Asignatura: Materiales Avanzados y Nanotecnología
Docente: Sandra M. Mendoza
Ciclo lectivo 2026, Facultad Regional Reconquista - UTN

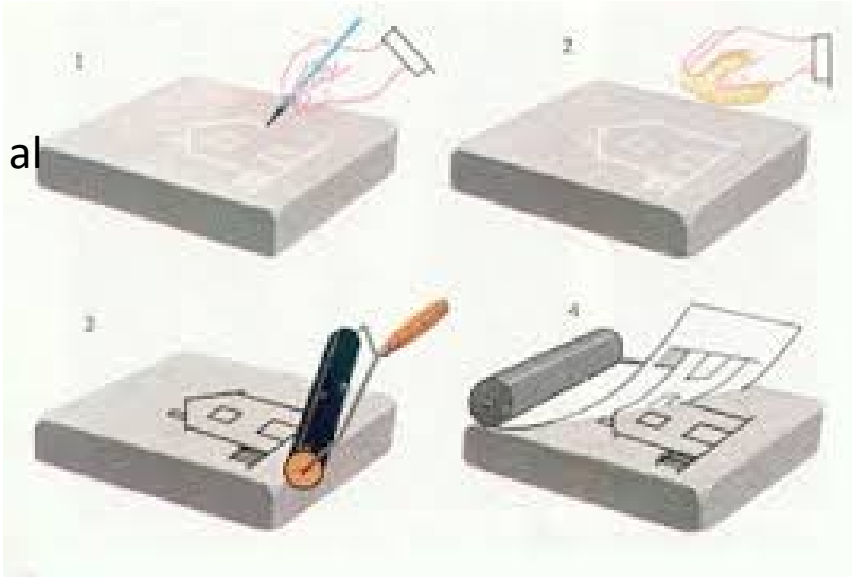
Capítulo 7
Métodos de manufactura

- **Litogrqafía: Fotolitografía. Litografía por haz de electrones. Litografía de iones focalizados. Litografía de nanoimpresión. Litografía Dip-Pen.**
- **Métodos para producir películas delgadas.**
- **Otros: Sinterización, fundición, fabricación aditiva (impresión 3D)**

Litografía

Según el diccionario de la Real Academia española, www.rae.es :

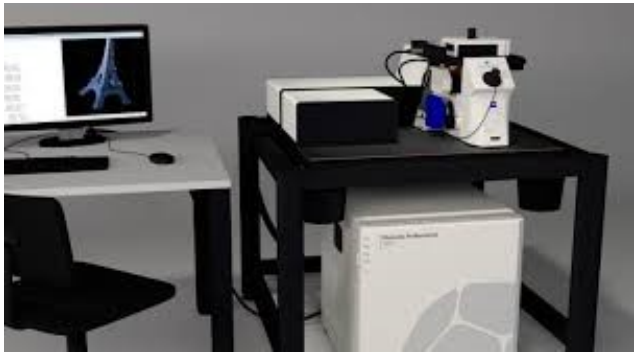
litografía.
(De *lito-* y *-grafía*).
1. f. Arte de dibujar o grabar en piedra preparada al efecto, para reproducir, mediante impresión, lo dibujado o grabado.
2. f. Cada uno de los ejemplares así obtenidos.
3. f. Taller en que se ejerce este arte.



litografiar.
1. tr. Dibujar o escribir en piedra, para reproducir lo dibujado o grabado.







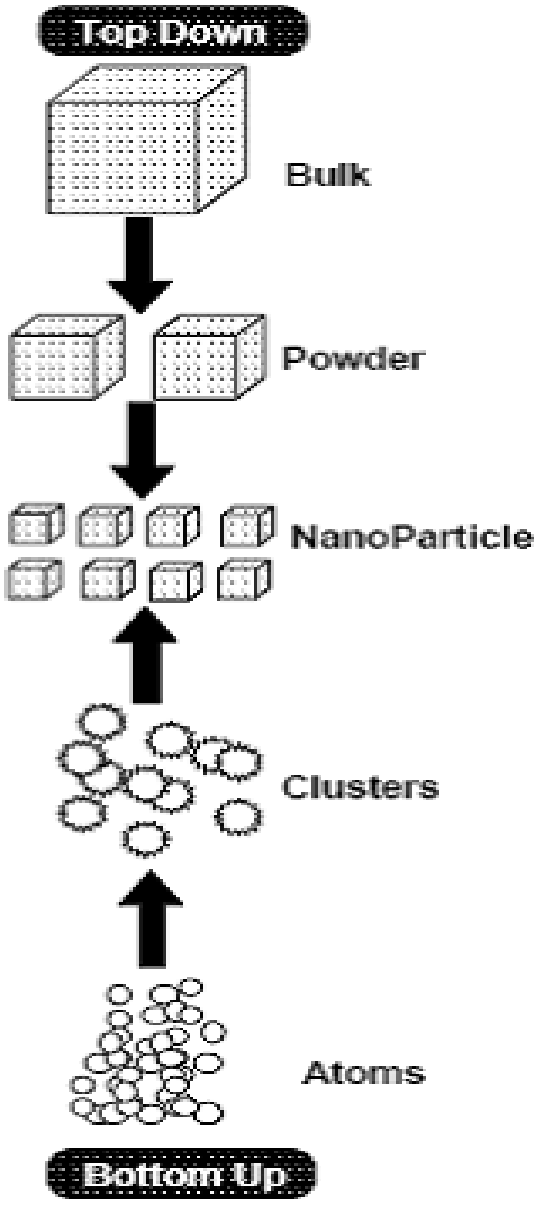
Aproximaciones de nano-fabricación

Top-down

Moldear un material hasta transformarlo en formas más pequeñas.

Bottom-up

Átomos y/o moléculas se unen para formar estructuras más grandes.



Litografía

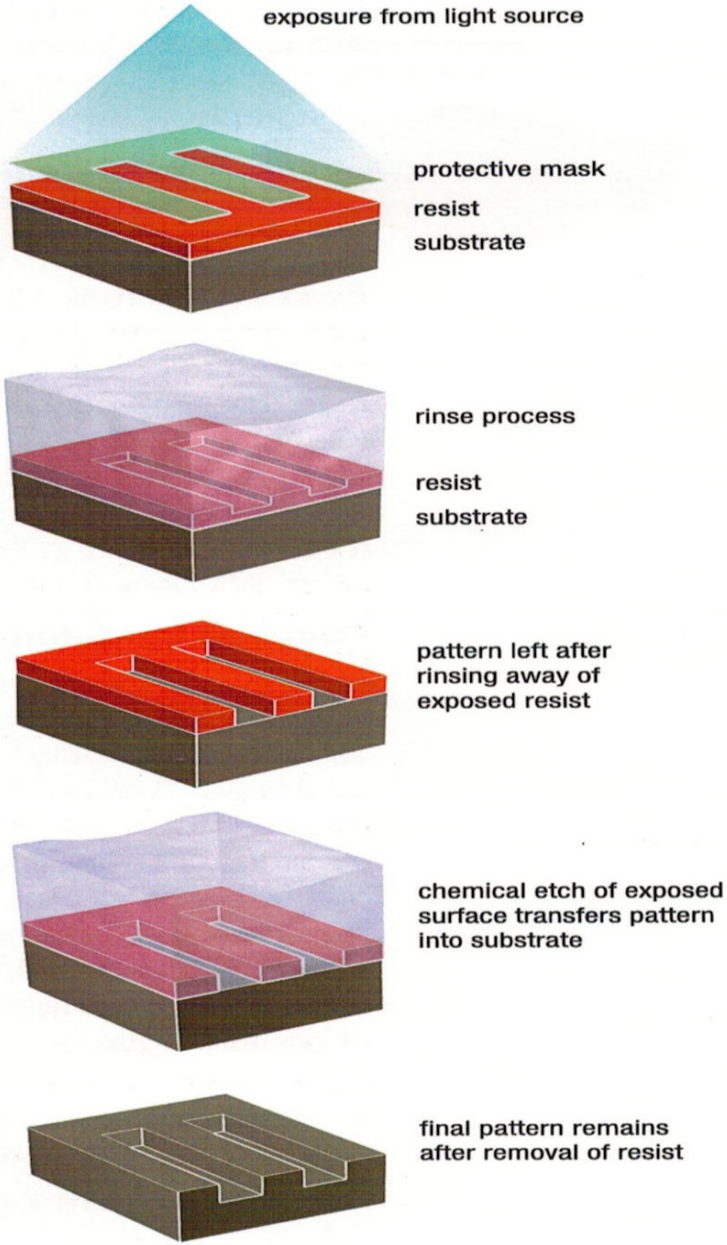
Ver Video: “La Manufactura de un Semiconductor - Texas Instruments”. (2009). 10 min.

https://youtu.be/YroyIXq2Iz0

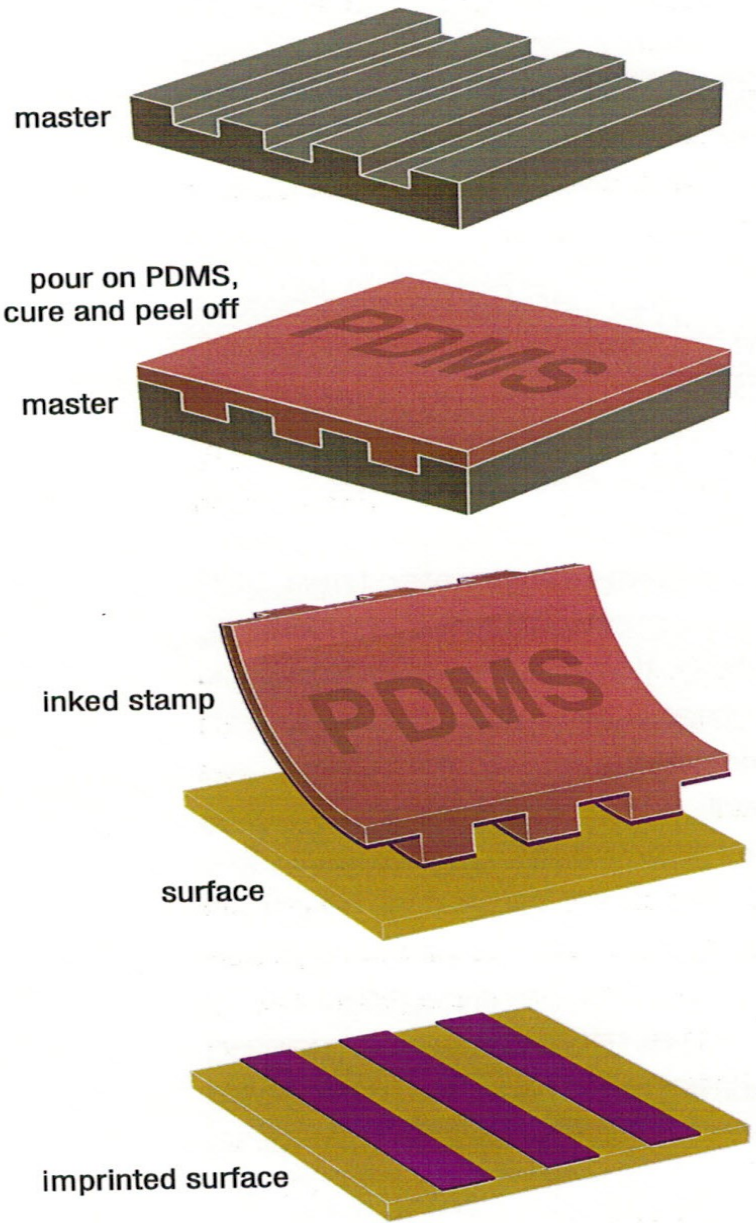
Técnicas de litografía

Técnica	Top-down	Bottom-up
Fotolitografía	X	
Litografía de haz de electrones	X	
Litografía de haz de iones focalizados	X	
Litografía por nano-impresión	X	
Litografía blanda	X	X
Nanolitografía dip-pen	X	X
Auto-ensamblaje		X
Manipulación atómica por SPM		X

Fotolitografía



Litografía blanda



¿Qué es nanolitografía?

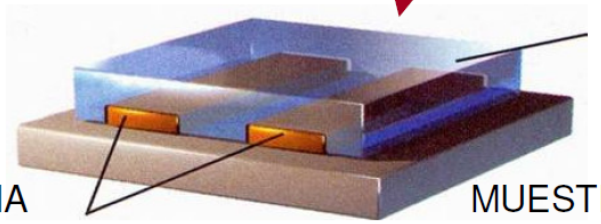
⇒ ***CONJUNTO DE TÉCNICAS QUE PERMITEN TRANSFERIR PATRONES PREDETERMINADOS SOBRE UNA MUESTRA DONDE EL TAMAÑO TÍPICO DE LOS MOTIVOS QUE FORMAN LOS PATRONES ES NANOMÉTRICO.***

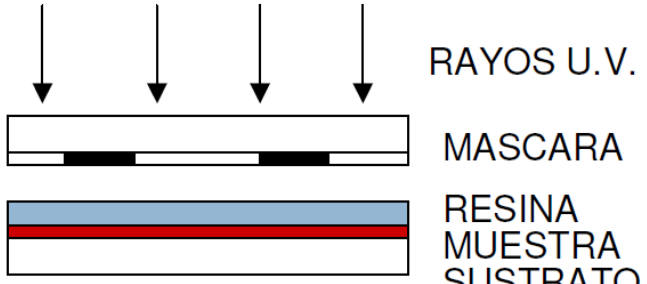
⇒ LOS PATRONES PUEDEN:

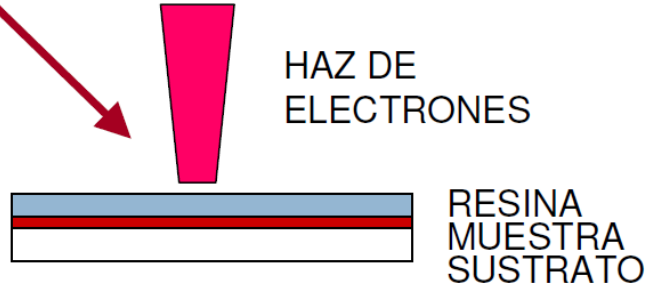
-<u>ESTAR PREVIAMENTE DIBUJADOS SOBRE UNA MÁSCARA</u>: Litografía óptica, litografía de rayos x

-<u>GENERARSE MEDIANTE UN BARRIDO DE ELECTRONES O IONES</u>: Litografía de electrones, de iones y de sonda local

-<u>ESTAR PREVIAMENTE DIBUJADOS SOBRE UN MOLDE</u>: Nanoimprinting

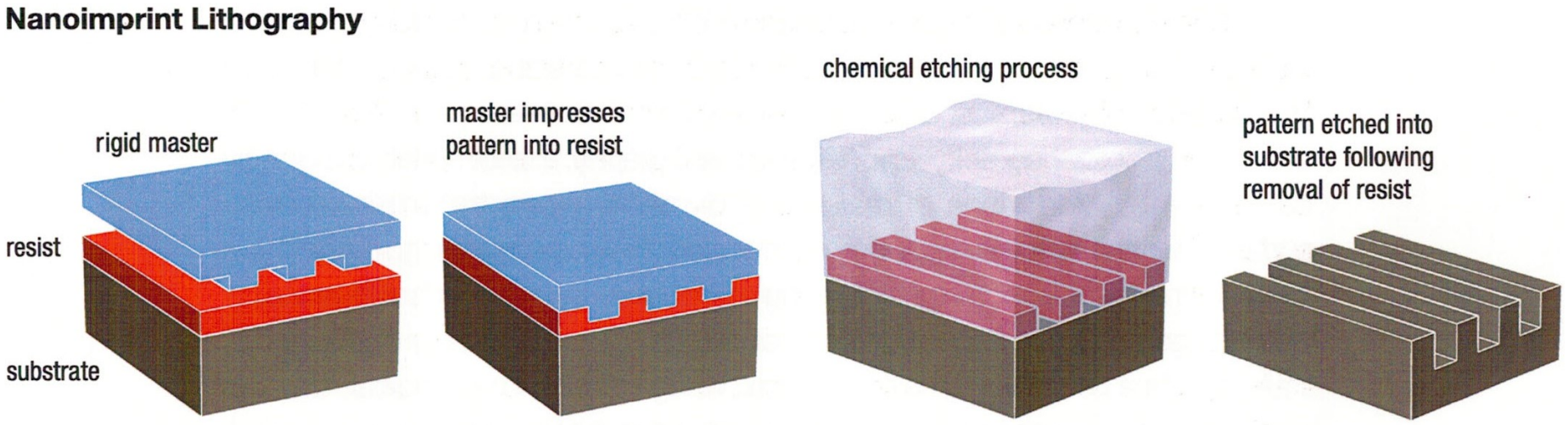






⇒ ***GRACIAS A LA NANOLITOGRAFÍA PODEMOS REALIZAR NANODISPOSITIVOS***

Nanolitografía



Litografía Dip-Pen

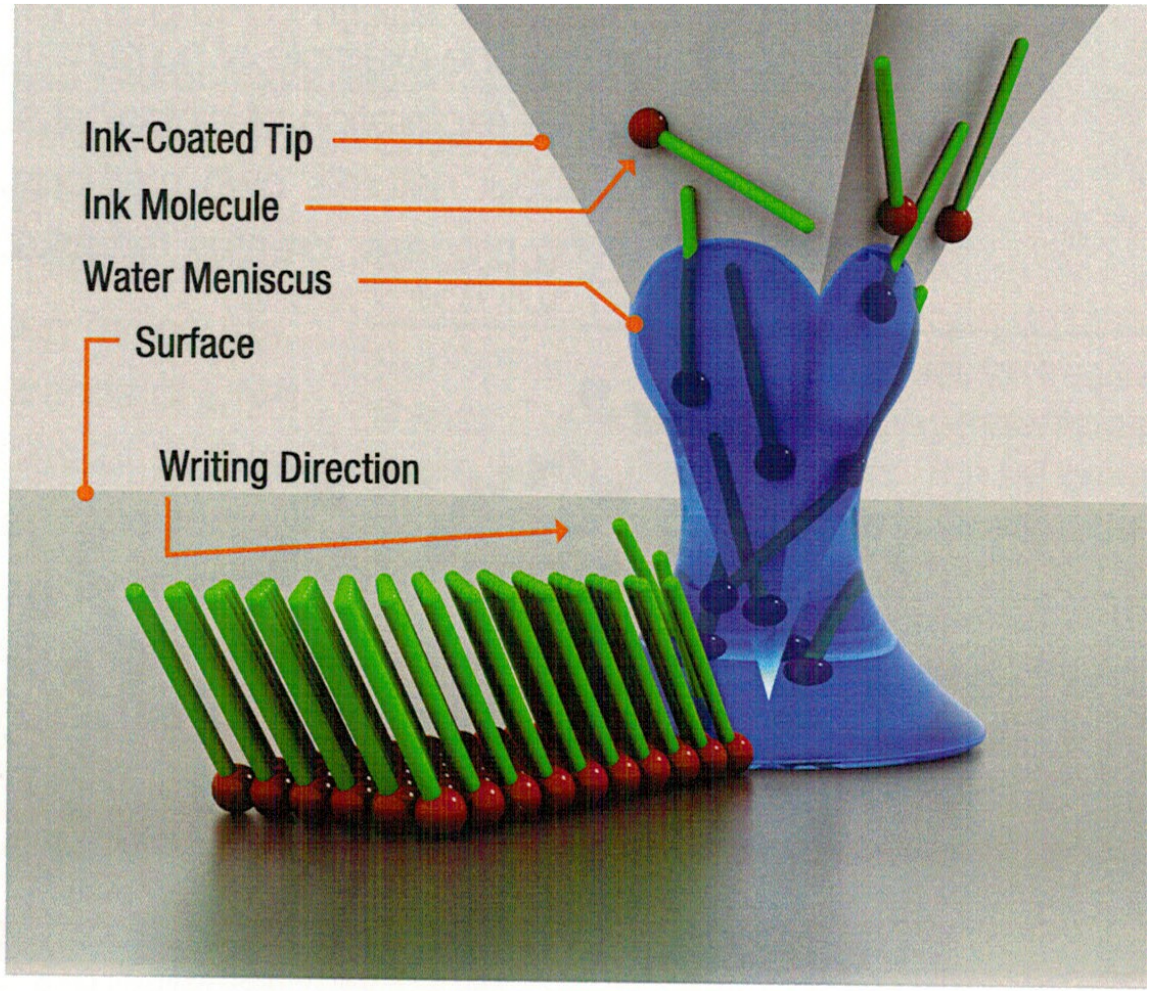
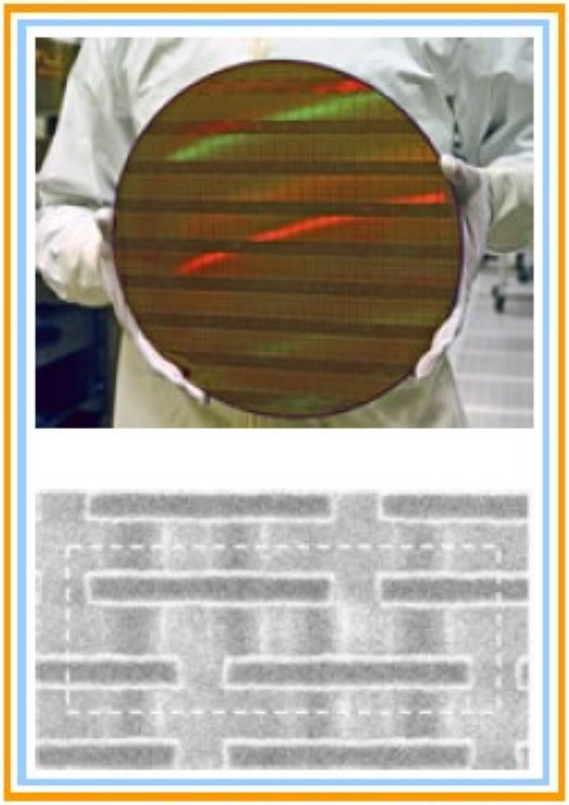
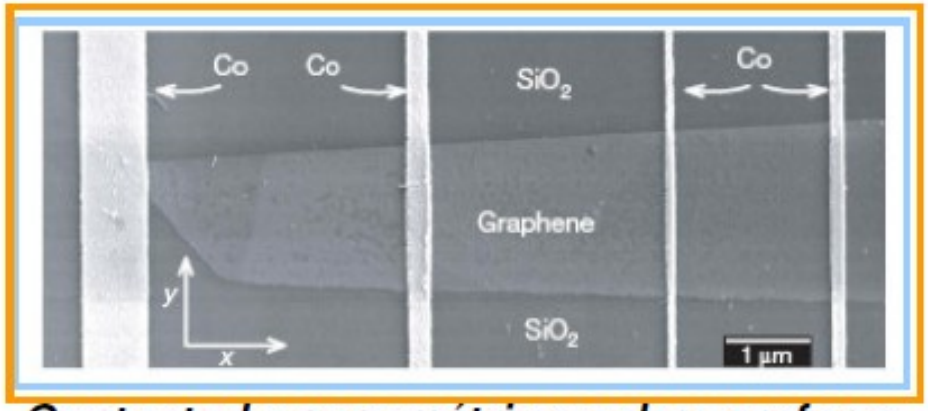


Figure 2.15 A very sharp tip writes with an organic or inorganic ink. A molecular ink deposits molecules on a surface through the water meniscus.

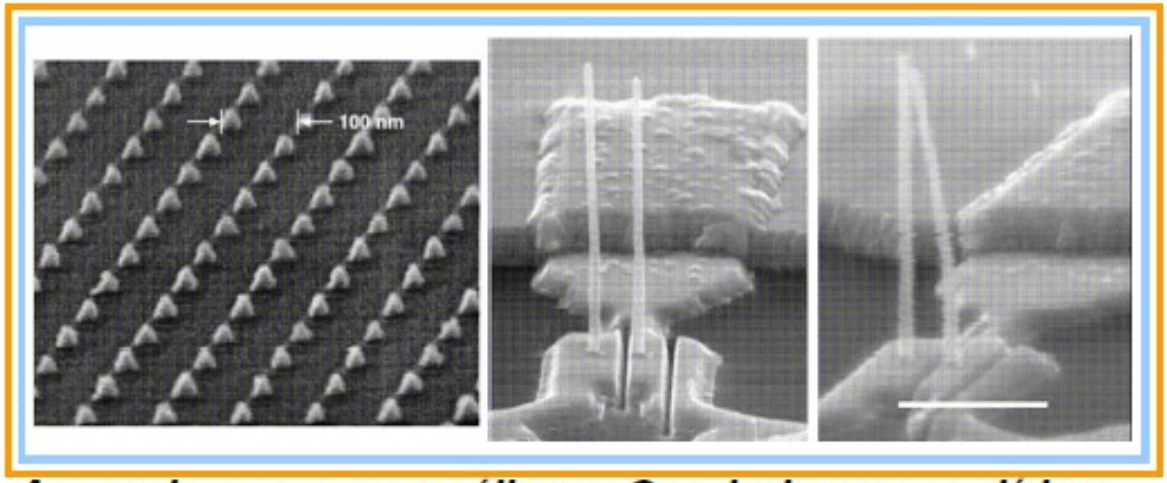
Ejemplos de nanolitografía



Memorias de dimensión crítica 45 nm (INTEL)



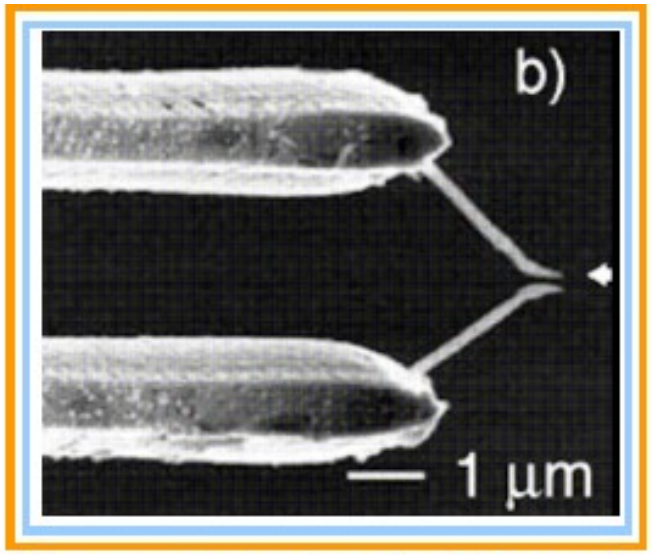
Contactado nanométrico sobre grafeno



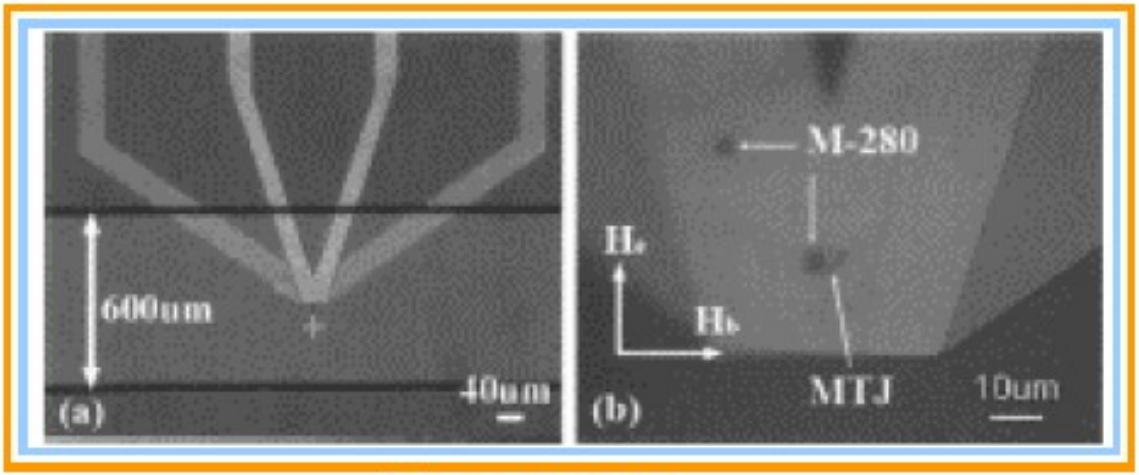
Array de puntos metálicos. Crecimiento catalítico. Sistemas nano-electromecánicos

Nuevo récord a escala piloto: chips de Si de 5 nm. IBM, junio de 2017. Samsung Electronics comenzó la manufactura comercial en 2019.

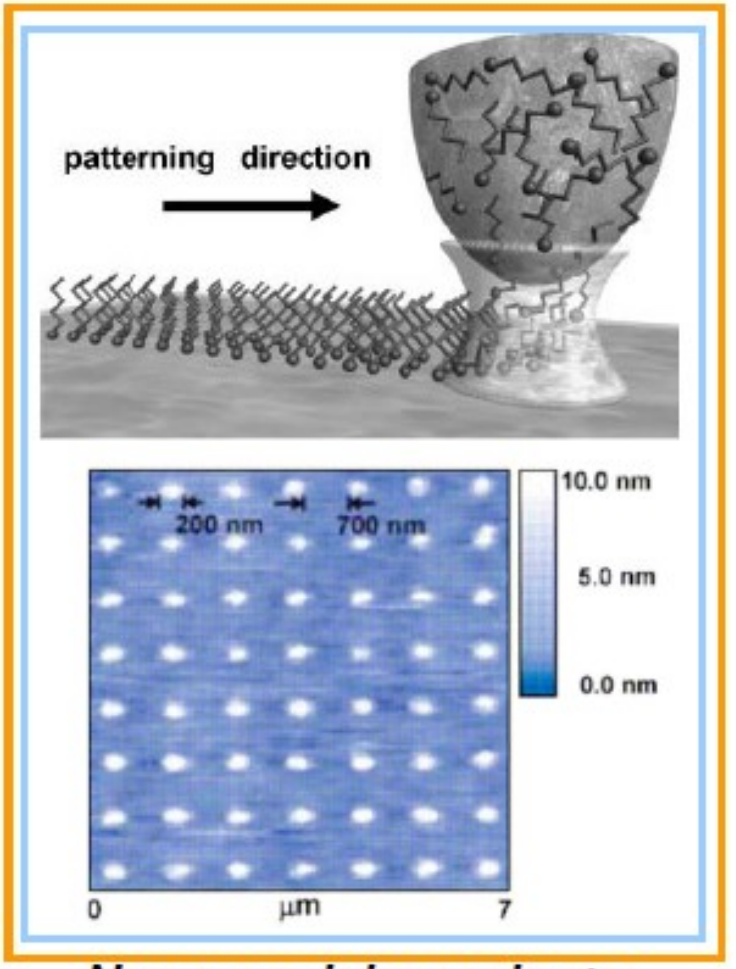
Ejemplos de nanolitografía



Nano-mecanizado (nanopinzas)

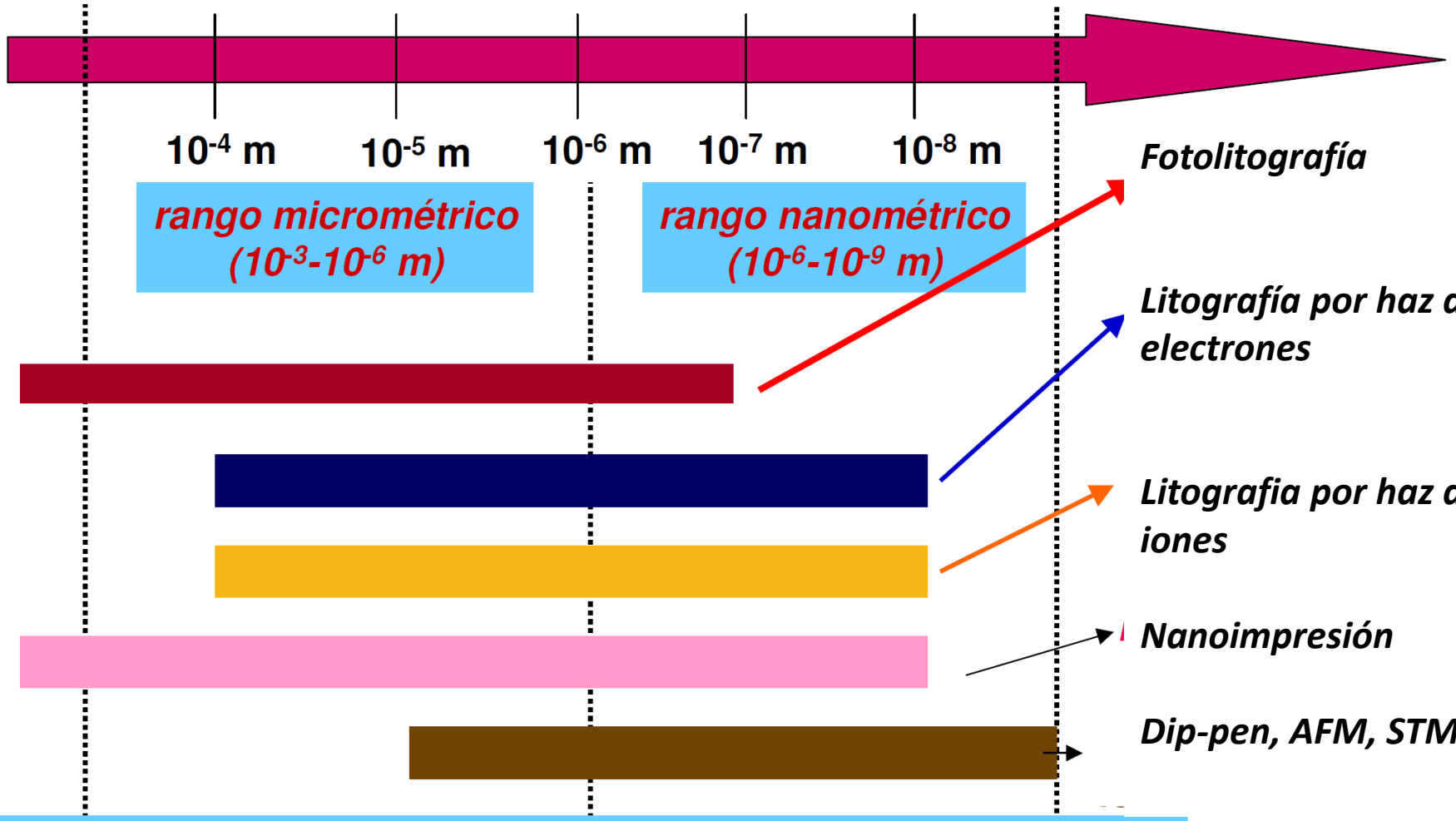


Biosensores



Nano-posicionamiento de proteínas (dip-pen)

Técnicas de litografía. Comparación



⇒*Junto a la resolución, otros aspectos importantes son: la velocidad, el coste, la reproducibilidad, la posibilidad de patrones complejos…*

Sala blanca (clean room)

Tipo de infraestructura (laboratorio o espacio de trabajo) que se utiliza en la industria de semiconductores y microelectrónica, entre otras.
-Las personas deben cubrirse con trajes especiales para no contaminar los materiales
-Existe una antesala para vestirse y poder ingresar
-El aire está libre de partículas, para lo cual ha sido filtrado
-Las condiciones de temperatura y humedad están controladas
-Las salas se mantienen en una escala de presiones ligeramente superiores a la del exterior, de forma que cuando se abren las puertas el aire sale y no puede entrar desde el exterior y contaminar.







Sala blanca (clean room)

Sala Blanca: El Entorno Controlado para la Nanofabricación

En el mundo de la micro y nanoescala, el entorno en el que se desarrollan los procesos de fabricación adquiere una importancia tan crucial como las técnicas mismas. A medida que los dispositivos se vuelven más pequeños, cualquier mínima partícula de polvo o fluctuación ambiental puede arruinar por completo un producto. Por esta razón, gran parte de las técnicas que hemos mencionado hasta ahora, como la litografía o la deposición de películas delgadas, se realizan en ambientes conocidos como **salas blancas** o *clean rooms*.

¿Qué es una sala blanca?

Una sala blanca es un espacio cerrado diseñado y mantenido específicamente para controlar los niveles de contaminación, temperatura, humedad y presión. Su nombre proviene del hecho de que estos ambientes suelen estar recubiertos de superficies de colores claros para facilitar la visión, que además son lisas y sin zonas que acumulen polvo o bacterias, para facilitar la limpieza. En términos técnicos, una sala blanca es un entorno en el que la concentración de partículas suspendidas en el aire se mantiene dentro de ciertos límites establecidos por normas internacionales (por ejemplo, ISO 14644).

Características clave de una sala blanca

- **Filtración del aire**: El aire dentro de la sala pasa constantemente por filtros HEPA o ULPA, capaces de retener partículas del orden de los nanómetros.
- **Control de temperatura y humedad**: Se mantienen constantes para evitar dilataciones térmicas en equipos o cambios en las propiedades de los materiales.
- **Presión positiva**: La sala se mantiene a una presión ligeramente superior a la del entorno exterior, para que al abrir una puerta el flujo de aire sea hacia afuera, impidiendo el ingreso de polvo o contaminantes.
- **Vestimenta especial**: Los operarios deben vestir trajes que cubren completamente el cuerpo, incluyendo guantes, mascarillas y gafas. Estos trajes impiden la liberación de partículas de piel, pelo o ropa común.

Fabricación de películas delgadas

Procesos de fabricación aditiva

Procesos de deposición que involucran reacciones químicas:

- Chemical Vapor Deposition (CVD)
- Electrodeposición
- Crecimiento epitaxial
- Oxidación térmica

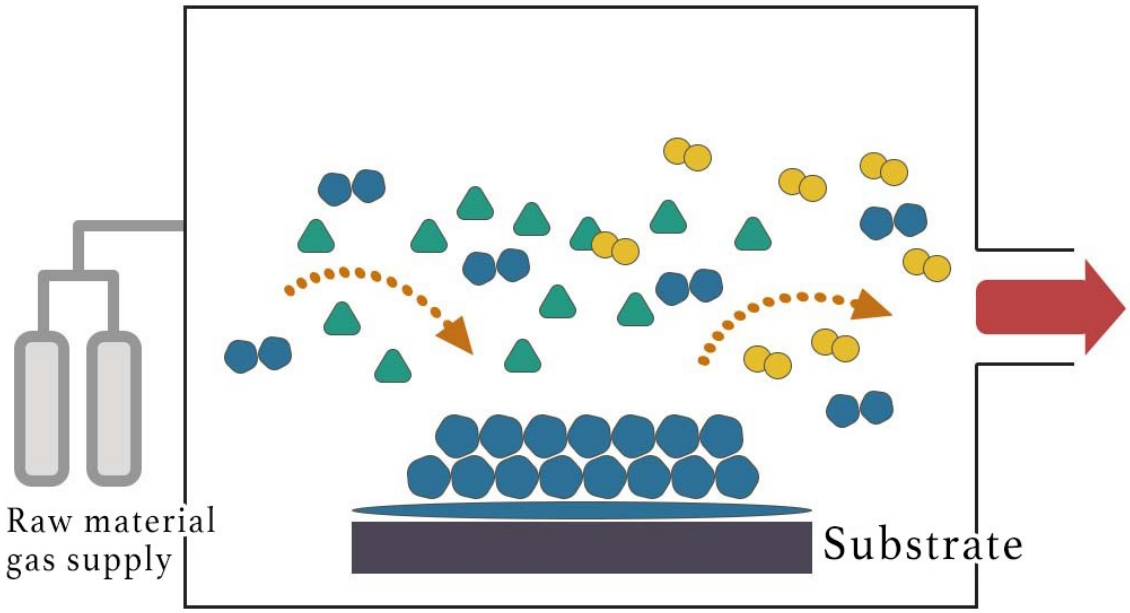
Procesos de deposición que ocurren mediante interacciones físicas:

- Physical Vapor Deposition (PVD)
- Casting

(Ver material de estudio disponible en Moodle).

Deposición química en fase vapor (CVD)

Se utiliza para crear películas delgadas sólidas sobre la superficie de un sustrato, a partir de sustancias gaseosas que reaccionan químicamente.

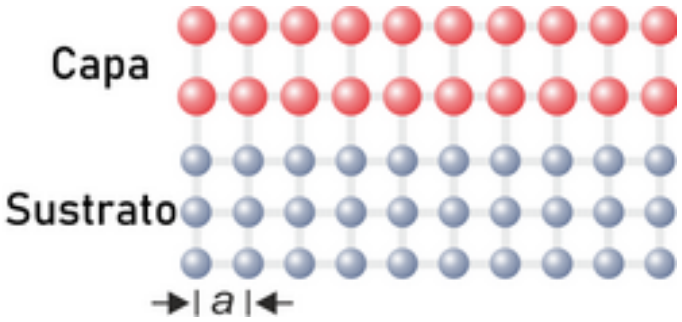


¿Cómo funciona?

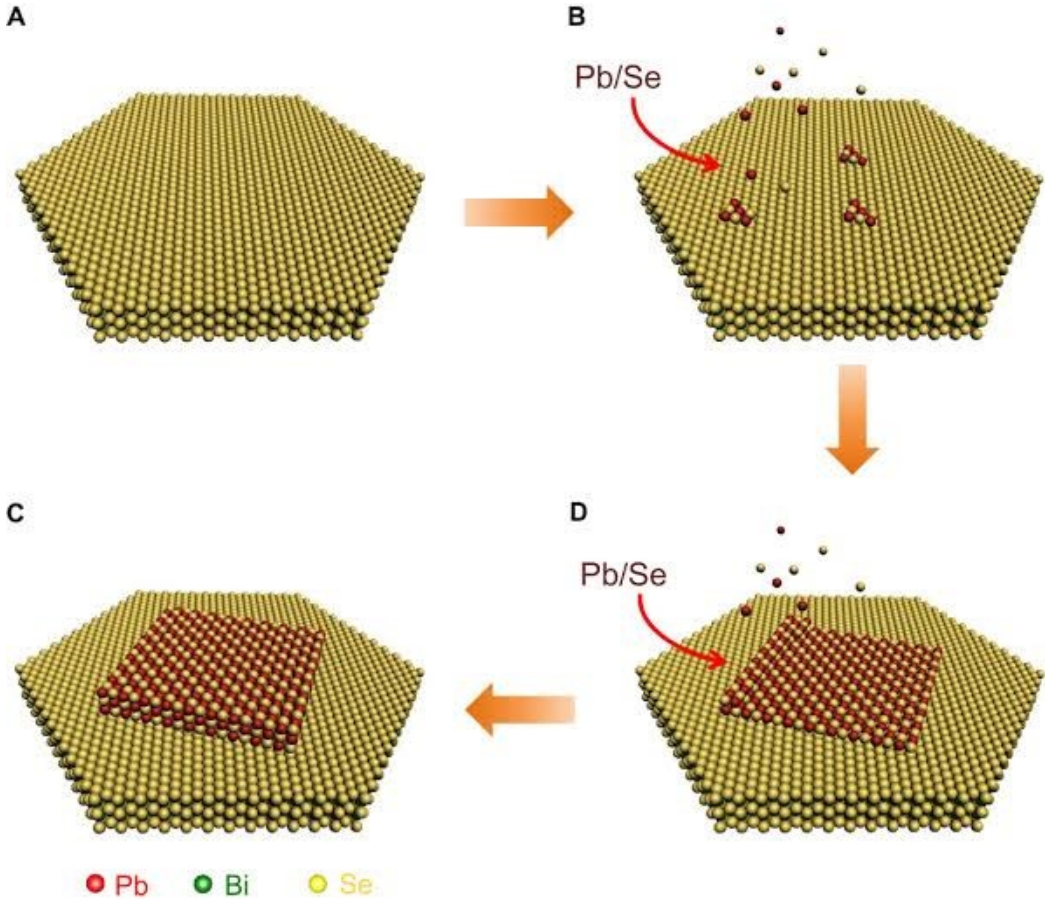
1. **Precursores gaseosos:** Se introducen uno o más gases dentro de una cámara de vacío.
2. **Reacción en la superficie:** los gases reaccionan, muchas veces al entrar en contacto con el sustrato (que a menudo se encuentra a alta temperatura).
3. **Crecimiento (*bottom-up*):** El producto de la reacción se deposita átomo por átomo o molécula por molécula, y forma una capa sólida nueva.
4. **Eliminación de subproductos:** Los gases residuales o subproductos de la reacción son extraídos de la cámara, generalmente mediante las bombas de vacío.

Crecimiento epitaxial

El **crecimiento epitaxial** (o **epitaxia**) es el proceso de depositar una capa cristalina delgada y uniforme sobre un sustrato cristalino, copiando exactamente su estructura y orientación atómica. El sustrato actúa como una plantilla que guía el orden de los nuevos átomos y permite controlar con alta precisión el espesor y las impurezas (dopaje) del material resultante.



Modelo de una capa epitaxial («átomos» rojos) sobre un sustrato cristalino (azul) con menor espaciado atómico a.



Técnicas de desgaste (etching)

La más empleadas son:

- **Desgaste en medio líquido (wet etching)**

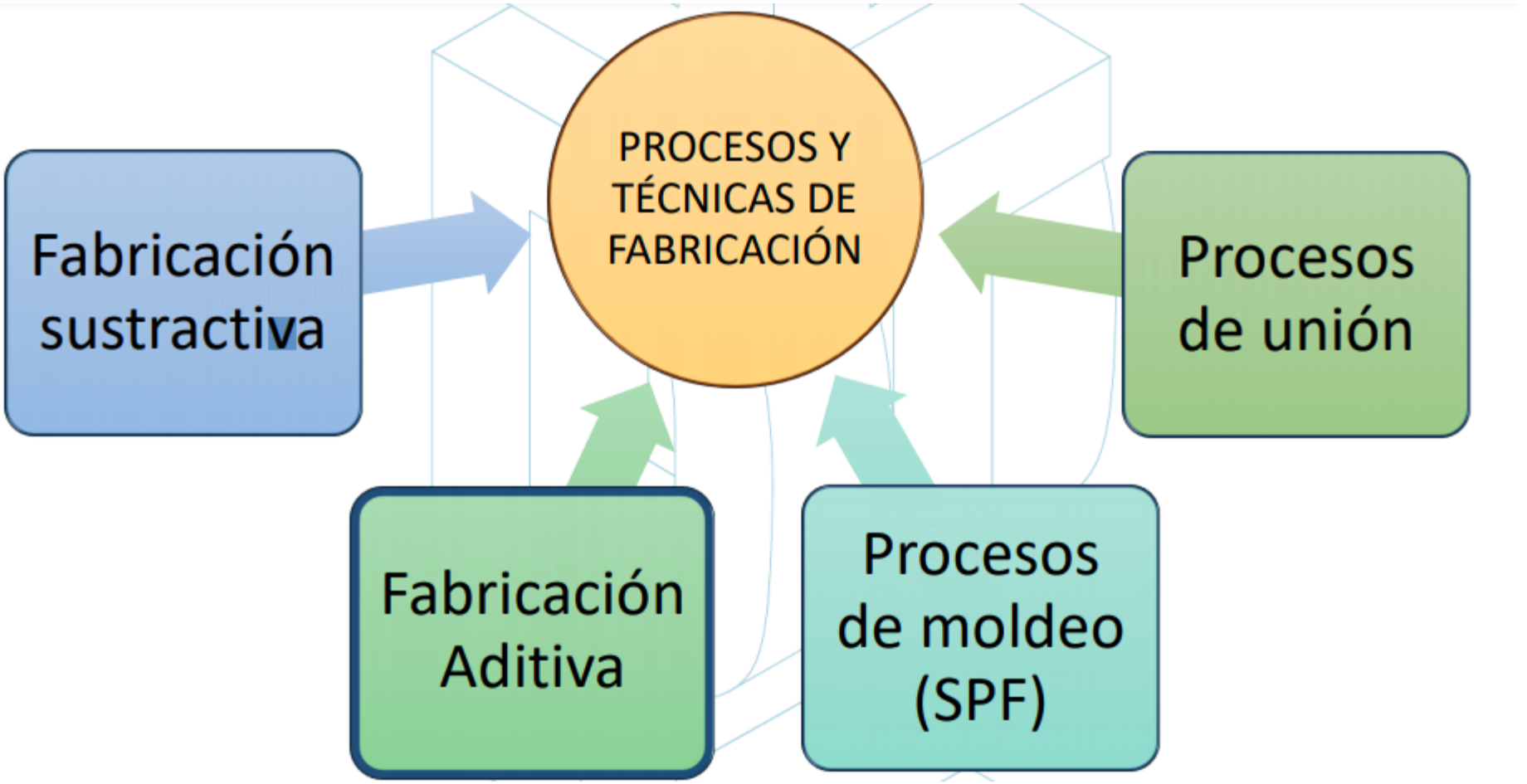
El material se disuelve por inmersión en una solución corrosiva adecuada.

- **Desgaste en seco (dry etching)**

El material el material se va desgastando haciendo incidir haces de iones en la superficie o mediante una fase vapor corrosiva.

(Ver material de estudio disponible en Moodle).

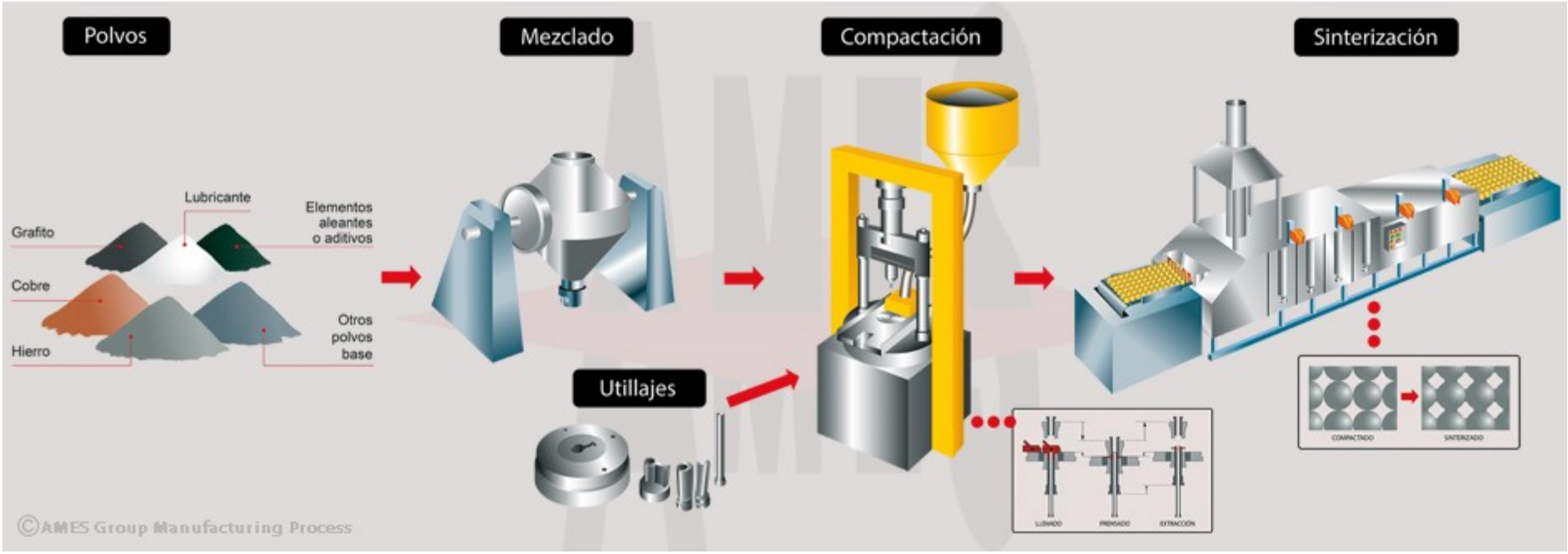
Otras técnicas de manufactura (continuación)


PROCESOS Y TÉCNICAS DE FABRICACIÓN
Fabricación sustractiva
Procesos de unión
Fabricación Aditiva
Procesos de moldeo (SPF)

Procesos de moldeo

Sinterización

Proceso de fabricación de piezas sólidas moldeadas. Consiste en compactar a alta presión varios polvos metálicos y/o cerámicos mezclados homogéneamente y, una vez compactados, realizar un tratamiento térmico, obteniéndose una pieza consolidada y compacta.



Video: “Cómo se realiza el proceso de sinterizado”
https://www.youtube.com/watch?v=dbRxknjTMhY&ab_channel=MartinAcevedoPacheco

Sinterización

Materiales:

Metales, cerámicas, carburos. En general, aquellos difíciles de procesar mediante el moldeo por fundición.

Aplicaciones. Fabricación de:

- Objetos con materiales refractarios.
- Objetos con materiales de mucha pureza y composición de alta precisión.
- Carburos metálicos.
- Piezas metálicas porosas para utilizar como filtros.
- Pastillas de uranio natural o levemente enriquecido utilizadas en combustibles nucleares.



Ventajas:

Obtención de las piezas a temperaturas relativamente bajas (ahorro energético).
Permite la obtención de las piezas directamente con su forma definitiva (proceso rápido).
Se usa todo el material sin generar residuos, como pueden ser virutas o polvo (ahorro de materias primas y productos).
Piezas mucho más ligeras y con porosidades que permiten su recubrimiento con lubricantes o antioxidantes (optimización).

Fundición o Casting

Proceso de fabricación de piezas, comúnmente metálicas pero también de plástico, consistente en fundir un material e introducirlo en una cavidad (vaciado, moldeado), llamada molde, donde se solidifica.

Ejemplo: fundición en arena





Fabricación aditiva o Impresión 3D

Qué es la fabricación aditiva?

La fabricación aditiva o impresión 3D (como se llama comúnmente) es un proceso que crea objetos físicos a partir de un diseño digital. Hay diferentes tecnologías de impresión 3D y materiales con los que imprimir, pero todas están basadas en el mismo principio: un modelo digital es convertido en un objeto sólido, tridimensional, a base de añadir material capa a capa.



Impresora FDM



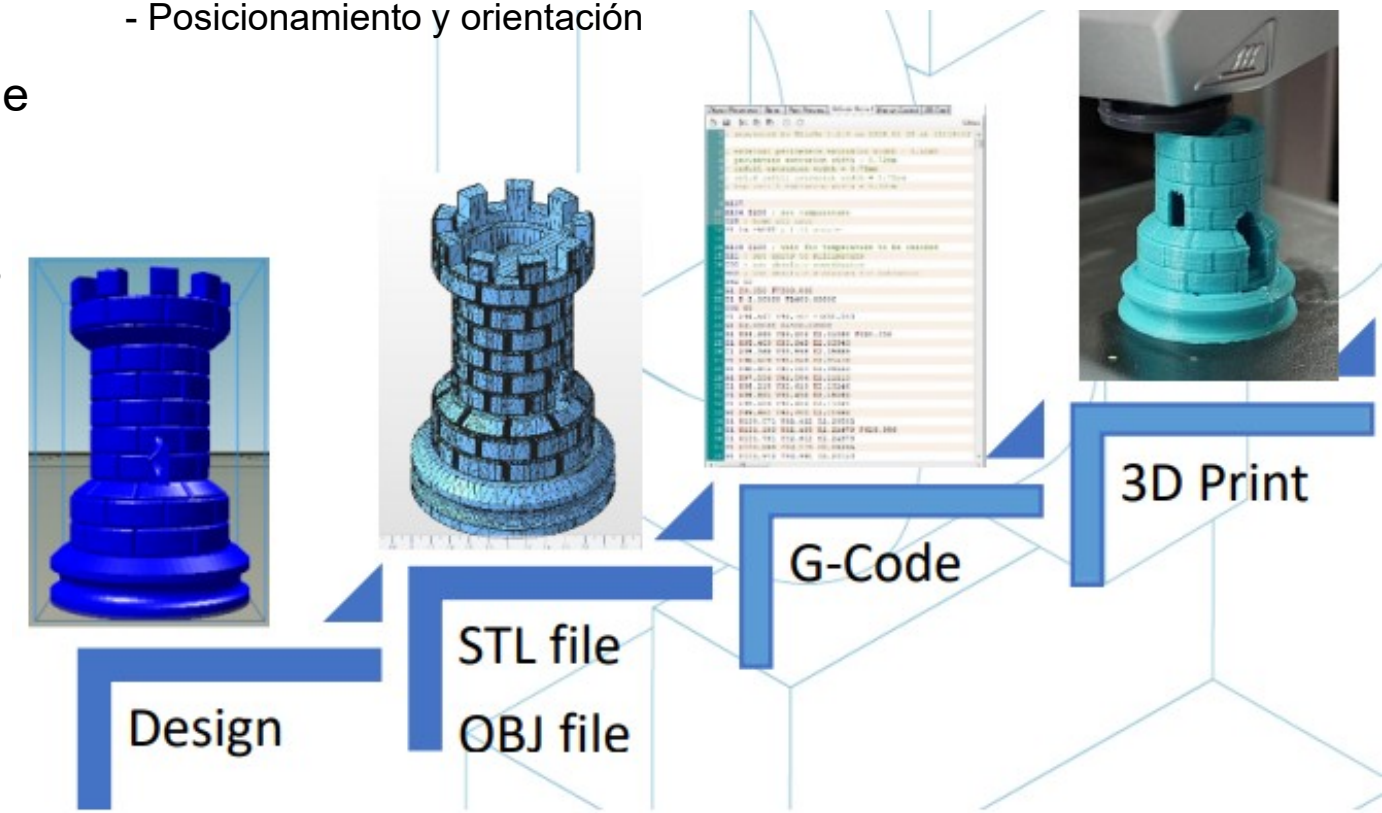
Impresora SLA



Impresora SLS

Fabricación aditiva. Proceso de impresión

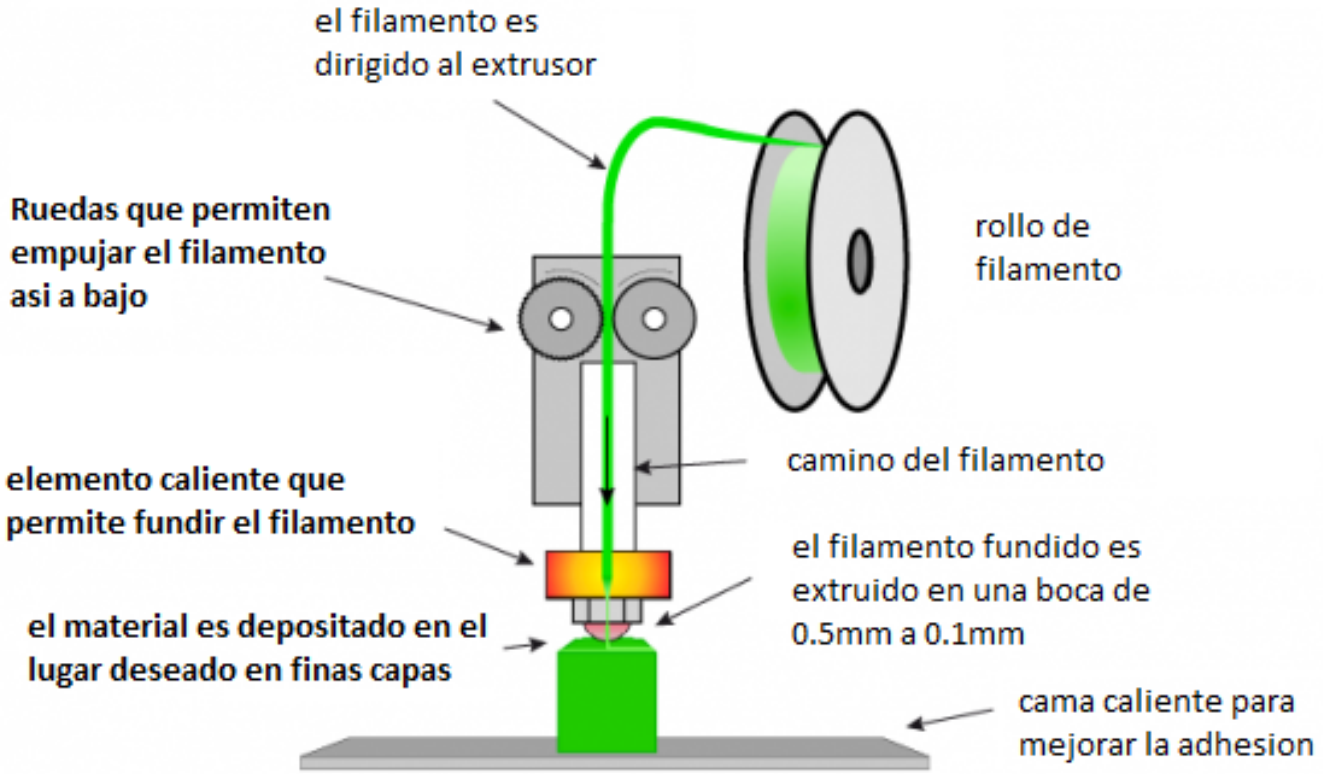
1. Obtener el modelo digital (diseño por software; scanner 3D; repositorio)
2. Exportar y reparar el archivo STL
   - Analizar la pieza o modelo
   - Estructuras de soporte
   - Relleno del modelo
   - Posicionamiento y orientación
3. Generar el G-Code
4. Impresión 3D
5. Extraer las piezas
6. Post-procesado.



Modelado por Deposición Fundida (FDM)

Técnica de impresión por adición. Un filamento de plástico (polímero termoplástico) es alimentado por un carrete hasta una boquilla, donde el material es fundido y licuado, para luego "dibujar" sobre una plataforma. Tan pronto como toca la superficie de impresión, el filamento se endurece mientras se deposita gradualmente, siguiendo una cierta estructura, para crear finalmente la impresión 3D.
Es una forma de fabricación aditiva y también un proceso de unión de materiales capa sobre capa.





Modelado por Deposición Fundida (FDM)

Materiales:

- ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno),
- PLA (Ácido Poliláctico)
- Nylon (Poliamida)
- Materiales compuestos: mezclas de plástico con fibras naturales o de carbono.



Aplicaciones:

- Prototipos en general.
- Piezas finales, desde partes de generadores eólicos hasta micro dispositivos.
- Modelos anatómicos para uso médico
- Dispositivos que son usados a diario en hospitales (mascarillas, gafas)



Ventajas:

- Técnica simple
- Técnica limpia
- Equipos económicos





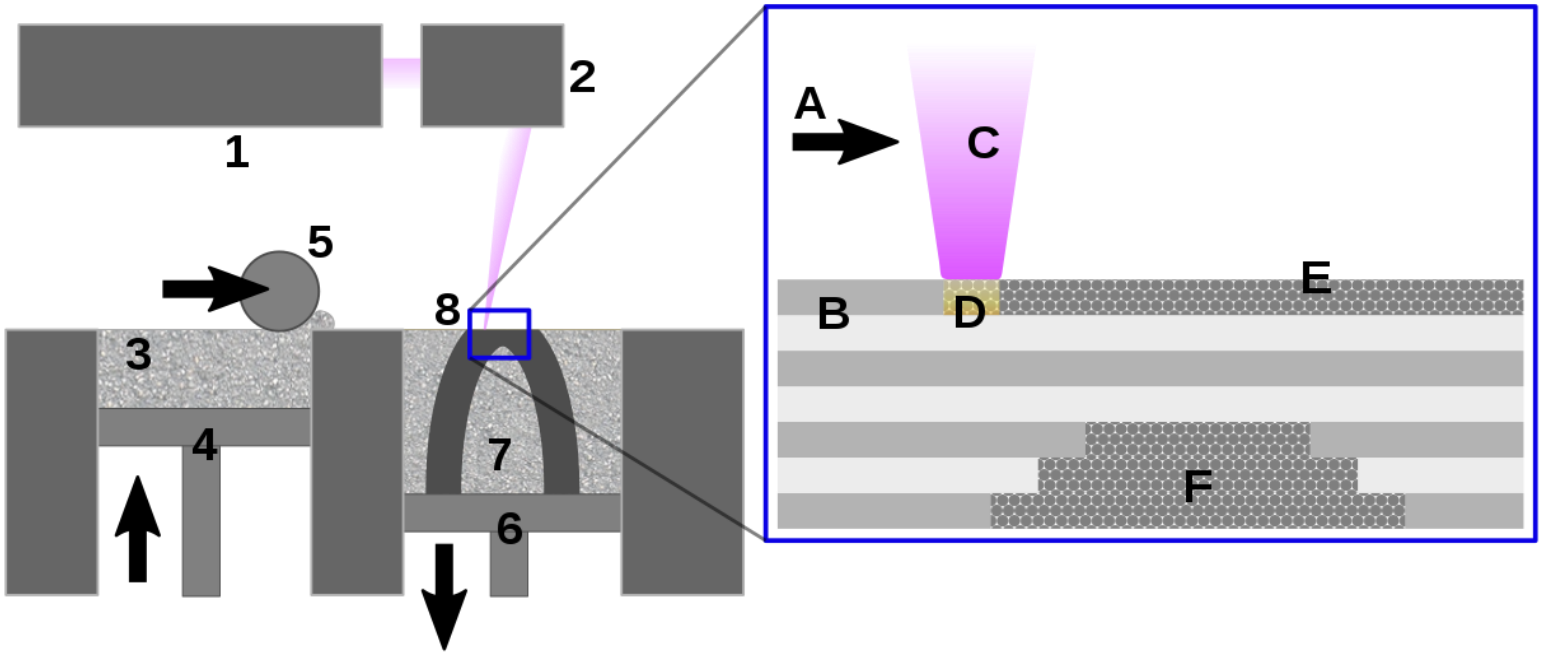
Modelado por Deposición Fundida (FDM)

Especificaciones técnicas de una impresión MDF. Ejemplo:

Standard lead time	Minimum of 4 working days (or 48 hours for models using the Fast Lanes service), depending on part size, number of components and finishing degrees
Standard accuracy	± 0.15% (with lower limit on ± 0.2 mm)
Minimum wall thickness	1 mm
Layer thickness	0.18 – 0.25 mm (varies depending on the chosen material)
Maximum part dimensions	Dimensions are unlimited as components may be composed of several sub-parts. The maximum build envelope is 914 x 610 x 914 mm
Surface structure	Unfinished parts typically have a rough surface but all kinds of fine finishes are possible. FDM parts can be sandblasted, smoothed, colored/impregnated, painted and coated

Sinterizado Láser Selectivo (SLS)

Técnica de impresión por adición. Consiste en depositar una capa de polvo, de unas décimas de milímetro, en una cuba que se ha calentado a una temperatura ligeramente inferior al punto de fusión del polvo. Seguidamente un láser sinteriza el polvo en los puntos seleccionados, causando que las partículas se fusionen y formen un objeto sólido.



Esquema del proceso de sinterizado selectivo por láser: **1.-** Láser. **2.-** Sistema de escaneo. **3.-** Sistema de dispensación de polvo. **4.-** Pistón de dispensación de polvo. **5.-** Rodillo. **6.-**. Pistón de fabricación **7.-** Plataforma para polvo de fabricación **8.-** Objeto siendo fabricado (ver inserto)
Leyenda del inserto: **A.-** Dirección de escaneo del láser. **B.-** Partículas de polvo sinterizadas (estado marrón). **C.-** Haz láser. **D.-** Sinterizado por láser. **E.-** Plataforma de polvo pre-posicionado (estado verde). **F.-** Material no sinterizado en capas anteriores.

Sinterizado Láser Selectivo (SLS)

Materiales:

Nylon, cerámica, aluminio, plata, acero.

En algunos de ellos, como los cerámicos, no se sinterizan por láser, sino un pegamento. En este caso, un rodillo coloca una fina capa de polvo en la plataforma y un cabezal especial de impresión aplica un agente aglutinante en puntos específicos.

Aplicaciones:

Varían desde el sector de la automoción al sector de los bienes de consumo (ejemplo: componentes de aviones, producción de calzado)
SLS es conveniente para pequeños lotes de producción, donde la fabricación de moldes no es rentable.

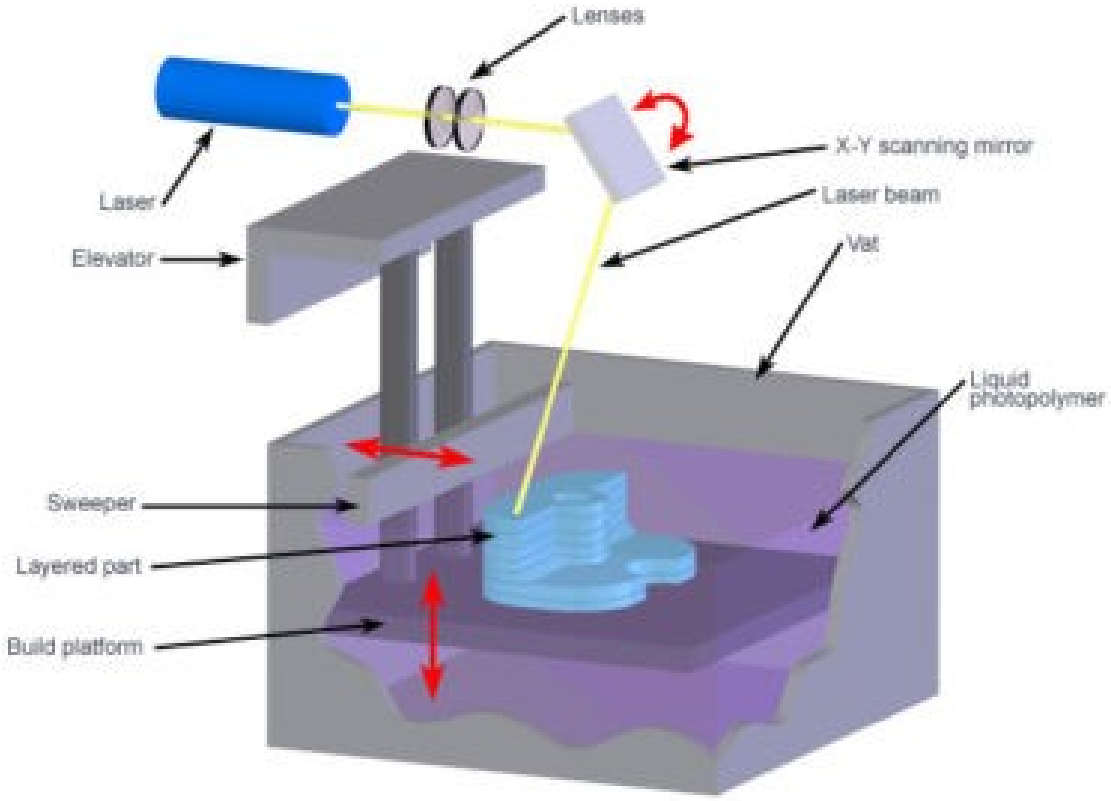
Ventajas:

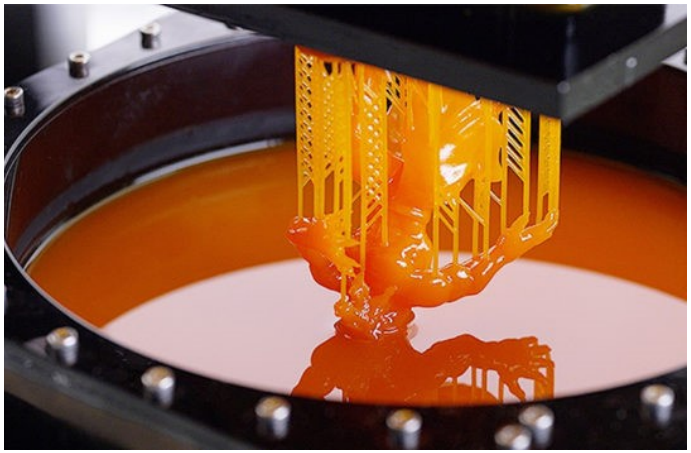
- No utiliza estructuras de soporte
- Variedad de materiales de impresión
- Alta precisión
- Escalabilidad



Estereolitografía (SLA)

Es un proceso de fabricación aditiva que consiste en dirigir un haz de luz láser ultravioleta hacia un polímero líquido, el cual se va solidificando capa a capa. A diferencia del SLS, la SLA requiere de estructuras de soporte.





Estereolitografía (SLA)

Materiales:

Resinas poliméricas fotosensibles.



Aplicaciones:

Producción de prototipos o piezas finales, en industria automotriz, aeroespacial, medicina y bienes de consumo en general.

Ventajas:

- Alta resolución
- Geometrías complejas
- Variedad de terminaciones post-impresión (color, textura).



Tecnologías de impresión 3D. Comparación

TECHNOLOGIES	Process	Materials used	Complexity	Speed	Max Part Size (cm)	Accuracy	Surface Finish	Strengths	Weaknesses	Pricing	Application Area	Application Examples
Fused Deposition Modeling (FDM)	Layers of melted plastic	ABS Filaments, Polycarbonate, Resin, Nylon	●●●●	Fair	30x30x50	Fair	Fair	Durable; ideal for conceptual models	Low resolution	€€	Aerospace, automotive, industrial, medical	Wind turbines, aircraft components
Selective Laser Sintering (SLS)	Plastic powder melted by laser	Paper, plastic, metal, glass, ceramic, composites	●●●	Fast	34x34x60	Good	Fair	Resistant, durable, flexible	Needs post-processing	€€	Automotive, consumer products, aerospace	Small production batches and prototypes
Stereolithography (SLA)	Polymerization scanned by UV laser	Liquid photopolymer, composites	●●●	Fast	30x30x50	Very good	Very good	High res; complex geometries	Only photopolymer materials	€€€	Aerospace, automotive, consumer goods	Medical models of anatomic human parts
Photopolymer Jetting (POLYJET)	Inkjet method with liquid photopolymers	Metals, plastic, wax	●●●	Fast	39x31x19	Very good	Good	More materials at the same time	Only photopolymer materials; not durable	€€€	Medical devices, multimaterial prototypes	Medical stethoscopes
Selective Laser Melting (SLM)	Metal powder melted by laser	Metals: copper, aluminium, tungsten etc.	●●	Fair	28x28x36	Fair	Fair	Manufactures high density parts	Price; needs post-processing	€€	Dental products, mechanical components	Lightweight components for aircraft
Electron Beam Melting (EBM)	Melted powder selected by electron beam	Metals: cobalt, chrome, nickel	●●●	Fast	20x20x20	Fair	Poor	Less thermal stress	Limited set of metals	€€€	Dental, medical implants, automotive	Bone tissue medical models
Electron Binder Jetting (BJ)	Powder distributed by jetting machine	Ceramic, metals, plastic, sand, composite	●	Fast	40x20x10	Fair	Fair	No support structure; multicolour prints	Fragile with limited mechanical properties	€	Architecture, mechanical structures	Pots and general home furniture
Continuous Fibre Fabrication (CFF)	Double nozzle laying/melting method	Plastic, carbon composites, nylon	●●●●	Fair	32x43x16	Fair	Fair	Robust parts, no post-process needed	Limited fibre placement	€€€	Aerospace	Lightweight components
Material Jetting (MJ)	Inkjet method with wax materials	Wax	●●	Slow	30x18x20	Very good	Good	High resolution	Limited wax-like materials; requires support structure	€€	Prototypes for form, fit testing; Casting patterns	Lost Wax Casting in Jewellery and Medical fields

Activar Windows
Ve a Configuración para activar Windows

Fabricación aditiva: ventajas

- Menos pasos entre el modelo CAD y la producción de la pieza.
- Se necesita poca mano de obra debido al alto nivel de automatización.
- Mayor número de formas geométricas pueden fabricarse, permitiendo por ejemplo la producción de piezas con topología optimizada, con canales internos, etc.
- Fabricación de alta velocidad para piezas pequeñas y complejas.
- Generalmente menos desperdicio de material.
- Posibilidad de reconstruir secciones dañadas de objetos existentes, dependiendo del material de la pieza.