



UNIVERSIDAD DE MÁLAGA
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE
TELECOMUNICACIÓN

DEPARTAMENTO DE TECNOLOGIA ELECTRONICA

INTRODUCCION A LA ROBOTICA

AUTORA: Cristina Urdiales García

Capítulo 1

Introducción a la robótica

1 Bases y antecedentes de la robótica

En 1979, el Robot Institute of America definía un robot como: 'Un manipulador reprogramable y multifuncional diseñado para trasladar materiales, piezas, herramientas o aparatos específicos a través de una serie de movimientos programados para llevar a cabo una variedad de tareas'. Veinte años más tarde, la Encarta de Microsoft da la siguiente definición: 'Máquina controlada por ordenador y programada para moverse, manipular objetos y realizar trabajos a la vez que interacciona con su entorno. Los robots son capaces de realizar tareas repetitivas de forma más rápida, barata y precisa que los seres humanos'. El cambio más sustancial incorporado al concepto en estos veinte años es el hecho de contemplar una interacción del robot con su entorno, que permite comportamientos adaptativos e inteligentes.

Se considera a un robot como un agente autónomo inteligente (AAI) cuando cumple los siguientes requisitos:

- Autonomía: El sistema de navegación reside en la propia máquina, que debe operar sin conexión física a equipos externos.
- Inteligencia: El robot posee capacidad de razonar hasta el punto de ser capaz de tomar sus propias decisiones y de seleccionar, fusionar e integrar las medidas de sus sensores.

A continuación se presenta un breve recorrido a través de la historia del robot desde su concepción hasta el desarrollo de los sistemas móviles autónomos, incluyendo un resumen del panorama actual, tanto en el extranjero como en nuestro país.

1.1 Concepto e historia

El concepto de robot se remonta casi al principio de la civilización, donde los mitos hablan de seres mecánicos dotados de vida. En la civilización griega aparecen figuras que se mueven mediante poleas y bombas hidráulicas y que se usan para propósitos estéticos y artísticos. Tal es el caso del *Hero's Automatic Theater and Driver*, una estatua de un dios alrededor de la cual rotaban pequeñas figuras de forma periódica, o del mítico Coloso de Rodas, que defendía el puerto de la ciudad. No obstante, la sociedad griega carecía de dos puntos básicos para un desarrollo satisfactorio de robots: necesidad y tecnología.

La civilización árabe cubre el primero de estos puntos al concebir el robot como un elemento para el confort del ser humano. Un ejemplo de este punto de vista pragmático es la Fuente del Pavo Real (Fig. 1.1), un sencillo dispositivo que medía el nivel del agua vertida en un recipiente

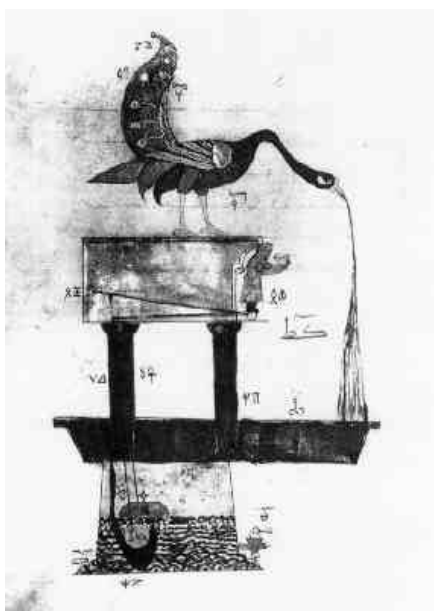


Figura 1.1: Robots en la antigua civilización árabe

de forma que, al alcanzarse un cierto umbral, aparecía un autómatas portando una pastilla de jabón y, transcurrido un cierto tiempo, una toalla. Existen ejemplos mucho más sofisticados, aunque imposibles debido a las limitaciones tecnológicas de la época, que reflejan más claramente la idea del robot, como es el caso del Caballo Encantado.

Durante el Renacimiento, los estudios de Leonardo da Vinci sobre anatomía del cuerpo humano aportaron un valioso conocimiento a la hora de desarrollar la mecánica del robot, principalmente los antropomorfos, permitiendo la construcción de juntas mecánicas mucho mejores e impulsando por tanto el desarrollo modular de máquinas complejas. Como consecuencia, se desarrollaron una gran cantidad de figuras dotadas de partes móviles capaces de llevar a cabo acciones tan complicadas como escribir o tocar ciertos instrumentos musicales.

No fue hasta finales del 1800 que se contempla de forma científica el concepto de autonomía e inteligencia artificial, cuando Nikola Tesla se propone crear una máquina capaz de tomar sus propias decisiones sin necesidad de un telecontrol. Más adelante, el escritor checo Karel Capek acuñaría el término robot como tal en su obra R.U.R. (*Rossum's Universal Robots*), que se estrenó en Praga en 1921. El término deriva de la palabra checa *robot*, que define un trabajo forzado o de carácter feudal y la obra trataba de la deshumanización en una sociedad tecnológica. En ese caso, los robots no eran mecánicos, sino creados químicamente, hecho probablemente relacionado con la figura del golem, que soportaba una primitiva forma de programación. Poco después, Fritz Lang tocaría el mismo tema, ésta vez con robots mecánicos, en 1926 con la película *Metrópolis* (Fig. 1.2).

La robótica como ciencia que estudia el robot y su uso se concebiría más tarde, cuando en 1942 el escritor de origen ruso Isaac Asimov escribió el relato corto *Runaround* y la recopilación posterior *Yo, Robot*. Desde entonces, los robots no sólo han acaparado la atención de la ciencia ficción sino también la de un creciente número de investigadores, presentándose como una excelente alternativa para todos aquellos trabajos que por una u otra causa resultan indeseables para el ser humano.

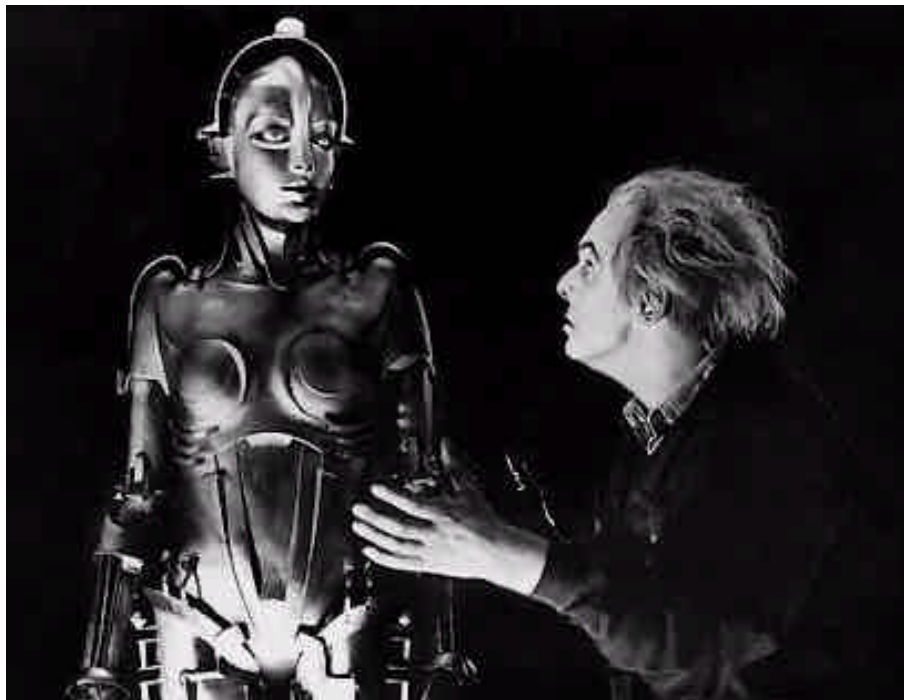


Figura 1.2: El concepto de robot en 1926

1.2 Bases de la robótica actual

Los robots tal como se conciben hoy en día no necesariamente tratan de asemejarse al ser humano, sino de cubrir las necesidades de éste de la forma más óptima posible. El inicio del desarrollo de la robótica actual puede fijarse en la industria textil del siglo XVIII, cuando en 1801 Joseph Jacquard inventa una máquina textil programable mediante tarjetas perforadas denominada *Telar Programable* y que se produciría en masa. Conforme la Revolución Industrial progresaba, continuó el desarrollo de estos agentes mecánicos, aunque el desarrollo de un verdadero robot no fue posible hasta los años cuarenta, con la aparición de la computadora y la cada vez mayor integración de los circuitos. Son de mención los trabajos de Christopher Spencer, inventor de un torno manejado mediante engranajes en 1830, de Seward Babbitt, creador de un brazo motorizado para extraer metales de un horno en 1892 y de Willard Pollard y Harold Roselund, que diseñan en 1938 un mecanismo programable para pintar con spray para la compañía DeVilbiss.

Los primeros robots industriales fueron los Unimates, desarrollados por George Devol y Joe Engleberger. Las primeras patentes aparecen en 1946 y pertenecen a Devol, por sus muy primitivos robots capaces de trasladar maquinaria de un lugar a otro. También en 1946 aparece la primera computadora: J. Presper Eckert y John Mauchly construyen el Eniac en la universidad de Pensilvania y la primera máquina digital de propósito general se desarrolla en el MIT. Más tarde, en 1954, Devol diseña el primer robot programable y acuña el término 'autómata universal', que posteriormente recorta a unimation. Ese sería el nombre de la primera compañía de robótica, fundada por Engleberger, que se considera el padre de la robótica.

La comercialización de robots comienza en 1959, cuando la Planet Corporation saca a disposición del público el primer modelo disponible. Un año después, Unimation se traspaasa a la Condec Corporation y comienza el desarrollo de los sistemas robóticos Unimate. La AMF Corporation (American Machine and Foundry) comercializa el Versatran, diseñado por Harry

Johnson y Veljco Milenkovic. En 1962, la General Motors incluiría el primer robot industrial en su cadena de producción en Trenton, New Jersey.

En 1964 se abren laboratorios de investigación en inteligencia artificial en el MIT, el SRI (*Stanford Research Institute*) y en la universidad de Edimburgo. En el 68 el SRI construiría un prototipo experimental llamado SHAKEY, que era una unidad independiente capaz de navegar en entornos cerrados estructurados de forma autónoma y dotado de una cámara y un detector táctil. Los japoneses, que hasta entonces habían importado su tecnología robótica de AMF dado que Estados Unidos estaba unos diez años por delante de ellos en dicho campo, se sitúan como pioneros del mercado y la Kawasaki Heavy Industries establece un pacto de cooperación con Unimation.

En 1970 se construye un brazo mecánico para propósitos de investigación que se conoce como el Brazo de Stanford. Su inventor, Victor Scheinman, fundaría Vicarm Inc en 1974 para comercializar el prototipo para la industria. La versión comercial iba controlada por un minicomputador parecido al que usaba el T3, construido por Richard Hohn para la Cincinnati Milacron Corporation el año anterior. Anteriormente, Raymond Goentz había diseñado un modelo mucho más primitivo de brazo articulado operado por control remoto para la Comisión de Energía Atómica en 1951. En el 76, tanto la sonda Viking 1 como la 2 incorporaron brazos de robot. En este mismo año Vicarm incorporó microcomputadores a sus diseños. Por la misma época, la NASA inicia un programa en colaboración con el Jet Propulsion Laboratory (JPL) para el desarrollo del MARS-ROVER. En 1977, Unimation adquiere Vicarm y un año más tarde desarrollan el PUMA (Programmable Universal Manipulator for Assembly). Una acción integrada entre IBM y Seiki permitiría la creación del SCARA, con un 85 % de las capacidades del PUMA, pero sólo a la mitad de su precio.

1.3 Plataformas móviles

Dentro del conjunto de plataformas que ofrece la industria, merecen especial consideración por la amplitud de posibilidades que ofrecen los agentes móviles. Si bien existe la posibilidad del control remoto y la programación para entornos estáticos, resultan mucho más interesantes los sistemas autónomos, que son capaces de extraer información del medio en que desarrollan su actividad mediante un conjunto de sensores y de alterar su comportamiento de forma dinámica de acuerdo a dicha información.

Se puede considerar que el primer robot móvil de la historia a pesar de sus muy limitadas capacidades fue ELSIE (*Electro-Light-Sensitive Internal-External*), que hizo su aparición en Inglaterra en 1953. Dicho robot se limitaba a seguir una fuente de luz utilizando un sistema realimentado en sus motores y sin incorporar ningún tipo de inteligencia adicional. Años más tarde, en 1968, aparecería el robot SHAKEY, del SRI (Fig. 1.3.a). SHAKEY presentaba como configuración sensorial una cámara gran angular y un detector táctil. El módulo de proceso estaba integrado por dos ordenadores, uno a bordo encargado de controlar los motores y otro remoto para el procesamiento de imagen, conectados por un enlace radio. El robot era capaz de navegar, explorar y representar el entorno mediante un mapa tipo rejilla organizado por regiones. Con SHAKEY aparece por primera vez el problema del deslizamiento (*slippage*), dado que basa el cálculo de su posición únicamente en información referida a sí mismo, como posición previa, velocidad y aceleración (*dead – reckoning*). Así, se produce un error acumulativo debido al deslizamiento de las ruedas sobre el suelo que provoca no sólo que el robot desconozca su posición tras un cierto tiempo de navegación, sino que el mapa adquirido sea erróneo.

En la década de los setenta, la NASA arrancarían un programa de cooperación con el JPL (*Jet Propulsion Laboratory*) para desarrollar plataformas capaces de explorar terrenos hostiles. Su

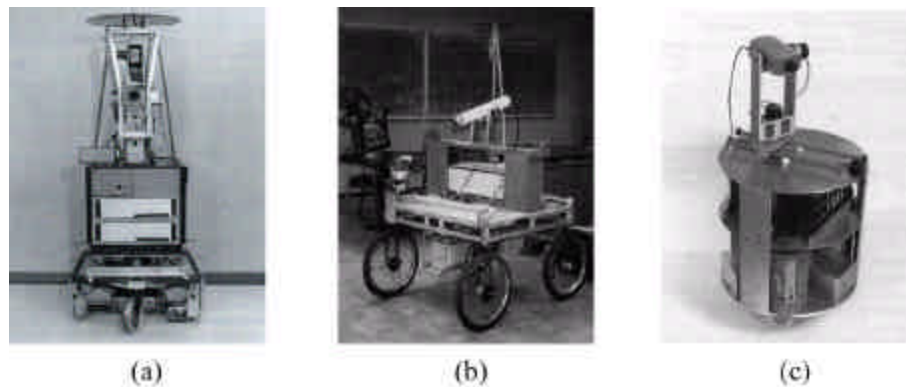


Figura 1.3: Plataformas móviles: a) SHAKEY, b) CART y c) CMU-ROVER

primer fruto sería el MARS-ROVER, cuya equipación sensorial consistía en un brazo mecánico tipo STANFORD, un dispositivo telemétrico láser, cámaras estéreo y sensores de proximidad. Esta plataforma tenía las mismas posibilidades que el SHAKEY, pero en su caso el modelado del entorno se llevaba a cabo únicamente por regiones de dos tipos: las de paso y las ocupadas o desconocidas. Así, el mapa consistía en una serie de polígonos irregulares que determinaban las áreas por las que el robot podía desplazarse de forma segura. El vehículo seguía utilizando el método *dead – reckoning* para localización, pero añadía un componente muy importante: una brújula giroscópica. Teniendo en cuenta la relación ángulo/arco es inmediato constatar que las derivaciones inducidas por deslizamiento son mucho más problemáticas en el caso de la rotación que de la traslación, pero presentan la ventaja de poder corregirse fácilmente mediante una brújula. De nuevo el proceso se realizaba mediante dos ordenadores, uno a bordo y uno remoto, pero esta vez conectados mediante cable.

El problema de la localización tomaría un nuevo giro poco después con la aparición del HILARE francés, que usaba un sistema de balizas activo consistente en una serie de baterías de infrarrojos situadas en determinados lugares de referencia (*landmarks*). Así, la plataforma era capaz de localizarse respecto a un sistema de coordenadas absoluto mediante un sencillo proceso de triangulación, si bien se encontraba limitada a entornos cuya disposición estuviese previamente almacenada. El sucesor de estos primitivos exploradores también construido por el JPL, aterrizaría en Marte el 5 de julio de 1997. Tres meses más tarde, y a pesar de las dificultades intrínsecas a la orografía y otras condiciones adversas del planeta, el SOUJOURNER (Fig. 1.4.c) había transmitido a la Tierra 8.5 millones de tomas de temperatura, 16 análisis químicos de la superficie y 16.500 fotografías.

La siguiente plataforma digna de mención aparece en los ochenta: el CART, del SRI (Fig. 1.3.b). El sistema sensor del CART se basaba en imagen, para lo que incorporaba visión estéreo y una cámara adicional acoplada en la parte superior. La novedad del CART se encuentra en el mapa del entorno que construye, ya que trata de modelar los obstáculos en lugar de las regiones de paso. Así, cualquier objeto queda delimitado por las coordenadas cartesianas de sus vértices. Este sistema de representación permite un cálculo de trayectorias más fiable y versátil que la técnica de descomposición en rejilla, pero presenta la desventaja de una mayor carga computacional en tanto que el cálculo de los vértices se basa en visión. El procesado se llevaba a cabo con el robot inmóvil y podía tardar más de diez minutos en reanudar la marcha, de forma que cruzar una habitación se convertía en una operación de unas cinco horas de trabajo. Referente al cálculo de trayectorias, es de destacar el hecho de que el cálculo de caminos trata de optimizar no solo la longitud recorrida, sino el número de giros, paradas y energía consumida.

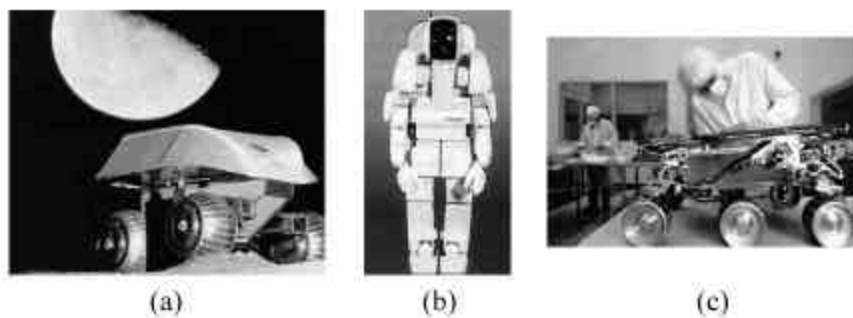


Figura 1.4: Plataformas móviles: a) LUNAR-ROVER, b) P3 y c) SOUJOURNER

También en la década de los ochenta, el CMU-ROVER (Fig. 1.3.c) de la Universidad de Carnegie Mellon supuso un avance mecánico al presentar una configuración de tres ruedas que permite cualquier posición y orientación del plano. Su configuración sensorial estaba integrada por una cámara y un conjunto de sensores de proximidad y contacto que, utilizando un sistema multiprocesador sobre la plataforma, reducía a más de una cuarta parte el tiempo de proceso. El CMU-ROVER incluía un sistema de control jerárquico por niveles con intercambio de mensajes por una rudimentaria memoria compartida. Simultáneamente, en la Escuela de Postgrado Naval estadounidense aparecen los ROBART, diseñados para vigilancia.

Hoy en día existen varias compañías que comercializan robots para investigación y desarrollo. Entre ellas cabe destacar Nomadic Technologies con su NOMAD-200. El NOMAD presenta una configuración sensorial muy parecida a la del CMU-ROVER que consiste en dos anillos de sensores de proximidad de corto y largo alcance y otro más de detección de contacto. Permite acoplar dos cámaras con tres grados de libertad para visión estéreo, pero sin duda su característica más interesante es estar basado en una plataforma tipo PC y ser altamente configurable, lo que lo hace idóneo para todo tipo de experimentos. Una de sus mayores desventajas reside en su tamaño, dado que es necesario disponer de una elevada extensión de espacio para trabajar en navegación. La opción más extendida en entornos reducidos la ofrece el robot KHEPERA, de unos 55 milímetros de diámetro y 30 de alto. Obviamente, esta plataforma no permite tantos accesorios como el NOMAD, pero es capaz de incorporar 8 sensores infrarrojos, dos microcámaras y una pinza.

En la actualidad, la robótica se debate entre modelos sumamente ambiciosos, como es el caso del IT, diseñado para expresar emociones y construirse una personalidad, el COG del MIT, también conocido como el robot de los cuatro sentidos, o el LUNAR ROVER (Fig. 1.4.a), de Carnegie Mellon, pensado como vehículo de turismo a control remoto, y otros mucho más prácticos con una funcionalidad muy definida. Entre éstos últimos merece la pena destacar a ROBODOC, un modelo empleado en cirugía para operaciones de sustitución de cadera que se emplea ya en varios hospitales estadounidenses, CYPHER, un helicóptero robot de uso militar diseñado por la empresa Sikorsky, el guardia de tráfico japonés ANZEN TARO, los robots mascota de Sony, el PIONEER, creado por el departamento de energía norteamericano y la NASA y encargado de la limpieza en la central nuclear de Chernobyl o el DANTE II, que descendió al volcán Mt. Spurr en Alaska para explorar su interior. En el campo de robots antropomórficos, es obligada la mención al P3 (Fig. 1.4.b) de Honda, sucesor del famoso P2. El P3 mide 1,60 m., pesa 130 Kg. y es capaz de subir y bajar escaleras, abrir puertas, pulsar interruptores e incluso empujar vehículos.

El panorama de la robótica en España, si bien recibe una financiación relativamente baja,

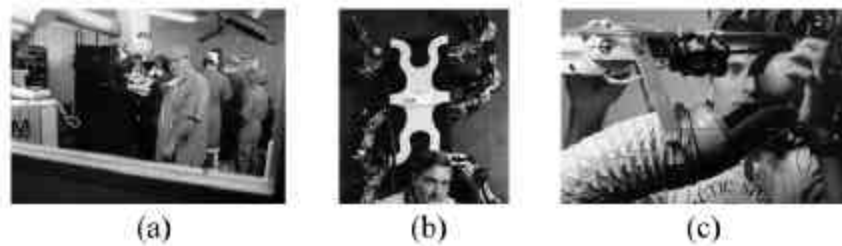


Figura 1.5: Robótica en España: a) ZEISS, b) SACON y c) AGRIBOT

es bastante alentador. El primer robot español fue creado por Josu Zabala en 1976 y recibió el nombre de GIZAMAT I. Servía para pintar superficies de una forma un tanto errática, pero fue la base de los modelos DANOBAR y FAGOR, de Ikerlan, que constituyen los primeros prototipos comerciales. Los modelos de Zabala y Ezquerro siempre han tenido objetivos muy específicos, como células de soldadura para andamios o manipulación automática de telas de fibra de carbono para las alas de los aviones. Hoy en día están encargados de la creación del brazo articulado del Pathfinder europeo bajo la financiación del programa Eureka. En la Universidad Politécnica de Cataluña también se han desarrollado interesantes prototipos como el submarino inteligente GARBI para exploración a 200 metros de profundidad o las unidades móviles del Instituto Catalán de Tecnología. El proyecto Ultramaris de Enric Ferrer concluyó con éxito en mayo del 98 una teleoperación de hidrocefalia gracias a un microscopio robotizado y un brazo mecánico bajo la denominación de ZEISS (Fig. 1.5.a). El paciente se encontraba en Barcelona, mientras que el cirujano viajaba en un barco en aguas de Palma de Mallorca. En la Politécnica de Madrid han aparecido igualmente prototipos muy interesantes, como ROBTET, una unidad que lleva a cabo el mantenimiento de las líneas de alta tensión sin necesidad de cortar el fluido eléctrico y un helicóptero robótico que usa para inspeccionar dichas líneas. Algunas de las unidades más interesantes se han desarrollado en el Instituto de Automática Industrial (I.A.I.) de Arganda, Madrid, una institución perteneciente al C.S.I.C. Entre ellos se encuentra el robot de cuatro patas RHIMO, el recolector de naranjas AGRIBOT (Fig. 1.5.c) o la unidad magnética SACON (Fig. 1.5.b) para soldar brechas en los petroleros.

1.4 Crecimiento esperado en la industria robótica

En 1990, había más de 40 compañías japonesas, incluyendo gigantes como Hitachi y Mitsubishi, que producían modelos comerciales de robots, mientras que en Estados Unidos, este número se reducía a una docena aproximadamente, encabezada por la Cincinnati Milacron y la Unimation de Westinghouse. En 1995 funcionaban unos 700.000 robots en el mundo industrializado: más de 500.000 se empleaban en Japón, unos 120.000 en Europa Occidental y unos 60.000 en Estados

Año	RE	RMM	RT	RA	RP	ROU
1994	11.2	25.5	28.5	18.5	10.7	5.5
1995	11.1	26.4	28.9	18.1	10.1	5.4
1996	11.5	27.0	28.0	17.6	10.1	5.8
1997	11.8	27.7	27.0	17.0	10.2	6.3
1998	11.7	28.0	26.6	17.0	10.1	6.6

Tabla 1.1: Porcentajes de adquisición de robots de acuerdo a su función en E.E.U.U. (1994/98)

Unidos. Principalmente, los modelos comerciales se reparten en las categorías que se presentan en la tabla 1.1, donde RE significa robots de ensamblado, RMM robots de manipulación de materiales, RT robots de tracción, RA robots para aplicaciones, RP robots de procesado y ROU robots para otros usos. Si bien en los 80 la mayor parte del consumo se focalizaba en la industria automovilística, dicho consumo acabó estabilizándose en torno a un 24 % y las aplicaciones se diversificaron hacia otros campos de aplicación como agricultura, construcción, industria aeroespacial o medicina.

En general, el crecimiento del mercado de robots experimentó una subida de un 5 % anual durante la década de los 80, pasando a estabilizarse en torno al 30 % al principio de los noventa. Hoy en día, los mayores productores de robots son Japón y E.E.U.U., seguidos por Suecia, Francia e Italia. España es el sexto país europeo.

1.5 Límites de la robótica actual

Michael Knasel, director del Centro de Aplicaciones Robóticas de Science Application Inc., explicó en la exposición Robots-8 en Detroit (1984) que los robots deberían evolucionar durante cinco generaciones. Las dos primeras ya se habían manifestado en los ochenta e incluían la gestión de tareas repetitivas, pero estaban muy limitadas en cuanto a movimiento se refiere. La tercera generación incluiría visión artificial, la cuarta movilidad avanzada en exteriores e interiores y la quinta entraría en el dominio de la inteligencia artificial. Lamentablemente, si bien se han cumplido algunas de estas expectativas, aún no se han conseguido modelos lo suficientemente efectivos. Los límites de la robótica actual se pueden apreciar en contraste con las expectativas previstas por Joseph Engelberger para la robótica de los ochenta:

- Seis articulaciones de precisión entre la base del robot y el extremo de un manipulador
- Programación sencilla e intuitiva
- Adaptación al medio mediante estímulos sensoriales
- Margen de movimiento en rangos de 0.3 mm.
- Capacidad de manipular pesos de hasta 150 Kg.
- Control de movimiento punto a punto y de seguimiento de trayectorias
- Sincronización con blancos móviles
- Compatibilidad con ordenadores personales
- Alta fiabilidad (durante al menos 400 horas de trabajo)
- Visión artificial que incluya al menos capacidad de orientación y reconocimiento
- Sensores táctiles
- Coordinación de las distintas partes de la unidad
- Capacidad de corrección de trayectorias en línea
- Movilidad
- Optimización de movimiento

- Conservación de la energía
- Apéndices de propósito general
- Comunicación por voz
- Seguridad de acuerdo a las leyes de Asimov de la robótica

Engelberger aseguraba que los primeros diez puntos ya se habían conseguido a principios de los ochenta. Los sistemas sensoriales por visión y tacto, si bien existen, se limitan a aplicaciones muy básicas y específicas con bajo nivel de detalle debido a la enorme carga computacional inherente al procesado de imagen. En lo que respecta al movimiento, se progresa, aunque con menor precisión de la deseable debido a imperfecciones, deslizamiento y problemas mecánicos en general. La energía necesaria para operar una unidad robótica ha disminuido mucho desde el 79, y se han conseguido unidades capaces de funcionar con baterías solares, como las TEN-TOMUSHI de Sanyo. No obstante debe seguirse trabajando en este punto, especialmente en robots destinados a desplazarse en exteriores y entornos hostiles, donde la autonomía del móvil es un factor crítico. Respecto a la comunicación por voz, en tanto que existe la compatibilidad con ordenadores personales y éstos soportan paquetes de reconocimiento de voz distribuidos de forma comercial, es un problema resuelto de forma cada vez más satisfactoria.

