

¿Industrializar la fabricación de micro y nanoproductos?

Estado del arte y retos

Por: Javier Borda Elejabarrieta, Dr. Ingeniero Industrial, Msc. Quantitative Models y MBA.
 Presidente y Consejero Delegado de Sistplant, S.L. y Goldgym, S.L.U.
 Profesor de la ETSII de Bilbao (Aula Aeronáutica) y de la Universidad Comercial de Deusto.

Introducción a la Micro (MF) y Nano (NF) fabricación: fundamentos y ventajas.

Es conocido que la MF y NF son el conjunto de técnicas que permiten la generación de elementos y sistemas físicos a escalas micro y nanométricas. En común hay (en algunos casos) algo determinante: los productos genera-

dos no son visibles a simple vista y esto condiciona profundamente su industrialización y manipulación. Pero también hay, sin embargo, una profunda diferencia; mientras la MF es microscópica en cuanto al tratamiento de la materia, la NF manipula átomos y grupos de ellos, con lo que el potencial de crear propiedades sorprendentes y particularizadas en los productos es casi total. Las grandes dificultades estriban en este caso de la NF, en la caracterización de lo fabricado y en la velocidad de su obtención.

La naturaleza de ambas MF y NF es pues radicalmente diferente. Pero la MF puede hacer de puente experimental hacia la segunda, en el caso de que se esté utilizando en la fabricación de productos diminutos (por ejemplo micro moldes de inyección de micro o nano componentes), pues el aspecto de la manipulación "invisible o casi" será común.

La MF es esencialmente "convencional" en el sentido de utilizar técnicas de fabricación tradicionales (mecanizado, deformación, inyección, montaje, etc.) La NF, al recurrir a la manipulación de la estructura atómica, además de las técnicas tradicionales, utilizables en la generación *top-down* de la nano producción, recurre en el escalado *down-top* bien al movimiento individual de átomos o grupos por el AFM (microscopio de fuerza atómica, dotado de un voladizo actuador o cantiléver), y el STM (microscopio de efecto túnel), proceso evidentemente lento, o bien al auto ensamblaje macroscópico, hoy en día mayormente por síntesis química, más rápido que el anterior, pero menos gobernable salvo para casos sencillos (los que hoy se realizan) de tratamientos superficiales y recubrimientos. La tecnología de CVD (deposición de vapor dopado) es la utilizada mayoritariamente para este último propósito, y consiste en dirigir por campos eléctricos átomos ionizados sobre las superficies.

Quizá, una primera excepción a los productos NF, sean los CNT (nanotubos de carbono). Un nanotubo es una estructura hexagonal de átomos de carbono, pero que es circular a diferencia de las capas de grafito, conectadas solo por fuerzas débiles de *Van der Waals*.

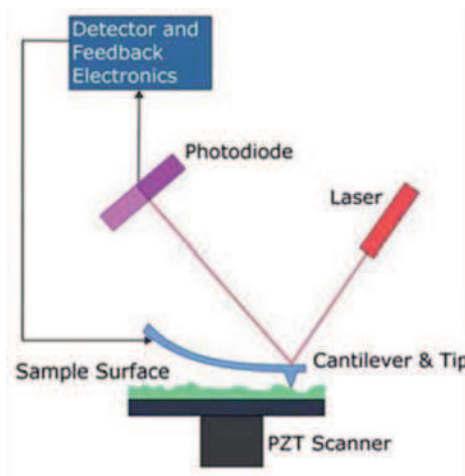
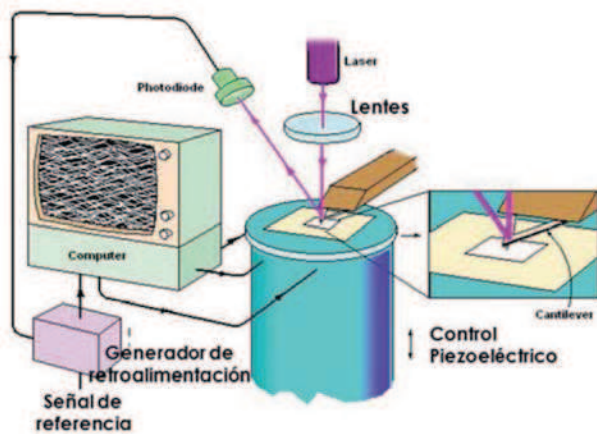


Fig. 1. AFM. Microscopio Fuerza Atómica por campos eléctricos átomos ionizados sobre las superficies.

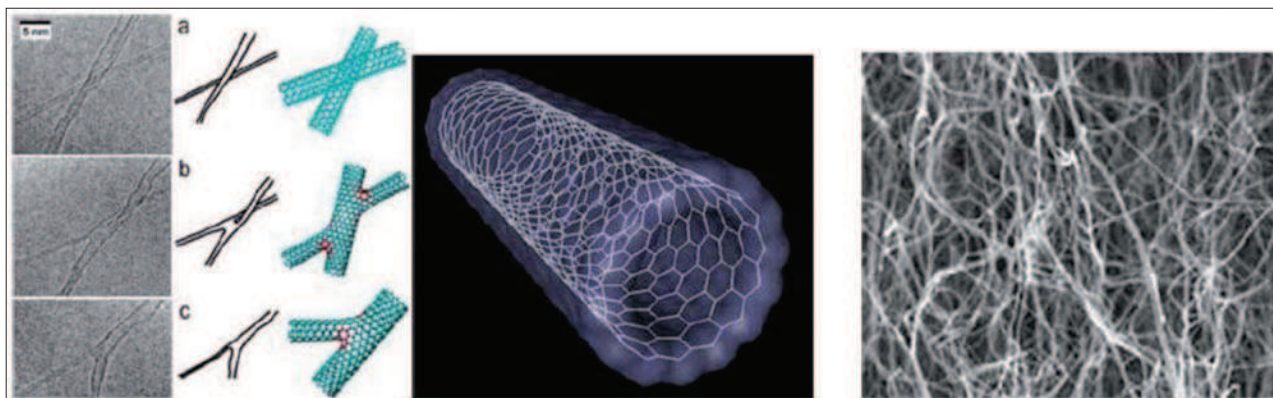


Fig. 2. Nanotubo de carbono y entrelazado indeseable.

Al estar cerrada sobre sí misma es resistente y tenaz, y consumiendo sólo tres de las cuatro valencias, le queda un electrón en la banda de conducción. Con esta idea, en el sector Aeroespacial, Naval y Defensa, entre otros, podrían emplearse como nano fibras largas para estructuras mucho más resistentes y ligeras que las actuales, y además conductoras de la electricidad (evacuación de rayo o estática). Sin embargo, y a modo de ejemplo de lo preindustrial de la NF, tan atractiva idea se ve frenada por la imposibilidad actual de evitar el entrelazado y amalgamado de los CNT al intentar orientarlos sobre todo en fibras largas, lo que anula gran parte de su eficacia al aparecer momentos flectores significativos en las estructuras a pesar de estar únicamente sometidas a esfuerzos de tracción o compresión. Se necesita, en este caso, una máquina de deposición de fibras que sea capaz de orientar por fuertes campos eléctricos los nanotubos, evitando gran parte de su entrelazado. Lo de que los campos eléctricos sean fuertes tiene una razón de ser que es general a cualquier manipulación de un producto NF: a este nivel de dimensiones, la viscosidad en cualquier lecho fluido (como por ejemplo la resina epoxy empleada en las aeroestructuras) y los movimientos brownianos son muy significativos debido a la cercanía de los efectos cuánticos en la materia (que se manifiestan más a medida que nos acercamos a la longitud de Planck).

La segunda excepción es la fabricación de *nanochips*. La utilización de la luz de alta frecuencia (RX) en litografía de productos micro electrónicos es ya bastante tradicional. Por ello, y dado que el aumento de la frecuencia de los RX es elemental y permite discernir el menor tamaño, es sin duda el campo donde el desarrollo de la NF es más rápido. No hay mucha más "Ingeniería de proceso" radical a añadir, casi se trata solo de hacer viable un incremento más o menos significativo en la frecuencia de la radiación, sin producir una alteración no deseada en los substratos.

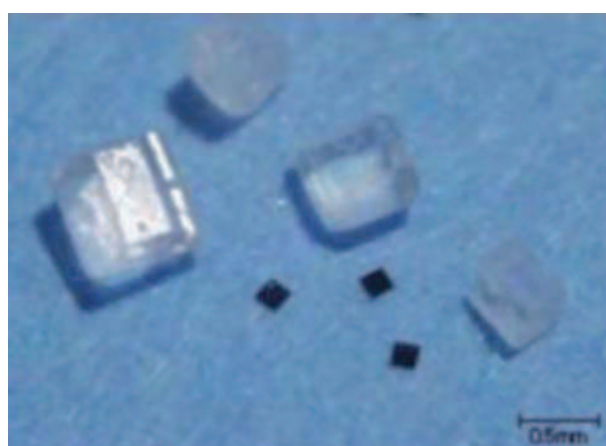


Fig. 3. Nanochips.



Fig. 4. Máquina para fabricar Nanochips.

¿Por qué estar alerta?

Hoy en día todo el mundo habla de la NF, pero la realidad es que exceptuando la nanoelectrónica y los recubrimientos, todo se encuentra confinado a nivel de laboratorio, con casi nula practicidad industrial. ▶

Pero las posibilidades rupturistas en propiedades de los productos nano son totales, y el salto a la industrialización lo produciremos en cualquier momento (antes en unos que en otros) dado el inmenso esfuerzo que todos los países desarrollados le dedicamos.

Es por lo tanto ingenuo atender a predicciones generalistas de años concretos (normalmente alejados de hoy), y la táctica inteligente es estar atentos para predecir qué cambios afectarán a nuestros productos y cuando ocurrirán.

Sin duda, esto requiere para cada organización un plan estratégico-tecnológico concreto ya que las variaciones del salto en utilización de la NF serán muy grandes según cada producto y mercado.

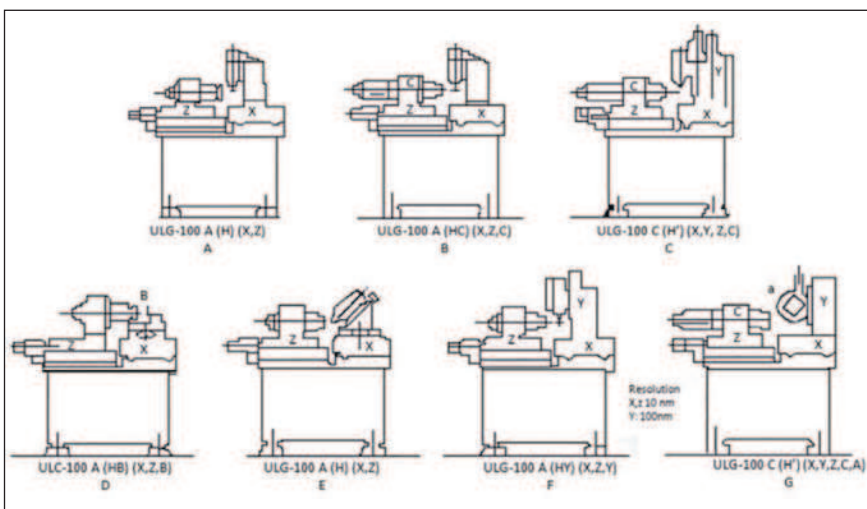


Fig. 5. Máquinas de 5 ejes ultra precisas para micro mecanizado (torneado y rectificado).

En mi opinión, intentando adivinar algunos objetos y áreas que se crearán o transformarán por MF y sobre todo NF, diría que podrían ser, por ejemplo, y al margen de la micro y nano electrónica ya desarrollada hoy en día y de los recubrimientos y tratamientos superficiales, los siguientes:

1. Micro robots (con elementos nano en algún caso) para exploración médica y cirugía sin intrusión.
2. Micro robots y micro UAV's (también con elementos nano) para la vigilancia indetectable y la lucha contra el terror, salvamento y asistencia, etc.
3. Micro accionamientos (también con elementos nano), por ejemplo para crear "morphing wings" en aeronáutica y en general en superficies activas.
4. CNT's (nanotubos de carbono) direccionables con precisión por campos eléctricos.
5. Materiales con dopajes "nano" múltiples y propiedades sorprendentes electrónicas y mecánicas.

Estado del arte en su industrialización. Retos.

Un proceso clave en la MF es el micro mecanizado. Aún con grandes diferencias en su vital precisión (rigidez extrema y dilataciones cero) y precio, las máquinas de media-alta velocidad de mecanizado para obtener esfuerzos de corte muy pequeños comienzan a extenderse.

Sin embargo, los periféricos de proceso se encuentran en un estado más precario. Normalmente, la micro fabricación se destina casi a series unitarias o muy cortas de componentes de muy alto valor añadido. Por ello son necesarios sistemas de carga y descarga de piezas y de cambios de herramientas que garanticen un tiempo de basculación de las máquinas del orden de unos pocos segundos.

Como los productos apenas se aprecian o no se ven, es inmediato deducir que se requiere una manipulación automatizada rápida, mejor con robots muy pequeños, precisos y rápidos (sin detenciones ni inercia) integrados y servoconducidos por iluminación láser para la detección precisa de la posición de la pieza. Y lo mismo cabe decir que los amarres pieza-palet y pieza-máquina, en parte piezoeléctricos.

Así pues, suponiendo que el proceso de mecanizado esté bien conseguido, el reto está en diseñar una periferia acorde.

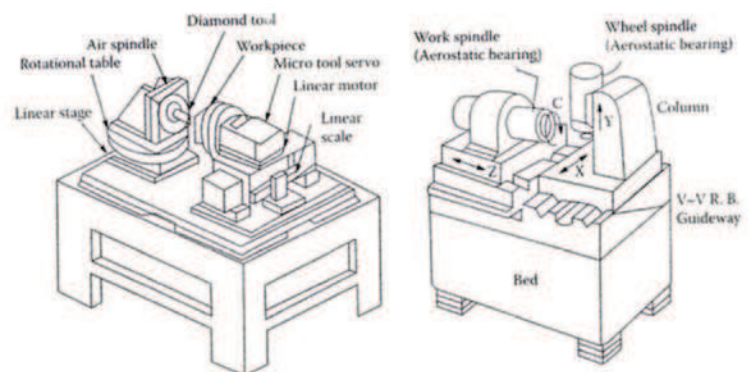


Fig. 6. Máquinas de micro torneado y micro rectificado ultra precisas de 2 ejes.

Las estructuras de máquinas tetraédricas (equivalentes a las de los hexápodos del MAV, mecanizado de alta velocidad macroscópico) son una buena alternativa de rigidez frente a las prismáticas.

Un aspecto interesante a destacar figura en el siguiente gráfico. Dependiendo del tamaño de la micro pieza, los

esfuerzos y la energía específica (por unidad de volumen) del corte, determinan la viabilidad de utilización del micro torneado o micro rectificación. Al acercarnos al tamaño nano, prácticamente sólo el último de ellos será viable.

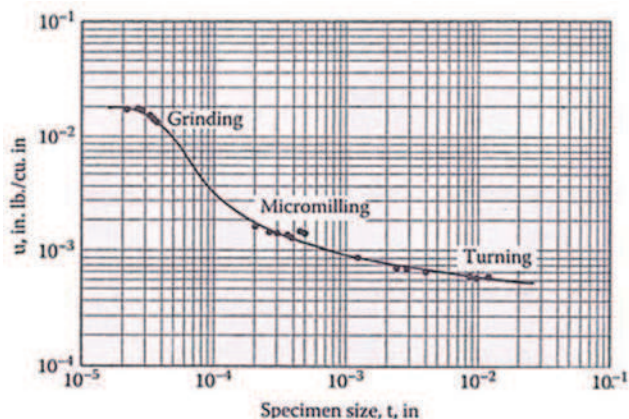


Fig. 7. Energía específica en el plano de corte para un acero SAE 1112.

Para la NF las cosas están aún menos definidas, pero los retos en tecnología de manipulación que se adivinan son realmente grandes.

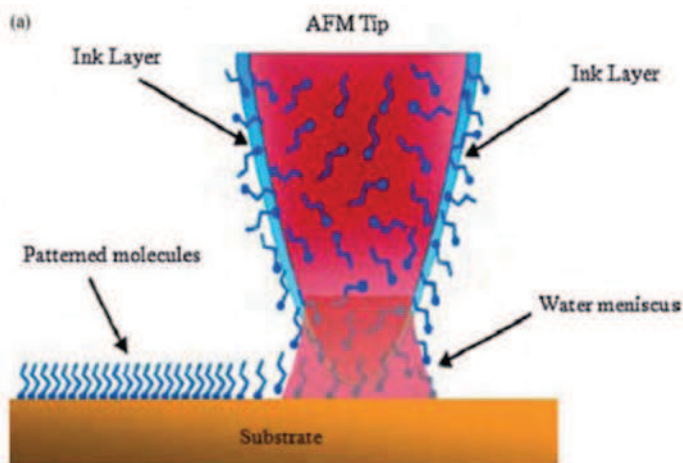


Fig. 8. Nano auto ensamblaje direccional por CNC: nano litografía "dip-pen".

Una alternativa, lenta aún, al CVD es la nano litografía "dip-pen", en la que el auto ensamblaje podría dirigirse por una máquina de CNC. Utilizando un útil especial en la punta de un microscopio de fuerza atómica (AFM), podrían depositarse direccionalmente moléculas que se autoensamblan por afinidad. El reto aquí es una velocidad de deposición mayor. Si bien mecánicamente no sería nada difícil agilizar el movimiento del cabezal del AFM (aunque habría que concebir un AFM apropiado para ello, y no para "pruebas" en un laboratorio), sin embargo, posiblemente habría que reforzar, con un campo eléctrico longitudinal a la punta del AFM y una ionización el transporte

de los grupos de átomos. De lo contrario la ruptura del menisco y película de fluido, originados por la no resonancia entre la nueva velocidad y la frecuencia natural de autoensamblado, arruinarían el proceso.

Es también teóricamente posible generar productos NF "inyectados" (p.e. con un PMMA) o ensamblados (esto último más difícil).



Fig. 9. Estructura tetraédrica para nano fabricación.

Pero la "inyección" de NF's no es tal: habiendo generado un micro molde por micro mecanizado es más viable la deposición de una película continua de un material termoplástico y el "prensado" del mismo, cerrando las dos mitades del molde y habiendo calentado tanto el film como la micro estampa por un láser de la frecuencia e intensidad adecuadas. La rigidez y precisión requieren también estructuras tetraédricas en las máquinas. Estos productos termo prensados serán útiles como componentes de ensambles de orden superior, generalmente también NF.

Sin embargo, el paso del ensamblado es exponencialmente más complejo. Aquí ya no se puede recurrir, obviamente, a técnicas de autoensamblado, pues se requiere ▶

LOS RETOS EN TECNOLOGÍA DE MANIPULACIÓN QUE SE ADVINAN SON REALMENTE GRANDES

un montaje concreto y localizado que sólo es posible siendo realizado por nano robots, que a su vez, no podrían ser autoensamblados. Las fuerzas de viscosidad y brownianas requerirán de un vacío lógicamente.

Aunque en teoría esto sería posible (por ejemplo haciendo que el nano robot se guiara por un campo eléctrico vectorial en 3D en el vacío, o construyéndolo de materiales diferentes a proa y popa para que en un medio viscoso ionizable creara un movimiento de cargas y su consiguiente avance por intercambio de cantidad de movimiento), parece más lógico prescindir de nano robots sumamente complejos en el campo industrial (la salud y navegación corporal sería otra cosa), por su dificultad de construcción y su velocidad.

Sin embargo, nano robots elementales (nano-utilajes) movidos en el vacío por los mencionados campos eléctricos vectoriales, podrían ser una solución pragmática para el ensamblaje de nano productos de cierta complejidad con una velocidad industrial. Evidentemente, ello requeriría de un "dopaje" del componente NF (por ejemplo un punto de escala nanométrica en el film de termo-prensado).

Cómo organizar un proceso industrial competitivo: lay outs, sistemas de fabricación.

El modelo de lay-out en NF, si bien la planta será de dimensiones muy reducidas en consonancia con los productos y las máquinas ultra precisas y ultra rígidas, será determinante para lograr un flujo ágil y sobretodo una capacidad de proceso superior a "6Sigma".

Centrados unos procesos de fabricación que son industriales, es decir, con un mínimo de velocidad, inmediatamente el problema del tiempo y la precisión se trasladará a la manipulación, eventual ensamblaje y packing. Nada manual será posible aquí por razones obvias, y la precisión requerirá de robots y automatismos pequeños, rígidos, veloces y con poca inercia, guiados por láser de alta frecuencia y con actuaciones de campos eléctricos sobre los productos. Tengamos en cuenta que aunque las máquinas propias de proceso depositen el producto NF de su fase de producción en un útil, palet o molde relativamente macroscópico, este será de muy reducidas dimensiones para estar en consonancia con su entorno.

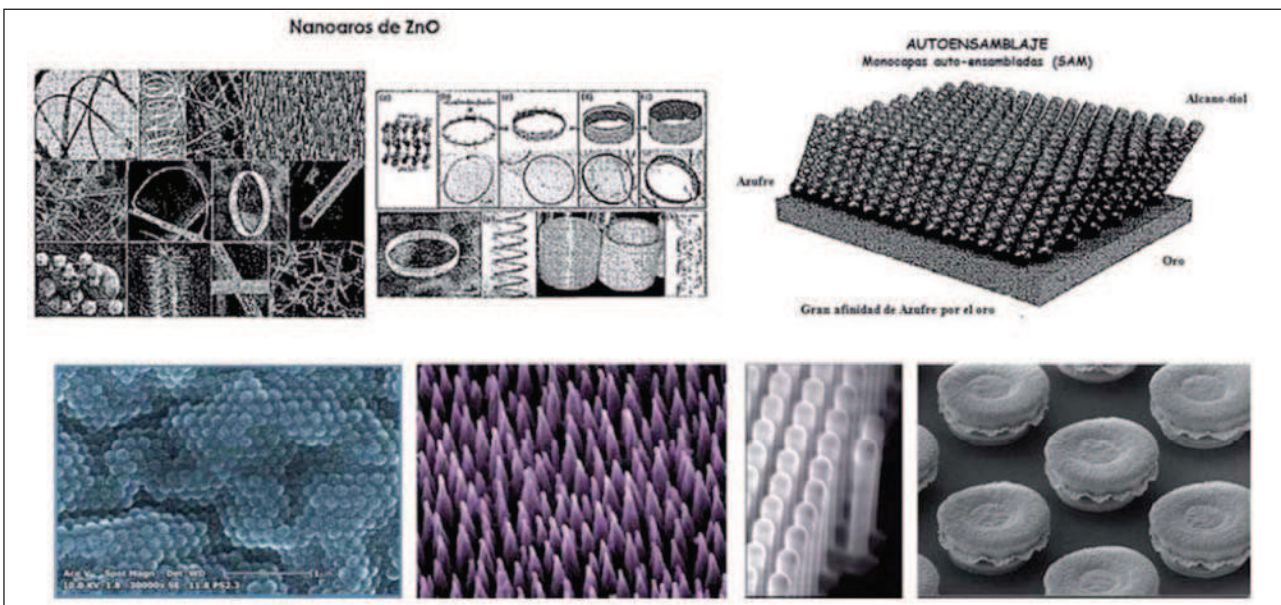


Fig. 10. Micro y Nano estructuras autoensambladas.

PARECE LÓGICO PRESCINDIR DE NANO ROBOTS SUMAMENTE COMPLEJOS EN EL CAMPO INDUSTRIAL, POR SU DIFICULTAD DE CONSTRUCCIÓN Y SU VELOCIDAD

Sería difícil imaginarse una sala blanca (inevitable, por supuesto), de alto grado de fabricación NF, pequeña, con un stock de útiles que ocupe más que la propia sala y cuya posibilidad de caída o golpe puedan deteriorar unos equipos por naturaleza muy caros, y además cuya manipulación requeriría aumentar el tamaño de unos automatismos y robots extremadamente pequeños por naturaleza.

En el caso de MF, el lay out es de mayores dimensiones, pero comparado con las fábricas tradicionales es también considerablemente menor.

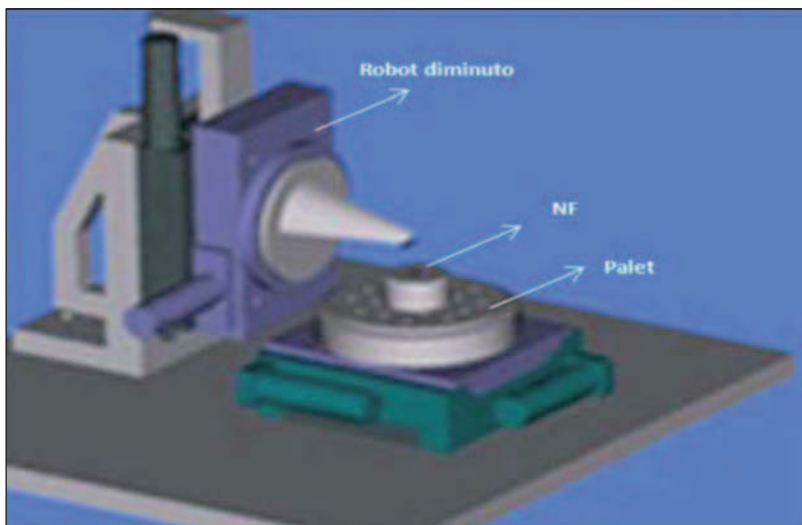


Fig. 11. Ensamblaje o manipulación automático de producto nano paletizado.

con el auxilio de una ingeniería que ya esté dando pasos en estas tecnologías, y la vea con enfoque industrial. No son válidas para determinar este posicionamiento otras entidades con una limitada visión industrial y competitiva.

Cinco son los elementos que un Plan Tecnológico competitivo en MF y NF debe, a mi juicio, contener:

Pero al igual que en el caso de la NF la técnica de automatización de la manipulación que sea idónea condicionará sin duda alguna la disposición de máquinas y sistemas, y los tiempos de cambio de herramientas y carga descarga de piezas deben ser, también, del orden de muy pocos (si alguno) segundos.

En mi opinión, la determinación del orden de magnitud de tiempos y tamaños podría ser muy adecuadamente estudiada por la "Teoría de Semejanza" que se aplica en el derrame de fluidos, comparando fábricas avanzadas macroscópicas con las que nos ocupan.

Finalmente, para completar el proceso industrial competitivo es necesario tener una organización acorde. ¿Puede alguien imaginarse en este contexto, por ejemplo que la estructura distinga entre las ingenierías de procesabilidad y mantenimiento? Es un lugar pequeño con una problemática críticamente integrada desde la concepción del producto, de los útiles, de su manipulación, de las condiciones de las máquinas, donde los sucesos son rápidos, encadenados, dependientes y confinados. Y así, forzosamente, deben ser las ingenierías, personas únicas con la totalidad de la función y, eventualmente, quizá también incluyendo en ellas la ingeniería de diseño. Y además, sólo el apoyo de un sistema inteligente en tiempo real y de detección de eventos integrables de proceso, calidad y mantenimiento hará posible la gestión eficaz de una fábrica MF o NF. Si MF es un puente (aunque con muchos agujeros en el piso) hacia la NF, aprovechémoslo.

Cómo iniciarse. Plan Tecnológico (lo que Sistplant hace).

Consideramos que es vital que las industrias se posicionen en MF y NF con una perspectiva, por las razones que el principio de este artículo he mencionado. Y que lo hagan

1. Creación de un escenario probable en base a las funciones desarrolladas por los productos actuales y el estado del arte y su evolución previsible.
2. Viabilidad tecnológica y encaje en el mercado.
3. Equipamiento y Plan Industrial; disponible, desarrollable y por inventar.
4. Concepción del modelo de actividad, *lay out*, tecnología de fabricación y manipulación, modelo y tamaño de la organización.
5. Agenda de revisiones periódicas del estado tecnológico y salto probable.

LA MF ESTÁ EN SUS INICIOS, LA NF A NIVEL DE LABORATORIO, Y LA PRIMERA ES UN PASO HACIA LA SEGUNDA, PERO ÚTIL EN SÍ MISMA

Conclusiones

La MF está en sus inicios, la NF a nivel de laboratorio, y la primera es un paso hacia la segunda, pero útil en sí misma. Como quiera que los esfuerzos que se están destinando a ambas son enormes, en cualquier momento puede haber un salto rupturista tecnológico que invalide un negocio actual. Para ello no hay fechas "generalistas", y debemos hurgar en los síntomas y realizaciones que nos afectan con un Plan Tecnológico adecuado y pensado para ser industrial e ir, de esta manera, adquiriendo el necesario conocimiento poco a poco.