

APLICACIÓN METALÚRGICA DE TECNOLOGÍAS QUE HACEN USO DE PLASMA

A. Cabo¹, IONAR S.A., Buenos Aires, Argentina.
Recibido Mayo 5, 2011 – Aceptado agosto 23, 2011

<http://dx.doi.org/10.18566/puente.v5n2.a01>

Resumen— Dentro de las tecnologías que hacen uso de plasma, las de aplicación más extendida son la nitruración y nitrocarburo. Son procesos termoquímicos asistidos por plasma que tienen ventajas y diferencias significativas con respecto a otras tecnologías convencionales. Se aplican para mejorar el comportamiento de componentes mecánicos, tales como: engranajes, matrices, válvulas, cigüeñales, etc. que pueden estar sometidos a desgaste, corrosión y fatiga. Dichos procesos pueden aplicarse a elementos fabricados en acero, fundición o aleaciones de titanio y se adaptan en forma precisa a cada material y diseño de modo de reducir o eliminar distorsiones y cambios dimensionales. Son tecnologías que permiten obtener elevada dureza y resistencia al desgaste, no generan efluentes y usan la energía de manera eficiente.

En este trabajo se mencionan los aspectos básicos, físicos y metalúrgicos, en que se basan las tecnologías que hacen uso de plasma para modificar superficies y se describen algunas aplicaciones industriales típicas para los casos de nitruración y nitrocarburo de componentes fabricados en aceros de baja aleación, de herramientas e inoxidables

Palabras clave— Plasma, Modificación de superficies, Nitruración por plasma, Nitrocarburo por plasma, Aceros de nitruración, Ingeniería de superficies.

Abstract— Among the technologies that make use of plasma, the ones with wider application are nitriding and nitrocarburing. They are plasma-assisted thermochemical processes which have advantages and significant differences from other conventional technologies. They are applied to improve the performance of mechanical components, such as: gear, matrices, valves, crankshafts, etc. that may be subject to wear and tear, corrosion and fatigue. These processes can be applied to elements manufactured in steel, foundry or titanium alloys, and adapt in a precise way to each material and design in order to reduce or eliminate distortions and dimensional changes. They are technologies that allow to obtain high hardness and resistance to wear, do not generate effluents and use energy in an efficient way. nitrocarburing of mechanical components made of low alloy, tool and stainless steels are discussed.

¹Amado Cabo, cursó estudios de ingeniería mecánica y física en Argentina. Es Doctor en Física en Carnegie-Mellon University, U.S.A. Fundador de la empresa de base tecnológica IONAR S.A. www.ionar.com.ar (correo e.: cabo@ionar.com.ar).

Keywords— Plasma, modification of surfaces, nitriding for plasma, Nitrocarburing for plasma, nitriding steel, surface engineering.

I. INTRODUCCIÓN

La industria moderna requiere producir con la máxima eficiencia, lo cual implica ejecutar de la mejor manera todo lo referido a diseño de producto, materiales y procesos de fabricación. En ese contexto, los materiales metálicos usados deben tener las propiedades mecánicas estructurales adecuadas y simultáneamente deben presentar propiedades óptimas en superficie donde siempre se requiere máxima resistencia a la corrosión, desgaste y fatiga.

Es bien sabido que en muchos casos, los materiales con propiedades mecánicas estructurales apropiadas no responden en forma adecuada a las sollicitaciones de superficie. Para resolver esa situación de compromiso entre propiedades requeridas en volumen y en superficie, la industria utiliza desde hace décadas varios procesos térmicos y termoquímicos. De estos últimos los de nitruración y nitrocarburo son muy usados porque permiten mejorar las propiedades de la superficie de herramientas y elementos de máquina, fabricados en acero y fundición, mediante procesos a baja temperatura. Con su aplicación se consigue aumentar la dureza y en algunos casos también se obtiene mayor resistencia al desgaste, a la fatiga y a la corrosión.

Obviamente, siempre se ha tratado de trabajar con los mejores procesos, sin embargo actualmente las exigencias de competir y ser eficientes en toda la cadena de valor, desde el insumo básico hasta el producto o servicio final, imponen una revisión crítica sobre la eficiencia de cada tecnología. En general se requiere confiabilidad operativa, mínimo impacto ambiental, bajo consumo de energía y equipos fáciles de mantener en condiciones óptimas que permitan obtener la mejor ecuación costo/beneficio, además de obtener la mejor calidad de producto o servicio.

Entre los aspectos básicos que diferencian a las tecnologías de nitruración más antiguas y las más modernas, como la nitruración y nitrocarburo por plasma, se encuentra la forma en que proveen nitrógeno o carbono a la superficie. En todos los casos se trata de procesos termoquímicos, es decir

que producen un cambio de composición en la superficie. La temperatura y el tiempo de proceso dependen fundamentalmente de la tecnología utilizada y también del material que se trate. Las tecnologías más antiguas usan baños de sales o un medio gaseoso para aportar nitrógeno o carbono a la superficie. En la Tabla I se muestran los rangos de temperatura típicos para diferentes procesos termoquímicos.

TABLA I.
TEMPERATURAS TÍPICAS A LAS QUE SE REALIZAN LOS PROCESOS TERMOQUÍMICOS

Proceso	Temperatura
Cementación	930 °C mas temple y revenido
Carbonitruración	870 °C mas temple y revenido
Nitrocarburation en sales	570 °C
Nitruración gaseosa	530 °C
Nitruración y nitrocarburation por plasma	350 a 560 °C, según requerimientos

En todos los casos, parte de los átomos que llegan a la superficie pueden difundir y quedar en solución sólida o reaccionar con el hierro y algunos elementos aleantes para formar compuestos denominados nitruros o carbonitruros. Según las condiciones en que se realice el proceso, una fracción de los átomos que difunden desde la superficie quedan en solución sólida y el resto precipita formando compuestos como los mencionados. El tipo de compuesto que se genera y la cantidad, forma, tamaño y distribución del mismo son los principales causantes del cambio en las propiedades físicas y mecánicas de la superficie. Los productos que se forman modifican la superficie de la pieza; normalmente la parte más externa queda constituida por una capa llamada capa de compuestos o capa blanca (por su aspecto metalográfico). La capa blanca puede tener un espesor de varios micrones. Entre la capa blanca y el material base, se forma la llamada capa de difusión cuyo espesor puede llegar a tener, según el caso, desde algunos micrones hasta décimas de milímetro.

La experiencia muestra que la resistencia al desgaste y a la corrosión depende significativamente del espesor y calidad de la capa blanca, mientras que el comportamiento a la fatiga y la resistencia mecánica (macro dureza) dependen esencialmente de la capa de difusión.

Los conceptos expuestos, derivados de trabajos científicos y de la experiencia industrial, llevan a concluir que para lograr el máximo rendimiento de una superficie, es necesario realizar los procesos de nitruración y nitrocarburation teniendo en cuenta: material, tratamiento térmico previo, diseño y sollicitación a que va a ser sometida la pieza. En

general, cualquiera sea la tecnología utilizada, el proceso conviene que sea lo más corto y a la menor temperatura posible, además debe obtenerse una superficie con capa blanca y de difusión, de espesor, estructura cristalográfica y dureza óptimas.

II. NITRURACIÓN Y NITROCARBURACIÓN POR PLASMA

El concepto de plasma es conocido en el ámbito científico desde principios del siglo XX pero recién durante los últimos 50 años fue posible, gracias a desarrollos en electrónica de potencia, informática, tecnología de vacío y nuevos materiales, lograr procesos industriales competitivos desde el punto de vista económico [1-2]. La aplicación a escala industrial comenzó en Alemania a fines de la década del 60 mientras que en Estados Unidos se realizaron diversas investigaciones fundamentales [3].

En el caso que vamos a describir aquí, el plasma se forma a partir de una mezcla de gases puros (N₂, H₂, CH₄, Ar, etc.) en la proporción y presión adecuadas para producir la reacción fisicoquímica necesaria. La mezcla de gases es sometida a un campo eléctrico entre dos electrodos (ánodo y cátodo) y se ioniza y convierte en plasma. En ese estado, la materia continúa en estado neutro, desde el punto de vista de carga eléctrica, pero adquiere comportamiento colectivo, es decir que las partículas con cargas positivas (iones) se desplazan hacia el cátodo y las que tienen carga negativa (electrones) van hacia el ánodo.

En un reactor industrial la carga a tratar es el cátodo y el ánodo es el recinto que la rodea. La temperatura de la carga aumenta por la energía cinética que le transfieren de los iones que bombardean su superficie. Esta forma de calentamientos fue la original, actualmente también se transfiere energía a la carga mediante fuentes auxiliares, por ejemplo mediante resistencias eléctricas como se ejemplifica en la Fig. 1. El uso de ambos medios de calentamiento permite lograr temperatura uniforme independientemente de la forma de la carga. Los primeros equipos que utilizaban solo el bombardeo iónico como fuente de calor imponían algunas limitaciones a la tecnología; esas limitaciones fueron superadas pero crearon un mal precedente que costó mucho erradicar, principalmente en los Estados Unidos.

La diferencia de potencial entre ánodo y cátodo puede variar entre 400 y 900 V y la presión está comprendida entre 0,1 y 10 hPa, así se genera un plasma de aspecto luminiscente que cubre todas las superficies a tratar. La Fig.1 muestra esquemáticamente el principio de funcionamiento de una instalación de nitruración por plasma.

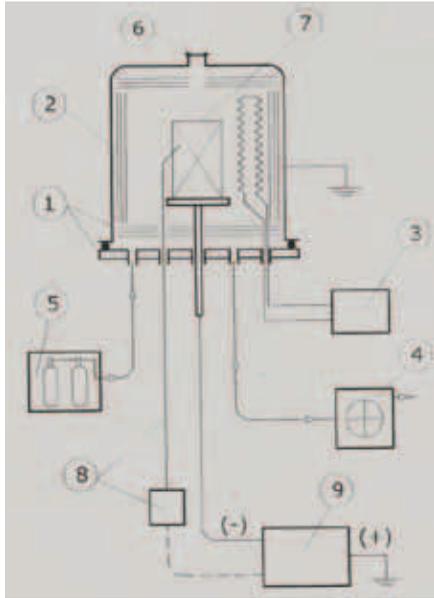


Fig. 1. Esquema de una instalación de nitruración por plasma donde se muestran sus principales componentes. 1) Cuerpo del reactor; 2) Pantallas de radiación; 3) Fuente de calentamiento auxiliar; 4) Equipo de bombeo; 5) Fuente de gases; 6) Visor; 7) Carga; 8) Sensor de temperatura y control de potencia; 9) Fuente de plasma

La reacción fisicoquímica que tiene lugar en la superficie es compleja y se han propuesto diferentes modelos [1-3] para interpretarla, de todos modos desde el punto de vista tecnológico, lo sustancial es que la reacción es más rápida que en los procesos convencionales, lo que permite obtener un espesor de capa igual o superior mediante procesos a menor temperatura y durante tiempos del orden del 40 % menores a los requeridos por la nitruración gaseosa. La zona más activa del plasma (zona luminiscente) está junto a la superficie de la pieza y como ya dijimos, "copia" la forma de esta en toda su extensión, esto permite tratar de manera uniforme aún piezas de forma compleja, Fig. 2.

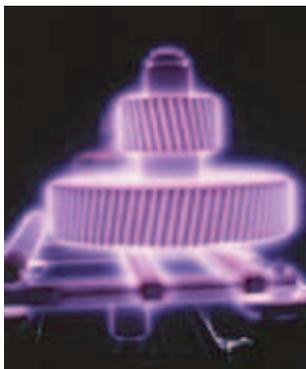


Fig. 2. Engranajes de un reductor de velocidad fabricados en acero AISI 4140, en proceso de nitruración por plasma



Fig. 3. Equipo vertical de nitruración iónica, puede verse una carga típica

La posibilidad de controlar en forma independiente: presión, densidad de corriente, composición química del plasma, tiempo y temperatura, convierten a la nitruración y nitrocarburation por plasma en procesos muy flexibles y de elevado rendimiento frente a las tecnologías convencionales. Por la forma en que se produce el fenómeno, los equipos pueden ser de tipo modular, particularmente los de diseño vertical, destinados al tratamiento de componentes esbeltos o de gran longitud (ejes, tornillos de máquinas inyectoras y extrusoras de plástico, brochas, cigüeñales, etc.). En la Fig. 3 se muestra un equipo vertical de nitruración por plasma y una carga de elementos que se tratan habitualmente. El montaje de la carga es un arteciencia que puede pasar desapercibido a primera vista, pero que tiene importancia significativa en el rendimiento de todo el proceso; no se trata de cargar un equipo en el sentido habitual del término, sino de armar "un cátodo" en forma precisa y en condiciones de excelente limpieza. Otro aspecto práctico lo impone la flexibilidad del proceso mencionada anteriormente; para obtener óptimos resultados deben seleccionarse materiales, y a veces diseños particulares, en cada carga.

En la Fig. 4 se muestran curvas de penetración (dureza vs. penetración) obtenidas en un acero tipo AISI D2 usado en la construcción de herramientas de trabajo en frío. Se puede apreciar la influencia del tiempo y temperatura del proceso aplicado. Obsérvese que a menor temperatura se obtiene mayor dureza.

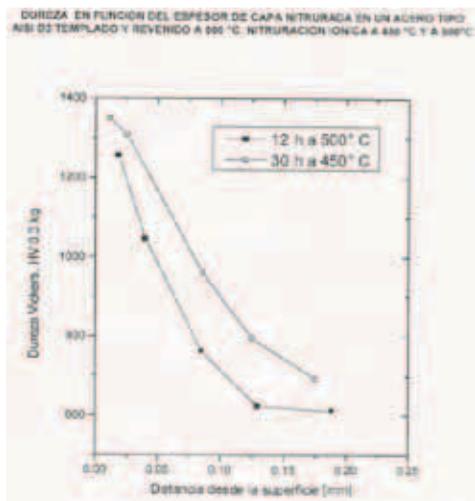


Fig. 4. Variación de dureza en función de la penetración, obtenida por nitruración iónica, en un acero tipo AISI D2

III. ASPECTOS A TENER EN CUENTA EN LAS APLICACIONES INDUSTRIALES

Prácticamente todos los aceros y fundiciones pueden ser tratados por nitruración o nitrocarburation por plasma con óptimos resultados. Sin embargo, con respecto a la selección de materiales se puede, en primera aproximación, estimar su comportamiento en base a la concentración de elementos aleantes que forman nitruros [4]. Esos elementos deben estar en solución sólida de modo que al entrar en contacto con el nitrógeno que difunde puedan formar nitruros, los que se caracterizan por ser termodinámicamente estables a temperaturas superiores a la de su formación. Esto tiene gran importancia práctica porque las propiedades resultantes, tanto físicas como mecánicas se mantienen a temperaturas relativamente altas, superiores a las que pueden soportar las superficies cementadas, que se forman a temperaturas del orden de los 900 °C y luego son templadas y revenidas (ver Tabla I).

Los elementos formadores de nitruros pueden ordenarse, comenzando por el que más favorece dicha formación, de la manera siguiente: Aluminio, Titanio, Cromo, Vanadio y Molibdeno. El aluminio es un aleante típico de los aceros de baja aleación “especiales de nitruración” y su contenido suele estar en el orden del 1 %. En la mayoría de los aceros su capacidad de nitruración está dada por el contenido de cromo, vanadio y molibdeno, en los aceros al carbono mas comunes solo se forman nitruros de hierro y de manganeso, por esta razón se consigue un bajo aumento de dureza aunque sí se consigue una notable mejora

frente al deslizamiento y a la corrosión. Es conveniente que el contenido de carbono no sea elevado o que guarde una relación adecuada con el contenido de aleantes porque la mayoría de los formadores de nitruros también son formadores de carburos y esto equivale a reducir el contenido de aleante disponible para formar nitruros. En forma no muy técnica podemos decir que el carbono y el nitrógeno compiten por los mismos aleantes.

Las mejores condiciones para nitrurar o nitrocarburar se dan cuando el acero está templado y revenido (bonificado) conforme a los procedimientos de fabricación que vayan a utilizarse posteriormente. La temperatura de revenido debe ser superior a la nitruración en por lo menos 30 °C.

Lo anterior es mandatorio para los aceros con microestructura martensítica, no así para los austeníticos o endurecibles por precipitación. No obstante, en todos los casos conviene que la microestructura sea lo más homogénea y con el menor tamaño de grano posible. El material bonificado tiende a tener propiedades y estructura más homogéneas, lo cual permite obtener una capa nitrurada de mejor calidad [5].

El espesor y características de la capa nitrurada deben ser adecuados a la aplicación; sus propiedades dependen del tipo y estado del material y del proceso de nitruración por plasma. Desde el punto de vista del desgaste y corrosión debe tenerse en cuenta que la capa blanca, de solo algunos micrones de espesor es fundamental, especialmente en los aceros de baja aleación.

La tecnología de nitruración por plasma presenta ventajas con respecto a las convencionales, porque permite formar la capa blanca, de espesor y estructura adecuadas o eliminarla, como se requiere, por ejemplo, en matrices de extrusión de aluminio. Por otro lado, los aumentos de dureza y de resistencia a la fatiga mecánica están dados fundamentalmente por la capa de difusión.

El aumento de vida en fatiga se debe, básicamente, a las tensiones de compresión que se generan en la capa de difusión, por lo tanto deben tenerse presentes desde el momento del diseño del componente a los efectos de evitar posibles distorsiones. La tecnología de nitruración por plasma a diferencia de las convencionales permite, en gran medida, formar la capa más conveniente para cada aplicación.

En lo que sigue presentaremos resultados obtenidos en: aceros inoxidable austeníticos (ver Fig. 5) y en aceros inoxidable endurecibles (ver Fig. 6) por precipitación que corresponden a válvulas esféricas y a matrices de inyección de plástico respectivamente.



Fig. 5. Válvulas esféricas (diámetro máximo 350 mm) fabricadas en acero inoxidable tipo AISI 316L

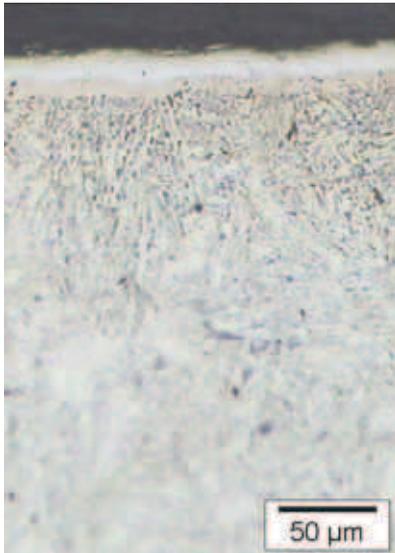


Fig. 6. Micrografía de un acero inoxidable endurecible por precipitación; 0,05C; 15 Cr; 4,5 Ni; 0,45 Mn; 0,25 Si y 3,5 Cu, usado en una matriz de inyección de plástico para la industria automotriz, nitrocarburado por plasma

A. Los Aceros Inoxidables: un Caso Especial

Los aceros inoxidables no se consideran materiales adecuados para nitrurar o nitrocarburar; esta observación es válida cuando se usan las tecnologías antiguas donde la temperatura y el tiempo de proceso generan la precipitación de nitruros o nitrocarburos de cromo. Como consecuencia de este fenómeno, análogo al que ocurre en otros aceros, el material pierde sus propiedades de resistencia a la corrosión, razón principal por la que seguramente fue elegido. La formación de nitruros baja el contenido de cromo

en la zona adyacente al precipitado de forma que esa zona se vuelve sensible a la corrosión.

Cuando se aplican las tecnologías asistidas por plasma, la temperatura de tratamiento puede estar en el orden de los 400°C y cuando esto ocurre no se forman precipitados y el nitrógeno o carbono forman una solución sólida sobresaturada que aumenta la dureza a valores del orden de los 1000 HV sin afectar la resistencia a la corrosión. Esto es observable especialmente en los aceros inoxidables austeníticos. Esta es una ventaja significativa porque, precisamente son los aceros austeníticos los más usados en la fabricación de componentes que deben resistir la corrosión y además son materiales de baja dureza con un comportamiento deficiente frente al deslizamiento; como se dice habitualmente, su superficie tiende a “engranarse” fácilmente aun en condiciones de lubricación correcta. La nitrocarburation por plasma pone a la superficie en excelentes condiciones desde el punto de vista de la tribología sin afectar su resistencia a la corrosión (ver Fig . 6). [6].

B. Aspectos Especiales de la Nitruración y Nitrocarburation por Plasma

Datos obtenidos de la bibliografía científica y tecnológica y de la experiencia industrial permiten identificar las siguientes características:

- i. Son los procesos termoquímicos que pueden aplicarse a menor temperatura con calentamiento y enfriamiento en vacío, a velocidad controlada, lo cual reduce al mínimo o elimina las distorsiones y cambios dimensionales obteniéndose valores máximos de dureza, resistencia al desgaste, fatiga y corrosión.
- ii. La posibilidad de trabajar a menor temperatura que los procesos convencionales, permite aplicar la nitruración por plasma a un mayor número de materiales susceptibles de ablandamiento con los procesos convencionales u obtener mayor dureza en los materiales típicos de nitruración.

iii. En caso de ser necesario, la nitruración por plasma se puede aplicar en forma selectiva o parcial en una misma pieza.

iv. La nitruración por plasma es la única que puede aplicarse eficientemente a los aceros inoxidables austeníticos, martensíticos y endurecibles por precipitación, con mínima alteración de su resistencia a la corrosión.

v. El control preciso de las variables: temperatura, tiempo, presión, composición química del plasma, y potencial de aceleración de los iones permite ajustar el proceso para cada

material y aplicación. Debido a estas características es posible controlar la metalurgia física de la superficie y obtener las capas blanca y de difusión, de espesor y estructura adecuadas.

vi. El plasma puede penetrar en ranuras, agujeros, espacio entre dientes de engranaje, etc., y "copiar" geometrías complejas, lo cual permite obtener capas de espesor más uniforme.

vii. Por las características mencionadas, es una tecnología adecuada para tratar piezas de precisión como ser: matrices, engranajes, herramientas especiales, cigüeñales, brochas, mandriles y componentes de máquina en general.

viii. Las piezas después del tratamiento quedan listas para ser puestas en servicio.

IV. CONCLUSIONES

La tecnología descrita en este trabajo significa un avance cualitativo en el área de tratamientos termoquímicos. El mismo se ha dado como resultado de una síntesis entre diversos campos del conocimiento, en particular: metalurgia física, materiales, electrónica de potencia y tecnología de vacío. Como la mayoría de las tecnologías que hacen usos de plasmas, aun continúa en desarrollo para ampliar sus posibilidades de aplicación y entender mejor los aspectos básicos que permiten explicar mejor sus resultados. A diferencia de las tecnologías convencionales basadas esencialmente en la experiencia industrial, esta como la mayoría de las nuevas tecnologías, tiene su origen en el ámbito de la investigación aplicada. Es un caso más en el que se muestra que la separación entre investigación básica e industria, aunque ambas entidades sean fundamentales, conducen a resultados pobres o por lo menos a tiempos extremadamente largos para comprobarse la transferencia del conocimiento a la práctica. Para hacer más fructífero el trabajo de las partes involucradas en el desarrollo, deben hacerse trabajos a escala intermedia, de planta piloto, donde el conocimiento básico y los recursos converjan con las necesidades y límites que impone la producción. Cuando se analiza en forma integral a través del tiempo, la estrategia del desarrollo a escala de planta piloto resulta ser la que requiere inversión mínima para lograr la eficiencia máxima. Todo esto plantea un panorama favorable para su incorporación al ámbito industrial de nuestros países con vistas a mejorar la capacidad de competir con los de mayor desarrollo.

REFERENCIAS

- [1] Thanki, Paragkumar N. Dellachene, Edith. Six Jean, Luc. Surface characteristics of PLA and Plga films. *Applied Surface Science* 25. 2006, p. 2758-2764.
- [2] B. Edenhofer, Physical and metallurgical aspects of ionitriding, *Heat Treatment of Metals*, pp. 23-28 and 59-67, 1974.
- [3] James D. Cobine, *Gaseous Conductors*, Dover Publications, Inc., 1958.
- [4] M. Hudis, Study of ion-nitriding, *J. Appl. Phys.*, vol. 44, N°4, pp. 1489-1496, april 1973.
- [5] Karl Thelnig. *Steel and Its Heat Treatment*. Bofors Handbook, The Butterworths Group, 1974.
- [6] Tom Bell and Y. Sun. Load bearing capacity of plasma nitrided steel under rolling-sliding contact. *Surface Engineering* 1990, Vol. 6, N° 2. pp. 133-139.
- [7] E. De Las Heras, P. Corengia, M. Brizuela, A. García-Luis, G. Ybarra, N. Mingolo, A. Cabo, S. P. Brühl, *Plasma Process. Polym.* 2007, 4, S741.

BIOGRAFIA



Amado Cabo, nacido en 1939, Argentina. Cursó estudios de ingeniería mecánica y de física; obtuvo el doctorado en Física en Argentina, posteriormente hizo trabajos de post grado en Carnegie-Mellon University, U.S.A. Su actividad profesional ha estado vinculada al desarrollo de tecnología, primero en el campo nuclear y posteriormente al desarrollo de equipamiento y aplicación de tecnologías a la ingeniería de superficies. En 1990 fundó la empresa de base tecnológica IONAR S.A. dedicada a la modificación de superficies mediante la aplicación de plasma, lo que realiza con tecnología propia y en estrecho contacto con instituciones científicas y tecnológicas de varios países.