025; AHT Corporation, 2026). Aunque la nitruración gaseosa sigue siendo una tecnología vigente, buena parte de su

madurez actual descansa en ese largo proceso de refinamiento histórico.

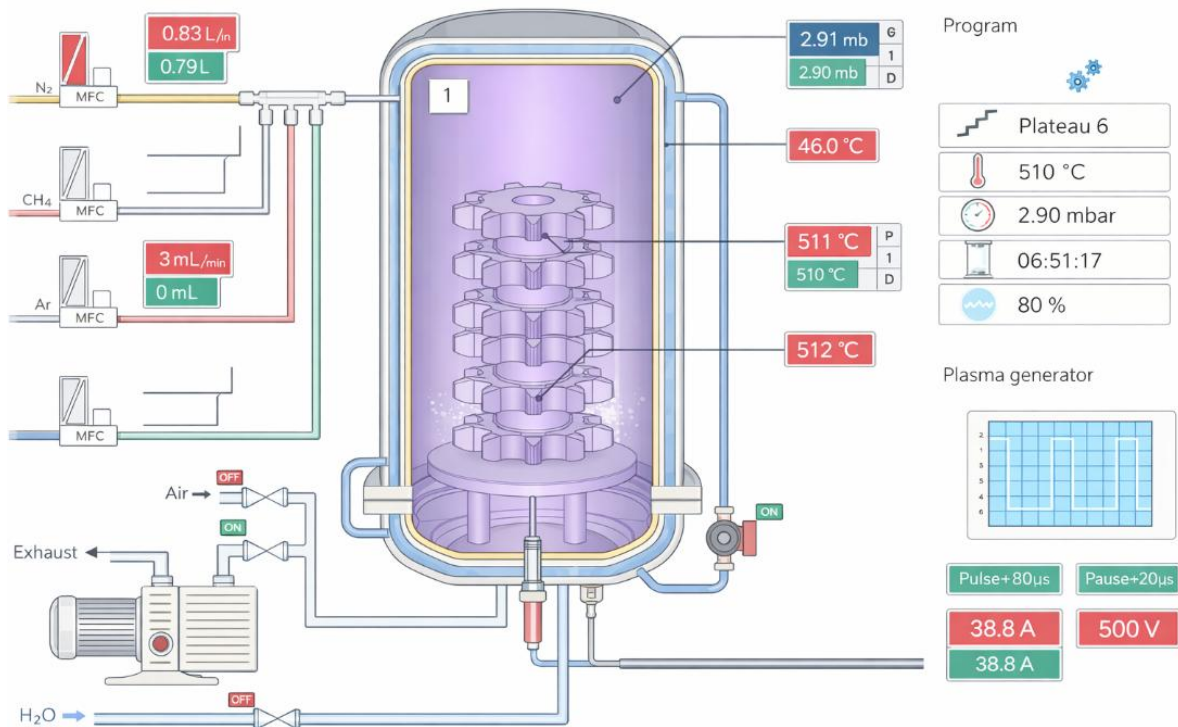


Figura 3. Esquema general de horno y ciclo de nitruración gaseosa/plasma, útil para ilustrar la evolución tecnológica del proceso. Fuente: Elaboración propia.

### Aparición de la nitruración iónica o por plasma

Aunque la nitruración gaseosa dominó gran parte del desarrollo temprano, la historia del proceso dio un nuevo salto con la aparición de la **nitruración iónica o por plasma**. La publicación técnica de ASM sobre nitruración indica que, aunque la patente de Fry data de 1922, la nitruración iónica todavía era considerada “un proceso nuevo” cuando Wehnheldt y Berghaus desarrollaron el proceso de ion nitriding en 1932 (ASM International, 1932). Este dato es importante porque muestra que la evolución de la nitruración no fue lineal, sino que avanzó por saltos tecnológicos vinculados al modo de activar e introducir el nitrógeno (ASM International, 1932). La nitruración por plasma introdujo un cambio fundamental: en lugar de depender exclusivamente de la disociación térmica del amoníaco en una atmósfera relativamente pasiva, recurrió a una descarga luminiscente en vacío

parcial para generar especies activas e iones capaces de interactuar intensamente con la superficie metálica. Esto mejoró el control del proceso, redujo tiempos en ciertos casos y permitió tratamientos más uniformes en componentes de geometría compleja (AHT Corp, s.f.; Lee et al., 2025). Además, la nitruración por plasma facilitó la obtención de capas con menor espesor de capa compuesta o incluso con capas ajustadas según la aplicación, algo particularmente valioso en herramientas y componentes de precisión (AHT Corp, s.f.; Lee et al., 2025). Desde un punto de vista científico, la nitruración por plasma hizo visible algo que en la nitruración gaseosa permanecía más oculto: que el proceso no depende solo de difusión en volumen, sino también de fenómenos superficiales de activación, sputtering, adsorción y recombinación. Por ello, la variante por plasma no solo fue una mejora tecnológica, sino también una vía para comprender mejor la física del tratamiento (AHT Corp, s.f.; Lee et al, 2025).

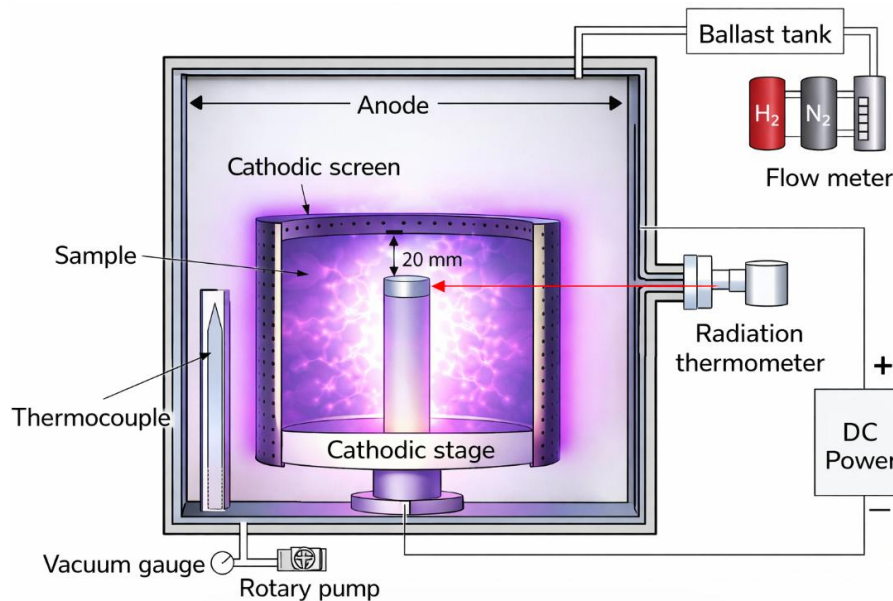


Figura 4. Esquema simplificado de nitruración por plasma, mostrando cámara, cátodo, ánodo y flujo de gas reactivo.  
Fuente: Elaboración propia

### Microestructura, propiedades y relevancia industrial

La razón por la cual la nitruración se consolidó industrialmente es directa: las capas nitruradas producen una combinación muy atractiva de alta dureza superficial, incremento en la resistencia al desgaste, mejora del comportamiento a fatiga y estabilidad dimensional. ScienceDirect Topics resume la nitruración como un tratamiento en el que ciertos aceros aleados se calientan alrededor de 550°C en atmósfera de amoníaco, formando una capa dura de nitruros; además, subraya que el crecimiento de nitruros va acompañado de tensiones compresivas residuales elevadas debido a la expansión superficial restringida por el núcleo, lo que contribuye a mejorar el comportamiento frente a concentraciones de esfuerzo (ScienceDirect, 2025). La microestructura resultante se organiza típicamente en dos zonas. La primera es la capa compuesta, también llamada a veces "capa blanca", formada principalmente por  $\epsilon\text{-Fe}_{2-3}\text{N}$  y/o  $\gamma'\text{-Fe}_4\text{N}$  (ver Figura 5) (Liapina, 2005). La segunda es la zona de difusión, donde el nitrógeno se encuentra disuelto o precipitado con elementos aleantes en el

interior de la matriz (Epstein et al., 1923; Schneider et al., s.f.). La proporción relativa entre ambas zonas depende de la composición del acero, del potencial nitrurante, del tiempo y de la temperatura (National Bureau of Standards, 1950; Epstein et al., 1923; Schneider et al., s.f.). De hecho, una parte importante de la ingeniería moderna de nitruración consiste justamente en controlar la presencia, espesor y continuidad de la capa compuesta según la función del componente (Schneider et al., s.f.; AHT Corporation, 2026).

Esa posibilidad de diseñar superficies explica su permanencia industrial. A lo largo del siglo XX y lo que va del XXI, la nitruración se ha aplicado a moldes, troqueles, cigüeñales, husillos, engranes, componentes de inyección, piezas aeronáuticas y herramientas para conformado metálico, entre otros (National Bureau of Standards, 1950; AHT Corporation, 2026). Hoy, lejos de ser una técnica obsoleta, es una tecnología madura que sigue adaptándose a nuevos materiales y exigencias de sostenibilidad, particularmente en contextos donde se busca prolongar la vida útil de piezas sin recurrir a recubrimientos gruesos o a reemplazos frecuentes (AHT Corporation, 2026; Fuentes industriales, 2026).

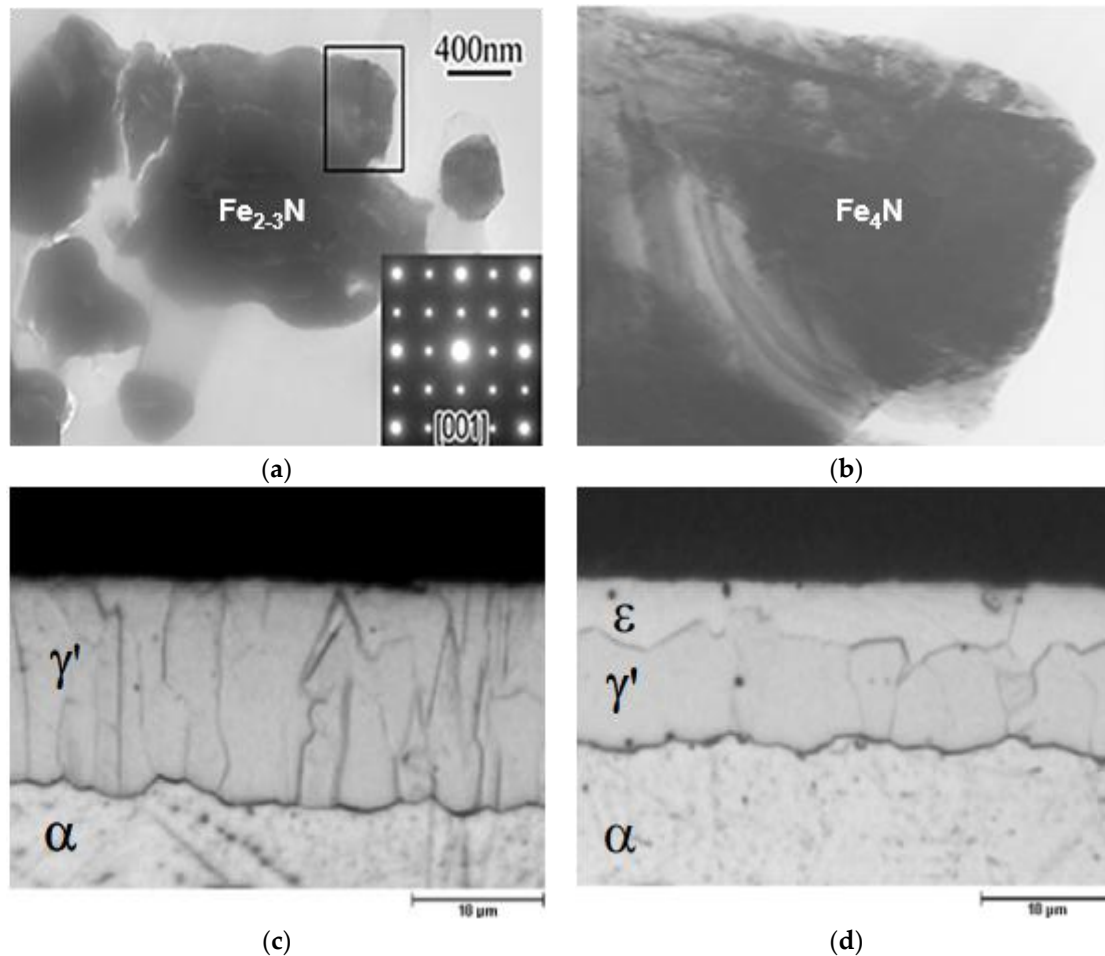


Figura 5. Imagen de campo claro obtenida mediante microscopía electrónica de transmisión (TEM) de algunas partículas de una muestra de  $\epsilon$ -FeN<sub>y</sub> +  $\gamma'$ -Fe<sub>4</sub>N ( $\epsilon$ -FeN<sub>y</sub> recocido durante 4 días a 657 K). El recuadro muestra un patrón de difracción de un grano de  $\gamma'$ -Fe<sub>4</sub>N (zona [001]) obtenido en la zona superior derecha de la partícula central de Fe<sub>2-3</sub>N ( $\epsilon$ -FeN<sub>y</sub>). (b) El grano de  $\gamma'$ -Fe<sub>4</sub>N resaltado en (a). Evolución de la capa compuesta (formada por subcapas de nitruro de hierro  $\epsilon$  y  $\gamma'$ ) sobre el hierro  $\alpha$  tras el recocido posterior a la nitruración: (c) recocido durante 40 días a 693 K; (d) recocido durante 7 días a 693 K (Liapina, 2005).

## Discusión

La historia de la nitruración permite ver con claridad cómo una tecnología de tratamiento superficial puede evolucionar desde una observación práctica hacia una disciplina científicamente estructurada. En su fase inicial, el interés estaba puesto en obtener una superficie dura sin deformar la pieza; después, la atención se trasladó a la relación entre atmósfera, composición y resultado microestructural; más tarde, se incorporaron los conceptos de difusión, diagramas de fase y control del potencial nitrurante; finalmente, aparecieron variantes como el plasma que hicieron del proceso una herramienta mucho más flexible (National Bureau of Standards, 1950; Epstein et al., 1923; Schneider et al., s.f.; ASM International, 1932; AHT Corporation, 2026). También es significativo que la nitruración haya impulsado una visión más moderna de la relación entre sustrato y superficie. Históricamente, muchos tratamientos se entendían como

“endurecimientos” generales del material. La nitruración, en cambio, ayudó a consolidar la idea de que la superficie puede diseñarse con relativa independencia del núcleo, creando sistemas gradientes donde cada región del material responde a una función diferente. Ese enfoque es hoy central en la ingeniería de superficies y conecta directamente la nitruración con otras tecnologías contemporáneas como la borurización, la nitrocarburoización y ciertos recubrimientos dúplex (ScienceDirect, 2025; AHT Corporation, 2026).

Por ello, la nitruración no debe verse solo como una técnica de endurecimiento, sino como una etapa clave en la maduración de la ingeniería superficial moderna. Su historia enseña que el control del transporte atómico, de la reactividad superficial y de la formación de fases intermetálicas puede traducirse directamente en soluciones industriales de gran impacto. Ese principio,

formulado en el contexto de los aceros nitrurados, sigue siendo plenamente vigente.

## Conclusiones

La nitruración representa uno de los desarrollos más importantes en la evolución de los tratamientos termoquímicos de superficies metálicas. Su historia demuestra cómo una necesidad industrial concreta endurecer la superficie sin deteriorar el núcleo ni deformar la pieza dio lugar a una tecnología capaz de integrar química, metalurgia, difusión y diseño de materiales. Desde las primeras patentes asociadas a Machlet hasta la consolidación europea del proceso con Fry, pasando por los estudios clásicos del sistema Fe-N y la posterior irrupción de la nitruración por plasma, el desarrollo histórico de la nitruración refleja el tránsito desde el empirismo hacia la comprensión científica plena del fenómeno (Machlet y Fry, 1913; Epstein et al., 1923; ASM International, 1932). Lo que comenzó como un endurecimiento superficial basado en amoníaco terminó convirtiéndose en una tecnología de alta precisión capaz de diseñar capas con características microestructurales específicas.

En la actualidad, la nitruración sigue siendo una tecnología vigente no solo por sus beneficios mecánicos y tribológicos, sino también porque encarna una filosofía moderna de la ingeniería de materiales: optimizar la superficie de acuerdo con la función del componente. Su historia no es únicamente la historia de una técnica, sino la historia de una forma más sofisticada de pensar la relación entre estructura, proceso y desempeño.

## Referencias

- AHT Corporation. (2026). *Plasma, gas nitriding and nitrocarburizing for engineering components and metal-forming tools*.
- ASM International. (1932). *Nitriding* (historia y desarrollo del proceso). ASM International.
- Epstein, S., Cross, H. C., Groesbeck, E. C., & Wymore, I. J. (1923). Observations on the iron-nitrogen system. *Journal of Research of the National Bureau of Standards*.
- Fuentes industriales. (2026). *Current nitriding equipment and industrial deployment of plasma nitriding furnaces*.
- Lee, S. K., et al. (2025). Hydrogen-free plasma nitriding process for fabrication of expanded austenite layer on AISI 316 stainless steel surface. *Materials*.
- Liapina, T. (2005). *Phase transformations in interstitial Fe-N alloys* [Tesis doctoral]. University of Stuttgart. [https://elib.uni-](https://elib.uni-stuttgart.de/server/api/core/bitstreams/f97e1e40-ed4d-4355-bba2-563343a84796/content)

[stuttgart.de/server/api/core/bitstreams/f97e1e40-ed4d-4355-bba2-563343a84796/content](https://elib.uni-stuttgart.de/server/api/core/bitstreams/f97e1e40-ed4d-4355-bba2-563343a84796/content)

Machlet, A., & Fry, A. (1913). *The nitriding process* (referencia histórica). Citado en recopilaciones sobre tratamientos termoquímicos.

National Bureau of Standards. (1950). *Heat treatment and properties of iron and steel* (Circular 495). U.S. Government Printing Office.

ScienceDirect. (1997). *Nitriding – An overview*. ScienceDirect Topics.

ScienceDirect. (2025). *Nitriding*. ScienceDirect Topics.

Schneider, R., et al. (s.f.). Microstructural scheme of nitrided layer with  $\epsilon$ -Fe<sub>2-3</sub>N,  $\gamma'$ -Fe<sub>4</sub>N and diffusion zone. *HTM Journal*. De Gruyter.