

PROCESO DE RECUBRIMIENTOS BASADOS EN DEPOSICIÓN POR PLASMA



El término “plasma” se utiliza para definir un estado de la materia (“a veces referido como “cuarto estado de la materia”)



en el cual una proporción importante de átomos o moléculas en un gas se encuentran en un estado ionizado exhibiendo un comportamiento colectivo eléctricamente neutro (quasi-neutro).

El estado de plasma se genera haciendo pasar la corriente gaseosa, a baja presión, a través de un arco eléctrico, de forma que la energía eléctrica que proporciona el arco es transferida como energía térmica a las moléculas del gas.

Como resultado de dicha transferencia, las moléculas del gas son ionizadas.



Se puede decir que, desde el punto de vista térmico, un plasma producido por una descarga eléctrica en un gas a baja presión está formado por dos fluidos diferentes:

- a) uno, compuesto por los electrones libres, tiene propiedades similares a las de un gas de alta temperatura,
- b) en tanto que el otro, compuesto por los elementos pesados, se comporta como un fluido de baja temperatura.

Por su alta temperatura, los electrones transfieren energía interna a las especies pesadas del plasma, activándolas y permitiéndoles reaccionar químicamente.

Como resultado, se producen reacciones químicas en fase gaseosa y, en particular, sobre la superficie de un substrato inmerso en el plasma por deposición de especies activadas, lo que da lugar al crecimiento de un recubrimiento.

Esta constituye la base de los procesos reactivos de deposición por plasma.

La materia alcanza su estado de plasma cuando se encuentra ionizada, es decir, compuesta por partículas con cargas eléctricas positivas y negativas, que forman un gas de carga eléctrica total nula que presenta un comportamiento colectivo debido a las interacciones eléctricas simultáneas entre las partículas.

La formación del plasma se puede entender desde el punto de vista de la energía interna de la materia.

Así, la energía interna de una sustancia en estado líquido es mayor que en estado sólido, y en estado gaseoso mayor que en líquido. Sin embargo, si se aumentara paulatinamente su energía interna, las moléculas del gas se disocian en átomos y estos a su vez en electrones e iones positivos, es decir, se ionizan.

Una vez que el número de partículas ionizadas es suficientemente grande, el comportamiento dinámico del sistema queda determinado por fuerzas electromagnéticas (de largo alcance) y no por colisiones binarias entre partículas neutras (como en los gases reales).

A pesar de considerarse un nuevo estado de la materia, no existe una transición de fase.

En general, a energías internas equivalentes a temperaturas mayores de 10.000°C , todas las sustancias conocidas se encuentran en este estado.

Dependiendo de su energía, distinguimos entre plasma caliente y plasma frío.

El primero (Caliente), está fuertemente ionizado y solo está formado por electrones e iones positivos.

El segundo (Frío), débilmente ionizado, además de electrones e iones, también contiene átomos y moléculas en su estado fundamental de energía o estados excitados.

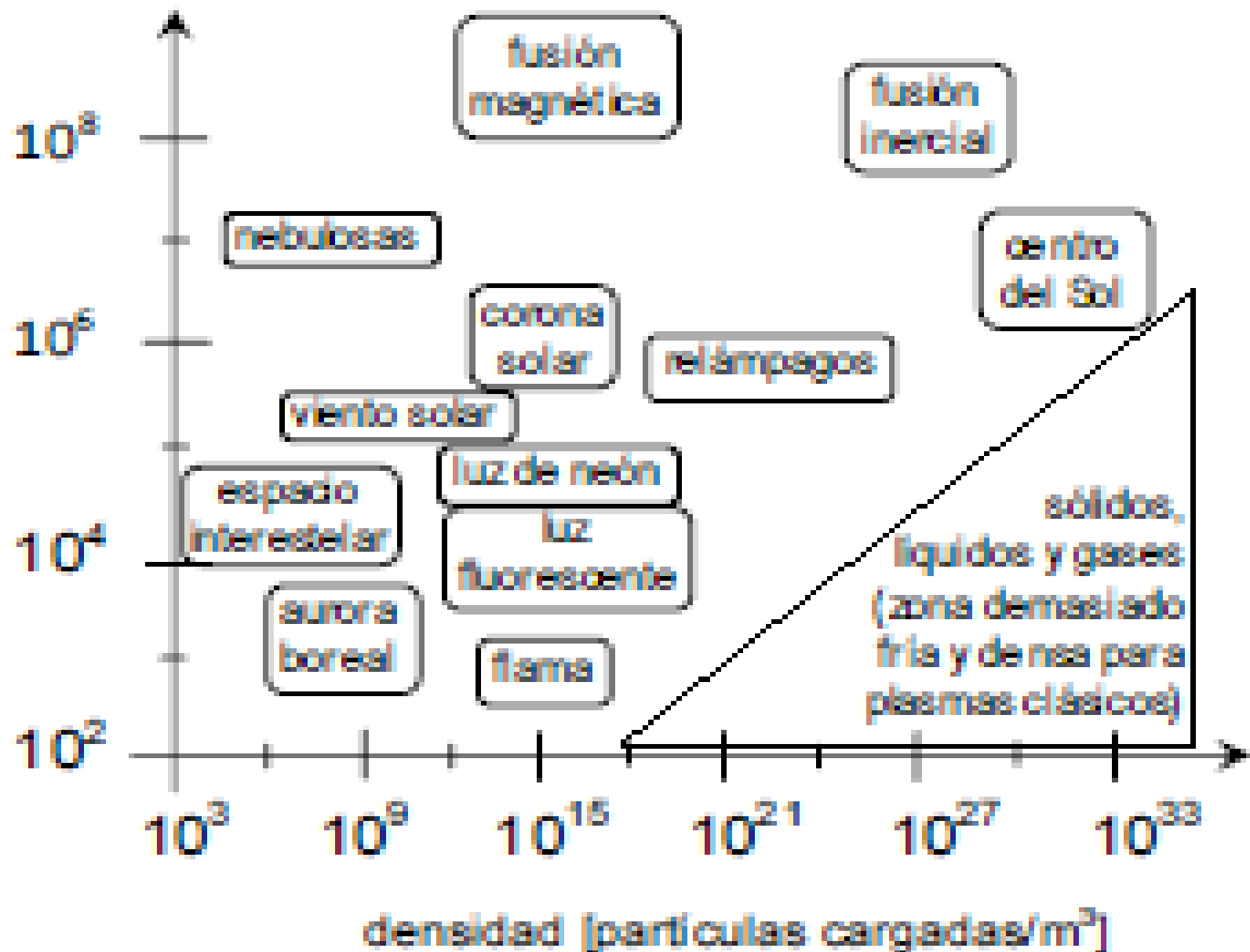
Sea fuerte o débilmente ionizado, el plasma presenta nuevos fenómenos y características imposibles de observar en los otros estados de la materia; por ejemplo, estos son gases de alta conductividad eléctrica y térmica, forman regiones laminares ricas en iones, tienen alta difusión de partículas, transmite ondas electromagnéticas y mecánicas, emite radiación y partículas.

Todas estas propiedades son aprovechadas en la industria.

Las sustancias en estado de plasmas se presentan con un rango de temperaturas y densidades de partículas muy variados.

En la figura se muestran algunos ejemplos de formación de plasmas en la naturaleza y otros creados por el hombre.

temperatura [k]



CÓMO SE OBTIENE?

Para que la materia alcance el estado de plasma, se pueden utilizar diversas técnicas que le transfieran energía, las cuales utilizan diferentes procesos físicos.



Es posible generar plasma, por ejemplo, estableciendo intensos campos eléctricos o por interacción con ondas electromagnéticas de radiofrecuencia (RF), por absorción de microondas, por interacción con ondas de choque y láseres, por colisiones con haces de partículas de alta energía, con vapores a altas temperaturas, por arcos eléctricos, etcétera, y a su vez, cada técnica presenta diversas variantes.

Un ejemplo son los reactores de plasma para procesamiento de materiales donde pueden utilizarse campos eléctricos constantes o variables, los que primero ionizan el átomo y luego aceleran los electrones e iones positivos.

La transferencia de energía de los electrones a las partículas pesadas (iones, átomos o moléculas) vía colisiones es muy lenta debido a la gran diferencia de masa. Sin embargo, si se confina un gas en una cámara a baja presión, se tiene una menor frecuencia de colisión, lo que implica un mayor recorrido en promedio, de forma que los electrones pueden acumular suficiente energía para producir, por choques, la ionización y la excitación energética de las partículas más pesadas.

De esta forma es posible generar un plasma con partículas ionizadas (las que pueden ser químicamente muy reactivas) que luego intervienen en procesos físicos y químicos al interactuar con el material que se desea procesar.

ALGUNAS TÉCNICAS DE PROCESAMIENTO POR PLASMA

Las técnicas de procesamiento por plasma son muy variadas pero es posible clasificarlas en dos grandes grupos según la energía interna que requiere el plasma.

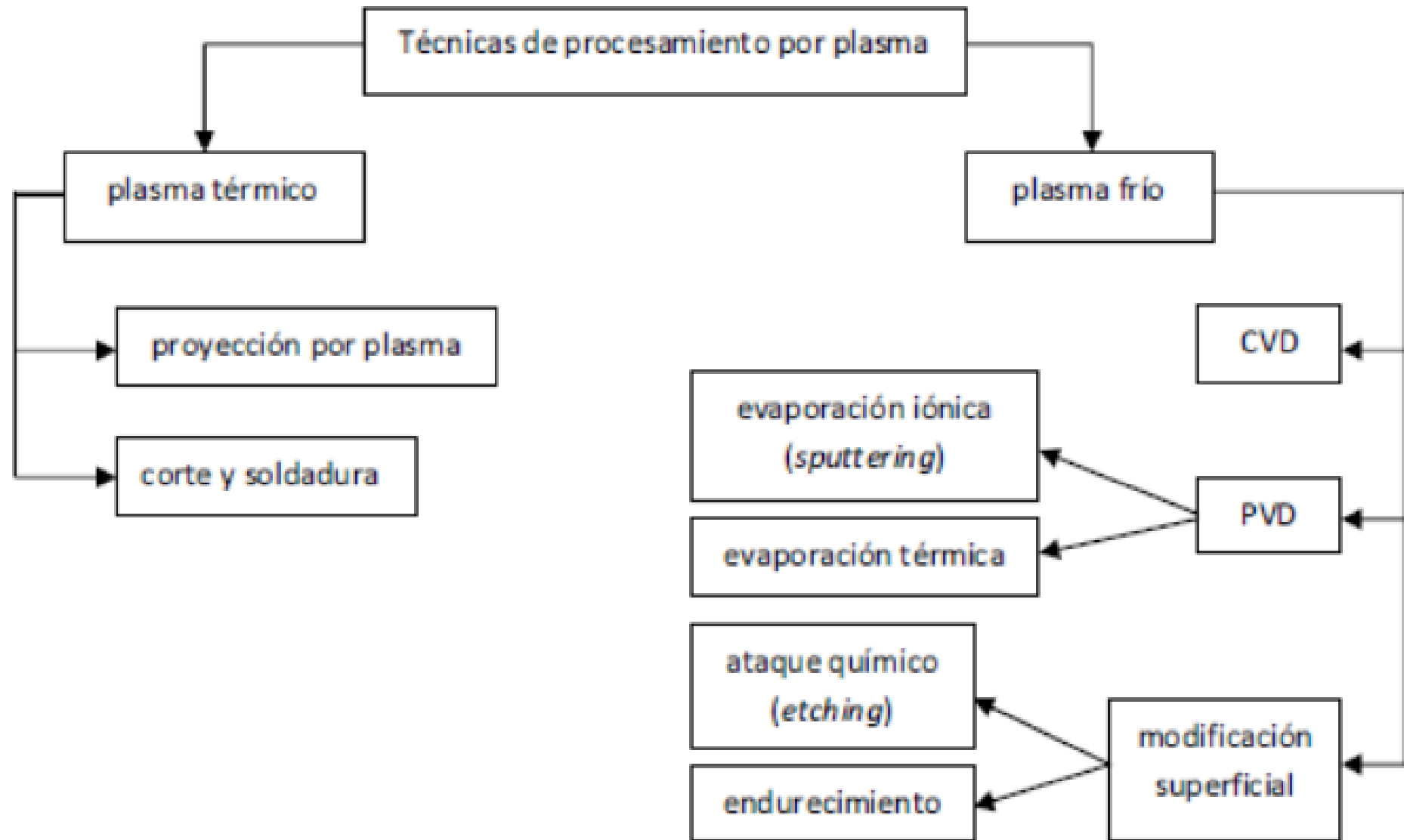
- Los “plasmas térmicos” son los que poseen una alta densidad de partículas cargadas (es decir formadas por electrones, iones positivos y en menor cantidad de átomos excitados).
- Los “plasmas fríos” poseen una densidad baja (por lo que el plasma está formado no solo de iones positivos y electrones sino también átomos neutros y moléculas).

Cada uno de estos agrupa una cantidad de técnicas de plasma que se aplican en diversos procesos de la industria. En el caso de los plasmas fríos, las técnicas se pueden subdividir además en plasmas PVD (Physical Vapor Deposition) y plasmas CVD (Chemical Vapor Deposition), ambos son bastante utilizados para la formación de recubrimientos sobre materiales (sustratos) con aplicaciones en la industria metalmeccánica, aeroespacial, automovilística, energética, entre otras.

Si el recubrimiento se produce por evaporación o por bombardeo dentro del plasma, se trata del primero (PVD), pero si el recubrimiento se forma por reacciones químicas con el sustrato, se trata del segundo (CVD).

En este grupo también se encuentran los plasmas para modificación superficial, donde las nuevas características del material se deben al recubrimiento y al mismo tiempo al diseño o figura impresa sobre el sustrato, técnica fundamental para el desarrollo de la microelectrónica (proceso también conocido como “plasma etching”).

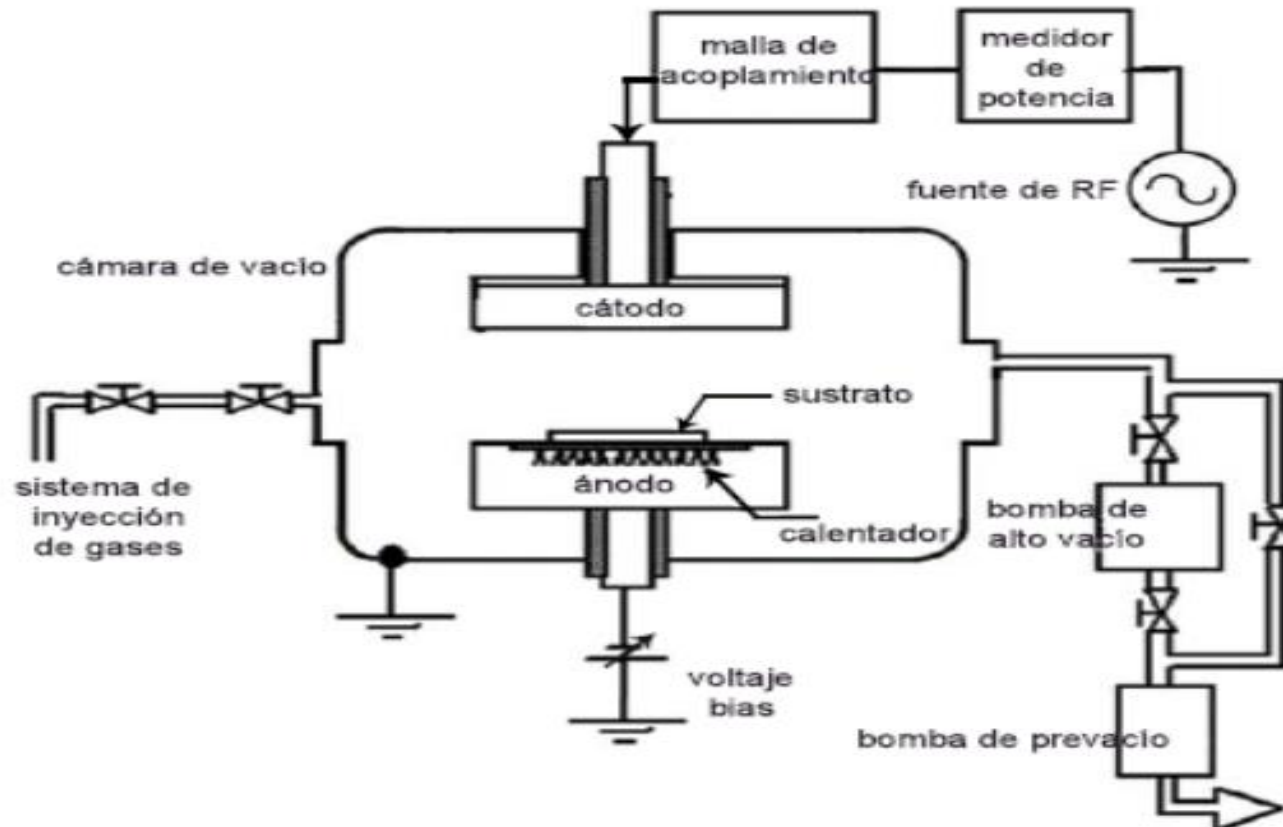
Clasificación de las técnicas de plasma según su energía interna



Por otro lado, las técnicas con plasma PVD y CVD son básicamente:

1. Evaporación térmica, en la cual la vaporización es producida por transferencia de calor al sólido fuente y,
2. Evaporación iónica (o sputtering), en la cual la vaporización es producida por transferencia de momento lineal (colisiones) de un flujo de iones de alta energía al material fuente. Para esta técnica se utilizan reactores de “descarga brillante” (glow discharge).

Esquema de un reactor RF de evaporación iónica (*sputtering*) para producir recubrimientos de películas delgadas por procesos PVD o CVD



Básicamente, los reactores como el mostrado en la figura están formados por una cámara de vacío, por lo general de acero inoxidable (en el caso de nuestro laboratorio la cámara es de vidrio pyrex), acoplado a una bomba difusora o una turbo molecular que a su vez opera con una bomba mecánica de pre-vacío.

En esta cámara se crea una presión menor a 10^{-3} Pa y luego se inyecta un flujo constante de un gas inerte (generalmente Ar o N₂) hasta que la cámara alcanza una presión interna constante entre 0,1 Pa y 1 Pa.

Se establece luego un campo eléctrico por medio de una fuente de voltaje continuo, alterno o de radiofrecuencia (RF) y, generalmente, una baja intensidad de corriente (entre 100 mA y 500 mA); en caso de emplear fuentes de RF, además debe utilizarse una malla de acople para maximizar la potencia absorbida por el plasma. Este último permite obtener plasmas más estables en áreas mayores para procesos a bajas temperaturas.



EL PROCESO FÍSICO QUE SUCEDE SE EXPLICA DE LA SIGUIENTE FORMA:

El campo eléctrico ioniza algunos átomos de argón, separándolos en electrones e iones positivos de Ar.

Los electrones son acelerados por este mismo campo eléctrico y por colisiones con los átomos de Ar, logran ionizarlo muy rápidamente por “efecto avalancha” formando una “nube” de plasma.

La aplicación de una diferencia de potencial permite acelerar el Ar ionizado hacia el cátodo (blanco o target) de tal forma que los átomos del blanco son extraídos y se mezclan con el gas inerte, formando una nube de plasma compuesto por átomos del gas y del blanco y sus combinaciones (por ejemplo, si el blanco es de titanio y el gas inerte es nitrógeno, se formará una nube de plasma formada por electrones, N^+ , Ti^+ , TiN , TiN^+ , etcétera).

Finalmente, este plasma es direccionado hacia el sustrato, que es el objeto que se desea recubrir, de forma que se condense sobre su superficie (en el ejemplo, se formaría un recubrimiento de nitruro de titanio, TiN).

A veces es necesario aplicar un voltaje adicional (llamado “voltaje bias”) y calentar con resistencias al sustrato para mejorar la adherencia.

El resultado es superior en uniformidad y adherencia al obtenido por medios químicos, además de que es posible controlar otras características del recubrimiento.

PROCEDIMIENTOS DE DEPOSICIÓN:

Las presiones de los gases en el reactor tienen una influencia enorme en la cinética de la reacción.

Las menores presiones favorecen la reacción en superficie, denominada reacción homogénea, lo cual es ventajoso si se quieren recubrimientos parejos en superficies grandes y complejas.

Los depósitos PECVD a baja presiones además garantizan economía de proceso por el menor consumo de gases reactantes.

Para incrementar la tasa de depósito y reducir los tiempos del proceso, se aplica un campo eléctrico en el interior de la cámara, esto genera la ionización de los gases (plasma) que aumenta la reactividad química de estos.

Dicho campo puede ser de CC o de CA. Muchas veces la aplicación de un campo de radiofrecuencia (13,56MHz) es utilizado para aumentar el grado de ionización.

Esto, aun mejora, si se logra la pre-sesión de los iones mediante un campo magnético.

Más recientemente, otra forma utilizada para lograr la activación de los gases reactantes, es la aplicación de luz láser (LCVD).

Los recubrimientos por PECVD se realizan a partir de un compuesto químico denominado precursor, este es portador de cierto metal (Si, Ti etc.).

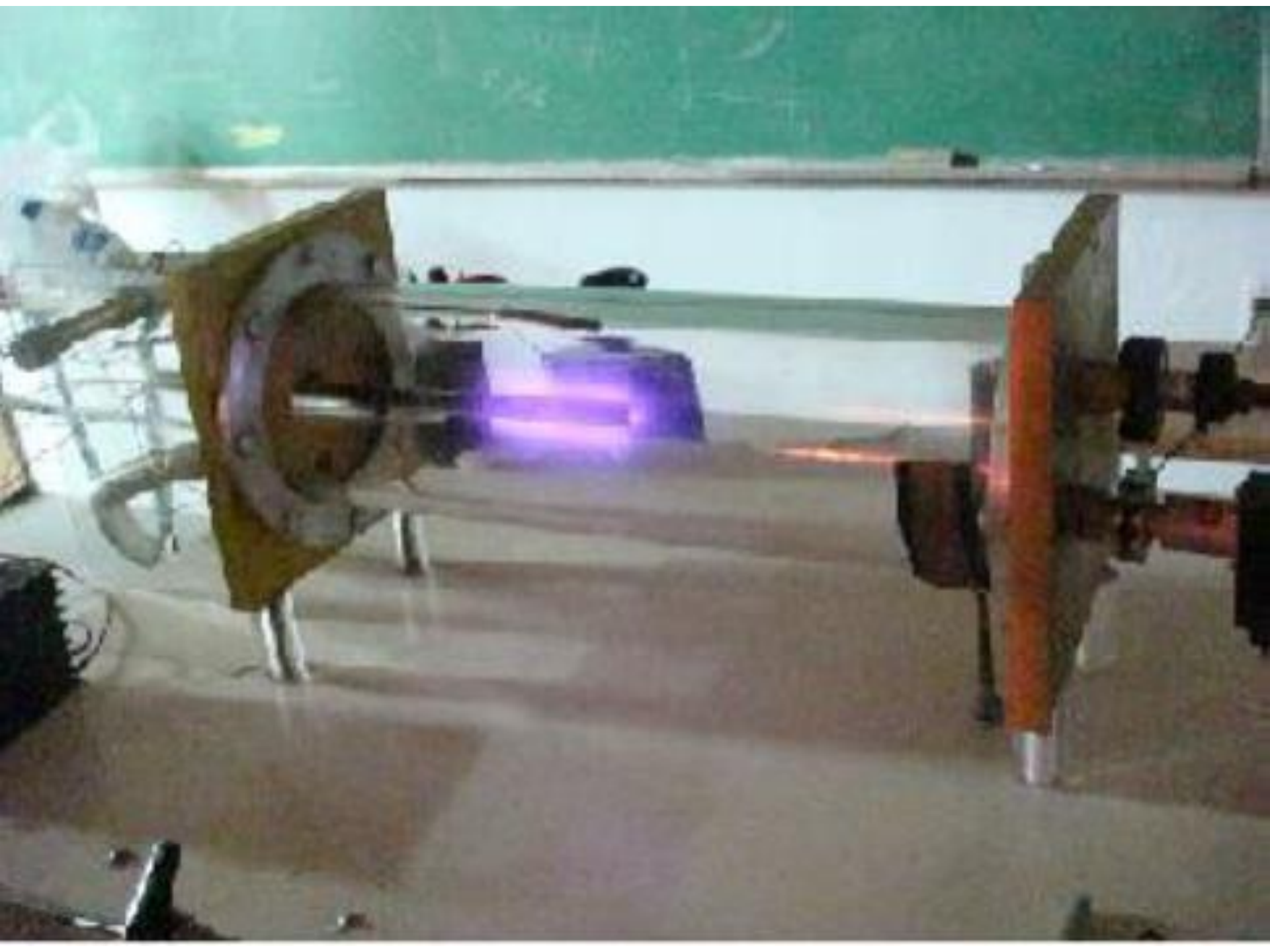
Los cloruros y metal-orgánicos son los precursores industriales más empleados.

El compuesto precursor se disocia en una cámara a altas temperaturas, y libera el metal en el seno de una atmósfera controlada.

La misma es generada por la circulación de un gas (por ej. O₂, CH₄, N₂, etc.).

El metal liberado por el precursor reacciona con los átomos que son el resultado de la descomposición del gas, dando lugar a una reacción química en la superficie del sustrato; el resultado es la síntesis del compuesto buscado en forma de recubrimiento.

Esta técnica permite la utilización de varios tipos de sustratos metálicos y con distintas geometrías.





PARA QUE UTILIZA ESTE PROCESO Y POR QUE ES TAN IMPORTANTE:

- ✓ Sirven para producir recubrimientos superficiales.
- ✓ Comprenden procesos físico-químicos que modifican las propiedades superficiales en el orden de micrones, ó décimas de milímetro.
- ✓ Confieren al elemento así tratado, propiedades muy específicas.
- ✓ Ciertos tipos de recubrimientos no admiten otra forma de elaboración.
- ✓ Este tipo de recubrimiento se realizan en reactores de plasma herméticos, con procesos a alto vacío, y control preciso de los reactivos de proceso.
- ✓ Se obtienen recubrimientos de pureza y estructura perfecta dada su absoluta independencia de la contaminación ambiental.
- ✓ Estos requisitos indispensables en microelectrónica o nanotecnología, así como en otras áreas altamente especializadas.
- ✓ Producción de elementos nano-estructurados.

ALGUNAS ÁREAS DONDE SE APLICA ESTA TÉCNICA

MICROELECTRÓNICA

- Fotocatálisis
- Resistencias y capacitores de película delgada
- Contactos eléctricos e interconexiones en circuitos integrados
- Semiconductores
- Conversores de energía solar

RECUBRIMIENTOS PROTECTORES

- Antidesgaste
- Anticorrosivos
- Lubricantes sólidos.
- Barreras gaseosas y térmicas

MEDIO AMBIENTE

- Tratamiento de residuos gaseosos
- Conversión de residuos sólidos orgánicos
- Membranas selectivas para purificación de aire

MODIFICACIÓN DE SUPERFICIES

- Endurecimiento superficial
- Limpieza superficial
- Control de topografía

PLASMAS TÉRMICOS

- Recubrimientos por inyección
- Corte de metales
- Soldadura
- Hornos de plasma para metalurgia

Además en **TEXTILES**,
RECUBRIMIENTOS DECORATIVOS y
muchos otros.

NANOTECNOLOGÍA

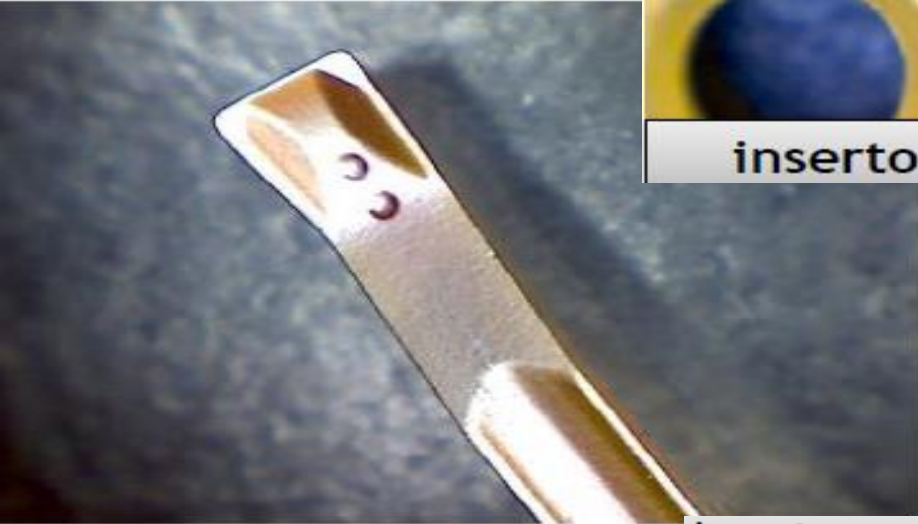
- **Fabricación de componentes para nanosensores.**
- Modificación de superficies
- Pegado de vidrio y PDMS por medio de plasma de oxígeno
- **Modificación de hidrofiliidad** de superficies con tratamiento por plasma

MEDICINA

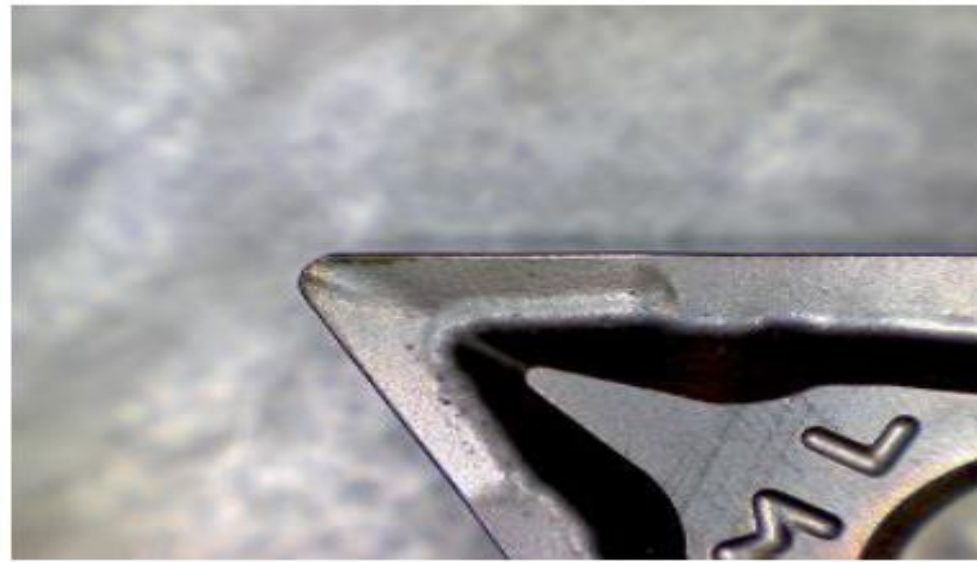
- Recubrimientos biocompatibles para implantes quirúrgicos
- Recubrimiento para lentes
- Esterilización de materiales



inserto sin recubrir



insertos recubiertos con SiC.



Procesos:

Comprenden decisiones que afectan al tipo de tecnología a utilizar, los flujos de proceso así como la distribución física de la planta. El diseño del proceso está muy ligado al diseño del producto con lo que la colaboración con el área de marketing será muy necesaria.

1°.

La elección del proceso productivo es una de las decisiones estratégicas que ha de tomar la empresa. A la hora de decidir cómo será el proceso productivo de los bienes y servicios hay que tener en cuenta en primer lugar si dichos bienes se van a almacenar una vez producidos a la espera de ser vendidos ó si la producción va a implicar que ya existe un pedido. También es importante determinar si la producción se va a llevar a cabo en grandes volúmenes ó en lotes pequeños.

2°

A continuación hay que ver qué tipo de instalación y de maquinaria es necesaria para la producción. Esta decisión es fundamental debido al elevado coste que supone y por tanto la dificultad de modificarlo a posteriori. Además también condiciona las futuras decisiones estratégicas que se tomen a este respecto.

3°

Después hay que decidir qué personas van a llevar a cabo la producción. Su cualificación, perfil, salarios, condiciones laborales, etc.

Para saber cuál es el tipo de proceso más adecuado hay que analizar la demanda, y adaptar el volumen de producción más adecuado para satisfacerla. El proceso productivo deberá tener en cuenta la demanda inmediata y el tiempo necesario para alcanzar ese nivel.

Los grupos en los que se clasifican los tipos de procesos atienden a dos factores.

- El primero se refiere al producto en sí y al flujo a lo largo del proceso de producción. En este grupo se clasifican los procesos en línea, intermitentes y por proyecto.
- Y el segundo se refiere al tipo de pedido ya que la empresa puede producir y almacenar el bien ó producir sólo cuando hay un pedido.

En el caso de las empresas de servicios el proceso productivo se refiere a la serie de operaciones secuenciales necesarias que dan lugar al servicio.

PROCESOS EN LÍNEA

Se caracteriza por tener una secuencia lineal y continua de pasos para producir el bien. Estos pasos no pueden ser alterados y la carga de trabajo está perfectamente definida para evitar cuellos de botella y demoras en la producción.

Estos procesos son en general muy eficientes aunque es difícil y caro modificar la línea para introducir modificaciones en los productos. La inversión en maquinaria es muy alta y está enfocada al producto.

En cuanto al perfil de las personas que trabajan en este tipo de procesos son no especialistas ya que las tareas que llevan a cabo son muy repetitivas y sencillas.

Para recuperar la inversión en maquinaria hay que aproximarse el volumen de producción a la capacidad máxima de la línea. La eficiencia en este tipo de procesos es mayor del 95%.

Ejemplos: fabricación de automóviles, equipos informáticos, suministro de electricidad, suministro de agua, etc.

PROCESOS INTERMITENTES

La producción se lleva a cabo por lotes y a intervalos intermitentes. La maquinaria se agrupa por tipo de centro de procesado y las personas encargadas son especialistas. El producto no tiene por qué recorrer todos los centros de procesado.

En este caso, la producción es más flexible a la hora de modificar el producto, ya que la maquinaria está menos estandarizada.

El principal inconveniente es que puede haber tiempos muertos a la espera del producto inacabado ó de materiales necesarios para continuar el proceso de fabricación. Esto provoca ineficiencias en el proceso ya que algunos centros de procesado pueden estar a falta de actividad mientras que otros tenga sobre carga de trabajo. La eficiencia de este tipo de procesos suele oscilar entre el 20% y el 40%.

Ejemplos: construcción de bloques de viviendas.

FLUJO POR PROYECTO

Se trata de la fabricación de un único producto. Se trata de una serie de operaciones ordenadas según una secuencia determinada y una duración en cada fase que es conocida.

La mano de obra es especializada, no hay prácticamente automatismos y la maquinaria es de uso general para poder adaptarse al producto. Es necesario el conocimiento sobre técnicas de planificación de proyectos como PERT y CPM.

Ejemplos: producción de una película.

PRODUCCIÓN POR INVENTARIO

Son productos fabricados y almacenados para ser vendidos posteriormente. En este caso los productos son indistinguibles y definidos por el fabricante. Se dispone de un almacén que cubre la demanda del producto con la adecuada inmediatez. El principal problema surge si no se cubre la demanda. El cliente adquiere el bien en función de su precio, utilidad y plazo de entrega.

De cara a establecer una correcta planificación se parte de una estimación lo más exacta posible de la demanda. En función de la fuerza de ventas se hace una estimación de las mismas. A continuación se ha de tener en cuenta la capacidad de producción y el nivel de stock de productos. El objetivo es que la demanda siempre esté cubierta.

PRODUCCIÓN POR PEDIDO

El proceso de fabricación comienza con el pedido solicitado por un cliente. El producto va destinado desde el principio con unas características concretas. No será necesario el control de stocks

Los factores clave de producción son el control del flujo de pedido y el plazo de entrega.

DIAGRAMA DE PROCESO

Es una de las herramientas más útiles para comprender el funcionamiento de los procesos y para aplicar técnicas de mejora y eficiencia.

Se utiliza una nomenclatura concreta que define una forma para cada tipo de actividad presente en un proceso operativo.

En un diagrama de proceso se representa de una forma muy visual y sencilla el momento en el que los materiales van siendo procesados, las verificaciones y controles que se realizan, así como los tiempos invertidos en cada fase.

A la hora de diseñar un proceso se deben evaluar las materias primas y conocer las alternativas más adecuadas para que teniendo en cuenta el proceso productivo completo, el producto final tenga las características adecuadas en cuanto a funcionamiento, fiabilidad, calidad, servicio y coste.

También se debe evaluar si hay etapas redundantes ó innecesarias para eliminarlas. Puede ocurrir que haya etapas que puedan solaparse (por ejemplo agrupar varias inspecciones de producto en una sola etapa).

Por último también hay que buscar eficiencia en los tiempos de fabricación.

SIMBOLO	NOMBRE	DESCRIPCIÓN
	OPERACIÓN	Indica las principales fases del proceso Agrega, modifica, montaje, etc.
	INSPECCIÓN	Verifica la calidad y cantidad. En general no agrega valor.
	TRANSPORTE	Indica el movimiento de materiales. Traslado de un lugar a otro.
	ESPERA	Indica demora entre dos operaciones o abandono momentaneo.
	ALMACENAMIENTO	Indica depósito de un objeto bajo vigilancia en un almacén
	COMBINADA	Indica varias actividades simultáneas

DIAGRAMA DE FLUJO

Es una representación gráfica de la secuencia de actividades que se producen durante el proceso y que en cada etapa deben dar respuesta concisa a las siguientes preguntas:

- QUÉ: que operaciones son fundamentales, cuales son eliminables y cuales se pueden combinar con otras. Qué se puede modificar del producto para adaptarlo a proceso productivo.
- QUIEN: persona responsable de cada tarea, cualificación requerida, agrupación de operaciones en la misma persona, formación, experiencia, condiciones laborales, etc.
- DONDE: posibilidad de que las actividades se realicen en menos recorrido, optimizar la distribución de la planta.
- CUANDO: momento de ejecución, retrasos, tiempos muertos, cuellos de botella, almacenamiento intermedio, etc.
- COMO: metodología más adecuada, actualización de los equipos, orientación a simplificar las operaciones y llevarlas a cabo en menos tiempo.

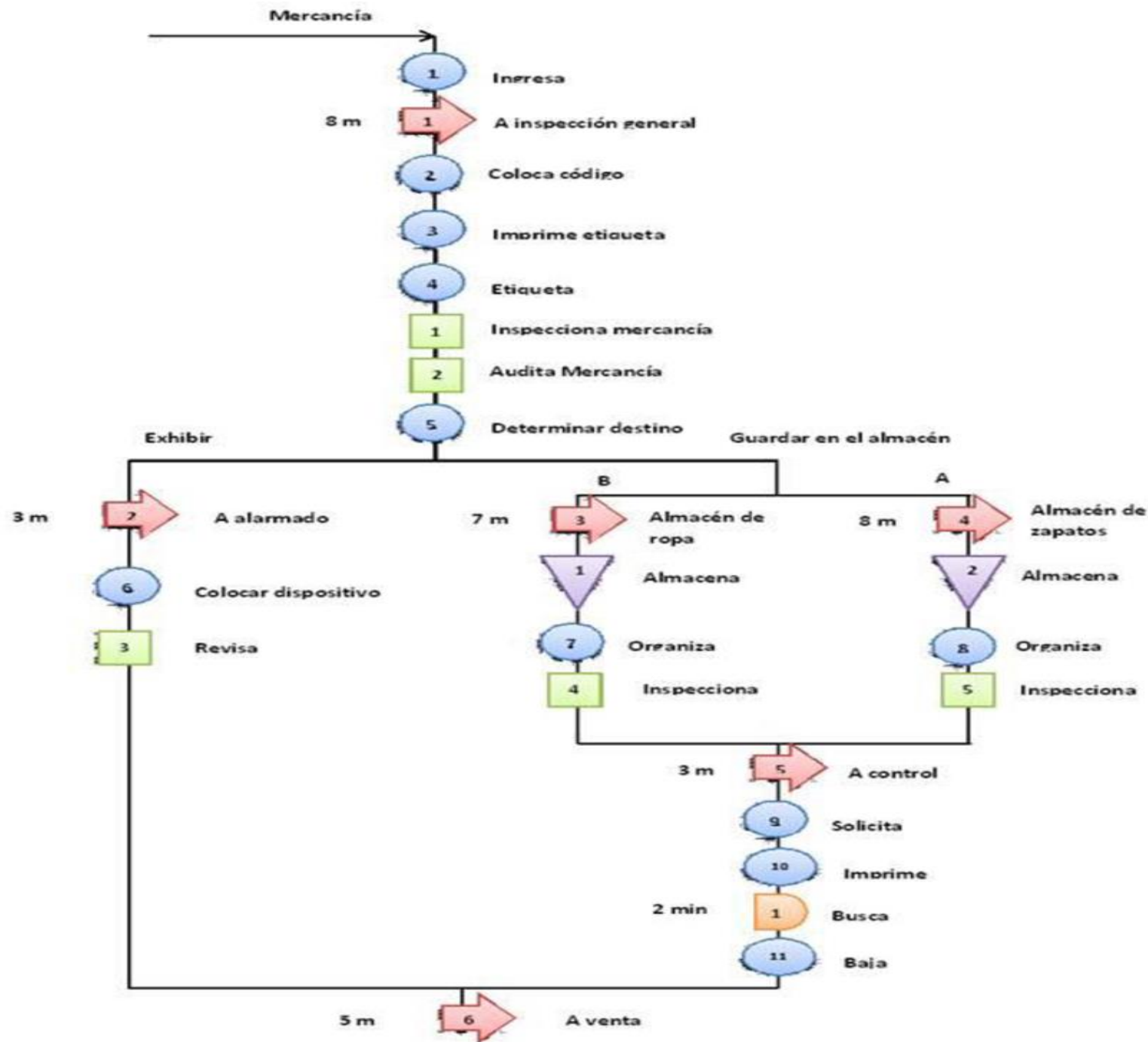
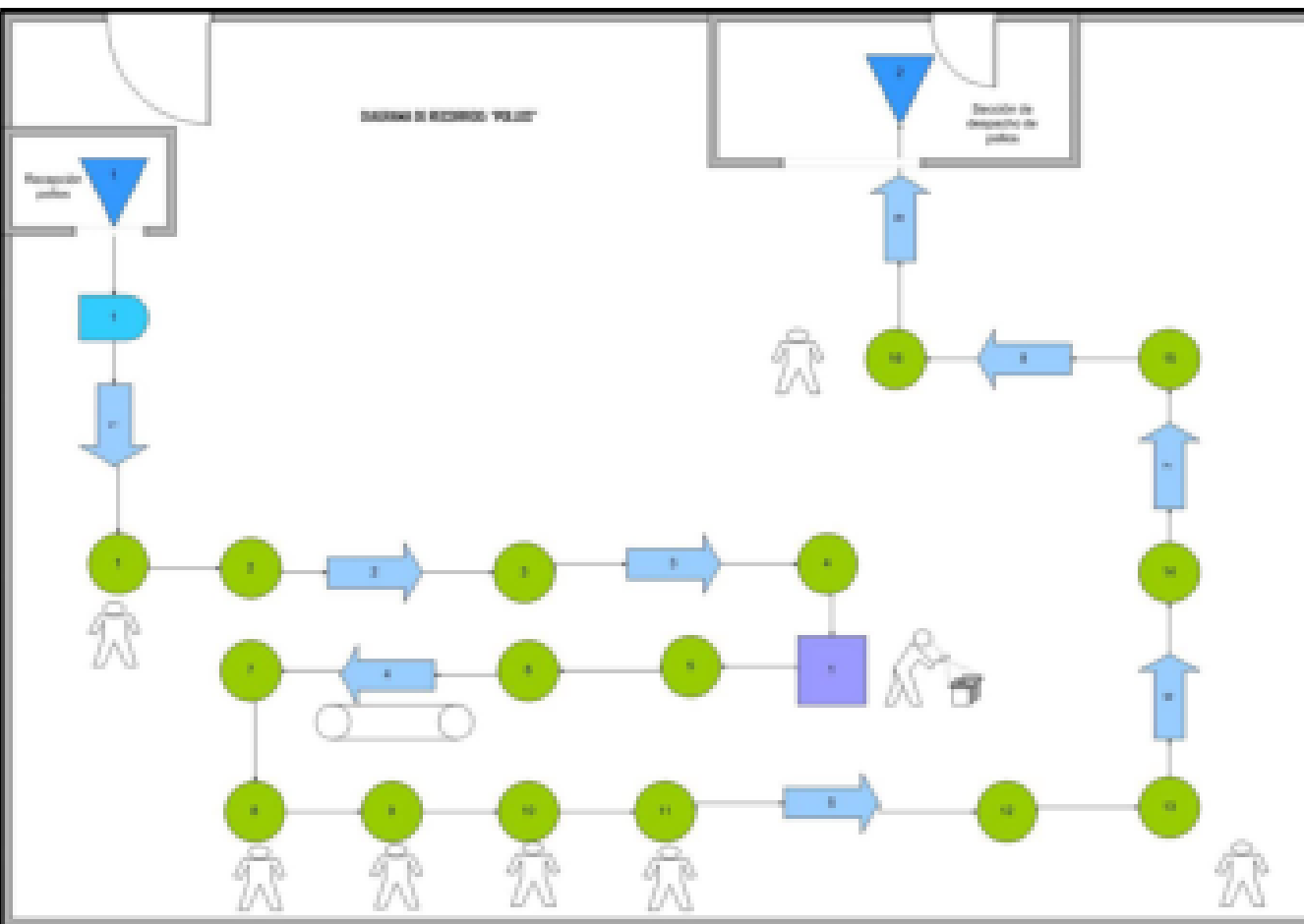


DIAGRAMA DE CIRCULACIÓN

Representa cómo se mueven los materiales a lo largo del proceso de fabricación en la planta. En el esquema de la planta aparece su distribución y la ubicación de las actividades que se reflejan en el diagrama de proceso.

Las flechas indican el sentido del movimiento reflejando el recorrido real de los materiales. Estos diagramas se confeccionan sobre planos a escala de la planta. Son de gran ayuda para eliminar recorridos innecesarios y cuellos de botella.



FLUJO DE INFORMACIÓN

Refleja la parte administrativa del proceso. En las empresas de servicio el flujo de información juega el mismo papel que el diagrama de circulación en una empresa manufacturera. La mecanización e informatización de los procesos parte de un buen análisis del flujo de información.

DISTRIBUCIÓN POR POSICIÓN FIJA O POR PROYECTO

En este tipo de distribución los materiales básicos permanecen fijos en una zona, mientras que la mano de obra con sus herramientas y material adicional se desplazan hasta ellos. Este tipo de distribución es el más versátil en cuanto a modificaciones del producto. Además la organización de la distribución del trabajo es muy sencilla, ya que materiales y personas se concentran en un punto determinado.

Además, la colocación de los materiales habrá de hacerse en función del orden en el que van a utilizarse para así optimizar el espacio que ocupan y los movimientos de material innecesarios.

Para tener en cuenta todos estos aspectos en este tipo de distribución hay que programar de forma exacta las actividades que se van a llevar a cabo y la duración de cada una.

En la última década, la Gestión por Procesos ha despertado un interés creciente, siendo ampliamente utilizada por muchas organizaciones que utilizan referenciales de Gestión de Calidad y/o Calidad Total.

El Enfoque Basado en Procesos consiste en la Identificación y Gestión Sistemática de los procesos desarrollados en la organización y en particular las interacciones entre tales procesos (ISO 9000:2000). La Gestión por Procesos se basa en la modelización de los sistemas como un conjunto de procesos interrelacionados mediante vínculos causa-efecto.

El propósito final de la Gestión por Procesos es asegurar que todos los procesos de una organización se desarrollan de forma coordinada, mejorando la efectividad y la satisfacción de todas las partes interesadas (clientes, accionistas, personal, proveedores, sociedad en general).

DISTRIBUCIÓN POR POSICIÓN FIJA

Ejemplo: Montajes de calderas en edificios, barcos, torres de tendido eléctrico y, en general, montajes a pie de obra.

