

JUAN GÓMEZ ORTEGA

ROBÓTICA. EVOLUCIÓN EN EL CONTEXTO DE LA AUTOMÁTICA

Lección Inaugural
Curso Académico 2003/04



UNIVERSIDAD DE JAÉN

Robótica.
Evolución en el contexto de la Automática

JUAN GÓMEZ ORTEGA
Catedrático de Ingeniería de Sistemas y Automática

ROBÓTICA.
EVOLUCIÓN EN EL CONTEXTO DE LA
AUTOMÁTICA



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Lección Inaugural. Septiembre 2003

© Juan Gómez Ortega

© Universidad de Jaén (Para la 1ª edic. septiembre de 2003)

Depósito Legal: J - 441 - 2003

Difusión: Publicaciones de la Universidad de Jaén
Vicerrectorado de Extensión Universitaria
Campus Las Lagunillas, s/n
23071 JAÉN

Imprime: Gráficas La Paz de Torredonjimeno, S. L.
www.graficaslapaz.com

A Capilla, Beatriz y Juan
A mis padres

*Excelentísima Sra. Consejera de Educación y Ciencia,
Excelentísimo Sr. Rector Magnífico,
Excelentísimas e Ilustrísimas Autoridades,
Estimados Miembros de la Comunidad Universitaria,
Señoras y Señores.*

La Universidad, como institución, ha evolucionado desde sus orígenes, en los albores del siglo XIII, hasta la actualidad. A lo largo de todos estos años ha experimentado cambios profundos en su estructura, en sus formas, en su dimensión y en su función. Y a pesar de ello, el acto académico de la inauguración de un nuevo curso ha permanecido siempre como una tradición inalterable. Incluso, en los primeros tiempos los estudiantes tenían la obligación de asistir a todos los actos de la Universidad entre los que, además de las disputas ordinarias o extraordinarias, misas, predicaciones y procesiones, se incluían las sesiones inaugurales de bachilleres o de maestros.

Probablemente, esta tenaz persistencia se deba al sentido que originariamente tuvo el acto de la «inauguratio», que era considerado en la Roma antigua como el ritual que establecía augurios favorables para una nueva ciudad o espacio, que eran de esta manera consagrados.

El hecho, por lo tanto, de ser ésta una tradición tan ancestralmente ligada a la Universidad hace que la encomienda de la lección inaugural sea un honor, probablemente el más alto para un profesor universitario, con el que aquella distingue a uno de sus profesores y, por extensión, al Centro y al Departamento al

los que pertenece. Como no puede ser de otra manera, a este privilegio, que en esta ocasión generosamente se me concede, me gustaría responder con mi máxima dosis de agradecimiento, en primer lugar, hacia el Rector, que es quien tiene en última instancia la potestad del encargo, y en segundo lugar, hacia el resto de la Comunidad Universitaria, en cuyo nombre entiendo que se hace la propuesta.

La técnica es una de las actividades del hombre que más ha influido sobre su propia vida. Desde que los primeros habitantes del planeta empezaron a construir sus instrumentos de trabajo y de caza, hasta la revolución informática actual, la humanidad se ha visto afectada, para bien o para mal, por la técnica que ella misma producía. Melvin Kranzberg, un reconocido historiador, mantenía¹ que «la tecnología no es ni buena ni mala, pero tampoco es neutral», aforismo que expresa la ambigua fuerza con la que el nuevo paradigma tecnológico del desarrollo se inserta en todas las vertientes de nuestra práctica social. Esta máxima podría tener además su complementaria en lo referente a nuestra postura ante la tecnología, con la que se puede llegar a alcanzar un mayor o menor grado de complicidad, pero respecto de la que no deberíamos ser indiferentes.

Sin embargo, a pesar de su indudable interés para el progreso humano, la historia de la técnica, como disciplina académica, no ha recibido hasta ahora la atención que se merece. Surgida como materia de enseñanza en algunas universidades europeas hace relativamente poco tiempo, todavía no ocupa un rango adecuado en las enseñanzas universitarias, comparada con otras especialidades históricas como las económicas o las sociales.

1. KRANZBERG, M. «The Information age: evolution or revolution?», en B.R. GUILLE (Editor), «Information Technologies and Social Transformation», Washington D.C., National Academy of Engineering, 1985.

En relación con esto, me gustaría referirles una antigua anécdota que me llamó la atención al leer, hace ya algunos años, unas notas sobre la evolución del control automático que, mi buen amigo y compañero, el Profesor Sebastián Dormido había escrito para un curso sobre control de procesos; anécdota que a su vez él referenciaba, y en la que un médico visitaba una buena biblioteca de investigación sobre historia de la medicina. Al finalizar la visita, el médico comentó que pensaba seriamente dedicarse, cuando se jubilase, al estudio de la historia de tan vetusta ciencia; a lo que el historiador profesional encargado de la biblioteca le replico diciendo que era una magnífica idea, y que incluso él también pensaba dedicarse a la medicina.

Me sirvo de esta anécdota para llamar la atención sobre el hábito bastante extendido en las disciplinas tecnológicas de abordar el estudio de una materia sin conocer, ni siquiera en sus aspectos más elementales, sus orígenes, su historia, que siempre aporta datos imprescindibles para comprenderla adecuadamente. Y desde luego no me refiero a una simple exposición de eventos y fechas más o menos destacables, sino a la presentación argumentada de las circunstancias, motivaciones e incluso fracasos que conforman el soporte sobre el que se apoya la evolución de cualquier disciplina científica o tecnológica. Es cierto que el encorsetamiento temporal al que nos enfrentamos los docentes casi siempre impide, más allá de lo estrictamente anecdótico, subsanar esta carencia, al menos de forma individual. La solución, creo, pudiera estar en todo caso en la inclusión de una materia de estudio que abordara el tema de manera global.

De cualquier forma, mientras somos capaces de buscar una solución para esa cuestión, he considerado que ésta podía ser una excelente ocasión para llevar a cabo el ejercicio académico de abordar la materia sobre la que acostumbro a desarrollar mi trabajo desde una perspectiva no voy a decir que histórica, fundamental-

mente por respeto a los profesionales de esa disciplina, pero sí al menos diferente a la exclusivamente tecnológica en la que habitualmente me desenvuelvo.

Así, me propongo hablarles, en el tiempo que el sentido común dicta como prudente, de la Robótica como disciplina, de cuáles han sido sus orígenes, su evolución y cuáles las circunstancias en las que se ha desarrollado, de cuál es su situación actual y hacia dónde dirige sus pasos en un futuro inmediato.

En la actualidad, la Robótica ha llegado a ser una disciplina generalmente aceptada, e incluso me atrevería a decir que popular. Sobre todo si se compara con otras ramas de la tecnología, mucho más antiguas, de las que hasta la población más industrializada tiene un profundo desconocimiento. En ella se suelen mezclar, por un lado, las ilusiones, alimentadas por la ficción científica que ha aprovechado el anhelo que siempre ha tenido el hombre por disponer de máquinas que lo liberasen del trabajo ingrato para incluir en sus producciones literarias y cinematográficas la figura del robot como símbolo de civilizaciones futuras tecnológicamente avanzadas; y por otro, la realidad de una tecnología, reciente, pero que ya ha tenido un enorme impacto en la industria, sobre todo de la manufactura, y también en otros sectores de actividad diferentes al industrial.



Engelberger (izqda.) y Devol en 1960, servidos por un robot Unimate

Hace poco más de cuarenta años, Joseph Engelberger, por entonces director de ingeniería de la división espacial de una com-

pañía estadounidense, y George Devol, un prolífico ingeniero de este mismo país, imaginaron un futuro en el que los robots fueran los encargados de realizar los trabajos peligrosos, aburridos, repetitivos o, en general, desagradables, permitiendo a los hombres llevar una vida más creativa y satisfactoria. Y apostaron por ello, a pesar de las dificultades. El propio Engelberger, algunos años después, contaba cómo tuvo que recorrer más de cuarenta empresas hasta encontrar una en la que se tomaran razonablemente en serio su propuesta de utilizar un robot en una línea de fabricación.

Esta ilusión fue tomando cuerpo lentamente, a medida que la tecnología robótica fue madurando, y los responsables de las empresas fueron asimilando el hecho de que los robots podían realmente ayudarles a mejorar la capacidad de competencia en sus respectivos mercados. Aun así, todavía en 1974, hace tan sólo veintinueve años, las compañías estadounidenses no estaban convencidas de los beneficios que para la mejora de la productividad de sus empresas y para el aumento de la calidad de sus productos suponía el uso de los robots en sus sistemas de producción. Fue la industria japonesa la que comenzó en esos momentos a incluir de forma masiva robots industriales en sus fabricas, circunstancia que a la postre fue una de las claves del surgimiento de Japón como una potencia mundial en lo referente a la industria manufacturera.

El éxito de las empresas japonesas propició un cambio en la postura de sus homólogas estadounidenses en relación con la Robótica, de forma que en los primeros años de la década de 1980 se lanzaron a la compra casi compulsiva de robots, que eran instalados en las líneas de fabricación muchas veces sin llegar a comprender adecuadamente la forma en la que estas máquinas debían integrarse en los procesos para llegar a conseguir de ellas un rendimiento efectivo. De esta manera, los fabricantes de robots alcanzaron en 1985 un récord en las ventas de nuevas unidades,

llegándose en esta época incluso a considerar a la Robótica como la «siguiente revolución industrial».

A pesar de ello, bastantes de estas empresas abandonaron en esos años el sector porque los productos relacionados con la Robótica comenzaron a ser considerados caros y poco eficientes. Esta situación provocó una reacción en los fabricantes de robots, iniciándose a partir de ese momento una nueva etapa en la que las empresas realizaron un gran esfuerzo por mejorar sustancialmente sus productos, reduciendo además su dependencia, por entonces casi absoluta, de la industria automovilística. Se comenzaron a diseñar nuevos robots, con un mayor grado de autonomía y con un control más sofisticado, así como con nuevos sistemas de visión por computador e interfases mejoradas, lo que permitió una notable recuperación del sector, que se ha mantenido desde ese momento en una posición de estabilidad, junto con etapas de claro crecimiento.

La Robótica, como tecnología, ha estado desde sus inicios, en la mitad del siglo XX, hasta los primeros años de la década de 1990 ligada de forma casi exclusiva a la producción industrial. De hecho, adquiere todo su sentido en el contexto de una industria tecnológicamente avanzada, en la que la automatización de los procesos de fabricación constituye un elemento clave para la consecución de un sector industrial competitivo y que genere una gama de productos con los niveles de calidad y flexibilidad exigidos por la sociedad moderna. De este modo, el robot industrial debe considerarse, de la misma manera que ocurre con otros dispositivos como por ejemplo los autómatas programables o los reguladores, como uno de los elementos, aunque con toda certeza fundamental, de los que puede servirse la automática industrial para conseguir su fin último, esto es, disponer de sistemas de fabricación autónomos, con la mínima intervención humana que debería redu-

cirse, en el caso ideal, a una mera labor de supervisión de más alto nivel.

La definición de robot que propone la *Enciclopedia Británica* destaca este hecho:

«Un robot es un instrumento mecánico utilizado en la ciencia o la industria que ocupa el lugar de un ser humano. Este dispositivo puede o no reproducir físicamente a un humano o realizar sus tareas a la manera de los humanos, no siendo siempre fácil determinar la línea que separa un dispositivo robotizado de una simple máquina automática. En general, cuanto más sofisticada e individualizada sea una máquina, mayor será la probabilidad de ser clasificada como un robot».

No obstante, a partir de esa década de 1990 la Robótica empieza a mirar hacia otro tipo de aplicaciones diferentes a las clásicas en el ámbito de la producción industrial, lo que ha tenido una enorme repercusión en el propio desarrollo de la disciplina.

El desarrollo exponencial de tecnologías como la informática o el importante avance en la creación y comercialización de nuevos sensores, que han permitido dotar a los robots de mecanismos para obtener información de sus entornos de trabajo y por lo tanto aumentar así su capacidad de adaptación y de autonomía, han desencadenado un cambio profundo en la dirección que se ha dado a la investigación en el campo de la Robótica, construyéndose robots orientados hacia aplicaciones en campos tan diversos como el espacial, en el que en 1997 el *Sojourner*², el robot

2. El nombre con el que se bautizó a este robot surgió de un concurso convocado en 1995 en todo el mundo, y corresponde al de una esclava afro-americana nacida en 1797 llamada Sojourner Truth (aunque su verdadero nombre era Isabella Van Wagener). Tras conseguir su libertad, fue una luchadora en favor de los derechos humanos y esa actividad la convirtió en una «incansable viajera».

que viajó en la sonda espacial *Mars Pathfinder*, se convirtió en el primer robot «inteligente» que el hombre ha enviado lejos de sus fronteras naturales, o los de la agricultura, la seguridad, la investigación submarina, o la medicina, probablemente una de las líneas de trabajo más prometedoras en un futuro cercano. Se ha ampliado así el horizonte de esta disciplina, lo que ha supuesto la aparición de nuevos problemas, diferentes a los clásicos de la Robótica Industrial, y el surgimiento de nuevos retos para la investigación, circunstancia que ha desencadenado en pocos años un crecimiento digno de mención del número de ingenieros y científicos dedicados a este campo, tanto en las universidades como en las empresas; siendo igualmente proporcional el incremento de la inversión, tanto pública como privada, que se está dedicando a la financiación de proyectos en las diferentes especialidades de la Robótica.

ANTECEDENTES Y DESARROLLO DE LA ROBÓTICA

La idea de construir máquinas que realizasen tareas «aparentemente» con la inteligencia de los humanos ha existido desde hace siglos. Como muestra, tres ejemplos de los muchos posibles, manifestados en épocas y escenarios muy diferentes, pero coincidentes en esta idea. Aristóteles, en el siglo IV a.C., ya intuía que algún día existirían artilugios que liberarían al hombre del trabajo cuando escribía, bien es cierto que en un contexto muy lejano al de la Robótica, lo siguiente³:

«Si cada instrumento pudiese, en virtud de una orden recibida o, si se quiere, adivinada, trabajar por sí mismo, como las estatuas de Dédalo o los trípodas de Vulcano, “que se iban solos a las reuniones de los dioses”; si las lanzaderas tejiesen por sí mismas; si el arco tocase solo la cítara, los arquitectos prescindirían de sus ayudantes y los señores de los esclavos».

Mucho tiempo después, Oscar Wilde nos proporciona otro ejemplo cuando en 1890, en un uno de sus ensayos de corte más político, escribe⁴:

3. ARISTÓTELES, «Política», Libro primero (De la sociedad civil. De la esclavitud. De la propiedad. Del poder doméstico), Capítulo II (De la esclavitud). Colección Austral. Espasa Calpe. Madrid, 1997.

4. WILDE, O. «El alma del hombre bajo el socialismo y notas periodísticas», Biblioteca Nueva, 2002. En el capítulo II del ensayo «El alma del hombre bajo el socialismo».

«Todo trabajo no intelectual, todo trabajo monótono, pesado, todo trabajo que trate cosas terribles e implique condiciones desagradables, debe hacerse mediante máquinas... Actualmente las máquinas son rivales del hombre. En condiciones apropiadas, las máquinas servirán al hombre. No hay duda en absoluto de que éste es el futuro de la maquinaria, y de la misma forma que los árboles crecen mientras el campesino duerme, mientras la humanidad se divierte o disfruta del placer cultural - que es el fin del hombre y no el trabajo - o hace cosas hermosas, o lee cosas bellas, o simplemente contempla el mundo con admiración y deleite, las máquinas harán todo el trabajo necesario y desagradable».

Finalmente, y en un marco mucho más tecnológico, el ilustre, y creo que insuficientemente reconocido, ingeniero español Leonardo Torres Quevedo publica en enero de 1914 en la *Revista de la Real Academia de Ciencias de Madrid* una memoria con el título *Ensayos sobre Automática. Su definición. Extensión teórica de sus aplicaciones*, en la que expone lo siguiente⁵:

«Estos autómatas tendrán sentidos: los termómetros, los dinamómetros, las brújulas..., aparatos sensibles a las circunstancias que pueden influir en su marcha; poseerán miembros, aparatos capaces de ejecutar las operaciones de que estarán encargados y que dispondrán de la energía necesaria. Además, y éste es el principal objeto de la automática, es preciso que los autómatas sean capaces de discernimiento, que puedan en todo momento, teniendo en cuenta las impresiones que reciben o incluso las que han recibido antes, ordenar la operación deseada».

En todo caso, y a pesar de este obstinado y remoto deseo, no será hasta ya pasada la primera mitad del siglo XX cuando vea la luz el primer robot de la historia. De cualquier manera, y antes de ese destacado momento, podemos encontrar en la crónica de

5. Citado en GARCÍA SANTESMASES, J. «Obra e inventos de Torres Quevedo». Instituto de España. Madrid, 1980. p. 119.

las civilizaciones algunos precedentes que pueden considerarse, aunque con matices, como precursores de los robots actuales.

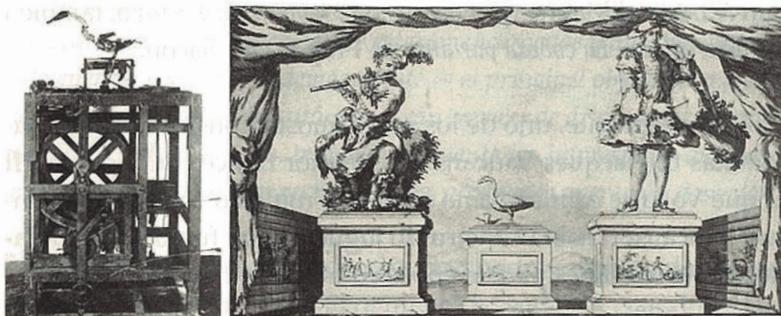
Desde la Antigüedad, el hombre ha diseñado y construido mecanismos, más o menos exitosos, con la intención de imitar la forma y los movimientos de algunos seres vivos. Los griegos denominaban a estos dispositivos «autómatos» –que se mueve por sí mismo– palabra de la que deriva la actual «autómata». La historia está plagada de ejemplos de estos artilugios, algunos notablemente famosos. Entre los primeros autómatas de que se tiene noticia se encuentran las estatuas animadas que habrían sido construidas en el templo de Dédalo, a las que hacía referencia Aristóteles. Los griegos, y más tarde los romanos, conocieron ya varios tipos de juguetes mecánicos. Son también notables los mecanismos animados de Herón de Alejandría, construidos en el siglo I, que utilizaban dispositivos hidráulicos y poleas para sus movimientos. De todas formas, resulta difícil distinguir, entre todas las descripciones que se han conservado, la parte imaginativa de la efectivamente real. Igual ocurre con los famosos autómatas que, según parece, fueron construidos en la Edad Media por San Alberto el Magno (por ejemplo *El hombre de hierro*) o, también de esta época, *La cabeza parlante* de Fray Roger Bacon.

Probablemente, uno de los más famosos constructores de autómatas fue Jacques Vaucanson, inventor francés del siglo XVIII al que Voltaire calificó como rival de Prometeo⁶. Ya en su juventud Vaucanson había construido juguetes que fueron considerados como sublimes para la época como *El flautista* (1738), que re-

6. Aunque se manejan varias versiones del mito griego, en una de ellas se sostiene que Prometeo, Titán hijo de Jápeto y de Clímene, había moldeado al hombre con arcilla y lo había animado con una chispa del fuego divino. Voltaire incluso llega a decir de Vaucanson que «parecía que había robado los fuegos celestiales en su afán por otorgar la vida».

presentaba un fauno que ejecutaba una docena de aires valiéndose de movimientos de la lengua, labios y dedos; o *La tañedora* (1739), que todavía hoy puede ser admirada en el *Conservatorio de Artes y Oficios* de París. Pero la fama de Vaucanson se debe sobre todo a su célebre *Pato* (1739), el cual era capaz de batir las alas, zambullirse, nadar y tragar grano. Del examen de los restos de algunas de las múltiples imitaciones que se hicieron de este autómeta se ha podido comprobar que se trataba de una verdadera obra maestra de la ingeniería, en la que se puso en juego toda la gama de recursos de la micromecánica, utilizando engranajes, muelles, palancas, levas y otros mecanismos. Parece incluso que una sola de sus alas se componía de cuatrocientas piezas aproximadamente.

También en España podemos encontrar algunos ejemplos de autómetas. Con seguridad, el más famoso fue el denominado *Hombre de palo*, construido para el emperador Carlos V por Juanelo Turriano, y que consistía en un mecanismo con forma de monje que andaba y movía la cabeza, los ojos, la boca y los brazos.



Autómetas de Jacques Vaucanson. Siglo XVIII

En cualquier caso, todos estos dispositivos, al menos de los que se tiene certeza de su existencia y en especial los numerosos

autómatas contruidos en el siglo XVIII, siempre tuvieron un carácter exclusivamente lúdico y de divertimento, y en ningún momento fueron planteados con algún objetivo de utilidad. Mas bien pueden ser considerados como un producto de la frívola cultura de la corte de la época. Por lo tanto, su aportación a la disciplina de la Robótica, tal y como la entendemos hoy en día, debe ser considerada como estrictamente anecdótica.

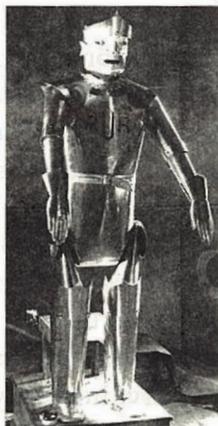
Por otro lado, cualquier revisión histórica de la Robótica debe rendir un justo tributo a la ficción científica. Después de todo, los términos «robot» y «robótica» fueron acuñados por dos escritores de este género. Además, es la ciencia-ficción la primera en mostrar, al menos en un mundo imaginario, la figura del robot como la de una máquina creada para servir al hombre y sustituirlo en las tareas no deseadas por éste.

La palabra «robot» proviene del término eslavo «robota», que significa trabajo forzado o servidumbre, y que originalmente se utilizaba para referirse a los trabajos que en la época feudal de la Edad Media, y durante dos o tres días a la semana, realizaban los trabajadores para los nobles sin recibir ninguna remuneración a cambio. Fue el escritor checo Karel Capek⁷ el que en 1921 la utilizó por primera vez⁸, cuarenta años antes de la construcción del primer robot, en su obra teatral *R.U.R. (Rossum's Universal Robots)* para describir a unos androides, fabricados por un brillante cien-

7. Al parecer, fue realmente su hermano Josef, igualmente un reputado escritor, el que le sugirió el término a Karel como idóneo para describir a las máquinas que realizarían el trabajo en lugar del hombre. Sin embargo, el «mérito» de acuñar el término siempre se le ha otorgado a este último.

8. La primera mención de la palabra «robota» en referencia a los androides aparece realmente en una obra anterior del propio Karel Capek, titulada *Opilec* (1917). Sin embargo, la «puesta de largo» del término se produce con el estreno de *RUR*, y es este momento el aceptado generalmente como el del nacimiento de la palabra «robot».

tífico llamado «Rossum» con la secreta esperanza de que actuarían obedientemente al servicio del hombre, llevando a cabo los trabajos físicos más duros. Finalmente, estos robots humanoides se rebelan contra sus dueños, destruyendo toda la vida humana a excepción de uno de sus creadores con la frustrada intención de que les enseñe a reproducirse.



Uno de los robots de Rossum

Esta visión, ciertamente pesimista, y que también podemos encontrar en producciones cinematográficas de la época, como por ejemplo la mítica *Metrópolis* dirigida en 1927 por Fritz Lang, ha sido un recurso muy común en los relatos de ciencia-ficción, que frecuentemente presentaban a los robots como seres que combinaban una fuerza sobrehumana con una inteligencia infrahumana y a los que se les atribuían habitualmente intenciones siniestras.

Fue Isaac Asimov, un bioquímico reconocido como uno de los escritores por excelencia del género de ciencia-ficción, el que en la década de 1940 cargó sobre sus hombros el cometido de hacer

ver los robots bajo un prisma más feliz. Así lo cuenta el propio Asimov⁹ cuando, años más tarde, describe cómo, sin proponérselo, acuñó el término «robótica»:

«Los robots en los mitos, las leyendas y la literatura siempre fueron diseñados para subrayar una moraleja. Generalmente eran considerados como ejemplos de un orgullo desmesurado por parte de su diseñador humano; como un esfuerzo para lograr algo que sólo estaba reservado a Dios. E inevitablemente, esta arrogancia era tenida en cuenta por Némesis¹⁰, de manera que el diseñador era destruido, habitualmente por aquél que él había creado.

Crecí cansado de estos cuentos, y decidí que debía contar historias sobre robots que hubiesen sido cuidadosamente diseñados para realizar ciertas tareas, pero contruidos con determinadas medidas de seguridad internas; los robots podrían ser potencialmente peligrosos, como cualquier otra máquina, pero no mucho más que éstas.

Mientras contaba estas historias, elaboré, por fuerza, ciertas reglas de conducta que guiarían a los robots... Estas reglas fueron plasmadas en una historia llamada "Runaround", que apareció en el número de marzo de 1942 de "Astounding Science Fiction". En ese número, en la página cien, uno de mis personajes decía, "Ahora, presten atención, comenzaremos con las tres reglas fundamentales de la Robótica..." y procedía a recitarlas. Esa línea, en esa página fue, hasta donde yo sé, la primera vez y el primer lugar en el que apareció impresa la palabra "robótica".

9. NOF, S.Y. (Editor). «Handbook of Industrial Robotics». Second Edition. John Wiley & Sons, Inc. 1999. Citado en el prefacio de Isaac Asimov.

10. De la época de Homero a la de Heródoto, Némesis no fue una diosa, sino un concepto filosófico, una abstracción. Los seres humanos estaban obligados a respetar una serie de leyes morales que los mismos dioses les habían impuesto. La oposición a estas leyes era considerada como un ultraje a los dioses, debiendo afrontar las consecuencias de la justicia divina, es decir, Némesis, la Venganza.

Yo no inventé deliberadamente la palabra. Al igual que la Física y la mayoría de sus subdivisiones incorporan rutinariamente el sufijo “-ica”, asumí que “robótica” era el término científico adecuado para el estudio sistemático de los robots, de su construcción, mantenimiento y comportamiento, y que se usaba en ese sentido. No fue hasta varias décadas más tarde cuando me di cuenta del hecho de que la palabra no estaba en ningún diccionario, general o específico, y que yo la había acuñado».

Fueron esta y otras novelas que Asimov dedicó a la Robótica las que, como él mismo ha reconocido, «captaron la atención» de Joseph Engelberger cuando aún era un estudiante de Física en la Universidad de Columbia, y que le llevaron años más tarde a liderar, junto a Devol, los inicios de la era de la Robótica.

Además de la sobresaliente capacidad creativa, obligatoriamente presente en los grandes descubrimientos e invenciones de la historia de la humanidad, las circunstancias de toda índole siempre han sido determinantes a la hora de tener éxito en los menesteres del progreso científico y tecnológico.

En este sentido, la repercusión que supuso el nacimiento y posterior desarrollo de la Robótica no puede entenderse en toda su extensión si no se analiza en el contexto, por un lado, de la evolución de los modos de producción de la industria, sobre todo de la manufactura, y muy especialmente de la automática industrial; y por otro, del desarrollo alcanzado en ese momento por algunas tecnologías en las que se soporta esta disciplina.

Los grandes avances tecnológicos generalmente han dado lugar a cambios importantes, a veces incluso revolucionarios, en el papel que el hombre ha desempeñado en la estructura del proceso productivo en la industria. En otras ocasiones, ha sido la propia evolución en la forma de organizar el trabajo la que ha demandado una dosis generosa de innovación en la tecnología.

Tras los cambios profundos que para la estructura de los sistemas productivos supuso la revolución industrial de los siglos XVIII y XIX, sobre todo en lo referente al extensivo uso de maquinaria mecánica propiciado fundamentalmente por la invención de la máquina de vapor, la Segunda Revolución Industrial, iniciada en los Estados Unidos en el último tercio del siglo XIX y que se prolonga prácticamente hasta el final de la Segunda Guerra Mundial, tiene entre sus consecuencias más inmediatas la completa transformación de la manera de administrar el trabajo. Siguiendo el precepto de la organización científica propugnado por el en ese momento influyente Taylorismo, fue calibrado milimétricamente para obtener los máximos beneficios con el mínimo dispendio de tiempo y mano de obra y, por consiguiente, lograr el menor coste de fabricación, garantizando al mismo tiempo unos niveles de calidad sobresalientes para la época. Ya no era suficiente con la idea de la división del trabajo como mecanismo para la mejora de la capacidad productiva del proceso de fabricación, una de las aportaciones centrales del liberalismo económico dieciochesco de Adam Smith y argumento central de la Primera Revolución Industrial en lo referente a la organización del trabajo, sino que también debía tenderse a la optimización de los recursos materiales y humanos empleados para la producción.

A partir de la segunda década del siglo XX y liderada por la industria del automóvil, en especial por Henry Ford que la introdujo en 1914 en la fabricación del mítico modelo *Ford T*, la adopción de la «cadena de montaje» para la producción en masa de grandes cantidades de piezas, constituyó, más allá de los avances técnicos en los propios vehículos y la industria auxiliar, la novedad tecnológica más trascendente del momento. De hecho, la máxima aplicación de la mencionada administración científica del trabajo se dio en el denominado «Fordismo», llamado así por su utilización en las plantas de la *Ford*, y que fue la manera en la que se identificó a la forma de organizar la producción que consiste

en trabajar en torno a un objeto que circula en una cadena productiva pasando por varias estaciones de trabajo en las cuales operarios especializados agregan sucesivamente partes al producto.

En estas líneas de fabricación se integran a partir de 1920 los denominados «dispositivos de transferencia», utilizados ya de forma puntual desde 1888, y que ahora se instalan masivamente, transportando automáticamente las piezas de una estación de trabajo a otra y posicionándolas además de manera precisa. Surgen así las denominadas «líneas transfer» o «de transferencia».

De este modo, la especialización en un limitado número de tareas y la consiguiente destreza, aunada a la extraordinaria economía de tiempos que se lograba al reducir los desplazamientos de los operarios, dieron como resultado, por un lado, crecimientos inimaginables en la cantidad de producto obtenida con el mismo número de recursos, y por otro, la reducción de las exigencias laborales a un máximo de destreza carente de contenido. Los trabajadores de la *Ford*, por ejemplo, tuvieron que ser alentados a quedarse en sus empleos con incrementos sustanciales en el salario por hora. Muchos preferían retirarse y buscar trabajos menos intensivos, alejándose así del frenético ritmo ocasionado por el reciente descubrimiento de la cadena de producción.

Es en este ambiente en el que surgen las primeras ideas para el diseño de máquinas que realizasen esos trabajos de forma autónoma. Se empieza así a hablar en esos momentos de una nueva ciencia, la Automática, que comienza a tomar entidad propia como disciplina. El honor del término, y me atrevería a decir que incluso el de la propia identidad de la Automática como especialidad independiente, le corresponde a Leonardo Torres Quevedo, quien

en el ensayo sobre esta materia anteriormente citado propone lo siguiente¹¹:

«Estas máquinas (refiriéndose a los autómatas) pertenecen a un capítulo nuevo de la ciencia que se podría llamar Automática... y actúan como una persona circumspecta y reflexiva: examinan las circunstancias en que se encuentran para decidir lo que deben hacer y lo hacen».

Con posterioridad, sería la industria del automóvil la que en 1947 acuñaría el término «automatización», dándole un sentido ya más industrial para referirse, entonces de manera casi exclusiva, al transporte y procesado automático de piezas de manufactura. Habría que esperar a la introducción del computador como elemento esencial de la automatización industrial moderna para que este concepto ampliara sus horizontes hasta adquirir el significado actual, en el que se integra a un importante número de tecnologías diferentes.

La mejora de la productividad que supuso esta «revolución metodológica», que se exportó además a otros procesos de producción en la industria, permitió la rebaja en el precio del producto final que se redujo hasta niveles asequibles, sobre todo para la numerosa clase trabajadora, lo que significó a su vez, a modo de ciclo cerrado, un mayor aumento de la demanda de bienes manufacturados. En ese momento, prácticamente todo lo que se producía en grandes series se vendía. Así pues, el consumo se convierte en los países occidentales y sobre todo tras la Segunda Guerra Mundial, en un motor de la economía industrial, exigiendo a las fábricas tasas de producción cada vez mayores y niveles de calidad también cada vez más altos.

11. GARCÍA TAPIA, N. (Editor). «Historia de la Técnica». Libros de Investigación y Ciencia. Prensa Científica. 1994. En el capítulo 13, «Leonardo Torres Quevedo». p. 113.

La competencia se establecía en estos momentos fundamentalmente en un ámbito local, lo que favorecía que la demanda de cambios en las características de los productos fuera casi inexistente y, por lo tanto, que la vida media comercial de los mismos se extendiese en el tiempo de manera extraordinariamente prolongada.



Cadena de montaje de automóviles Ford en 1913

Es en este contexto de ausencia de flexibilidad en la producción en el que surge el concepto, todavía vigente, de «automatización fija» o «especial», del que las líneas de transferencia son el mejor exponente. Este tipo de automatización se caracteriza por ser el adecuado para la fabricación de productos estandarizados, y por lo tanto intercambiables, con características que no se modifican a corto plazo, utilizándose para ello líneas de fabricación en las que la secuencia de operaciones está fijada por una maquinaria con un diseño «ad hoc» para cada tipo de pieza. Esta forma de automatizar requiere una inversión inicial muy elevada, sobre todo por el alto coste del diseño y de la construcción de esta maquinaria especial, lo que la hace viable sólo para la producción en masa de grandes cantidades de piezas.

La aplicación efectiva a la industria de los avances tecnológicos, es decir, la transformación del «invento» en «innovación tecnológica», es en esos momentos el resultado de un cambio en la actitud del capital en lo relativo a la investigación en tecnología. Hasta la Primera Guerra Mundial, el desarrollo científico se caracteriza por el individualismo y la lenta penetración del capitalismo industrial en la esfera de la investigación científica y tecnológica. Es en el periodo de entreguerras cuando la gran industria irrumpe como mecenas, y consecuentemente como directora, de los rumbos de la investigación. Comienza a desarrollarse una economía basada en la tecnología.

Además, la Segunda Guerra Mundial se convirtió lamentablemente en una extraordinaria demandante de tecnología y fue uno de los motores principales que impulsaron el avance y el desarrollo de la técnica, tan fructífero a partir de esos momentos. Así, los años de la contienda y los inmediatamente posteriores a su finalización fueron testigos del nacimiento o la consolidación de varias disciplinas tecnológicas que serían determinantes para el desarrollo de la ciencia y de la técnica en general, y de la Robótica en particular.

La primera de ellas fue el Control Automático, la ciencia del gobierno de los sistemas, la Cibernética, como la denominó¹² en 1947 Norbert Wiener, un brillante y destacado matemático estadounidense.

12. WIENER, N., «Cybernetics, or control and communication in the animal and the machine». John Wiley, 1948. En realidad, cuando Norbert Wiener trabajaba en 1947 en los fundamentos de esta nueva disciplina no sabía que, previamente, en 1834, André Marie Ampere había propuesto «Cybernetique» como un término para la ciencia del gobierno, y utilizó la palabra griega «κυβερνητική» que significa «timonel», a la cual había llegado a través de la etimología de la palabra «governor», término propuesto por James Clerk Maxwell en 1868 en su mítico trabajo «On Governors».

El concepto de realimentación, central para esta materia, es un principio natural que se encuentra en la esencia de las cosas. Wiener lo formalizó, definiéndolo como «un método de controlar un sistema reinsertando en él los resultados de su comportamiento anterior». Desde hacía siglos, el hombre lo había utilizado, de forma mas bien intuitiva que científica, para resolver los problemas de regulación de algunos sistemas (son famosos los «clepsidra» o relojes de agua de la antigua Grecia). En todo caso, sería el regulador centrífugo diseñado en 1788 por James Watt para controlar la velocidad de giro del eje de su máquina de vapor el que sin duda marcó un hito en el desarrollo de la Regulación Automática. Pero a pesar del éxito de esta y otras aplicaciones y de algunos trabajos teóricos memorables que ilustres científicos como James Clerk Maxwell publicaron en relación con el tema, todavía en el primer tercio del siglo XX la disciplina, sobre la que había ya entonces una considerable experiencia práctica aplicada a problemas de telefonía o de control del nivel, se encontraba en ese momento dispersa entre muchas ramas de la ingeniería, sin una teoría unificada y sin un lenguaje común.

La segunda contienda mundial obligó a concentrar los trabajos de investigación en el área del control en unos pocos problemas específicos. Probablemente, el más importante fue el que generó la necesidad urgente de diseño de servomecanismos de altas prestaciones para solucionar el problema del control de tiro de los cañones antiaéreos, que en esos momentos se resolvía en cierto modo casi de forma manual, necesitando la compleja intervención de hasta catorce personas de manera sincronizada. En 1941 quedó claro que esta metodología no era eficiente para combatir contra aviones cada vez más rápidos, surgiendo entonces la necesidad de diseñar un sistema que enlazase directamente la información generada por el radar, que estimaba la posición de las aeronaves, con el dispositivo orientador del cañón. Aparece

así la idea del servomecanismo de posición, que permite controlar de forma precisa esta magnitud en un eje rotatorio a partir de la información generada por un sensor adecuado.

Los detalles de los trabajos llevados a cabo por diversos comités creados al efecto por el gobierno de los Estados Unidos fueron publicados tras la finalización del conflicto en el libro *Theory of Servomechanisms*¹³, siendo el principal resultado de este gran esfuerzo la generación de una teoría unificada y coherente para los denominados sistemas realimentados con un único lazo y, como caso particular, para los servomecanismos.

Otra disciplina que cristaliza en este momento es la de los computadores digitales, la Informática, que surge entonces como resultado de una evolución hecha durante años de tanteos, reflexiones, bloqueos, avances y retrocesos. Científicos como Charles Babbage, Herman Hollerith, Alan Turing, Konrad Zuse o Claude Shannon, o prototipos como *MARK I* (el primer calculador universal) o *ENIAC* (el primer ordenador electrónico) no pasan desapercibidos en la historia de esta rama de la ingeniería. Sin embargo, es en 1945 cuando se produce un salto cualitativo al publicarse los primeros trabajos de John Von Neumann, un científico de origen húngaro, sobre un computador de propósito general, el *EDVAC* (*Electronic Discrete Variable Automatic Computer*), que registraba en su memoria no sólo los datos que debían ser procesados, sino también las instrucciones para su propio funcionamiento. La flexibilidad introducida por el programa memorizado significaba que la máquina podía fácilmente adaptarse a la resolución de problemas diferentes, simplemente modificando la secuencia de instrucciones del programa.

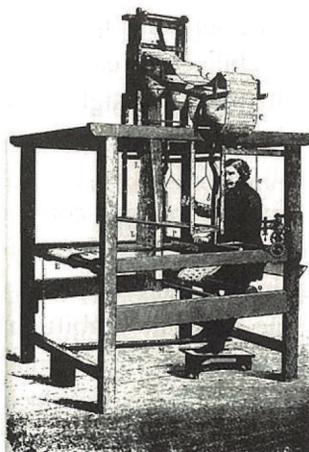
13. JAMES, H.J., NICHOLS, N.B. y PHILIPS, R.S. «Theory of Servomechanisms». McGraw-Hill. Nueva York, 1947.

Con la aparición del computador se realiza la transición desde la extensión del músculo a la expansión del cerebro. Es decir, se pasa de máquinas que tienen como objetivo exclusivo la ampliación de la potencia muscular del hombre, supliéndolo en su trabajo físico, a máquinas o instrumentos que son también capaces de procesar información, complementando al hombre, o incluso sustituyéndolo, en algunas actividades intelectuales.

La posibilidad proporcionada por la teoría de los servomecanismos de controlar de forma precisa el movimiento del eje de una máquina, ingeniosamente combinada con la flexibilidad que aportaba la programabilidad de los dispositivos digitales, dio lugar, al final de la década de 1940, al nacimiento del Control Numérico, tecnología que ya tenía en 1801 un antecedente puntual, aunque ciertamente muy exitoso¹⁴, con la aparición del telar programable de Joseph Marie Jacquard.

Sería la industria aeronáutica la que lideraría inicialmente el desarrollo de esta tecnología, en la que vio la posibilidad de superar los problemas que tenía para el mecanizado de las superficies tridimensionales de las hélices de los helicópteros, de extraordinaria complejidad para ser realizadas por el más hábil de los operarios humanos. El primer prototipo de máquina controlada numéricamente fue presentado en 1952 en el *Instituto Tecnológico de Massachussets*, y estaba basado en los trabajos previos de John Parson y Frank Stulen.

14. El telar programable de Jacquard se basaba en la introducción de los datos para la confección del tejido a través de un mecanismo de rodillos de papel perforados, y en menos de una década se instalaron más de diez mil, sólo en Francia.



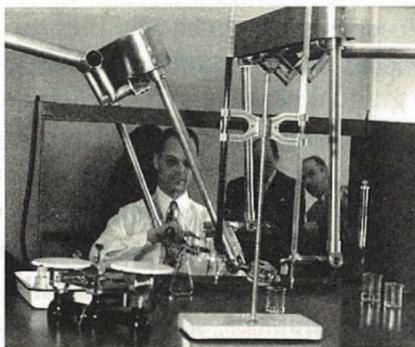
Telar automático de Joseph Marie Jacquard. 1801.

Con posterioridad, serían los fabricantes de máquinas herramientas los que gradualmente fueron percatándose de los enormes beneficios que suponía incorporar el control numérico en sus diseños de máquinas para torneado o fresado, de manera que sus diferentes ejes móviles se gobernasen de forma automática por un dispositivo programable. Además de la versatilidad que se le proporcionaba a la máquina, que tenía ahora la posibilidad de adaptarse a diferentes trabajos, se podían abordar procesos de mecanizado de un nivel de dificultad muy superior al que podía aspirar un operario humano, ya que ahora se sincronizaban los movimientos de hasta cinco ejes de forma simultánea, lo que suponía que la herramienta correspondiente describía en el espacio trayectorias extraordinariamente complejas.

Originariamente basado en dispositivos cableados y relés, la combinación, a partir del final de la década de 1960, de la filosofía del Control Numérico con la de los computadores digitales daría lugar al nacimiento del «Control Numérico por Computador», tecnología que supuso una revolución en la industria de la manu-

factura, hasta el punto de ser considerada por algunos autores, como por ejemplo Mehrabi¹⁵, como eje para la división de la historia de este sector industrial en el siglo XX en un periodo anterior y otro posterior a la aparición de esta disciplina.

Con el Control Numérico irrumpe con fuerza el concepto de «automatización programable», basada, a diferencia de la fija, en la utilización de máquinas que mediante un programa permiten variar la operación que realizan. Habitualmente, este tipo de automatización es adecuado para una forma de producción denominada «por lotes» o «en tandas», es decir, de un número intermedio de unidades, pero permitiendo la variabilidad de las características del producto de un lote a otro.



Prototipo de telemanipulador de Ray Goertz. 1948

En 1948, de forma casi simultánea a los trabajos originales de Parson sobre Control Numérico, Ray Goertz, un ingeniero del *Argonne National Laboratory* de Illinois, desarrolló un dispositivo articulado al que denominó «telemanipulador», con el objeto de manejar elementos radiactivos sin riesgo para el operador. Éste

15. MEHRABI, M.G., ULSOY, A.G. y KOREN, Y., 2000, «Reconfigurable Manufacturing Systems: Key to Future Manufacturing» *Journal of Intelligent Manufacturing*, Vol. 11, No. 4, pp. 403-419.

consistía en un mecanismo maestro-esclavo, de manera que el manipulador maestro, situado en una zona segura, era movido por el operador, mientras que el esclavo, en contacto con los reactivos peligrosos y unido mecánicamente al manipulador maestro, reproducía remotamente los movimientos de éste último. El operador podía visualizar la zona de trabajo a través de un cristal de seguridad y a la vez sentir, transmitida por los enlaces mecánicos, la fuerza que estaba ejerciendo el manipulador esclavo sobre el entorno de trabajo.

Algunos años más tarde, en 1954, el propio Goertz aprovechó la tecnología electrónica y los trabajos sobre servomecanismos para sustituir la transmisión mecánica entre los manipuladores maestro y esclavo por otra eléctrica, desarrollando así el primer manipulador teleoperado con servocontrol bilateral.

Es en este contexto en el que George Devol, que ya había patentado en 1946 un dispositivo de propósito general para el control de máquinas que reproducían secuencias previamente aprendidas, comienza a pensar, en los primeros años 1950, en la idea de un robot manipulador que de algún modo integre en una sola máquina las ventajas del Control Numérico y de los telemanipuladores mecánicos. Es así como en 1954 Devol solicita la primera patente de un dispositivo robotizado, al que denomina *Máquina de Transferencia de Artículos Programada*, por lo que retóricamente ha sido considerado, junto a Engelberger, como uno de los *padres de la Robótica*. La máquina ideada por Devol, y cuya patente para los Estados Unidos finalmente obtuvo en 1961, era en esencia un brazo articulado con la capacidad de realizar movimientos controlados automáticamente desde un punto a otro, reproduciendo una secuencia previamente programada.

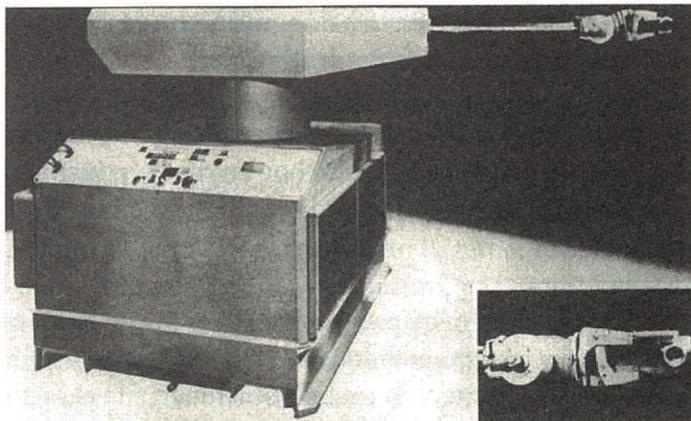
En 1956, Devol y Engelberger se conocieron casualmente y su interés común por los robots les llevó a trabajar juntos y a fundar

la compañía *Consolidated Controls Corporation*, que más tarde se convertiría en la mítica *Unimation Inc.*, acrónimo de la frase, también acuñada por Devol, «universal automation», que incidía en la capacidad de adaptación de los robots a todo tipo de tareas. En ese mismo año ya llevaron a cabo el primer estudio de mercado relacionado con la Robótica, realizando el trabajo de campo en quince fábricas de automóviles y en otras veinte factorías relacionadas con la industria de la manufactura. Con las conclusiones que obtuvieron de este trabajo establecieron las especificaciones que deberían tener los robots para realizar las operaciones más simples, pero a la vez más duras en la industria, lo que les llevó a disponer en 1959 de un primer prototipo, que era controlado por dispositivos finales de carrera. Muy poco después, en 1960, ve la luz el primer robot industrial de la historia (que desde luego se parecía muy poco a las previsiones de Capec o Lang), el *Unimate*, un brazo articulado con accionamiento hidráulico basado en la *Máquina de Transferencia* de Devol, y que utilizaba los principios del Control Numérico para el gobierno del manipulador, y un tambor magnético como memoria para almacenar la secuencia de movimientos.

La financiación para esta aventura fue aportada en un primer momento por la compañía *Consolidated Diesel Corporation* (CONDEC), a la que Devol vendió en 1960 las cerca de cuarenta patentes que entonces ya tenía sobre dispositivos relacionados con los robots, y que incorporó como filial en ese mismo año a *Unimation Inc.*

Finalmente, en la primavera de 1961 se realizó con éxito la primera instalación de la historia de un robot en una línea de producción industrial. Fue, como no podía ser de otra manera, un robot *Unimate* y la instalación se llevó a cabo en la planta de ensamblaje de automóviles de la *General Motors* en Trenton, Nueva

Jersey, utilizándose el manipulador para atender a una máquina de fundición en troquel¹⁶.



Primer robot Unimate instalado en 1961

A pesar de este éxito inicial y del potencial que, al menos con la perspectiva actual, se les presume a los robots industriales como catalizadores de un aumento de la productividad, la realidad les vino a demostrar a Devol y Engelberger que su «bola de cristal» estaba algo empañada, ya que *Unimation Inc.* no obtuvo beneficios hasta 1975, quince años después de su creación. Más tarde, el propio Engelberger asociaría este contratiempo con el conservadurismo pertinaz de la actividad manufacturera, y con el mayor coste que entonces suponía el uso de robots frente al de la mano de obra humana. En boca de este sector industrial Engelberger ponía las siguientes palabras¹⁷:

16. Después de 100.000 horas de trabajo este robot fue desmantelado y se exhibe actualmente en el *National Museum of American History* de la *Smithsonian Institution*, en Washington.

17. NOF, S.Y. op. cit. Citado en el capítulo 1. Engelberger, J. «Historical Perspective and Role in Automation». p. 7.

«¡Nadie necesita realmente un robot!. Cualquiera cosa que pueda hacer un robot puede ser realizada por un hombre. La única justificación para instalar un robot es que su trabajo tenga un coste menor que el del hombre. Y aun así, esta justificación no es válida si al menos uno de los competidores no hace uso extensivo de los robots».

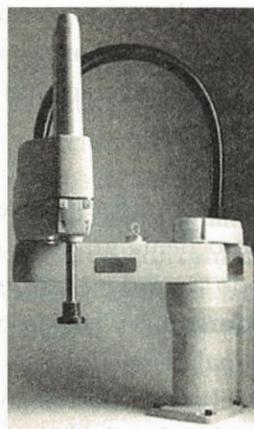
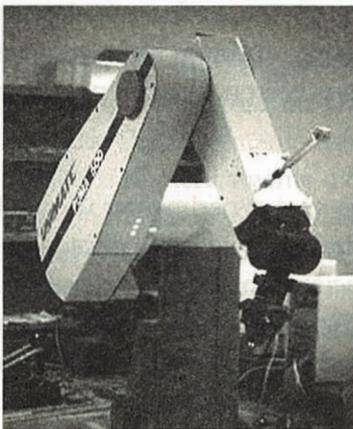
Afortunadamente, hace ya bastantes años que esta postura cambió de manera rotunda, siendo hoy en día la industria de la manufactura uno de los pilares indiscutibles del sector de la robótica.

Durante una primera etapa, en la que se incluyen las décadas de 1960 y 1970, y los primeros años de la de 1980, la aplicabilidad de los robots se mantuvo casi exclusivamente ligada al sector de la producción industrial. Sólo puntualmente, la inclusión de robots en algunos programas espaciales liderados por la N.A.S.A. y el *Jet Propulsion Laboratory* suponen una excepción en este sentido. Por lo tanto, los esfuerzos en investigación y desarrollo se enfocaron de manera prioritaria hacia la construcción de sistemas robotizados que posibilitasen la ampliación de las aplicaciones industriales más allá de la originaria manipulación para la carga y descarga de otra maquinaria. En 1966, la firma noruega *Trallfa*, construyó e instaló un prototipo de robot para la aplicación de pintura pulverizada; y en 1974, la japonesa *Kawasaki* instala, bajo licencia de *Unimation*, un robot para realizar automáticamente la soldadura por arco de la estructura de sus motocicletas. Sería la italiana *Olivetti* una de las pioneras en la utilización de los manipuladores en tareas de montaje, al desarrollar en 1975 el robot *SIGMA*, especialmente ideado para este tipo de operaciones.

A mediados de los setenta se produce también un cambio significativo en cuanto al tipo de actuadores que se utilizan para mover los brazos articulados, cambio que estuvo motivado

fundamentalmente por los avances en el campo del control de las máquinas eléctricas rotativas. El robot *Irb6*, introducido en el mercado en 1974 por la compañía sueca *ASEA* (la actual *ABB*), se convierte en el primer manipulador comercial con accionamiento totalmente eléctrico, tendencia que hará que a partir de los ochenta los grandes robots con accionamiento hidráulico se especialicen exclusivamente en aquellas operaciones que involucren el manejo de cargas muy pesadas.

Igualmente al final de los setenta, llegan al mercado dos robots que determinarían para un futuro, que se prolonga hasta nuestros días, los dos tipos de estructura mecánica más extensamente utilizados en los manipuladores industriales. En 1978, *Unimation Inc.* presenta su robot *PUMA* (*Programmable Universal Machine for Assembly*), especialmente pensado como un manipulador multiarticulado y polivalente, cuya morfología recordaba en cierto modo a la de un brazo humano, aunque lógicamente con una capacidad de movimiento mucho más limitada que la de éste. Así, por analogía, se llega a identificar sus elementos estructurales como «hombro», «codo» y «muñeca».



Robots PUMA (izqda.) y SCARA

Sólo un año después, se desarrolla en la Universidad japonesa de *Yamanashi* un tipo de robot al que se bautizó genéricamente como *SCARA* (*Selective Compliance Arm for Assembly*), un manipulador muy sencillo, pero especialmente dotado para realizar operaciones de ensamblaje de precisión, y que despega comercialmente en el año 1981.

Desde un punto de vista operacional los robots en este primer periodo –algunos hablan de «generación»– se caracterizan por lo que se denomina como «funcionamiento repetitivo», es decir, su grado de «inteligencia» se limita al simple aprendizaje de una secuencia más o menos compleja de movimientos, que posteriormente reproducen con una precisión determinada. Aún hoy en día, la mayoría de los robots que se instalan en las industrias pertenecen a una versión mejorada de este tipo de manipuladores.

La escasa adaptabilidad de la que gozaban estas máquinas se conseguía exclusivamente mediante dispositivos mecánicos, de los que el más representativo fue el *Centro Remoto de Acomodación* (*RCC*), desarrollado en 1976 por el *Charles Stark Draper Laboratory*, y que mediante un mecanismo pasivo, es decir, sin la participación de ningún sensor o actuador, absorbía las tolerancias existentes en las operaciones de precisión necesarias para el ensamblaje de piezas.

Sin embargo, este escenario va a experimentar un cambio de ciento ochenta grados a partir del inicio de la década de 1980, cuando se produce una revolución dentro del mundo de los computadores que ya incorporan el microprocesador como elemento principal de cálculo. Esta circunstancia desemboca en una reducción del coste y del tamaño de los equipos, y en un aumento de su capacidad de cálculo inimaginables tan sólo unos años atrás.

Y aunque el hecho puntual del desarrollo del primer robot comercial que incorpora un sistema de control basado en un minicomputador se remonta al año 1974, momento en el que la compañía estadounidense *Cincinnati Milacron* pone en el mercado el mítico robot *T3*, es sin lugar a dudas este salto cualitativo en el sector informático el que supuso para la Robótica, y también para el resto de las ramas de la ingeniería, un cambio trascendental en cuanto a sus expectativas de desarrollo.

La primera consecuencia de esta nueva situación es la mejora significativa de los sistemas de control de los robots, que de forma ya inexcusable incorporan microcomputadores como elementos centrales de los sistemas de gobierno de la máquina, haciendo así posible una mejora de las prestaciones de los manipuladores y facilitando a los operarios su uso. Estas circunstancias, junto con la determinante reducción del coste del propio sistema de control, y por lo tanto del precio final del robot en su conjunto, han permitido desde entonces posicionar a estos últimos en la casi totalidad de las áreas productivas y de los sectores industriales, siendo además uno de los elementos fundamentales en los modernos «sistemas de fabricación flexible».

Esta forma de automatización se basa en una estructura jerarquizada que integra a un grupo de estaciones de trabajo automatizadas (habitualmente basadas en centros de mecanizado controlados numéricamente o dispositivos de inspección automática), conectadas mediante sistemas de transporte igualmente automáticos y gobernadas por un elemento de control central que se comunica con todos los dispositivos de esta «célula de fabricación» mediante una red informática industrial. El papel de los robots en estos sistemas suele ser, bien el de la atención a otra maquinaria, llevando las piezas desde una estación de trabajo hasta la siguiente, bien el de realizar ellos mismos el procesado correspondiente mediante el uso de las herramientas adecuadas.

Estos sistemas de fabricación adquieren su sentido, y por lo tanto su viabilidad, en las producciones de tamaño reducido, pero con una gran variabilidad en sus características.

Pero sin duda, el hecho más determinante que trajo consigo la incorporación de los microcomputadores a la Robótica fue la posibilidad de dotar a los robots de sofisticados sistemas de percepción, elementos que demandan una capacidad de procesamiento muy elevada para poder atender en «tiempo real», es decir, a la misma velocidad con la que se generan, el voluminoso flujo de datos que suministran los diferentes sensores del sistema.

La capacidad de un robot para realizar tareas complejas, adaptarse a posibles variaciones de su entorno y afrontar situaciones imprevistas, viene condicionada en gran medida por el sistema de percepción de que esté dotado. Es este sistema el que proporciona al robot la posibilidad de obtener e interpretar la información de su entorno con el objeto de acomodar su actuación a las condiciones cambiantes del mismo. La información ambiental captada por dicho sistema permite el establecimiento de una realimentación, es decir, de una evaluación por parte del robot del efecto de sus propias acciones sobre su entorno, con la consiguiente modificación de estas últimas. Un robot que no disponga de un sistema de este tipo puede operar únicamente en contextos restringidos especialmente preparados para él, en los que por medios manuales o maquinaria específica se ha realizado un proceso previo de ordenación.

Se habla así de otra generación de robots, los robots «autónomos» o «inteligentes», los más evolucionados desde el punto de vista del procesamiento de información. Son máquinas capaces de percibir, modelar el entorno, planificar y actuar para alcanzar objetivos sin la intervención de supervisores humanos, utilizando para ello complejos algoritmos propios del campo de la Inteligencia Artificial.

Lo anterior se pone especialmente de manifiesto en el caso de los robots móviles, dispositivos por los que, de manera incluso explosiva, se recupera el interés ya manifestado en los primeros años 1960, pero relegado hasta ese momento, el final de la década de 1980, a un segundo plano por la falta de soluciones tecnológicamente adecuadas para construir robots útiles para los intrincados ambientes de trabajo reales. Las enormes posibilidades que computadores potentes a bordo de los robots proporcionan a los investigadores, han permitido que esta rama de la Robótica se haya desarrollado en estos últimos años de forma especialmente intensa.

La facultad de la movilidad y la rápida evolución de la tecnología aplicada a los dispositivos sensoriales, y en especial de la de los cada vez más completos sistemas de visión por computador, propició que se abriera para la Robótica un nuevo abanico de potenciales aplicaciones, muchas de ellas comercialmente rentables. Este hecho ha provocado que el inventario de robots, en su momento exclusivamente poblado por los modelos industriales que podríamos considerar como «clásicos», haya aumentado en poco más de diez años de manera apreciable, incluyendo hoy en día un sin fin de dispositivos utilizados en operaciones industriales no convencionales y también en actividades diferentes a las propias del entorno productivo.



Diferentes configuraciones de robots móviles

ROBÓTICA INDUSTRIAL

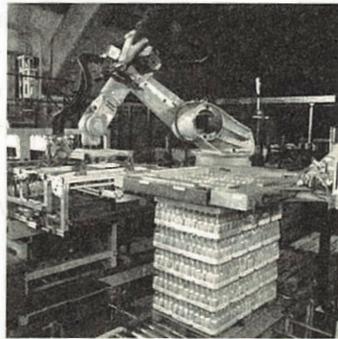
Se han propuesto diferentes definiciones más o menos «oficiosas» que describen funcionalmente a un robot industrial. Todas ellas restringen notablemente la definición más general expuesta al principio de esta lección, con la intención sobre todo de distinguir los robots industriales de otras máquinas automáticas. Y, aunque con ligeros matices, todas ellas coinciden en los aspectos básicos. Probablemente, la más significativa sea la utilizada por la *International Federation of Robotics (IFR)*, organismo de ámbito internacional y reconocido mundialmente como referencia en el sector de la robótica, que establece¹⁸ que un robot es una:

«Máquina manipuladora controlada automáticamente, reprogramable y de propósito general, con tres o más ejes programables».

Ya habíamos dejado claro que los robots, todos en general, pertenecen a la categoría de las máquinas automáticas programables. Por lo tanto, lo que diferencia al robot industrial del resto de estas máquinas es, en primer lugar, la posibilidad de la manipulación, que debe ser entendida en un sentido amplio, esto es, como la capacidad de manejar tanto las propias piezas como las herramientas para procesarlas. Y en segundo lugar, el ser una máquina multipropósito. Los robots industriales no están diseñados para una tarea particular, sino que se comportan como máquinas universales que pueden adaptarse a diferentes tipos

18. AER/ATP. Estudio de estadísticas de Robótica 2001. Publicado por la *Asociación Española de Robótica* y la *International Federation of Robotics*. p. 1.

de trabajos modificando los programas que los gobiernan. De esta manera, el concepto de «programabilidad» adquiere en los robots un sentido aún más amplio que en el resto de las máquinas de su categoría, ya que hace referencia no sólo a la posibilidad de modificar los parámetros de una operación determinada, definiendo la secuencia de los movimientos que debe llevar a cabo el manipulador, sino incluso a la conmutación de la propia tarea. En este sentido, las máquinas herramientas controladas numéricamente no presentan esta característica, estando concebidas, tanto mecánicamente como en lo referente al control, como máquinas monofuncionales con el único propósito de realizar un determinado tipo de trabajo de mecanización.

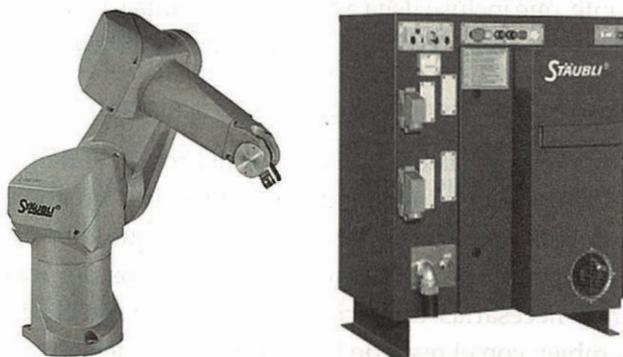


Robot industrial en una operación de paletizado

Desde un punto de vista técnico, el robot industrial es indudablemente una máquina integradora de tecnologías. Y esto se pone de manifiesto con claridad al analizar la estructura básica de lo que se puede denominar como «sistema robot». El elemento morfológicamente característico de los robots industriales es el brazo articulado, formado generalmente por una cadena «cinemática abierta», y que determina visualmente la imagen del robot. Existen diferentes tipos de configuraciones mecánicas, caracterizada cada una de ellas por una combinación distinta en nú-

mero y forma de articulaciones, es decir, de enlaces mecánicos que permiten el movimiento relativo entre los diferentes elementos rígidos del robot. La configuración mecánica determinará las posibilidades de movimiento del manipulador, y por lo tanto aquellas tareas a las que mejor se adaptará, el espacio de trabajo que éste abarcará, así como el grado de maniobrabilidad alcanzable, siendo habitual en la mayoría de los robots actuales disponer al menos de seis grados de libertad.

Esta estructura mecánica está accionada por un número suficiente de actuadores que, como ya se ha comentado, pueden ser eléctricos o, para robots con grandes capacidades de carga, hidráulicos. No es razonable utilizar la neumática como medio de accionamiento para las articulaciones por la poca precisión que proporciona la compresibilidad del aire; aunque sí es fundamental para dotar de movilidad a un gran número de dispositivos auxiliares del robot.



Brazo manipulador y su controlador

Aunque hasta hoy los parámetros en el diseño de la estructura mecánica de los robots industriales se han seleccionado para dotarla del mayor grado de rigidez posible, la necesidad de reducir el peso específico de las máquinas y el desarrollo alcanzado en el

uso de algoritmos de control avanzado aplicados a la Robótica, está permitiendo, al menos en el marco de la actividad investigadora, desarrollar prototipos de robots flexibles, con una morfología extraordinariamente esbelta que les permite alcanzar velocidades de movimiento muy superiores a las de los manipuladores convencionales.

La misión de la estructura mecánica es la de posicionar y orientar en el espacio de trabajo el denominado «elemento terminal» del robot, situado en el extremo del brazo articulado y constituido bien por una herramienta, por ejemplo una pistola de pintura o una antorcha de soldadura, bien por un dispositivo de agarre más o menos sofisticado, por ejemplo una pinza neumática o un soporte con ventosas de vacío. Este elemento terminal es el medio por el que el robot se adapta mecánicamente a la tarea específica a la que se destine. Es frecuente la necesidad de un diseño a medida de la propia aplicación, lo que suele soportar una parte importante, que incluso llega a alcanzar el treinta y cinco por ciento en algunas ocasiones, del coste total de la instalación de un sistema robotizado.

Por su parte, el sistema de control del robot, el denominado «controlador», está en realidad constituido por un conjunto de procesadores, organizados jerárquicamente, que de forma conjunta se encargan de gobernar los movimientos del robot y de realizar las necesarias operaciones de interfase con el programador y también con el resto de los dispositivos que habitualmente coexisten en un proceso productivo automatizado y con los que está obligado a sincronizarse.

El nivel más alto de esta pirámide jerárquica lo ocupan los procesos computacionales con un mayor grado de abstracción, encargados de la comunicación con el usuario y de la interpreta-

ción de las órdenes que, en un lenguaje de alto nivel cercano al humano, éste utiliza para especificar la secuencia de movimientos y actuaciones que debe llevar a cabo el robot para completar un trabajo. Hay que reconocer que durante los últimos años los fabricantes de robots han realizado un notable esfuerzo por mejorar el nivel de sinergia entre el programador y el robot, desarrollando entornos de programación que están mucho más en consonancia con el «estado del arte» de la ingeniería del software en lo referente a las interfases de usuario, y proporcionando además útiles herramientas de simulación que permiten, a diferencia de lo ocurría en un pasado cercano, realizar las tareas de programación «fuera de línea», es decir, sin utilizar el robot real, eliminando así la improductiva necesidad de sacarlo del ciclo de trabajo para modificar o cambiar la tarea que lleva a cabo el manipulador.

Además, también se encuentran en este máximo nivel jerárquico, y siempre en el caso de que el robot disponga de un sistema de percepción externo, los programas y dispositivos que realizan el procesado de la información sensorial generada acerca de su entorno de trabajo, procesado que proporciona los datos necesarios para planificar o adaptar los movimientos y actuaciones de la máquina a las posibles situaciones no previstas en la programación inicial.

En relación con esto último, predecía Engelberger¹⁹ en 1980 que:

«Cuando los robots puedan presumir de poseer el sentido de la vista y el tacto, la lista de sus aplicaciones aumentará sin duda considerablemente».

19. ENGELBERGER, J. Los robots industriales en la práctica. Ediciones Deusto. 1985. Traducción de la obra original publicada en 1980.

Realmente, la tendencia de la Robótica Industrial se orienta ya hacia ese objetivo, hacia la consecución para los robots de niveles de autonomía y adaptabilidad cada vez mayores. En este sentido, los sensores que con mayor frecuencia se utilizan, y a los que se tiende cada vez más a integrar en la propia estructura del controlador son, en un lugar destacado, los sistemas de visión por computador. Basados en cámaras de vídeo con sensores del tipo *CCD* (*Charged Coupled Device*) conectadas a dispositivos electrónicos específicos, proporcionan, haciendo uso de los algoritmos adecuados, información abundante y precisa sobre aspectos como la forma, la dimensión, la posición o la orientación de la pieza que debe ser manipulada en cada momento por el robot, permitiendo que todos estos parámetros no tengan que estar definidos de forma prefijada y aumentando de esta manera el grado de flexibilidad e incertidumbre admitidos para el propio proceso robotizado.

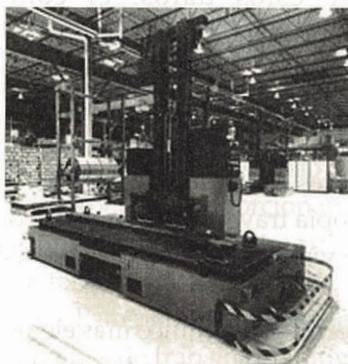
También es cada vez más frecuente el uso de los denominados «sensores de fuerza y par», que proporcionan información sobre las fuerzas ejercidas por el robot en las tres direcciones de un sistema de referencia determinado, así como sobre los pares aplicados respecto a tres ejes. Esto permite abordar aplicaciones que se llevan a cabo en ambientes de trabajo con movimientos del robot restringidos, esto es, tareas en las que debe interactuar con el entorno y en las que el control de las fuerzas o los pares ejercidos sobre éste último es clave para el éxito de la aplicación. Un buen ejemplo de esto lo constituye el uso de robots para el pulido de superficies, sobre las que hay que ejercer una fuerza constante con una herramienta adecuada, manejada en este caso por el robot. Un manipulador que no disponga de un sensor de este tipo sólo podrá garantizar, y esto solamente con una determinada precisión, el posicionamiento correcto y, en todo caso, la velocidad adecuada del útil, pero nunca la aplicación de la presión requerida sobre la superficie. El precio que hay que pagar por el uso de

esta clase de sensores es el aumento considerable de la complejidad de la tarea del control, que requiere en este caso el manejo de algoritmos avanzados y de modelos dinámicos del robot, no siempre conocidos con la precisión suficiente.

El segundo nivel jerárquico lo ocupan los algoritmos encargados de resolver el problema de la generación automática de trayectorias. Para simplificar la tarea de la programación de un robot industrial, el operario sólo tiene que especificar algunos puntos del espacio de trabajo, además de los de partida y destino, por los que inexorablemente debe pasar el extremo del robot para evitar colisiones o sincronizar el movimiento con otros dispositivos. A partir de estos datos, el controlador calcula automáticamente el resto de los puntos de la trayectoria que debe ser seguida por el brazo articulado, utilizando para ello las ecuaciones del denominado «modelo geométrico» del manipulador. Estas trayectorias se seleccionan atendiendo a las restricciones físicas particulares de los accionamientos y a ciertos criterios de calidad de la propia trayectoria, como pueden ser la suavidad desde un punto de vista geométrico o la precisión de la misma.

Finalmente, en el nivel jerárquico más elemental, encontramos a los dispositivos que gobiernan cada uno de los actuadores del brazo manipulador. Estos dispositivos son los servomecanismos de posición, que utilizan los principios de la teoría de la regulación automática para asegurar que el movimiento de cada uno de los accionamientos, y por lo tanto de las articulaciones que éstos mueven, siga las referencias establecidas por el generador de trayectorias del nivel jerárquico inmediatamente superior. Para esta misión, y de acuerdo con el principio de la realimentación ya mencionado, es necesario utilizar la información que generan los sensores internos del robot, rígidamente ligados a los ejes de los actuadores y que determinan en cada momento la posición ocupada por cada una de sus articulaciones.

En cualquier caso, y aunque la mayoría de los robots industriales instalados son fijos, cada vez es mayor el interés por los denominados «Vehículos Guiados Autónomamente», conocidos como «AGVs», robots igualmente diseñados para trabajar en ambientes industriales, pero con la capacidad de movimiento de un lugar a otro gracias a un sistema de locomoción, habitualmente basado en ruedas accionadas por motores eléctricos, y a un sistema de control que ahora se denomina de «navegación». En relación con esto, la definición de robot propuesta por la ISO²⁰ (*International Organization for Standardization*) completa la de la IFR, añadiendo a la dada por esta última la posibilidad de que el robot sea fijo o móvil.



AGV en una planta industrial

Siendo rigurosos, el primer AGV del que se tiene noticia fue instalado en 1954 por la compañía norteamericana *Cravens* en la factoría de Columbia de la *Mercury Motor Express*. Aun así, no es hasta la década de 1990 cuando esta rama de la Robótica Industrial comienza a despegar comercialmente. Un dato que lo confirma es el de las más de cien empresas que en todo el mundo están dedicadas hoy en día a la fabricación de este tipo de robots, frente a las seis que existían al final de los años 1970.

20. Standard ISO/TR/8373-2.3

Un AGV es un vehículo que es gobernado por un sistema de control automático que hace el papel de conductor. El uso de sensores de diferentes tipos (láser, ultrasonidos y otros), distribuidos en el entorno de trabajo y también a bordo del robot, proporciona información acerca de la posición y la velocidad del vehículo, datos que son utilizados por el sistema de control para generar las órdenes adecuadas a los actuadores de manera que el robot siga fielmente un camino o una trayectoria previamente establecida, evitando además las colisiones con los obstáculos imprevistos que puedan aparecer en el entorno del movimiento del robot.

Además, y dado que lo habitual es que varios vehículos estén compartiendo la misma área de trabajo, se recurre frecuentemente a un sistema central de supervisión que se comunica con cada uno de los robots para sincronizar sus movimientos.

Normalmente, la actividad llevada a cabo por este tipo de robots es la del transporte de piezas entre diferentes estaciones de trabajo y entre éstas y las zonas de almacenaje, para lo que cuentan a bordo con dispositivos de manipulación automática. Podrían así ser considerados en cierto modo como una versión avanzada, y desde luego mucho más flexible, de las clásicas cintas de transporte. Las dimensiones de estos vehículos oscilan entre los pequeños carros de unos pocos kilogramos de peso, y los grandes transportes de hasta ciento veinticinco toneladas, utilizados por ejemplo en algunos puertos marítimos como el de Róterdam para la manipulación de los voluminosos contenedores de carga.

Por otro lado, he sido conscientemente reiterativo con la idea de que la Robótica Industrial puede considerarse como una subclase de la Automática Industrial. Por lo tanto, los objetivos que se persiguen con su aplicación son en gran medida los mismos que los de esta última disciplina.



AGVs en el puerto de Róterdam

Una encuesta²¹ realizada hace ya algunos años entre los responsables de ingeniería de algunas empresas estadounidenses en la que se les preguntaba por los motivos que apoyaban la utilización de robots en la industria revelaba que, aunque con variaciones en función del sector industrial, en general la razón principal que justificaba su uso era la reducción de los costes directos de la mano de obra, motivo que cada vez ha ido adquiriendo una mayor importancia por la tendencia al crecimiento constante de este indicador económico, a lo que se añade la tendencia contraria en un porcentaje similar del coste de los robots industriales.

Junto a este factor, otros como el incremento de la productividad, el aumento de la flexibilidad de la producción y la mayor resistencia a la obsolescencia de la maquinaria, el liberar a los operarios de los trabajos duros y peligrosos con el consiguiente crecimiento de los niveles de seguridad, la mejora de la calidad de los productos y la reducción de la tasa de fallos, la minimización

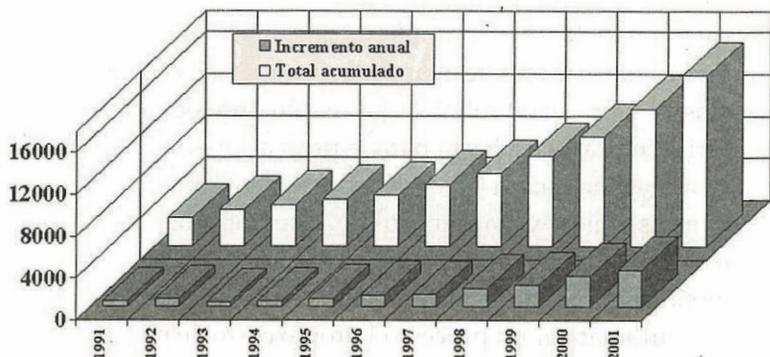
21. SANDERSON, R. «Industrial robots: a summary and forecast for manufacturing managers». *Journal of Industrial robots*. 1982

de los desechos de materia prima, la reducción de los tiempos de fabricación o incluso, en un plano más comercial, la imagen de empresa tecnológicamente avanzada que aporta la utilización de sistemas de fabricación robotizados, hacen que sea cada vez más necesaria, en ocasiones hasta para la propia supervivencia de las empresas, la tendencia a la automatización en general de los procesos industriales, y en particular a su robotización. Mikell Groover, un ingeniero respetado en el ámbito de la automatización y la robótica industriales, argumenta²² como justificación adicional para automatizar un proceso el propio coste de no hacerlo, en el sentido de la competitividad perdida respecto a otras empresas del sector que sí siguen esta tendencia.

Las estadísticas que anualmente compila la *IFR*²³ aportan los datos necesarios para analizar de manera cuantitativa el papel que el sector de la robótica representa dentro del panorama industrial actual. En términos absolutos, el total acumulado de robots manipuladores instalados en todo el mundo desde el final de la década de 1960, cuando empezaron a introducirse en la industria, hasta el final de 2001 es de 1.250.000 unidades. No obstante, muchas de las instalaciones puestas en marcha en los primeros años están ya fuera de servicio, lo que significa que el parque de robots en uso actualmente es significativamente inferior. La estimación de la *IFR*, considerando que la vida media útil de una de estas máquinas es de doce a quince años, lo cifra entre un mínimo de 757.000 unidades y un máximo de 1.020.000 robots. Las previsiones para los próximos tres años pronostican que en 2005 se alcanzará un total de 964.500 robots en servicio en todo el mundo.

22. GROOVER, M.P. «Automation, Production, Systemas, and Computer Integrated Manufacturing». Prentice Hall International. 1987. p. 7.

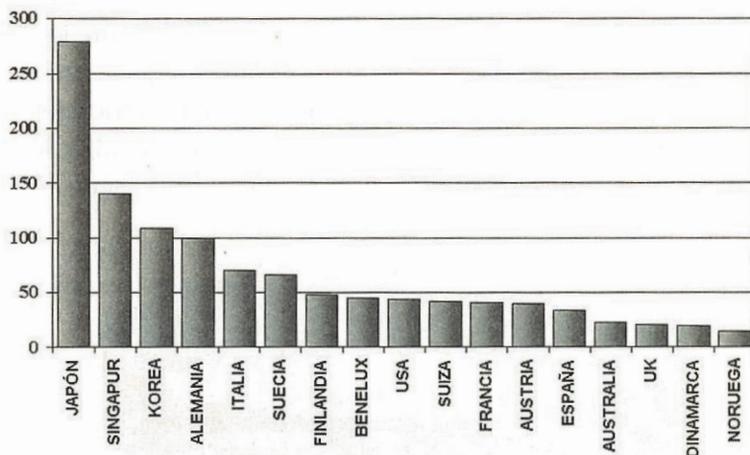
23. AER/ATP. op. cit. pp. 2-8.



Evolución del parque de robots en servicio en España

Un análisis por países revela que Japón, con 361.232 robots en servicio en 2001, es el que, de manera muy destacada, mantiene el mayor parque de robots en el mundo (un 47,74 % del total), seguido de los Estados Unidos, con 97.268 unidades. La Unión Europea, en su conjunto, aporta al total mundial un parque de 219.333 robots, de los que 16.378 corresponden a España, cifra que es ligeramente superior a los 13.411 del Reino Unido, pero sensiblemente inferior a los 99.913 de Alemania, los 43.911 de Italia o incluso los 22.753 de Francia.

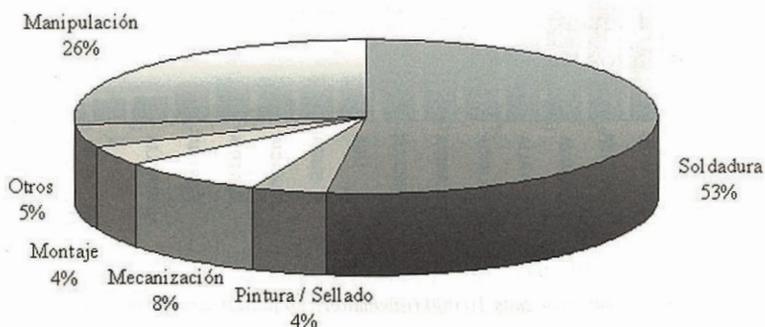
Por otro lado, si se realiza una comparación en términos relativos, utilizando para ello el número de robots instalados por cada diez mil trabajadores en la industria de la manufactura, España, con un índice de 34, estaría en una situación muy similar a la de los países de la Unión Europea (excepto Alemania que doblaría este cifra), e incluso a la de los Estados Unidos (con algo menos de 50), siendo Japón el que de nuevo destacaría con casi 300 robots por cada diez mil trabajadores.



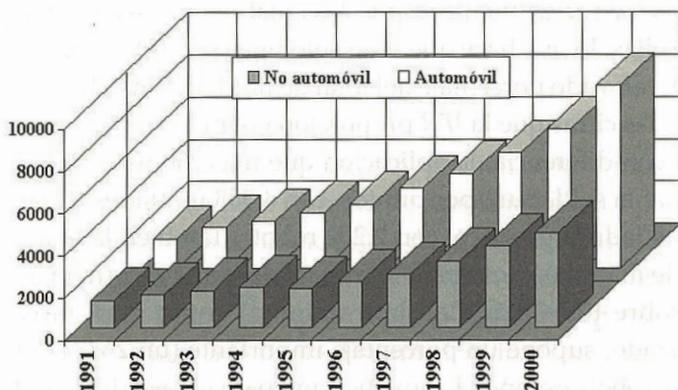
Número de robots por cada 10.000 trabajadores en la industria de manufactura

En cuanto a las aplicaciones, aunque son muchas y muy diversas las operaciones industriales llevadas a cabo por los robots manipuladores, el «estado del arte» de la tecnología robótica no proporciona actualmente respuestas igualmente satisfactorias para todas ellas, lo que hace que sean sólo unas pocas las que concentran un elevado porcentaje del total de unidades instaladas. Utilizando las cifras que la *IFR* proporciona para España, la soldadura es, con diferencia, la aplicación que más robots demanda; en especial la soldadura por puntos, con 4.553 unidades instaladas, y la soldadura por arco, con 2.202 robots. También la manipulación de material, tanto para la carga y descarga de otra maquinaria (sobre todo máquina herramienta) como para tareas de paletizado, supone un porcentaje importante (un 26 %) del parque de robots español. La justificación para el caso de la soldadura la encontramos en el hecho de ser el sector del automóvil, en cuyo proceso de fabricación se hace un uso extensivo de la misma, el que soporta el mayor número de robots de la industria,

cerca de un 66% del total, siendo esta cifra incluso superior a la del resto de los sectores considerados globalmente. Entre las demás áreas de la actividad industrial destacan, aunque a una distancia considerable del sector del automóvil, la de fabricación de productos metálicos, con algo más de un 8% del total, y la de fabricación de productos químicos y plásticos, con casi un 10%.



Distribución de robots por aplicaciones en España



Distribución de robots por sectores industriales en España

OTRAS APLICACIONES DE LA ROBÓTICA

El robot, en esencia, tiene como objetivo la sustitución del ser humano en los trabajos de carácter físico. Así, y fuera ya del estricto ámbito de la producción industrial, nos encontramos con un nutrido grupo de robots cuya aplicabilidad, al menos en potencia, se extiende a todas aquellas tareas en las que de una u otra manera interviene el hombre, y cuya finalidad es la de proporcionarle funciones de un mayor nivel de abstracción. La mayoría de estas máquinas encajan dentro de la denominación genérica de «robots de servicios», para los que la *IFR* ha adoptado una definición preliminar que los identifica como²⁴:

«Robots que operan de manera parcial o completamente autónoma llevando a cabo servicios útiles para el bienestar de los humanos y el buen estado de sus equipamientos, excluyendo las operaciones de manufactura».

Sectores de actividad como los de la vigilancia, inspección y mantenimiento, construcción de edificios, entretenimiento, minería, agricultura, intervención en catástrofes, cuidado de personas y hogares, o el de la medicina, cuentan ya hoy en día con numerosos prototipos de dispositivos robotizados, algunos de ellos incluso comercialmente explotados, capaces de llevar a cabo total o parcialmente algunas de las tareas propias de estas ocupaciones.

Hay además otros campos disciplinares, como es el caso del espacial o incluso del submarino, a los que por su grado de es-

24. World Robotics 2002. *International Federation of Robotics*.

pecificidad, y probablemente también por la tradición, se les reserva una parcela con entidad propia dentro de la Robótica.

La apariencia de estas máquinas es desde luego muy diversa, a veces incluso tan sorprendente que supone un esfuerzo incluirlos en la categoría de robots, siendo además sus capacidades y habilidades igualmente variadas, como corresponde a la heterogénea gama de actividades y aplicaciones a las que se destinan.

Normalmente, su trabajo se desarrolla en entornos complejos y parcialmente estructurados, es decir, ambientes de los que no se conoce con exactitud, la posición, la forma o incluso el número de los objetos que los ocupan, que pueden ser además fijos o también estar en movimiento. Esta situación demanda un nivel de autonomía, de «inteligencia» dirían algunos, que supera el de la mayoría de los robots industriales actuales; lo que naturalmente garantiza un aumento proporcional de su complejidad, especialmente en lo referente a sus sistemas de control y de percepción, siendo habitual la necesidad de integrar diferentes tipos de información proporcionada por grupos de sensores igualmente diversos.

En general, es habitual que no exista una fase previa de programación precisa de los movimientos y acciones que deben ser ejecutadas por los robots, a la manera en que se hace en los manipuladores industriales, sino que más bien se especifican los objetivos, siendo el propio sistema de gobierno el que en cada momento toma las decisiones que considera adecuadas en función de los eventos que van sucediéndose en el tiempo, y que son captados mediante sofisticadas baterías de sensores. Además, y aunque hay excepciones, es habitual que tengan diseños prácticamente exclusivos para cada aplicación, de los que se construye frecuentemente un único prototipo.

Esta diversidad de morfologías y características complica la realización de una taxonomía de esta clase de robots con un criterio estrictamente tecnológico. Por eso, es costumbre agruparlos en función de la actividad a la que se destinan, independientemente de su forma, capacidad de movimiento, grado de autonomía o habilidades funcionales.

Uno de los campos en los que la robótica ha tenido un éxito apreciable en los últimos años es el de los robots que se podrían calificar como «ayudantes», es decir, máquinas que tienen como misión realizar tareas de apoyo a las actividades cotidianas de los seres humanos, y que deben ser llevadas a cabo en sus entornos naturales (hogar, trabajo o lugares de ocio).

Uno de los proyectos pioneros en esta área fue el robot *HelpMate*, un vehículo autónomo diseñado en 1993 y ya explotado comercialmente, ideado para trabajar en centros hospitalarios transportando alimentos, medicamentos o documentos entre sus dependencias. También se han desarrollado algunos prototipos de robots para el llenado automático del depósito de combustible de los automóviles en las estaciones de servicio; o sillas de ruedas robotizadas, que hacen uso de complicados sistemas de navegación automática para facilitar la movilidad a personas con discapacidades motrices profundas.



Robot para el llenado automático del depósito de combustible

Dentro de este grupo se deben incluir también los robots de aspecto y comportamiento humanoides, tan aclamados mediáticamente en los últimos años, y de entre los cuales destaca por encima de los demás el robot *ASIMO*, diseñado por la firma japonesa *Honda*, que ha conseguido unos niveles de habilidad locomotriz y de capacidad de integración en ambientes humanos realmente sobresalientes.



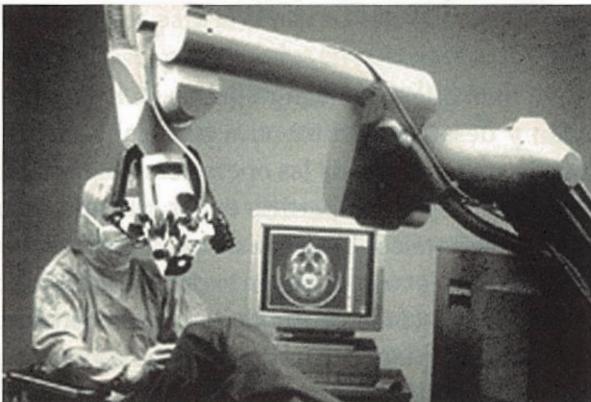
Robots ASIMO (izqda.) y HelpMate

Por otro lado, los trabajos de inspección y mantenimiento de algunos tipos de instalaciones requieren en ocasiones que los operarios accedan a zonas identificadas como peligrosas o de difícil acceso. La Robótica ha proporcionado en los últimos años soluciones automatizadas para un buen número de estas complejas operaciones. La inspección con vehículos autónomos teleoperados de zonas expuestas a la radiactividad en centrales nucleares, el uso de helicópteros también autónomos para el mantenimiento en conexión de líneas de alta tensión o la detección de fugas internas en depósitos de combustible o conducciones subterráneas son algunas de las aplicaciones que ya han sido abordadas con cierto éxito por los robots de servicios.

Existe también un interés creciente por disponer de robots que sean capaces de intervenir en situaciones de catástrofes naturales como es el caso de incendios forestales o terremotos.

Durante siglos, la técnica quirúrgica ha evolucionado de manera más que satisfactoria en beneficio de todos. Además, los avanzados procedimientos de la cirugía moderna están permitiendo abordar problemas que requieren niveles de destreza cada vez más exigentes, llegando a extremos en los que la máxima habilidad humana no alcanza a dar un soporte adecuado para estas técnicas.

Los robots son máquinas que pueden realizar movimientos con una precisión muy superior a la alcanzada por el hombre, lo que hace que sean considerados como candidatos idóneos para ocupar el lugar de un «ayudante» para los cirujanos en la realización de aquellas operaciones que demanden un mayor grado de habilidad manual. Los prototipos actualmente existentes están diseñados para realizar tareas relativamente sencillas en algunos tipos de intervenciones, como es el caso de la cirugía laparoscópica, cirugía ocular, o cirugía ortopédica, especialidad esta última en la que suele ser necesario realizar actuaciones de mecanizado de precisión, en cierto modo similares a las llevadas a cabo por los robots en los procesos industriales.



Robot quirúrgico MKM fabricado por la firma alemana ZEISS

Los robots utilizados en esta práctica médica son en general brazos articulados teleoperados por el cirujano, que utiliza un dispositivo manipulador remoto para guiar los movimientos del robot. Estos mecanismos están dotados a su vez de un juego de actuadores y de un sistema de control, sincronizado con el del robot, para reproducir en la mano del especialista la fuerza que el instrumental manejado por el robot esté ejerciendo sobre el órgano objeto de la intervención. Esta fuerza se mide mediante un sensor específico instalado sobre la estructura mecánica del brazo articulado. Es frecuente también la utilización de algún sistema de ayuda visual, a veces incluso con capacidad de proyección tridimensional, que permite además mostrar sobre un monitor o un visor binocular puntos de referencia generados con antelación por un computador a partir de modelos geométricos relativos a la operación en curso.

En un contexto muy diferente a los anteriores, la fascinación que la sociedad actual demuestra por todo aquello que tiene relación con la exploración planetaria y la astronáutica justifica sobradamente la expectación que alguno de los robots diseñados para operar en el espacio ha despertado en los medios de comunicación de masas.

El objetivo final que se encuentra detrás de los programas de investigación y desarrollo en robótica espacial apunta hacia el logro de que la mayor parte de las operaciones extravehiculares, tanto en órbita como en la superficie de los planetas, sean llevadas a cabo por robots teleoperados. Esto es además vital en aquellas misiones espaciales cuya duración excede de la admisible para los vuelos tripulados, como ocurre de momento con las que tienen como destino el planeta Marte. En estos robots se lleva al extremo el problema del retardo en las comunicaciones, característico de todos los dispositivos telerrobóticos, siendo por lo tanto imprescindible dotarlos de la autonomía necesaria para que

automáticamente gestionen de manera adecuada las situaciones imprevistas con las que se encuentren, sin esperar a la intervención del supervisor humano.

Por otro lado, en el diseño de cualquier dispositivo que deba operar en este ambiente se debe tener en cuenta el entorno severo, el vacío, en el que éste va a desarrollar su labor. Restricciones como la imposibilidad de usar fluidos hidráulicos, que pueden evaporarse, la falta de refrigeración por mecanismos distintos al de la radiación, la ausencia de gravedad, la radiación solar no filtrada, los cambios bruscos de temperatura e incluso las tormentas de polvo, hacen que la tecnología utilizada en la construcción de estos robots espaciales sea cuidadosamente seleccionada y difiera apreciablemente de la encontrada en sus homólogos terrestres. La robustez es otro de los aspectos críticos en estos diseños, toda vez que no se tiene actualmente la posibilidad de complejas auto-reparaciones, lo que obliga a que los componentes utilizados en su construcción hayan previamente pasado con éxito una estricta fase de homologación.

En los últimos años, han prosperado un número muy considerable de proyectos para la construcción de prototipos de dispositivos robotizados especializados en operaciones espaciales, de los que sólo unos pocos «elegidos» son finalmente utilizados en las misiones enviadas fuera de nuestro planeta.

En el segmento de los robots orbitales se incluye tanto a los dispositivos fijos, montados sobre las estructuras de los satélites, las estaciones o las naves espaciales, como a los de vuelo libre, capaces de maniobrar mientras se mantienen en órbita. Estos robots están en general diseñados para realizar operaciones como la reparación de minisatélites, el ensamblaje automático de módulos de estructuras espaciales o la recuperación de herramientas y otros objetos en el espacio.

De cualquier manera, la mayor parte del esfuerzo investigador en este campo se ha enfocado en los últimos años hacia el desarrollo de robots autónomos para la exploración de la superficie planetaria, los denominados «rovers». Desde el éxito conseguido en 1997 con el envío del *Sojourner* al Planeta Rojo se ha entrado en una nueva era en la exploración espacial, en la que el énfasis se ha puesto en la exploración «in situ» de la superficie de los planetas mediante una nueva generación de robots autónomos que dispondrán de una tecnología que supera con creces a la de este robot pionero. Estos robots tendrán capacidad metamórfica, reconfigurándose automáticamente para adaptarse a las condiciones de navegación en diferentes terrenos; serán capaces de comunicarse y cooperar con otros robots y de realizar la toma de muestras incluso bajo la superficie planetaria. Algunas previsiones²⁵ pronostican el éxito en un relativo corto plazo de tiempo de un nuevo concepto de misión espacial cuyo objetivo sea el de establecer una presencia permanente de «colonias de robots» en la superficie de los planetas, con las habilidades y la autonomía necesarias para garantizar la realización de operaciones científicas extensivas.



Robot Sojourner en Marte. Composición de fotos tomadas desde el Mars Pathfinder

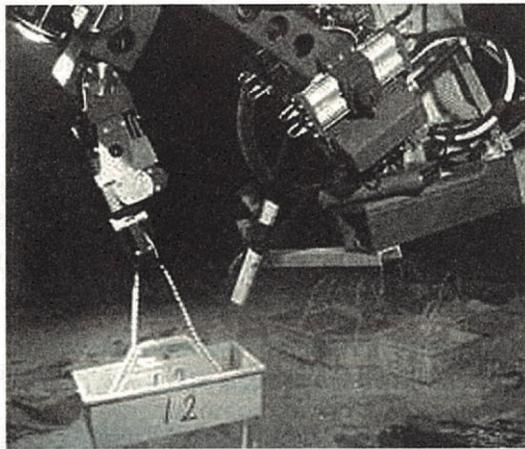
25. WEISBIN, C.R. y RODRÍGUEZ, G. «NASA Robotics Research for Planetary Surface Exploration». IEEE Robotics & Automation Magazine. Vol. 7, No 4. Diciembre 2000. pp. 25-34.

En el pasado, la mayor parte de las misiones científicas marinas de búsqueda y recuperación de naves y objetos valiosos, y también las de rescate submarino, han sido llevadas a cabo por pequeños vehículos tripulados especialmente adaptados para navegar en aguas profundas. Sin embargo, desde hace unos años, y seguramente espoleada por algunos éxitos que han tenido una repercusión mediática mundial, como es el caso del descubrimiento del mítico trasatlántico *Titanic*, la comunidad científica dedicada a la robótica submarina ha visto cómo la demanda de este tipo de vehículos ha crecido de manera inusitada en muy poco tiempo.

El reto de llevar a cabo operaciones a profundidades cada vez mayores, ha puesto sobre la mesa la cuestión de la seguridad de los tripulantes de los submarinos. Es obvio que en este sentido los robots permiten considerar misiones de alto riesgo sin que por ello deban ponerse en peligro vidas humanas.

En la mayoría de las ocasiones, estos vehículos robotizados trabajan de manera teleoperada remotamente por un supervisor que los guía mediante dispositivos adecuados desde un barco nodriza. En este caso, y considerando las distancias alcanzadas entre el robot y el barco, la necesidad de utilizar un cable «vital» que los una añade una complicación adicional al problema, de por sí ya complejo, del control de los robots. Con el objeto de relajar esta exigencia existen ya numerosos proyectos que pretenden desarrollar vehículos completamente autónomos, que eluden la necesidad de este vínculo físico y que además se están diseñando para poder adaptar de manera sencilla su configuración mecánica y de control a los distintos tipos de operaciones submarinas, cada una de las cuales presenta diferentes condicionantes y también objetivos diversos.

Otra línea de investigación reciente en este campo explota la idea de diseñar y construir mecanismos robotizados con una morfología que imita a la de algunas especies marinas, y que de esta manera les proporciona la posibilidad de integrarse y pasar desapercibidos en su hábitat natural, portando a bordo sensores que permiten acumular información valiosa que de otra manera no podría ser adquirida.



Robot submarino en una misión de inspección

CONCLUSIONES Y COMENTARIOS FINALES

Los robots son hoy en día elementos habituales en el paisaje industrial, en el que ya incluso pasan desapercibidos. Con toda seguridad, en poco tiempo lo van a ser también del paisaje natural y urbano, en el que el hombre desarrolla el resto de sus actividades vitales.

Ha quedado patente a lo largo de esta lección que el robot es una máquina que vive una situación en cierto modo «poligámica» con un buen número de tecnologías diferentes. Y desde luego, la propia evolución de la Robótica discurrirá de la mano del desarrollo de todas estas disciplinas.

Quizás, las cuestiones que deberíamos plantearnos ahora son: ¿Qué podemos esperar de esta tecnología en un futuro? y ¿En qué medida llegará la robótica a cambiar nuestras vidas? La predicción es que en un futuro razonable los robots no llegarán a comportarse ni a sentir realmente a la manera de los humanos. De hecho, hoy en día el motor impulsor de la mayor parte de la investigación apunta todavía hacia cuestiones que en el contexto de este debate se antojan «elementales», como la reducción del coste unitario de los robots, el aumento de su fiabilidad o la simplificación de las operaciones que realizan.

Sí es seguro que los robots van a disponer de una capacidad sensorial cada vez más evolucionada, de una habilidad motriz notable, de cierta aptitud aparente para «razonar» de forma autónoma, eso sí siempre de acuerdo con las reglas preestablecidas

por un determinado algoritmo, e incluso harán uso de una disposición para el autoaprendizaje a partir de la experiencia, lo que les permitirá adaptar su comportamiento para maximizar la eficiencia en la realización de las tareas para las que hayan sido diseñados. En definitiva, poseerán en cierto grado algunas cualidades propias de los humanos. Sin embargo, al hombre no lo determina exclusivamente su poder mental, ni la disponibilidad de un cuerpo, sino también sus capacidades emocional y afectiva, y la de establecer relaciones sociales. Y creo que los robots no alcanzarán nunca este privilegio. Los diseñadores concebirán robots exclusivamente para satisfacer nuestras necesidades y mejorar nuestro grado de bienestar, y nada más.

EPÍLOGO

Hay pocas dudas de que la diferencia fundamental entre un robot y un computador estriba en las capacidades de movimiento y de manipulación del primero, de las que no está dotado el segundo. Y en este sentido, siempre han sido los seres humanos los únicos que han sabido cómo fabricar objetos mediante la manufactura y cómo manipularlos en su beneficio. Y con esta habilidad, el hombre ha creado culturas. No deberíamos, por lo tanto, olvidar que esta parcela de la actividad humana seguirá siendo siempre la mayor fuente de generación del bienestar indispensable para la estabilidad y el desarrollo de nuestras civilizaciones. Y en esta tarea, es ya inevitable pensar en los robots como unos aliados de excepción para el hombre.

He dicho

BIBLIOGRAFÍA

- ANTSAKLIS, P.J. «Intelligent Learning Control». IEEE Control Systems. Vol 15. No 3. pp. 5-7.
- ASAMI, S. «Robots in Japan: Present and Future». Reserach Forum. IEEE Robotics & Automation Magazine. Vol. 1, No. 2. Junio1994. pp. 22-26.
- AYALA CARCEDO, F.J. (Director) «Historia de la tecnología en España» Valatenea, 2001.
- BARRIENTOS, A., PEÑÍN, L.F., BALAGUER, C. y ARACIL, R. «Fundamentos de robótica». McGraw-Hill, 1997.
- BENNETT, S. «History of Automatic Control to 1960: an overview». Proceedings of 13th IFAC World Congress. San Francisco, 1996. pp. 117-122.
- BOURHIS, G., HORN, O., HABERT, O. y PRUSKI, A. «An Autonomous Vehicle for People with Motor disabilities». IEEE Robotics & Automation Magazine. Vol. 8. No. 1. Marzo 2001. pp. 20-28.
- CACCIA, M. BONO, R. BRUZZONE, G. y VERUGGIO, G. «Variable-Configuration UUVs for Marine Science Applications». IEEE Robotics & Automation Magazine. Vol. 6. No. 2. Junio 1999.
- CASTLEBERRY, G.A. «The AGV Handbook». Braum Brumfiel, Inc. 1991.
- COX, J. y WILFONG, G.T. (Editores). «Autonomous Robot Vehicles». Springer-Verlag, 1990.
- ENGELBERGER, J. «Los robots industriales en la práctica». Ediciones Deusto, 1985.
- EVERETT, H.R. «Sensors for Mobile Robots: Theory and Applications». A.K. Peters, 1995.

- FUKUDA, T., MICHELINI, R., POTKONJAK, V., TZAFESTAS, S., VALAVANIS, K. y VUKOBRATOVIC, M. «How Far Away is "Artificial Man"?. IEEE Robotics & Automation Magazine. Marzo 2001. pp. 66-73.
- GARCÍA TAPIA, N. (Editor). «Historia de la Técnica». Libros de Investigación y Ciencia. Prensa Científica. 1994. Capítulo 4, Reynolds, T.S. «Raíces Medievales de la Revolución Industrial».
- GROOVER, M.P. «Automation, Production, Systems, and Computer Integrated Manufacturing». Prentice Hall International. 1987.
- GROOVER, M.P. «Robótica industrial: tecnología, programación y aplicaciones». McGraw-Hill. 1989.
- KATZAN, H. «Productividad y Robótica». Ediciones Deusto. 1989.
- KLAFTER, R.D., CHMIELEWSKI, T.A. y NEGIN, M. «Robotic engineering. An integrated approach». Prentice-Hall. 1990.
- KERAMAS, J.G. «How Will a Robot Change Your Life?». IEEE Robotics & Automation Magazine. Marzo 2000. pp. 57-62.
- NOF, S. Y. «Handbook of Industrial Robotics». Second Edition. John Willey & Sons, 1999.
- VILLAS TINOCO, S. y MONTIEL TORRES, F. «Historia, Ciencia y Tecnología». Servicio de Publicaciones e Intercambio Científico de la universidad de Málaga. 2000.
- WEISBIN, C.R y LAVERY, D. «NASA Rover and Telerobotics Technology Program». IEEE Robotics & Automation Magazine. Vol. 1. No. 4. Diciembre 1994
- WEISBIN, C.R., BLITCH, J., LAVERY, D., KROTKOV, E., SHOEMAKER, C., MATTHIES, L., y RODRÍGUEZ, G. «Miniature Robots for Space and Military Missions». IEEE Robotics & Automation Magazine. Vol. 6, No. 3. Septiembre 1999. pp. 9-18.



Servicio de Publicaciones