

Historia de las Matemáticas (2018-2019)
Grado en Ingeniería Informática y Matemáticas
Universidad de Granada

Historia de la Robótica



**UNIVERSIDAD
DE GRANADA**



**FACULTAD
DE CIENCIAS**

Ignacio Aguilera Martos, Alicia Rodríguez Gómez, Darío Sierra Martínez
1 de diciembre de 2018

Resumen

La computación ha tenido un desarrollo muy acelerado desde el siglo XX a nuestros días tomando para ello diferentes objetivos. En primer lugar se intentó automatizar tareas mediante complicadas máquinas que comenzaron siendo completamente mecánicas para proseguir con las actuales electrónicas. En el transcurso de la historia este intento de automatizar las tareas repetitivas y tediosas ha venido acompañado del desarrollo de tecnologías y campos aledaños como la teoría de autómatas o la inteligencia artificial para lograr lo que hoy en día conocemos como robots, o lo que es lo mismo, sistemas artificiales diseñados con un propósito propio. En este trabajo nos proponemos el estudio de la teoría y avances relacionados con la robótica acompañados de un análisis y revisión de la historia de los robots desde los primeros autómatas diseñados en la época griega hasta robots emocionales e inteligentes como Sophia.

Índice

1. Teoría de Autómatas, Automatización e Inteligencia Artificial	5
1.1. Sobre la noción de máquina	5
1.1.1. ¿Qué es un autómata? (mecánica)	6
1.2. Conceptualización de la máquina y el autómata.	6
1.2.1. Algebras de Boole y sistemas combinacionales	6
1.3. Autómatas finitos	7
1.3.1. Aumentando la abstracción: Lenguajes y problemas	7
1.3.2. No-Determinismo	9
1.3.3. Ejemplos de Autómatas	10
1.4. La jerarquía de Chomsky	11
1.5. La Máquina de Turing	12
1.5.1. El problema de la parada	13
1.5.2. Máquinas de Turing Universales	13
1.5.3. El juego de la vida: casualmente Turing-completo	14
1.6. Inteligencia Artificial	14
1.6.1. El Test de Turing	14
1.6.2. La habitación china	15
1.6.3. Agentes Inteligentes	15
1.6.4. Las tortugas de Walter: un ejemplo de agente	16
1.7. Fronteras	16
2. Historia Antigua de la Robótica	18
2.1. Definición y Descripción de un Robot	18
2.2. Orígenes de la Robótica (Griegos)	18
2.3. Sistemas Mecánicos Simples	22
2.4. Leonardo da Vinci	23
2.5. Máquina Calculadora de Pascal	24
2.6. Isaac Asimov y las reglas de la robótica	24
2.7. Tortugas autónomas de Walter	25
2.8. El brazo robótico teleoperado de Goertz	26
2.9. Autónoma Universal de George Devol	27
2.10. Sputnik	27
2.11. Robots Industriales de General Motors	30
2.12. Bibliografía	31
3. Historia Moderna de la Robótica	32
3.1. Introducción	32
3.2. Inicios de la Inteligencia Artificial	33
3.2.1. SRI	33
3.2.2. Laboratorios de IA del MIT	33
3.3. Robotics Institute	33
3.4. El primer robot antropomórfico: WABOT	34
3.5. Brazos Robóticos	35
3.5.1. Stanford Arm	35
3.5.2. T3	35
3.5.3. PUMA	35
3.5.4. MOGURA	36
3.5.5. SCARA	36

3.6.	Mejora en la movilidad de los Robots	37
3.6.1.	Introducción	37
3.6.2.	RB5X de RB Robot Corporation	37
3.6.3.	Phony Pony	37
3.6.4.	WAP1	38
3.6.5.	WL-9DR	38
3.6.6.	Aquarobot	39
3.6.7.	Honda y el gran avance	39
3.7.	iRobot	41
3.8.	State of Art de la Robótica	41
3.8.1.	NASA	42
3.8.2.	Robots militares	44
3.8.3.	Avances de la IA	46
3.8.4.	Robots humanoides	48

1. Teoría de Autómatas, Automatización e Inteligencia Artificial

En esta parte abarcaremos qué es un robot, la posible equivalencia entre robot y autómatas y la evolución de estos conceptos a lo largo del tiempo. Es decir claro queda que un robot debe ser un tipo de máquina, pero la noción de lo que es una máquina ha variado significativamente a lo largo del tiempo.

Nadie dudaría sobre la veracidad de la siguiente afirmación 'Un ordenador es una máquina'; sin embargo, hay una diferencia cualitativa importante entre un ordenador y un actuador mecánico, por ejemplo: una puerta automática.

La noción de automatismo será clave para discernir qué es o no es un robot.

1.1. Sobre la noción de máquina

Partimos del concepto más simple hasta ahora mencionado, 'la máquina' y de entre ellas las más sencillas de entender, las máquinas aristotélicas, siglo III A.C:

-Simple machine, any of several devices with few or no moving parts that are used to modify motion and force in order to perform work. (Enciclopedia Britannica)

Serían: El plano inclinado, La palanca, La polea, El torno, La cuña y el tornillo. El primer enfoque de qué es una máquina está mucho más relacionado con el equilibrio de fuerzas en un sistema estático que con la abstracta definición de qué cosas son máquinas que tenemos hoy en día.

Llegamos al siglo XVI, la idea de una máquina es la de un objeto que cuyas partes distinguibles pueden ser clasificadas como una de las anteriores máquinas simples.

- 'Thus Leonardo was the first to advocate the necessity of a science of mechanisms.' -

- ' A book about the nature of mechanism must precede a book about their applications'

Ladislao Retti: 'The Unknown Leonardo'

Este pensamiento hace avanzar la 'ciencia de la máquina' , en los siglos anteriores el estudio de las máquinas era empírico alejado de cualquier conceptualización teórica. Es decir, el conjunto de las máquinas estaba definido por extensión. Este paso cualitativo permitió el comienzo de la conceptualización teórica de las máquinas.

Vemos el auge de este pensamiento en el mecanicismo filosófico. Encontramos grandes matemáticos como Descartes o Newton participando en esta teoría. El concepto de máquina evoluciona, una máquina será aquel objeto descriptible mediante las leyes de la física, la mecánica (clásica) concretamente. Vemos una definición intensiva en contraposición al pensamiento anterior. Nace con Descartes el pensamiento de que una máquina no es necesariamente un objeto artificial, considerando los animales de manera mecánica, complicada, sí, pero máquina *per se*.

La evolución del termino 'maquina' se va alejando cada vez más de la aplicación concreta de la 'maquina' en sí, hacia el concepto de que una máquina es aquel objeto cuyo comportamiento es determinista.

- A machine (or mechanical device) is a mechanical structure that uses power to apply forces and control movement to perform an intended action (Wikipedia)

A nuestros ojos, la definición parece incompleta por lo pronto, pues en el conjunto que define encontraríamos las máquinas simples, los coches pero no los ordenadores. ¿Es que acaso no son máquinas? Si bien es cierto que un ordenador puede comportarse de este modo, no es una cualidad intrínseca de un ordenador. Es decir: podemos conectar un actuador mecánico para que cumpla la definición, pero no tiene mucho sentido que al desconectárselo deje de ser una máquina.

El elemento invariante es su cualidad determinística, una máquina actúa conforme a un patrón. La categorización de un objeto físico como una máquina se produce cuando de su comportamiento se elimina el azar, se puede conocer su estado exacto ante un estímulo dado.

1.1.1. ¿Qué es un autómatas? (mecánica)

Queda claro que un autómatas debería ser algún tipo de máquina, es decir: en esencia debería presentar un comportamiento determinista. Aquí cobra importancia la noción de 'automatización'.

Autómatas proviene de la palabra griega $\alpha\upsilon\tau\acute{o}\mu\alpha\tau\omicron\varsigma$, cuya traducción sería '**que se mueve por si mismo**'. Es decir, la noción de 'automatización' es clave en el entendimiento clásico de qué es un autómatas; sería por tanto una máquina capaz de actuar sin intervención humana. Dejaríamos fuera de este conjunto a todas la máquinas simples y a los coches por ejemplo, pues no son capaces de llevar a cabo su función sin una intervención expresa.

1.2. Conceptualización de la máquina y el autómatas.

Hemos hablado de lo complicado que resulta dar una definición completa de estos conceptos, pues aunque todos sepamos qué es una maquina por extensión, las cualidades que comparten los objetos que llamamos máquinas pueden llegar a ser muy escasas.

1.2.1. Algebras de Boole y sistemas combinacionales

En el siglo XIX se da otro gran avance cualitativo sobre el entendimiento de qué cosas son máquinas, alejándonos de la definición clásica de los mecanicistas y entrando en el campo de la lógica.

Las algebras de Boole son la base teórica de los sistemas combinacionales (S.C.). Un sistema combinacional es una máquina (según hemos definido) cuya salida es únicamente función de su entrada, es decir, no presenta memoria sobre ningún estado pasado. Este será un aspecto fundamental en el avance de las 'máquinas', su memoria. La habilidad de poder tener presente situaciones anteriores para deliberar en la ejecución actual, y en qué medida se pueda hacer esto, marcará toda una escala de complejidad.

La realización de este concepto se ve con gran claridad en los circuitos lógicos, a partir de operaciones simples (como son la negación, la disyunción y la conjunción) podemos

llegar a expresar teóricamente cuál sería el funcionamiento de un sistema lo suficientemente complejo como para realizar operaciones aritméticas a mayor velocidad que un humano.

Queremos destacar que aunque estos sistemas se consideran típicamente como digitales, hechos a base de transistores recibiendo impulsos eléctricos, no tienen una diferencia cualitativa importante en cuanto a capacidad de computo o expresividad con un sistema mecánico clásico.

En 1642 el filósofo y matemático francés Blaise Pascal inventó una calculadora mecánica, **La pascalina**. Aunque es evidente que hay una gran diferencia entre una calculadora mecánica y una digital, ambas pueden conceptualizarse como sistemas combinatoriales; ya que ninguna de las dos tiene memoria sobre ejecuciones anteriores (estados) y el sistema, sean cuales sean sus actuadores, produce una salida como función única de una entrada.

1.3. Autómatas finitos

En el siglo XX nace la teoría de autómatas como siguiente nivel de conceptualización sobre qué son las máquinas y qué pueden hacer, la pregunta fundamental de este momento histórico es : ¿Qué problemas puede resolver una máquina?.

Daremos ahora una definición de autómata alejada del mecanicismo anterior, más parecido al modelo abstracto de las álgebras de Boole: Un autómata finito es una máquina (abstracta) cuya salida no depende solo de la entrada actual.

Un autómata finito tiene estados, posiciones de memoria que dependerán de las entradas anteriores, esto eleva la capacidad expresiva del autómata muy por encima de la del S.C.

- En electrónica un autómata es un sistema secuencial, aunque en ocasiones la palabra es utilizada también para referirse a un robot. [...] Sin embargo, la rápida evolución de los autómatas hace que esta definición no esté cerrada. (Wikipedia)-

Aquí un sistema secuencial es justo lo que hemos definido como autómata, un sistema combinatorial dotado de memoria. Un ejemplo muy sencillo de un cálculo que podría hacerse con un autómata finito y no bastaría con un sistema combinatorial, sería la tarea de decidir si un conjunto de ceros es par o impar. Esto puede parecer una tarea trivial pero es un cálculo recurrente en la comprobación de errores de protocolos de comunicación tan conocidos como el TCP/IP, que implementan un bit de paridad para este fin.

Definiremos qué es un autómata con más rigurosidad en lo que sigue, pero por ahora, daremos un ejemplo de lo que será un autómata bajo el formalismo que plantearemos. El robot WATBOT1 tenía una interfaz conversacional implementada, pues bien, dicha interfaz se modelaba mediante un autómata finito. Es decir: El robot en sí no era el autómata, el mecanismo que le permitía dialogar (aunque fuese de manera precaria) se modeló con una máquina de estado finito.

1.3.1. Aumentando la abstracción: Lenguajes y problemas

Esta evolución sobre lo que era una máquina y qué problemas podía resolver planteó el mismo problema que habíamos subrayado antes. ¿Si podemos clasificar las máquinas que tenemos según su complejidad, podríamos hacerlo con los problemas?

Este es fundamentalmente el objeto de estudio de la teoría de autómatas, pues responde fundamentalmente a la pregunta: ¿Qué máquina necesito para resolver este problema?

La definición del lenguaje formal como se hace en esta teoría es bastante natural:

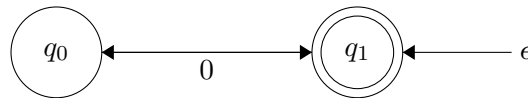
Sea \mathcal{A} un conjunto finito de símbolos, a este conjunto lo llamaremos alfabeto, muy en consonancia con el uso popular del concepto. A los símbolos de \mathcal{A} se les llamará letras, a las secuencias finitas de letras, palabras, y a todas las palabras que se puedan formar con las letras se las conoce como lenguaje generado por \mathcal{A} o por sintetizar: \mathcal{A}^* . Un lenguaje sobre \mathcal{A} , será un subconjunto de su lenguaje generado. Esto es:

$$\mathcal{L} \text{ es un lenguaje sobre } \mathcal{A} \iff \mathcal{L} \subset \mathcal{A}^*$$

Hasta aquí existe un paralelismo evidente con lo que asociaríamos con un lenguaje de manera popular. Pues bien, existe una relación entre las categorías de complejidad que mencionamos antes y los lenguajes.

Por ejemplo, definamos el siguiente lenguaje, palabras sobre $\{0, 1\}$ tales que tengan un número par de 0's.

$$\mathcal{L} = \{\omega \in \{0, 1\}^* : \omega \text{ tiene un n}^\circ \text{ par de 0's}\} \quad (1)$$

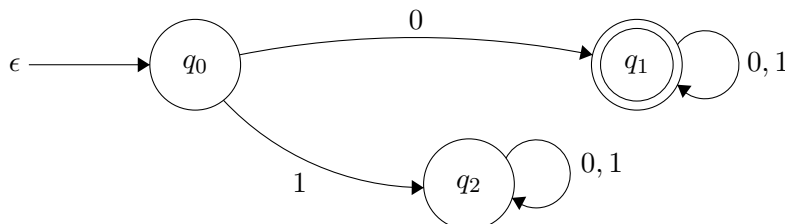


El siguiente autómata sería capaz de clasificar las palabras sobre el lenguaje generado por $\{0, 1\}^*$ de manera que podría decirnos qué palabras pertenecen exactamente al lenguaje. La correspondencia entre lenguaje y autómata es aun mayor, porque de hecho, este autómata solo acepta las palabras del lenguaje \mathcal{L} . Una vez introducidos los conceptos daremos una definición rigurosa.

Un autómata se modela de la siguiente manera, es una tupla de 5 elementos: $(Q, \mathcal{A}, q_0, \delta, F)$

- Q : Conjunto finito de estados que numeramos $q_0 \dots q_n$
- \mathcal{A} : Alfabeto, conjunto finito de símbolos sobre el que se crearán palabras del lenguaje.
- q_0 El estado inicial.
- $\delta : Q \times \mathcal{A} \rightarrow Q$. Función que nos indica cómo leer la palabra.
- F : Conjunto de estados finales

Explicaremos ahora con detenimiento la relación entre los lenguajes y los autómatas pues son dos maneras de hablar del mismo concepto. Supongamos el siguiente lenguaje sobre $\{0, 1\}$: Si la palabra empieza por 1 no pertenece al lenguaje, si empieza por 0 sí. El autómata que únicamente acepta las palabras de este lenguaje es el siguiente:



Un autómata puede presentarse también a modo de grafo como vemos, los estados se representan como nodos y los arcos representan las transiciones que modela la función $\delta(\cdot)$. Es decir, leemos la palabra de izquierda a derecha y por cada símbolo de la palabra, buscamos cuál es la transición asociada al estado en que nos encontramos y el símbolo que estamos leyendo.

Ahora bien, uno de los estados está marcado con dos circunferencias, este es un estado final, al ser el único: $F = \{q_1\}$. El resto de los elementos de la tupla serían:

- $Q = \{q_0, q_1, q_2\}$
- $F = \{q_1\}$
- $\mathcal{A} = \{0, 1\}$

En cuanto a la función de transición, tendremos que el par (a, q_i) pertenece al dominio de la función, si en el grafo existe un arco que salga de q_i con etiqueta a . Las transiciones serían las siguientes:

- $\delta(0, q_0) = q_1$
- $\delta(a, q_1) = q_1 \quad \forall a \in \{0, 1\}$
- $\delta(1, q_0) = q_2$
- $\delta(a, q_2) = q_2 \quad \forall a \in \{0, 1\}$

El símbolo ϵ se reserva para la palabra vacía, que es una entelequia que simboliza la palabra que no contiene ninguna letra.

1.3.2. No-Determinismo

Los autómatas que hemos examinado antes son deterministas, es decir, dada una entrada y partiendo de un estado, es trivial averiguar en qué estado acabaremos una vez leída esta. Sin embargo podemos considerar qué pasaría si nuestra función define las siguientes transiciones:

- $\delta(0, q_i) = q_j$
- $\delta(0, q_i) = q_k \quad j \neq k$

Es decir: ¿Qué hacemos si estando el estado q_i leemos un 0? ¿Nos vamos a q_j o a q_k ? La respuesta no es simple. Los autómatas finitos no deterministas nacen por su enorme capacidad de expresión y su definición menos rigurosa que la de los anteriores. Sería una gran ventaja que fuesen equivalente, de manera que pudiésemos usar este último, más sencillo de definir, y aun así tener la potencia expresiva del anterior. La respuesta será que sí.

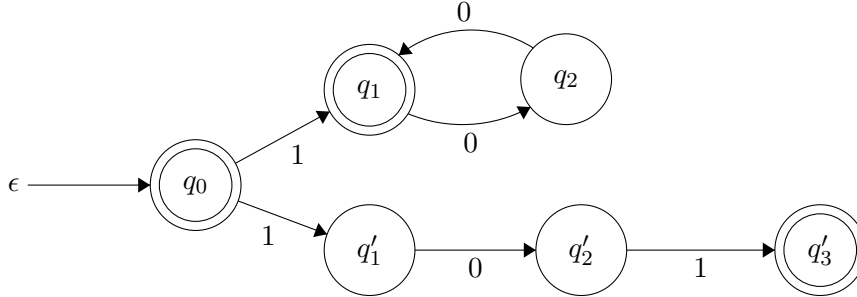
Su definición es parecida a la anterior salvo por un detalle, la función de transición:

$$\delta : Q \times \mathcal{A} \rightarrow \mathcal{P}(Q)$$

Aquí $\mathcal{P}(Q)$ es el conjunto potencia de Q , las partes de Q , es decir, dado un estado y un símbolo, podemos construir un autómata que tenga un arco conectando este estado q_i con todos los demás incluyendo el mismo.

Supongamos el siguiente problema, queremos crear un autómata que nos distinga si una palabra pertenece a este lenguaje:

$$\{\omega \in \{0,1\}^* : \omega \text{ tiene un número par de 0's}\} \cup \{\omega \in \{0,1\}^* : \omega \text{ contiene al cadena } 101\}$$



Si nos fijamos, los estados q'_i y los q_i conforman 2 autómatas independientes, que hemos unido usando el no-determinismo en la transición $\delta(q_0, 1)$ hemos dado un autómata que reconoce únicamente las palabras del lenguaje unión, uniendo los autómatas.

Esto se puede extender todavía más, introduciendo el concepto de las transiciones nulas. Una transición nula es la manera más cómoda de unir dos autómatas pues puedes moverte por libertad por todos los estados entre los que haya una transición nula. Intuitivamente esto quiere decir que podemos ir de un estado a otro sin leer el símbolo actual.

1.3.3. Ejemplos de Autómatas

Después de estas consideraciones, queda pensar cuál es el papel de estos modelos en cuanto a su papel en temas de robótica. Pues pensemos en una función relativamente simple que querríamos que tuviese un robot, la comunicación por ejemplo.

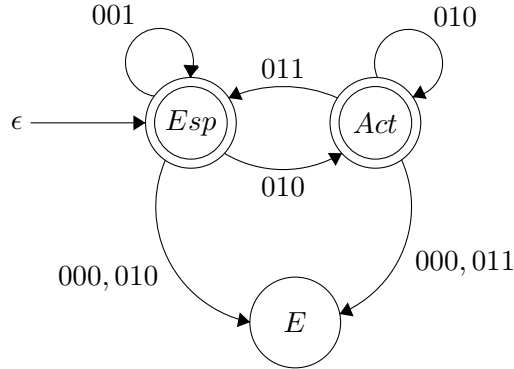
Un protocolo de comunicación es de los requerimientos más fundamentales, ya no en la robótica sino en cualquier sistema de relativa complejidad pues la función en sí es tan importante como la existencia de una interfaz de comunicación con el beneficiario de la función a implementar. No nos referimos necesariamente a la capacidad de expresión del agente, sino a la existencia de un protocolo que le permita transmitir información de forma coherente y exacta con el humano con el que interaccione, aunque este sea su programador.

Hablamos por ejemplo de la implementación del protocolo TCP/IP, que en el fondo, es una máquina de estados finita o como lo venimos llamando: un autómata finito determinista. Daremos un ejemplo de cómo modelar un sistema de autenticación de usuarios con una máquina de estados muy simple.

- q_0 Estado Inicial: En espera
- $F = \{q_1\}$ Único estado final : Autenticado
- $\mathcal{A} = \{001, 010, 011, 000\}$

En cuanto a la función de transición. Supongamos que nuestro sistema incorpora la siguiente directivas:

- Envío de contraseña incorrecta: 001
- Salir: 011
- Envío de contraseña correcta: 010
- Error: 000



Podríamos codificar los estados de *Esp* (espera) y *Act* (activo) como 000 y 100 con lo que tendríamos el estado de error (*E*) codificado como 101. El autómata describe los posibles pasos en la autenticación de un usuario en un sistema, los estados de 'espera' y 'activo' serían finales dado que son estados 'correctos' en un posible sistema como este. El estado de error, describe justo eso, un comando que no se esperaba dado el estado de la comunicación en el que estábamos. Con este modelo podríamos construir un sistema de autenticación de usuarios usando 3 bits unicamente.

1.4. La jerarquía de Chomsky

El lenguaje que puede reconocer un autómata finito recibe el nombre de lenguaje regular, ya sea el autómata determinista, no-determinista o no-determinista con transiciones nulas, pues como comentábamos el paso de uno a otro se lleva a cabo mediante un procedimiento algorítmico.

Un concepto íntimamente relacionado con el de lenguaje, como aquí lo hemos visto, es el concepto de gramática, a saber: las reglas de producción a seguir para crear una palabra del lenguaje. Distinguiremos símbolos terminales (escritos con letras mayúsculas) y símbolos no-terminales, notados con letras minúsculas. La gramática asociada a un lenguaje regular tiene la siguiente forma:

$$A \rightarrow aB \quad A \rightarrow a$$

Esto quiere decir que cada símbolo no terminal se intercambia por un símbolo terminal y otro no terminal a lo sumo y que, cada símbolo no terminal es resoluble, es decir, siempre se puede intercambiar por uno terminal. Pongamos un ejemplo:

Sea $\mathcal{L} = \{0, 1\}^*$ el conjunto de todas las palabras que se pueden formar yuxtaponiendo 0's y 1's. Su gramática vendría dada por:

- $A \rightarrow 1$
- $A \rightarrow 1A$
- $A \rightarrow 0$
- $A \rightarrow 0A$

Esta gramática es muy sencilla debido al alto número de restricciones bajo las que se ha concebido, si eliminamos dichas restricciones aumentamos la expresividad del lenguaje, aumentando así la complejidad del modelo de computación que tendrá asociado, como el caso de los autómatas finitos para los lenguajes regulares.

Pues bien, la jerarquía de Chomsky es una estructura piramidal que refleja cómo aumenta la complejidad del lenguaje conforme eliminamos restricciones en la gramática:

Gramática	Lenguaje	Reglas de producción	Autómata
Tipo 0	recursivamente enumerable	sin restricciones	Máquina de Turing
Tipo 1	dependiente del contexto	$\alpha A \beta \rightarrow \alpha \gamma \beta$	linealmente acotado
Tipo 2	independiente del contexto	$A \rightarrow \gamma$	autómata con pila
Tipo 3	regular	$(*)$	autómata finito

Los autómatas con pila presentan una generalización de los autómatas finitos. Ya no tenemos una representación tipo grafo pero la manera de leer símbolos con la función $\delta(\cdot)$ es similar. Resaltamos que además del criterio de estados finales (si terminamos de leer una palabra y estamos en un estado final la palabra es aceptada) los autómatas con pilas presentan un criterio de aceptación equivalente: el criterio de pila vacía; es decir: si al terminar de leer la palabra la pila del autómata está vacía se considerará una palabra válida. Esto se debe a que al leer un símbolo en la palabra en este tipo de autómatas podemos meter o sacar símbolos específicos de una pila (lifo).

Sin embargo, daremos un salto cualitativo importante e iremos directamente al modelo computacional más complejo de la jerarquía: Las Máquinas de Turing.

1.5. La Máquina de Turing

Una Máquina de Turing es un tipo de autómata con memoria infinita, se dispone de un conjunto de cardinal numerable infinito en el que podemos guardar símbolos e información temporal. La manera más sencilla de pensar en dichas máquinas es como una pareja: un cabezal lector y una cinta infinita. El cabezal lee un símbolo y se mueve a izquierda o a derecha dependiendo de la función de transición, de manera rigurosa, una Máquina de Turing es una septupla $MT = (Q, A, B, \delta, q_0, \#, F)$

- Q Conjunto finito de estados
- A Alfabeto de entrada
- B Alfabeto de símbolos en la cinta ,
 $A \subset B$
- δ Función de transición
- q_0 Estado inicial
- $\# \in B - A$ El 'símbolo blanco'
- F Conjunto de estados finales

Una transición típica de una Máquina de Turing sería: $\delta(q_0, 0) = (q_1, \#, D)$. Esto quiere decir que si estando en el estado q_0 el cabezal lector de la cinta está posicionado sobre una de las celdas de la cinta que contiene un 0, cambiaremos dicho 0 por un $\#$ y moveremos el cabezal lector a la derecha.

A diferencia de un autómata finito que tenía que leer la palabra entera para verificar que pertenecía al lenguaje, se dice que una Máquina de Turing acepta una palabra siempre y cuando llegue a un estado de aceptación, aunque queden símbolos por leer.

En caso de que lleguemos a un estado no final y ya hayamos terminado de leer la palabra se dice que esta se ha rechazado; el problema llega cuando la máquina cicla de manera indefinida.

1.5.1. El problema de la parada

Acabamos de mencionar el problema que se presenta cuando una Máquina de Turing no para, pues aunque técnicamente no rechaza la palabra tampoco la acepta. Existe una equivalencia entre función computable (algoritmo) y Máquina de Turing (**Tesis de Church-Turing**), entonces: dada una entrada para un algoritmo o de manera equivalente, dada una máquina de turing y una palabra sobre su alfabeto ¿ Es posible saber si la palabra será aceptada o rechazada? La respuesta es que no.

Alan Turing en su artículo **On Computable Numbers, with an Application to the Entscheidungsproblem** (1936) demostró que existían problemas indecidibles, entre los cuales se encuentra este. La demostración es sencilla:

Supongamos que existe $Stop(P, x)$ un algoritmo capaz de averiguar si el programa P para con los datos x . Construimos entonces:

Turing (P) :

L If Stops (P,P) , GOTO L

Al considerar $Turing(Turing)$ llegamos a contradicción pues el programa para si y solo si no para.

1.5.2. Máquinas de Turing Universales

Las Máquinas de Turing pueden codificarse mediante símbolos, una Máquina de Turing capaz de leer una codificación de este tipo y comportarse como dicha máquina se conoce como Máquina Universal de Turing. Un sistema de computo que pueda comportarse de esta manera se dice Turing-completo.

La primera máquina Turing-completa fue el Z3 de Zuse construida en 1941, aunque dicha propiedad fuese demostrada por Raúl Rojas en 1998.

Este es uno de los saltos cualitativos de mayor relevancia en la historia de la computación pues es el inicio de los ordenadores tal y como los conocemos, máquinas capaces de leer algoritmos y ejecutarlos, capaces de ser cualquier máquina.

Aunque *a priori* parezca una propiedad muy complicada de tener veremos que existen numerosos sistemas que poseen esta propiedad, no solo modelos teóricos tremendamente complejos, existen una sería de sistemas, en su mayoría juegos, que poseen esta propiedad, quizá el más señalado sea el juego de la vida de Conway. Aunque también podemos contar al 'Pokemon Amarillo' entre los elegidos.

1.5.3. El juego de la vida: casualmente Turing-completo

El juego de la vida consta de un tablero, en él, las celdas pueden clasificarse como vivas o muertas, se pintan en negro o blanco dependiendo de en qué categoría se encuentren. Una configuración inicial sería un conjunto cualquiera de células vivas. El juego posee 2 reglas:

- Una casilla con exactamente 3 vecinas 'vivas' nace.
- Una casilla con 2 o 3 vecinas vivas sigue viva, en otro caso muere.

Pues bien, este juego de 0 jugadores, con estas dos reglas es Turing-completo.

1.6. Inteligencia Artificial

Abordaremos ahora cómo ha ido evolucionando el paradigma de la inteligencia artificial, desde la inteligencia fuerte (hacer que las máquinas sean inteligentes) hasta la débil (hacer que se comporten de manera inteligente).

El término 'inteligencia artificial' se acuñó en el año 1955 en la 'Conferencia de Dartmouth' y describía al inteligencia artificial como : 'la ciencia e ingeniería de hacer máquinas que se comporten de una forma que llamaríamos inteligente si un humano tuviese dicho comportamiento'.

Como campo de investigación nace un año después en 1956, en la ciudad de Hannover, New Hampshire (EEUU). Mencionaremos otras dos definiciones que muestran la dualidad de la que hablábamos antes:

- 'La inteligencia artificial está relacionada con conductas inteligentes en artefactos' (Nilsson,1998).
- 'El nuevo y excitante esfuerzo de hacer que los computadores piensen...,máquinas con mentes, en el sentido más literal' (Haugeland,1985).

La primera definición se centra más en lo que hemos llamado 'inteligencia débil': conseguir que una máquina se comporte de manera inteligente. La segunda es algo más problemática pues si nos cuesta definir y entender el concepto de inteligencia, dotar a un ser inanimado de capacidad de pensamiento como tal, se plantea como un problema mucho más complicado que cualquiera con el que nos hayamos topado antes.

A colación de esto último comentamos que Turing escribió un artículo en 1950 llamado 'Computing machines and intelligence' en el que propone cuestiones como: ¿Pueden pensar las máquinas?

1.6.1. El Test de Turing

En dicho artículo Turing propuso un 'test', una prueba que podría hacerse a una computadora para comprobar si en efecto, presenta algún tipo de inteligencia.

En dicha prueba una persona conversa con un interlocutor al que no ve e intenta adivinar si dicho interlocutor es un ser humano o una computadora. Si la computadora consigue engañar al humano se dice que ha pasado el test. Evidentemente esta conversación no puede delimitarse a ningún tema trivial o a un campo muy delimitado, donde sería fácil engañar al interlocutor humano.

Destacamos la siguiente noticia del diario **ABC** de 2014 en el que un ordenador fue capaz de engañar a los jueces del test, haciéndoles creer que era un joven ucraniano de 13 años.

1.6.2. La habitación china

El test de Turing puede parecer a primera vista un método que, bajo una prueba suficientemente rigurosa, puede aportar un aserto creíble en torno a si la máquina en cuestión está teniendo un comportamiento inteligente; es decir: es capaz de engañar a su interlocutor humano captando y entendiendo el significado de los mensajes y respondiendo de manera acorde. Sin embargo existen críticas a este test, la más famosa, **la habitación china**: Este experimento modela una situación en el que se pasaría el test de Turing sin haber demostrado ningún comportamiento inteligente, invalidando el test.

Supongamos que tenemos la siguiente disposición en la prueba del test de Turing. Tenemos dos interlocutores, uno comunicándose en chino y otro en inglés. De manera que el interlocutor inglés tiene en su poder una chuleta para el examen, un conjunto de reglas que especifican cuál es la respuesta, de manera detallada, para los caracteres de entrada. Entonces, podría existir una comunicación real entre los dos interlocutores sin que uno de ellos tuviese idea alguna del contenido de los mensajes.

El interlocutor inglés pasaría la prueba del test de Turing burlando su metodología, sin haber demostrado un comportamiento inteligente, emparejando únicamente respuestas y preguntas sin llegar a comprender nada de su contenido.

El problema reside en que definir qué es ser inteligente es complicado, pues como comentamos al principio del texto, hay numerosos grupos de elementos en este campo que clasificamos por extensión. Un comportamiento es inteligente si es parecido a un comportamiento que ya teníamos categorizado como inteligente. El espíritu del test de Turing refleja esto a la perfección pues concluimos que la máquina es inteligente si es capaz de reproducir un comportamiento humano que ya hemos concluido que es inteligente.

Sin embargo, al igual que planteamos con el concepto de 'máquina' al principio, se hace complicado saber de manera concisa y concreta si un elemento pertenece a un grupo generado por extensión, clara prueba de ello es **la habitación china** que, teóricamente, invalida el test de Turing, que aun con todo esto, sigue en uso.

1.6.3. Agentes Inteligentes

La noción de agente es parecida a la definición de autómatas más clásica: un sistema capaz de interactuar de forma automática con el entorno, dotado de sensores y con capacidad de reaccionar ante la información que estos le brinden. La clase de complejidad a la que pertenezcan estos agentes ya es harina de otro costal; podríamos tener un ordenador (Máquina de Turing universal), controlando un agente, con lo cual su modelo de complejidad teórico estaría en lo alto de la jerarquía. También podríamos tener un agente con un mecanismo de respuesta muy sencillo descrito por un autómata, lo mostramos con un ejemplo.

Quizá la manera más familiar de pensar en un agente es imaginarlo como un robot de limpieza. Tenemos un mecanismo, capaz de llevar a cabo una tarea de forma automática, basándose en la información que percibe de unos sensores y en alguna forma programada de toma de decisiones. Dependiendo de lo laboriosa que sea el mecanismo de toma de decisiones, el agente podrá ser clasificado en uno de los campos de complejidad que comentábamos antes; pero sea cual sea, categoriza como agente.

Supongamos que uno de estos agentes tiene el siguiente mecanismo de toma de decisiones. El agente puede estar en movimiento o haber chocado, en caso de haber chocado giramos de manera aleatoria a izquierda o a derecha 90° y seguimos recto. Bueno, por muy sencillo que sea este funcionamiento, el robot se moverá y limpiará la habitación (aunque es posible que se quede dando vueltas en alguna esquina). Esto se conoce como **agente reactivo**: un agente que toma decisiones basándose únicamente en los input actuales. Estos agentes se encontrarían en la escala de complejidad más baja, son **sistemas combinatoriales**, pues no guardan información anterior para orientarse y tienen predefinida una respuesta para los estímulos de entrada producidos por los sensores.

Podemos pensar que tener tantos modelos de computación para crear un robot como el que acabamos de describir es decepcionante. Pues de aquí nace el concepto de **agente deliberativo**. Es decir, el agente no solo reacciona al impulso, delibera sobre el input e intenta tomar la 'mejor opción'. Un agente se considera deliberativo cuando tiene en memoria un esquema de representación del mundo en el que se mueve. Una vez más vemos como la capacidad de tener memoria nos permite dar saltos cualitativos en lo que a complejidad se refiere.

En contraposición al primer ejemplo, supongamos de nuevo que el agente ha chocado; este sería un típico comportamiento deliberativo: Marcar en memoria que en la posición actual hay un muro, planificar una ruta (usando el algoritmo A^* por ejemplo) a la siguiente zona por la que no hayamos pasado todavía y seguir recorriendo la habitación.

1.6.4. Las tortugas de Walter: un ejemplo de agente

Estos agentes fueron diseñados en 1948 por W. Grey Walter, cuya intención era la de probar que con mecanismos rudimentarios se podían crear comportamientos complejos. La funcionalidad básica del robot era la siguiente: constaban de 2 grupos de sensores unos de presión para evitar choques y otros fotosensibles. Además los robots podían moverse y girar con libertad y autonomía.

Los robots levantaron bastante expectación pues estaban programados para acercarse o alejarse de la luz dependiendo de el estado de su batería. Esto coincidía con el hecho de que las plataformas de carga se situasen cercanas a los focos de luz intensa. Estos agentes conseguían moverse con cierta libertad y mostraban comportamientos típicos de animales, acercarse o alejarse de la luz dependiendo de su ciclo 'energético'; pero, ¿Es esto un comportamiento inteligente?

Aunque es verdad que siguiendo la definición purista hay que considerarlos como agentes deliberativos, pues toman la acción de acercarse o alejarse de la luz en función de unos parámetros de representación interna (como es el porcentaje de carga en este caso), presentan un comportamiento y un razonamiento bastante limitado en comparación con algo con lo que podemos estar muy acostumbrados: un típico robot de limpieza, como comentábamos antes.

1.7. Fronteras

Por último queremos destacar la delgada línea que encontramos entre muchos de los conceptos de los que hemos hablado. Es decir: los extremos están controlados, queda claro que **Deep Blue** (1996), presentaba un comportamiento inteligente; también queda claro que una tostadora (por muy útil que sea) no lo presenta; pero, ¿Qué pasa si empezamos a

añadirle funcionalidades a la tostadora? Si por ejemplo fuese capaz de saber cuando las tostadas están hechas y nunca las quemase ya entraría en consideración como agente reactivo. Las siguientes preguntas quedan sin responder: ¿Cómo de inteligente es un comportamiento dado?, ¿A partir de qué momento sería la tostadora inteligente?, ¿Queda mucho para vivir en el utópico mundo en el que no haya que rascar 'lo quemado' de las tostadas?

Estas preguntas son más serias de lo que parecen en un mundo cada vez más informatizado. Desde luego llamamos inteligentes a los móviles, son MTU claramente, un concepto alejado de la implementación del protocolo de comunicación que supusieron en un principio..

Citando a Turing (1950): **'Solo podemos preveer el futuro inmediato, pero de lo que cabe duda es de que hay mucho por hacer'**.

2. Historia Antigua de la Robótica

2.1. Definición y Descripción de un Robot

La realidad es que, lo que hoy día consideramos , no se asemeja a lo que en sus inicios se llamaba robot. Pero si que existen características generales que nos permiten llamar de la misma forma a los robot se empezaban a desarrollar desde la antigua Grecia y que naturalmente eran muy rudimentarios y a los robot que conocemos hoy día y que ayudan notablemente a facilitar la vida diaria a las personas.

Si nos limitamos a definiciones como pueden ser de la R.A.E. se dice que un robot es *"Máquina o ingenio electrónico programable, capaz de manipular objetos y realizar operaciones antes reservadas solo a las personas."* Además de contar con las siguientes características:

- **Multifuncionalidad:** Capaz de llevar a cabo varias tareas.
- **Programable:** Capaz de modificar su funcionalidad sin un excesivo costo.
- **Alto Grado de Autonomía:** Capaz de ejecutar su tarea sin la intervención de un humano.

Pero nada más leer esta definición nos damos cuenta que esta definición no es válida ya que alrededor del año 400 a.C. no se podía hablar de máquinas programables y mucho menos electrónicas. La realidad es que el concepto de robots tal y como se conoce hoy en día, no se desarrolló hasta 1948 de la mano de George Devol. Más adelante se explicará con mayor profundidad la importancia de este en la historia de la robótica.

A modo de curiosidad, la palabra *robot* tiene su origen en la obra teatral *Robots Universales Rossum* dirigida por un dramaturgo checo que se estrenó en 1920. Es por tanto, que no fue hasta 1920 cuando comenzó a llamarse *robot* a todo lo que vamos a describir en próximos aparatos.

2.2. Orígenes de la Robótica (Griegos)

Los primeros autómatas se desarrollaron en el Antiguo Egipto. Como es natural estos no tienen nada que ver con lo que hoy se conoce como autómatas, pero tenía bastante mérito para la época a la que pertenecen. Eso sí, se consideraban como tales ya que eran capaces de realizar determinadas tareas de forma autónoma. A continuación se van a mencionar los robot más relevantes de la época:

Arquitas de Tarento en el año 400 a.C. diseñó *"la paloma"*¹, ave mecánica que funcionaba con vapor. El mecanismo era muy rudimentario, debido a la época, y funcionaba de la siguiente manera; Se trataba de un objeto de madera con forma de paloma y se situaba colgada de una cuerda del techo. Esta contenía un pequeño depósito de agua, que se llevaba a ebullición mediante una llama situada en la parte inferior del depósito, y el vapor que se originaba se filtraba por unos pequeños orificios que le permitían al *"robot"* simular el vuelo de la paloma.



Figura 1: Paloma de Arquitas de Tarento

Apolonio de Pérgamo, entre 262-190 a.C. , diseñó unos autómatas musicales que funcionaban impulsados por la fuerza del agua.

Ctesibio de Alejandría, en el año 300 a.C., también inventó autómatas musicales pero en este caso funcionaban por la impulsión de aire a través de diversos tubos. Pero su contribución más relevante fue el desarrollo del *reloj de agua o clepsidra* que fue el más preciso de los relojes creados hasta la aparición del reloj de péndulo. Este mide el tiempo en función de lo que tarda en caer el agua de un recipiente a otro. Hasta ese momento, el tiempo se medía el tiempo a través de la observación del movimiento del sol, esto permitía medir el tiempo en cualquier momento del día. A continuación se muestra una imagen:



Figura 2: Reloj de Agua de Ctesibio de Alejandría

Filón de Bizancio inventa en el año 200 a. C., hizo numerosas contribuciones a la ciencia que se describirán a continuación. Uno de los inventos más revolucionarios fue el molino de agua que se utilizaba tanto para moler grano como para diversos trabajos agrícolas. Además ideó la bomba de agua, esta permitía transportar el agua desde un nacimiento hasta una zona geográficamente más alta mediante la fuerza de la propia agua. Además, relacionado también con el agua, ideó un lavabo en el que, como se puede ver en la siguiente imagen, contenía en su parte superior un recipiente lleno de agua. Esta agua caía sobre un cucharón situado bajo este y cuando este se llenaba se inclinaba y el agua caía sobre el grifo y podía obtener el agua de forma dosificada. Al mismo tiempo que el agua caía por el grifo, también se dejaba caer una pequeña piedra pómez para limpiarte.

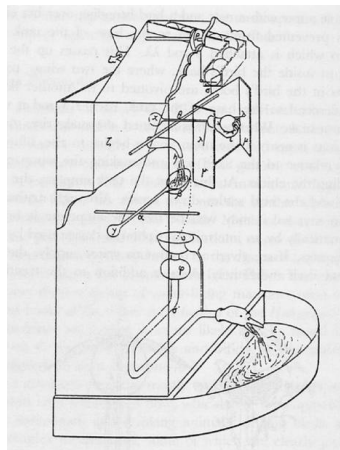


Figura 3: Lavabo de Filón de Bizancio

Pero estas no fueron las únicas contribuciones de Filón de Bizancio. Tenía cierto interés por el tema armamentístico y es por ello que diseñó las primeras flechas, una ballesta que esta compuesta por dos cadenas unidas con una polea tal que se lanzaban flechas mientras le quedaran en la recámara. Y por último, y uno de sus inventos más curiosos fue lo que se llamó una *camarera automática*. Esto era una estatua que tenía colocado en una de sus manos una jarra y cuando se le colocaba en la otra mano un vaso, esta cedía por el peso y el tubo que conectaba la jarra con el depósito del vino se accionaba para llenar el vaso.

Heron de Alejandría destaca por las numerosas contribuciones que hizo a la ciencia en la antigüedad. Es por ello que se va a hacer desarrollar sus contribuciones más relevantes y algunas de ellas han facilitado avances industriales a lo largo de la historia.

En sus contribuciones a lo que podría ser la robótica de la época se destaca su trabajo conocido como *Mecánica*, en el que se plasman los primeros datos descriptivos acerca de la construcción de un autómatas. Está compuesto por tres libros en los que se trata de las proporciones de las figuras en el primero de ellos, en el segundo de los sistemas mecánicos simples que son descritos en el siguiente apartado y finalmente en su último libro hablaba sobre las aplicaciones de la mecánica.

Cuando hablamos de inventos concretos se destaca que creó la primera máquina de vapor de la historia a la que llamaron *eolípila*. Esta estaba compuesta por una caldera de agua hirviendo y sobre esta se situaba una esfera hueca llena de agua conectadas ambas cosas por dos tubos como se ve en la siguiente imagen⁴. Cuando el agua hervía se conseguía que la esfera girase a gran velocidad. En la época se dice que solo servía como un divertimento para los niños pero la realidad es que en el futuro serviría como inspiración a las máquinas

de vapor utilizadas en las industrias.



Figura 4: Eolípila de Heron

Además diseñó lo que fueron los primeros autómatas y las primeras puertas automáticas. Con la energía que proporcionaba la *eolípila* y con sistemas mecánicos simples como cuerdas, poleas, cadenas y demás era capaz de poner en movimiento autómatas y puertas automáticas. La realidad es que no existe constancia de que lo llevara a cabo pero la idea sí que la tuvo y dejó constancia de ello en sus libros.

En el 770 d. C., **Yang Wu-Lien** diseñó un prototipo con forma de mono que alargaba la mano para que le dieran limosna. Cuando la mano alcanzaba un cierto peso, este guardaba el dinero en una bolsa.

En el 890, **Han Chih Ho** creó un gato de madera que se encargaba de cazar ratas y ratones que hubiese a su alrededor.

El príncipe hindú **Bhoja**, en el año 1050, escribió *Samarangana-Sutradhara* donde se describe cómo es el proceso de construcción de máquinas que eran capaces de actuar autónomamente y que se las llamaba yantras.

En el siglo XII Al-Jazari (o Al-Djazari)

En la antigüedad, las máquinas más perfectas que se consiguieron fueron los relojes ya que se acercaban al concepto de automatismo y por consiguiente al de robótica. Algunos de ellos cuentan con figuras humanas que sus movimientos van en función del transcurso de las horas. Ejemplos de ello son los relojes de la catedral de Munich y el reloj de Ánker que se puede visitar en la ciudad de Viena, Austria.

Más concretamente, en España se conserva un reloj construido en el siglo XVI, llamado Papamoscas, y que está compuesto por un hombre que se mueve con los cambios horarios. Hoy en día sigue funcionando y se puede visitar en la catedral de Burgos.



Figura 5: Papamoscas de la catedral de Burgos

Aunque se ha de señalar que el robot más antiguo, que estuvo en funcionamiento entre 1352 y 1789, y que se conserva en la actualidad es el Gallo de Estrasburgo. Este formaba parte del reloj de la catedral de Estrasburgo y hacía mover sus alas y su pico al dar las horas.



Figura 6: Gallo de Estrasburgo

Finalmente, para terminar con los orígenes de la robótica no podemos dejar de nombrar "*el hombre de hierro*" de Alberto Magno del siglo XIII. Este era un autómatas con forma de humano construido con hierro, cristal y cuero y que era capaz caminar, abrir puertas, entretener invitados y hasta incluso hacer tareas del hogar. Este es considerado como el inicio de lo que hoy en día es la inteligencia artificial.

2.3. Sistemas Mecánicos Simples

Cuando nos referimos a Sistemas Mecánicos Simples?? se hace referencia a aquellos formados principalmente por componentes, dispositivos o elementos que tienen como función transformar o transmitir el movimiento desde las fuentes que los generan al transforman distintos tipos de energía.

A continuación se describen los principales Sistemas Mecánicos Simples:

- **La Rueda:** Pieza mecánica circular que rota alrededor de un eje.
 - El Rodillo: Se trata de un cilindro con un diámetro ancho y con una destacada longitud, que al igual que lo hace la rueda, gira alrededor de un eje.
 - Tren de Rodadura

- Rueda Dentada: Se trata de una rueda cuyo perímetro está totalmente cubierto de dientes. Su ventaja recae en proporcionar movimiento circular mediante el contacto de los dientes entre dos ruedas.
- Polea Fija: Se trata de una polea en el que la polea se encuentra fija en la parte superior.
- Polea Móvil: Se trata de una polea conectada a una cuerda en cuyos extremos está, por un lado, anclada a un punto fijo y en otro a un extremo móvil.
- Polipasto: Conjunto de poleas en la cual una queda fija y la otra tiene movilidad.

■ La Palanca

- Palanca de Primer Grado: Se trata de una palanca donde el punto de apoyo se sitúa entre la Potencia y la Resistencia. Un ejemplo claro de este tipo de palanca podría ser unas tijeras o una balanza.
- Palanca de Segundo Grado: Se trata de una palanca en la cual la Resistencia se sitúa entre el punto de apoyo y la fuerza. Un ejemplo de este tipo de palanca podría ser un cascanueces o una carretilla de obra.
- Palanca de Tercer Grado: Se trata de una palanca en la cual la fuerza se sitúa entre la resistencia y el punto de apoyo. Un ejemplo de este tipo de palanca podría ser un martillo o una caña de pescar.

■ Plano Inclinado

- La Rampa: Superficie plana que forma un ángulo agudo con la superficie.
- Cuña: Se trata de un prisma triangular que actúa como un plano inclinado móvil.
- Sistema Tornillo-Tuerca: Sistema en el que un tornillo rota en el interior de una tuerca. Se utiliza para unir de forma no permanente dos elementos.
- Tirafondo: Tipo de tornillo que tiene una cabeza diseñada para ejercer el giro en esta mediante la ayuda de una herramienta.

2.4. Leonardo da Vinci

Leonardo da Vinci es un artista renacentista conocido principalmente por sus aportaciones en la pintura con son *La Mona Lisa* o *La Última Cena*. Pero este también era arquitecto, botánico, escritor, científico, filósofo, ingeniero e inventor entre otras cosas. Es por ellos que a continuación se va a hablar sobre su importante aportación al ámbito de la robótica.

En torno al año 1495, Leonardo da Vinci diseña un autómatas con forma de humano que se conoce como *El robot de Leonardo*. Este tenía forma de guerrero medieval y el objetivo de su construcción es la aplicación práctica del estudio sobre el canon de proporciones humanas que se refleja en su obra *El Hombre de Vitruvio*. No se tienen restos en la actualidad de aquel autómatas pero si que existen bocetos que nos permiten confirmar su existencia además de permitir probar que funcionaba correctamente. Gracias a dichos bocetos se volvió a construir en el años 2007.

Más tarde, en 1515 Leonardo creó un león mecánico que serviría como regalo a la monarquía francesa, concretamente al rey Francisco I, cuando la comunidad florentina hizo una nueva

alianza con Francia. Se trataba de un león de tamaño real y con una gran melena rizada. Este león es capaz de caminar, mover la cabeza, la cola y la boca y lanzar pétalos de flores de lis de uno de sus compartimentos, símbolo este de la monarquía francesa. Este, al igual que ocurrió con el *El robot de Leonardo* ha sido reconstruido recientemente gracias a los bocetos encontrados de la época.

2.5. Máquina Calculadora de Pascal

Una de las grandes contribuciones de la ciencia fue el desarrollo de la máquina calculadora. La primera calculadora mecánica de la historia, conocida como Pascalina, fue inventada por el francés *Blaise Pascal*. Fue el joven a la edad de diecinueve años, en 1642, cuando este inventó una máquina que era capaz de realizar sumas, restas hasta incluso multiplicar y dividir mediante restas y sumas sucesivas. Este tuvo una gran repercusión computacional tanto es así que aún sigue teniendo influencia en nuestros días. A continuación se muestra una imagen de dicha calculadora.

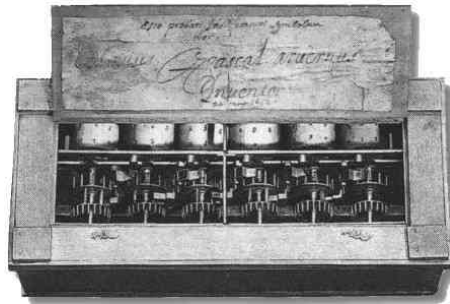


Figura 7: Calculadora Pascalina

La máquina estaba compuesta de 8 ruedas dentadas conectadas entre sí con una numeración en ellas de 0 a 9 y una manivela que en función de la forma de girarla indicaba la operación matemática que se quería realizar. Las 8 ruedas estaban distribuidas de la siguiente manera: dos de ellas se dedicaban a número decimales y las 6 restantes se utilizaban para números enteros. Esto significa que la calculadora te permitía hacer operaciones con número entre 0,01 y 999.999,99 lo que facilitaba un amplio rango de operaciones.

Lo curioso recae en el cómo se le ocurrió al joven Pascal inventar la calculadora. Este era hijo de un funcionario recaudador de impuesto y en numerosas ocasiones ayudaba a su padre a redactar informes oficiales. Pascal pensó que si conseguía crear una calculadora ahorraría mucho tiempo y al mismo tiempo se aseguraba que los resultados eran correctos. Como resultado de ello apareció la primera calculadora mecánica de la historia dejando atrás instrumentos para contar como puede ser el ábaco.

2.6. Isaac Asimov y las reglas de la robótica

Isaac Asimov nacido en 1920 en la ciudad de Petrovichi, RSFS de Rusia. Con apenas tres años de edad su familia se trasladó a los EE.UU. y fue allí donde desarrolló su vida familiar, académica y laboral. A modo de curiosidad, señalar que debido a su precocidad intelectual sus padres decidieron falsificar su fecha de nacimiento para ingresar antes en un colegio neoyorkino. Una vez en la universidad se licenció en Químicas, Ciencias y Artes, Bioquímica y se doctoró en Filosofía. A lo largo de su vida tuvo dos esposas pero en ningún

caso descendencia. Finalmente en 1992 fallece en Nueva York a causa del sida que había contraído en una transfusión sanguínea.

Durante su vida, Asimov destacó como escritor de ciencia-ficción y de divulgación científica. Fue en su libro *"Yo robot"* donde este aventuró la relación que tendríamos los humanos con los robots, pero claro dichos robots no garantizaban la seguridad y prevención total de los riesgos. Es por ello que Asimov estableció las tres siguientes reglas de la robótica:

1. Un robot no hará daño a un ser humano o, por inacción, permitirá que un ser humano sufra daño.
2. Un robot debe cumplir las órdenes dadas por los seres humanos, a excepción de aquellas que entrasen en conflicto con la primera ley
3. Un robot debe proteger su propia existencia en la medida en que esta protección no entre en conflicto con la primera o con la segunda ley

Señalar que Isaac Asimov era un adelantado a su tiempo y es que apostaba por la divulgación científica a través de la red. Es por ello que en 1988 aventuró la existencia de una plataforma como Wikipedia 13 años antes de que esta existiera. Además afirmaba la existencia en el futuro de plataformas como Skype, FameTime o el desarrollo de coches autónomos lo que hoy en día es una realidad.

2.7. Tortugas autónomas de Walter

William Grey Walter nació en Kansas (EE.UU.) en 1910 y se trata de uno de los pioneros en el campo de la robótica, cibernética e inteligencia artificial. Sus estudios en neurología le llevaron a la investigación y desarrollo inventos que eran capaces de medir ondas cerebrales y analizar el comportamiento del cerebro de una persona. Más concretamente, con la idea que que la conexión de neuronas o células cerebrales se podían ejecutar comportamientos complejos. Esto dio lugar a la construcción en 1948 y 1949 de las *tortugas* Elmer y Elsie, respectivamente. En la siguiente imagen se pueden observar como eran estas.



Figura 8: Tortuga autónomas de Walter

El nombre de tortugas se debe al caparazón de plástico que protegía al robot además de su lentitud en los movimientos. Estas solo estaban programadas para hacer dos misiones como son esquivar obstáculos aunque no de una forma muy inteligente y volver a recargar

su batería cuando esta estuviera cerca de agotarse. Este estaba formado por tres ruedas, una batería y una célula fotoeléctrica móvil que actuaba sobre el motor para decidir la dirección de los movimientos como lo hacen los actuales sensores.

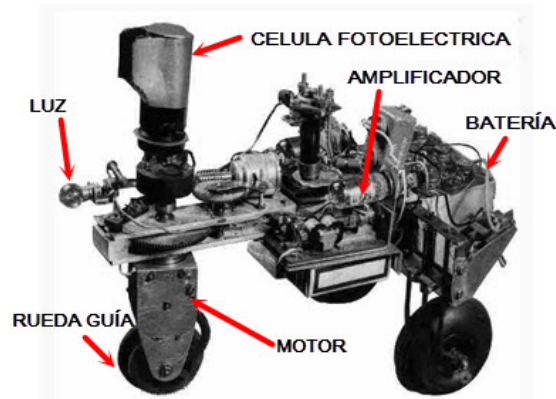


Figura 9: Estructura de las Tortuga autónomas

Walter fue el precursor de los robot aspiradores están tan de moda en nuestros días y que nos facilitan notablemente las tareas del hogar.

2.8. El brazo robótico teleoperado de Goertz

El primer brazo mecánico teleoperado se desarrollo por Raymond Goertz en 1949 y fue llamado *M1*. El objetivo de su desarrollo era proteger del riesgo a los trabajadores mientras se permite la manipulación precisa de materiales o elementos radiactivos. Este es considerado el pionero en aplicar la técnica maestro-esclavo en sistemas de teleoperación. Más concretamente, en la máquina se consideran dos dispositivos diferenciados un brazo *maestro* y otro brazo *esclavo*. El brazo *esclavo* se ubica dentro de un recipiente aislado en su totalidad y el brazo *maestro* se sitúa en una sala de control y es el encargado de ejecutar ordenes que posteriormente el *esclavo* reproducirá sobre el material radioactivo con notable precisión. En 1951, Goertz diseñó una mejora en este brazo mediante la incorporación de una serie de poleas y cables de acero entre el brazo *maestro* y el brazo *esclavo* que proporcionaba mayor precisión en sus movimientos.

Durante el desarrollo de dicho brazo robótico, Goertz estableció uno principios que debía cumplir un brazo de este tipo y que aun se siguen aplicando a los robots quirúrgicos que se utilizan hoy en día. Los principios son los siguientes:

1. El movimiento del brazo *esclavo* debe tener seis grados de libertad; tres de traslación, tres de rotación y uno de agarre.
2. El movimiento del brazo *esclavo* debe estar acoplado al brazo *maestro*.
3. Dicho acoplamiento debe ser bilateral, es decir, las fuerzas sobre el brazo *esclavo* deben reflejarse en el brazo *maestro* y los desplazamientos de producidos por el brazo *maestro* deben producir el mismo desplazamiento sobre el brazo *esclavo*.

Seguidamente se muestra una imagen donde se puede observar el brazo robótico de Goertz descrito anteriormente.



Figura 10: Brazo robótico de Goertz

2.9. Autónoma Universal de George Devol

George Devol es conocido como el creador del primer robot industrial además de cofundador de la primera empresa robótica de la historia llamada *Unimation* junto al empresario Joseph F. Engelberger.

Este tenía el objetivo de crear una máquina que fuese fácilmente manejable y que trabajara de forma automática. Fue en el año 1948 cuando Devol patentó el prototipo de lo que más tarde se convertiría el primer robot de uso industrial. Este robot era un brazo que tenía la función de mover artículos de gran tamaño y gran peso en el ámbito industrial. Además era capaz de mover piezas a altísimas temperaturas y de hasta 225 kilos de peso.

Señalar que Devol y Engelberger formaban un tándem perfecto, uno aportaba sus cualidades creativa y el otro las suyas empresariales. Esto les permitió fundar lo que fue la primera empresa robótica de la historia además de conseguir un contrato con la empresa *Generals Motors* para instalar el brazo robótico en su fábrica de Nueva Jersey. Poco después, en 1968, firmó un contrato similar con la empresa japonesa de *Kawasaki*. Señalar que en esa época las dos potencias industriales mundiales eran Japón y Estados Unidos y que por el contrario en Europa este tema estaba más estancado.

Más tarde, en 1978, Devol consigue mejorar este brazo robótico haciendolo programable y multiarticulado, lo que permitía colocar las piezas en cualquier posición que se quisiese siempre que estuviese a su alcance. Este fue llamado *PUMA* (*Programmable Universal Machine for Assembly*).

Señalar que George Devol murió en 2011 a los 99 años de edad y que no se le puede negar la gran aportación a la industria que ha realizado ya que puso la primera piedra de la industrias robotizadas de la actualidad.

2.10. Sputnik

El programa **Sputnik** se trataba de una serie de misiones espaciales ejecutadas por la antigua Unión Soviética a finales de los años 50 y principios de los 60 del siglo pasado. El objetivo de este programa era probar la viabilidad de los satélites artificiales alrededor de la órbita de nuestro planeta. Como curiosidad, señalar que el origen de la palabra *Sputnik* proviene del ruso y significa *satélite* o *compañero de viaje*. Durante este programa se lanzaron al espacio hasta 10 satélites diferentes. Seguidamente se describirán cada uno de

ellos y el impacto que esto tuvo.

Sputnik 111 fue el primer satélite artificial de la historia el cual fue lanzado el 4 de Octubre de 1957. La importancia de este satélite recae en que fue el primer intento sin fallo de poner a orbitar alrededor de nuestro planeta un satélite artificial. Fue lanzado con el lanzador R-7 y este se encargó de analizar señales de radio que utilizaba para conocer la cantidad de electrones en la ionosfera. Estuvo en actividad durante 92 días y en la actualidad se puede visitar en la oficina neoyorkina de las Naciones Unidas.



Figura 11: Sputnik 1

Más tarde, se lanzó el **Sputnik 213** el 3 de Noviembre de 1957. A diferencia del *Sputnik 1*, este portaba un ser vivo en su interior. Aquí viajó la conocida *Perra Laika*, y el objetivo de este lanzamiento era comprobar el efecto que causaba el medio espacial en un ser vivo. Regresó a La Tierra tras 162 días de actividad y en aquel momento se publicó que *Laika* murió al regreso a nuestro planeta. Sin embargo, en 2002 fuentes rusas declararon que el animal había muerto al poco tiempo de ser lanzada a causa del estrés y el sobrecalentamiento del satélite.



Figura 12: Sputnik 2 con Laika en su interior

Fue el 3 de Febrero de 1958 cuando se intento lanzar el siguiente satélite, **Sputnik 3**. Esto quedó en un solo intento ya que fue fallido. Pero más tarde, se consiguió volver a lanzar esta vez ya correctamente. A pesar de que el sistema de grabación falló, transportó instrumentos para explorar la atmósfera superior y el espacio próximo.

Sputnik 4 que fue lanzado el 15 de Mayo de 1960, fue el primer prototipo de nave espacial lanzada desde nuestro planeta y llevaba a bordo un maniquí de un hombre, un sistema de televisión y una cabina de soporte biológico. Pero un fallo en el sistema de guía la reubicó en una órbita más alta a la terrestre. Regresó el 5 de Septiembre de 1962, pero nada más tomar contacto con la atmósfera terrestre se desintegró. Algunas de sus piezas fueron encontradas al norte de los Estados Unidos, en Wisconsin.

Más tarde, el **Sputnik 5** se lanzó el 19 de agosto de 1960 y esta llevaba a bordo a los perros *Belka* y *Strelka* además de 40 ratones y numerosas plantas. La nave solamente permaneció en el espacio un día y todos los seres vivos regresaron con vida.

Sputnik 6 fue enviado al espacio el 1 de Diciembre de 1960 con los perros *Pchelka* y *Mushka* junto a una serie de insectos, animales y plantas, y la cápsula no se consiguió recuperar.

Más tarde, el 4 de Febrero de 1961, **Sputnik 7** fue el primer intento de exploración de Venus. Sin embargo, el sistema de ignición tuvo un fallo y la sonda regresó a la órbita terrestre en lugar de tomar dirección a Venus.

Seguidamente, **Sputnik 8** se envió el 12 de Febrero de 1961 que transportaba la sonda Verena 1. Esta fue la primera nave espacial lanzada para sobrevolar el planeta Venus.

Sputnik 9 fue una de las pruebas que tenían como finalidad precursar los vuelos espaciales tripulados por humanos. Este completó un giro completo alrededor de nuestro planeta y volvió sin ningún problema lo que supuso un gran éxito.

Finalmente el **Sputnik 10**, al igual que el **Sputnik 9**, se trataba de una serie de prue-

bas con naves espaciales diseñadas para tripulación humana. Este portaba un perro, un astronauta ficticio y un sistema de televisión. Al igual que el anterior, se recuperó con éxito.

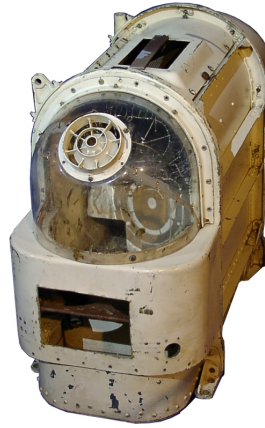


Figura 13: Sputnik 10

2.11. Robots Industriales de General Motors

Por último, como fin a la etapa primeriza de la historia de la robótica vamos a hablar sobre **General Motors**, empresa norteamericana que destaca como fabricante mundial de vehículos. En 1957 se ofrece a esta empresa el conocido como Controlador Digital Modular, que está compuesto por máquinas de estado secuencial y que trabajan con procesadores centrales con desplazamiento de bits, que es el principio de lo que hoy conocemos como sistemas de control automático.

Pero sin duda el hito de *General Motors* fue instalar el primer robot industrial de la historia en sus instalaciones de Trenton, Nueva Jersey, en el año 1960. Este robot era un brazo robótico de 1800 kg de peso y que tenía la función de mover y colocar piezas metálicas de gran tamaño a grandes temperaturas. Señalar que este robot fue comprado a la empresa **Unimation**, que como se ha comentado en apartados anteriores fue la primera empresa robótica de la historia fundada por George Devol y el empresario Joseph F. Engelberger. Es en el 1978 cuando el robot *PUMA*, desarrollado por la empresa de Devol y Engelberger, fue instalado en *General Motors* para realizar tareas de montaje.

2.12. Bibliografía

1. <https://www.ugr.es/~eaznar/heron.htm>
2. <https://www.biografiasyvidas.com/biografia/h/heron.htm>
3. https://es.wikipedia.org/wiki/Herón_de_Aleandr%C3%ADa
4. https://www.nationalgeographic.com.es/historia/grandes-reportajes/inventos-griegos_9395/6
5. <http://www.egiptomania.com/ciencia/puertas.htm>
6. <http://historiaautomatas.blogspot.com/2010/06/grecia-iii-heron-de-alejandria.html>
7. http://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0210-48062007000200001
8. https://es.wikipedia.org/wiki/Filón_de_Bizancio
9. <http://historiaautomatas.blogspot.com/2010/06/grecia-ii-filon-de-bizancio.html>
10. https://books.google.es/books?id=zNlrBAAQBAJ&pg=PT6&lpg=PT6&dq=camarera+automatica+de+filon+de+bizancio&source=bl&ots=_DHNhHwBq8&sig=JQfvYbMnn96LYanHGf-Sjf6gihl=es&sa=X&ved=2ahUKEwj3svmuuPeAhULyIUKHZ-gDTMQ6AEwEnoECAMQAQ#v=onepage&q=camarera%20automatica%20de%20filon%20de%20bizancio&f=false
11. <http://www.neferfisicayquimica.com/2008/10/ell-androide-de-alberto-magno.html>
12. [https://es.wikipedia.org/wiki/Autómata_\(mecánico\)#Alberto_Magno](https://es.wikipedia.org/wiki/Autómata_(mecánico)#Alberto_Magno)
13. <https://hernandopana.weebly.com/sistemas-mecaacutenicos-simples.html>
14. <https://husai-rule.weebly.com/sistemas-mecaacutenicos-simples.html>
15. <https://www.ecured.cu/Pascalina>
16. https://historiaybiografias.com/primer_calculadora/
17. https://es.wikipedia.org/wiki/Industria_textil
18. <https://www.fabricantes-maquinaria-industrial.es/desde-la-primer-revolucion-industri>
19. https://es.wikipedia.org/wiki/Isaac_Asimov
20. https://es.wikipedia.org/wiki/Tres_leyes_de_la_robotica
21. <https://www.biografiasyvidas.com/biografia/a/asimov.htm>
22. <https://hipertextual.com/2017/01/isaac-asimov-robotica>
23. <https://robotsaldetalle.es/noticias/las-tortugas-robot-de-william-grey/>
24. https://es.wikipedia.org/wiki/William_Grey_Walter
25. http://platea.pntic.mec.es/vgonzale/cyr_0204/ctrl_rob/robotica/historia.htm

26. https://en.wikipedia.org/wiki/Raymond_Goertz
27. https://es.wikipedia.org/wiki/Programa_Sputnik
28. https://www.ecured.cu/Programa_Sputnik
29. https://es.wikipedia.org/wiki/Sputnik_1
30. <https://blog-italia.com/actualidad/el-leon-mecanico-de-leonardo-un-curioso-automatismo.html>
31. <https://www.neoteo.com/el-leon-mecanico-de-leonardo-da-vinci-creado-para-el-rey-de-francia>
32. https://es.wikipedia.org/wiki/Leonardo_da_Vinci
33. https://es.wikipedia.org/wiki/Robot_de_Leonardo
34. <https://www.xatakaciencia.com/robotica/el-robot-que-construyo-leonardo-da-vinci>
35. https://www.ecured.cu/George_Devol
36. https://es.wikipedia.org/wiki/George_Devol
37. <https://spectrum.ieee.org/autoton/robotics/industrial-robots/george-devol-a-life-devoted-to-robotics>
38. <https://www.robotics.org/joseph-engelberger/unimate.cfm>
39. https://es.wikipedia.org/wiki/General_Motors
40. https://www.ecured.cu/General_Motors
41. <http://www.autopasion18.com/HISTORIA-GENERAL-MOTORS.htm>

3. Historia Moderna de la Robótica

3.1. Introducción

Acabamos de ver cómo fueron los comienzos de la historia de la robótica desde la época griega hasta los primeros robots industriales de la década de los 60. De aquí en adelante podemos considerar que entramos en la etapa más cercana a nuestros años con un hecho significativo que comenzaremos explicando y marca una diferencia con la etapa previa: la introducción concienzuda de la inteligencia artificial.

Este salto de época viene marcado por la apertura del SRI (Stanford Research Institute) que comienza con la investigación en el campo de la inteligencia artificial tanto en la universidad de Stanford como en la de Edimburgo. Este hecho delimita la historia de la robótica pues es a partir de aquí cuando los investigadores comienzan a dar autonomía e inteligencia a los robots que se pretenden diseñar. Esta herramienta será fundamental en el entendimiento del desarrollo de los robots y las capacidades de los mismos.

Estos avances en la robótica han afectado diversos campos como la medicina, la industria militar, la domótica ... Estos avances sobre todo han sido gracias a la inteligencia artificial y al estudio de la electrónica más avanzada. A continuación veremos el avance histórico reciente de este campo.

3.2. Inicios de la Inteligencia Artificial

3.2.1. SRI

SRI o Stanford Research Institute fue una institución amparada bajo la Universidad de Stanford de propósito general en un inicio. Su fundación fue difícil y no fue hasta el tercer intento cuando se consiguió en el año 1946.

El SRI hizo investigaciones en campos muy variados como la agricultura, el ejército o la contaminación pero no fue hasta 1966 cuando se fundó el Centro de Inteligencia Artificial comenzando a funcionar bajo el mando de Charles Rosen. El primer proyecto realizado por el SRI en Inteligencia Artificial fue el Robot Shakey, el primer robot cuya intención no era sólo moverse, si no razonar. Este robot era capaz de analizar el entorno mediante una cámara y procesaba el lenguaje natural para recibir instrucciones. Desarrollando las habilidades de este robot en el desplazamiento, se consiguió que se moviera por una habitación esquivando los obstáculos que se le imponían en la misma. En el SRI se desarrollaron algoritmos de Visión por Computador tales como filtros y convoluciones para detección de bordes de objetos a ser esquivados y además se desarrollaron algoritmos tan importantes como el A*, el algoritmo por excelencia de cálculo de caminos eficientes.

Shakey fue dado por finalizado en el año 1972, siendo ahora los esfuerzos del SRI dirigidos en la creación de Internet para suceder a ARPANET. La primera conexión que se produjo entre dos ordenadores usando Internet como lo conocemos ahora se produjo en 1977 entre los laboratorios del SRI y la universidad de California UCLA.

Tras estos grandes hitos el SRI se desprendió de la Universidad de Stanford para comenzar su andadura como una empresa, fundándose en ese momento la compañía SRI International, pero la Inteligencia Artificial ya había comenzado.

3.2.2. Laboratorios de IA del MIT

En la misma época el Instituto Tecnológico de Massachusetts o MIT abrió sus laboratorios de Inteligencia Artificial donde surgieron algunas de las figuras más reconocidas en el ámbito de la computación.

El inicio de la investigación en el ámbito de la computación en el MIT comenzó con figuras tan reseñables como Shannon o Vannevar Bush, el ideólogo del analizador diferencial. En sus comienzos el laboratorio no empezó formándose como tal, si no que se creó un proyecto llamado MAC (Man and Computer) en el que estaban figuras tan importantes como John McCarthy el inventor de Lisp. En un principio el proyecto se dirigió intentando abarcar un amplio rango de temas, como son: la visión por computador, el movimiento mecánico y la manipulación de objetos a partir de máquinas y el manejo del lenguaje natural.

De los despachos en los cuales se llevaban a cabo estas investigaciones surgieron otras figuras como Richard Stallman (creador del proyecto GNU) e invenciones como las máquinas Lisp (máquinas que ejecutaban muy eficientemente Lisp).

3.3. Robotics Institute

La Inteligencia Artificial y el desarrollo de la electrónica fue dando paso cada vez con mas fuerza a una nueva rama de la computación: la robótica.

Esta rama es completamente transversal, puesto que aglomera a todos los departamentos relacionados con la computación desde hardware a diseño de software pasando por la visión por computador o la Inteligencia Artificial. Sobre el año 1979 la Universidad Carnegie Mellon en Pittsburgh se dio cuenta del potencial desarrollo de la robótica en un futuro, por lo que decidió abrir un nuevo departamento en la misma que llamó Robotics Institute o Instituto de Robótica, siendo la primera Universidad en tener un departamento dedicado únicamente a la robótica.

Dos robots que podemos destacar de este instituto fueron los vehículos Sandstorm y Highlander dos vehículos completamente autónomos diseñados para realizar un rallye por un desierto llegando entre puntos del mismo sin ninguna intervención humana. Actualmente los avances logrados en la implementación de estos dos vehículos están siendo implementados por las marcas de coches para intentar lograr cada vez una mayor independencia de los conductores de los mismos.

Actualmente el Robotics Institute ya no es sólo un departamento de la Universidad Carnegie Mellon, sino una compañía en si misma con un presupuesto de unos 65 millones de dólares anuales. Algunos de los campos de trabajo en los que se centran son: robots relacionados con la agricultura, robots industriales, robots médicos, robots asistentes y robots relacionados con el transporte de personas y mercancías.

3.4. El primer robot antropomórfico: WABOT

Hasta este momento los robots habían sido proyectos que implementaban funcionalidades concretas tales como moverse, ver, intentar hablar, reemplazar a los humanos en algunas tareas repetitivas, etc.

En la Universidad de Waseda en Japón, se creó el primer robot con forma antropomórfica llamado WABOT 1. Según los integrantes del proyecto, si quisiéramos que un robot nos ayudase como un asistente, sería conveniente que tuviera forma antropomórfica para que nos resultase más familiar, por lo que se plantearon crear un robot asistente inteligente con forma humana. En este proyecto se desarrollaron dos versiones del mismo robot el primero llamado WABOT 1 y tras este crearon WABOT 2.

WABOT 1 fue creado entre los años 1970 y 1973 siendo el primer robot antropomórfico del mundo. El robot tenía control de sus brazos, incorporaba un sistema de visión y análisis del entorno y un sistema conversacional. Éste era capaz de medir su posición con respecto a objetos de la sala y medir las distancias hasta ellos. Además era capaz de andar y coger objetos. En aquel momento, al ser el robot capaz de hablar, se le realizó un test psicológico obteniendo como resultado que WABOT 1 se podría equiparar a un niño de un año de edad.

Tras el éxito del proyecto el grupo de investigación pensó en desarrollar una nueva versión que llamaron WABOT 2 entre los años 1980 y 1984. Esta versión se convirtió en algo mucho menos útil y versátil que WABOT 1, ya que fue diseñado únicamente con el objetivo de que fuera capaz de tocar el piano. Según los propios investigadores esto era interesante pues las artes requieren pensar como un humano y destreza en el movimiento.

Estos dos robots sentaron un precedente abriendo el campo de los robots antropomórficos, los cuales analizaremos en etapas posteriores más cercanas a nuestra época.

3.5. Brazos Robóticos

3.5.1. Stanford Arm

Los brazos robóticos han sido un gran pilar en el desarrollo de la tecnología por su gran utilidad. Actualmente rara es la fábrica que no emplea brazos robóticos para hacer la producción mucho más ágil e incluso segura para los operadores de la misma. Este camino fue iniciado en el año 1969 en la Universidad de Stanford por Victor Scheinman.

El primer brazo robótico fue desarrollado bajo el proyecto Hand-Eye en los laboratorios de Inteligencia Artificial de la Universidad de Stanford. El Stanford Arm fue diseñado tras los intentos de hacer brazos operables mediante un humano desempeñados en dicha Universidad. Los intentos precedentes incluían modificaciones de brazos ortopédicos e incluso un modelo hidráulico que resultaba muy peligroso por la rapidez de sus movimientos. El Stanford Arm se creó sin tener una forma antropomórfica y con 6 grados de libertad manipulado de forma completamente eléctrica.

El robot estaba controlado mediante cámaras y elementos parecidos a joysticks gracias a que el brazo llevaba incorporados potenciómetros y sensores que permitían el control del mismo.

3.5.2. T3

Tras los grandes avances del Stanford Arm la compañía Cincinnati Milacron Corp. decidió desarrollar en 1973 el primer brazo robótico pensado para ser incorporado dentro del mercado industrial. El encargado dentro de la compañía de elaborar el diseño del brazo fue Richard Hohn.

Este brazo robótico, al igual que el Stanford Arm fue desarrollado con 6 grados de libertad permitiendo un amplio abanico de movimientos que el brazo podía hacer con bastante precisión.

Este brazo ya no tenía que ser controlado directamente por un humano, si no que implementaba un módulo de decisiones y sensores capaz de saber si había completado una cierta tarea y tenía que realizar algún movimiento, por ejemplo coger un elemento de una cinta de transporte y moverlo.

3.5.3. PUMA

Tras el éxito de los diseños de Victor Scheinman en la Universidad de Stanford, la compañía General Motors se interesó en sus prototipos de brazos robóticos. Ante el incipiente mercado de estos robots las grandes compañías con un gran nivel de fábricas comenzaron a ver una utilidad en estos brazos, por lo que General Motors financió a Scheinman para que desarrollara el brazo robótico PUMA (Programmable Universal Machine for Assembly o Programmable Universal Manipulation Arm).

El brazo se comercializó en tres tamaños distintos con la intención de que unos levantasen más peso que otros. Todos los brazos tenían el mismo diseño y los mismos grados de libertad, por lo que los movimientos posibles eran iguales para todos los modelos. Los ángulos máximos de giro y rotación variaban entre modelos, ya que hay que pensar que estos fueron creados casi *ad hoc* para las compañías. Además los modelos más grandes tenían unos movimientos mucho más lentos debido al peso que tenían que soportar y mover por el diseño tan grande que tenían para la época.

Este modelo fue fabricado por General Motors, Westinghouse Electric Corp., Staubli e incluso la división de robótica de Nokia. Fue un éxito fabricándose únicamente por Nokia unos 1500 brazos robóticos PUMA.

3.5.4. MOGURA

No solo se hicieron brazos robóticos convencionales siguiendo los diseños de Stanford, si no que también surgieron algunos intentos más novedosos como el brazo robótico MOGURA. Este brazo surge como un diseño del profesor Shigeo Hirose, del Instituto Tecnológico de Tokyo. El profesor Hirose estaba estudiando robots que imitaran el comportamiento de animales, como por ejemplo las serpientes, con las que ideó un robot llamado ACMVI que imitaba el comportamiento de las mismas. De las articulaciones que desarrolló para este robot surgió la idea de hacer un brazo con más movilidad aún al que llamó MOGURA entorno al año 1978. Este brazo no tuvo un éxito muy destacable, ya que los diseños anteriores aún funcionaban bien y los siguientes intentos como SCARA cumplieron su función muy notablemente.

3.5.5. SCARA

Un avance muy grande en el ámbito de los brazos robóticos fueron los brazos SCARA (Selective Compliance Assembly Robot Arm o Selective Compliance Articulated Robot Arm). Estos brazos rompían la estructura de los antiguos diseños haciendo que la movilidad de los mismos fuera muy superior con movimientos mucho más rápidos. Estos robots fueron conceptualizados por las compañías Japonesas Sankyo Seiki, Pentel y NEC y fueron elaborados bajo la supervisión de Hiroshi Makino, un profesor de la Universidad de Yamanashi.

El diseño de este tipo de brazos pasaba de un robot que se movía únicamente como los ejes cartesianos, es decir en movimientos rectos muy fijos, a un movimiento muy ágil con ejes paralelos. El brazo SCARA se movía igual que los anteriores cartesianos, es decir, de forma recta con respecto a los ejes X,Y y Z pero además incluía un ángulo de giro en el plano del eje Z de forma que podía rotar las piezas que cogía.

Este tipo de robots son extremadamente útiles en la manipulación entre elementos en líneas de trabajo de fábricas, ya que con ellos se hace muy sencillo transportar objetos entre distintas fases en el proceso de un objeto. Por ejemplo podemos imaginar una línea de trabajo en la que se hacen puertas para vehículos, este robot podría transportar la puerta ya finalizada de la línea de fabricación de puertas, rotarla convenientemente y desplazarla hacia la línea de ensamblaje en el chasis del coche, de forma que movería la puerta él solo y el operario sólo tendría que atornillarla o realizar el ensamblaje que corresponda. Estos robots, gracias al ángulo de giro en el eje Z, pueden servir por ejemplo para atornillar piezas en una placa que se les coloque en la línea de ensamblaje tales como por ejemplo los tornillos que fijan ciertos componentes a la placa base de un móvil u ordenador.

Estos brazos robóticos supusieron un avance muy notable en su creación siendo incluso utilizados actualmente. Hay que tener en cuenta que los brazos robóticos siguen aún en desarrollo y casi a diario obtenemos nuevas mejoras en los mismos, pero estos fueron los que sentaron precedentes en lo que actualmente conocemos y asociamos con brazos robóticos.

3.6. Mejora en la movilidad de los Robots

3.6.1. Introducción

Tras el desarrollo de robots primigenios con funcionalidad concreta pero fija se planteó la posibilidad de integrar movimiento por el terreno en los mismos para poder realizar nuevas tareas u otras de forma más eficiente. En este ámbito se invirtió para lograr avances en esquivar objetos del escenario o en sistemas para andar basados en animales cuadrúpedos o bípedos como nosotros. A continuación analizamos de forma cronológica estos hechos.

3.6.2. RB5X de RB Robot Corporation

Un inicio en la movilidad en los robots fue incorporarles ruedas u orugas como herramientas para su desplazamiento por el suelo. Estos tipos de movimientos eran básicos, tales como hacia delante, hacia atrás o hacia los lados. Un avance en el movimiento inteligente lo protagonizó el Stanford's Cart, el cual fue programado con sensores para desplazarse de una punta a otra de un recinto esquivando los objetos a su paso. Este movimiento inteligente era realizado gracias a un sistema de Visión por Computador que incluía el mismo. Tras esto surgieron nuevos intentos como el RB5X, un robot de pequeñas dimensiones capaz de desplazarse y evitar obstáculos o, en caso de no poder evitarlos, capaz de reconstruir su trayectoria tras impactar con algún objeto.

El robot se ideó de forma multipropósito, puesto que los módulos que integraba eran programables por lo que las empresas tomaron el diseño y lo adecuaron a las tareas que se querían. El robot tuvo variantes tales como asistentes personales a los cuales les podías dar órdenes como recoger el periódico y a través de un brazo robótico que incluía poder interactuar con el medio. Además se le desarrolló una interfaz oral básica para poder darles las órdenes mediante la voz. Además era capaz de aprender de su entorno.

3.6.3. Phony Pony

Tras los intentos de hacer robots que incorporasen ruedas u orugas la Universidad de California del Sur realizó el desarrollo del que se conoce como primer robot cuadrúpedo llamado Phony Pony. El diseño de este robot se realizó en 1968 (anterior a RB5X) por los profesores e investigadores Frank y McGhee.

El robot intentaba imitar las articulaciones de los animales cuadrúpedos que conocemos de forma que lo desarrollaron con dos articulaciones: la cadera y la rodilla. De esta forma el robot podía mover la pierna hacia delante y además flexionarla. La velocidad del movimiento de las patas era extremadamente lenta, ya que al igual que ocurría con el Stanford Arm (contemporáneo a Phony Pony) los elementos eléctricos empleados en el movimiento estaban muy limitados. El Phony Pony era capaz de imitar comportamientos tales como andar, arrastrarse, agacharse o trotar.

El control de este robot se realizaba de forma remota gracias a la tecnología desarrollada ya en esa época. Internamente el robot estaba diseñado mediante patrones de movimiento, de forma que estaba implementado con un autómata finito que tomaba las transiciones del mismo tras recibir la entrada del mando de control.

3.6.4. WAP1

En primer paso que se dió entorno a la idea de realizar un robot bípedo tuvo lugar en 1969 en la Universidad de Waseda en Japón. El robot WAP1 (Waseda's antropomorphic pneumatically-activated pedipulators) fue diseñado por el doctor Ichiro Kato.

El doctor Ichiro Kato trabajaba por aquel momento en el terreno médico y empezó a intentar desarrollar músculos artificiales para poder sustituir músculos defectuosos en sus pacientes. El estudio desarrolló una serie de dispositivos que al hincharse adquirirían las formas que ellos necesitaban para simular el comportamiento de un músculo. Estas investigaciones darían sus frutos plasmándose en el primer robot bípedo creado. Los músculos que permitían el movimiento de WAP1 estaban hechos de goma y se inflaban con actuadores neumáticos. Este primer robot no era capaz más que de andar muy lentamente controlando el flujo de aire que se llevaba hacia las piezas de goma. Estas técnicas hacían que WAP llegara a tardar mucho tiempo en completar un paso, además de que no estaba pensado para andar una distancia dando pasos de forma consecutiva.

En los dos siguientes años el doctor Ichiro Kato mejoró el diseño del WAP1 creado el WAP2 y el WAP3. La segunda versión de estos robots tuvo una mejora en la fuerza que los músculos eran capaces de aplicar sobre la estructura del mismo, pudiendo ahora levantar más peso y tener una estructura más robusta. La última versión fue desarrollada en 1971 y en esta el robot ya era capaz de rotar su movimiento, por lo que ya no tenían que ser movimientos rectos y, además, era capaz de superar pequeños obstáculos tales como ligeras inclinaciones o incluso escaleras de pequeño tamaño. Para poder desarrollar todo esto no sólo fueron necesarios los músculos artificiales del doctor Kato, si no además sus estudios en el control y mejora de la postura con lo que fueron capaces de controlar el centro de gravedad del robot, cosa completamente imprescindible para caminar sobre dos piernas.

3.6.5. WL-9DR

Tras los avances del doctor Ichiro Kato se intentó agilizar el movimiento de estos robots, puesto que el tiempo que había que esperar hasta que el WAP era capaz de avanzar un paso hacía que no fuera práctico su uso, ya que los robots que empleaban ruedas por ejemplo eran mucho más ágiles. Entre los años 1979 y 1980 la Universidad de Waseda desarrolló el WL-9DR bajo la dirección del doctor Kato, al igual que con sus predecesores los WAP.

El funcionamiento de esta máquina también era mediante actuadores hidráulicos que operaban más rápidamente que los diseñados para WAP. Así mismo el control de este robot se hacía mediante un procesador de 16 bit conectado al robot mediante cables. El WL-9DR era capaz de dar un paso en 10 segundos, además de realizar ciclos completos andando, es decir, encadenar pasos para avanzar desde el punto de partida a un punto meta que se le fijaba. La velocidad con la que avanzaba era tan lenta que sus creadores no podían denominar al robot como dinámico, por lo que se le conoce como el primer robot bípedo cuasi-dinámico.

El robot tenía un sistema de pesos que mantenía el equilibrio del mismo como se requiriera, por ejemplo si el robot estaba estático se centraba el punto de apoyo y se mantenía la postura tanto por la gran base rectangular de sus pies como por los pesos centrados. Si se quería dar un paso hacia delante el robot alzaba alguna de las piernas y se cambiaba el centro de los pesos un poco hacia delante, de forma que el robot se inclinara ligeramente para seguir con el siguiente paso. Para poder andar solamente 0.5 metros el robot requería

sobre una docena de pasos llevándole entorno a un minuto completar dicha distancia.

3.6.6. Aquarobot

Tras los robots anteriormente mencionados (que sentaron precedentes en el tema de caminar) se siguieron desarrollando las técnicas que se empleaban en el equilibrio y las partes móviles de los mismos tal y como veremos en las siguientes secciones. Entre estos robots surgieron algunos proyectos que intentaron ir un poco más allá como el Aquarobot cuyo objetivo era ser capaz de andar bajo el agua.

En el instituto de investigaciones de puertos de Japón se pensó en que sería útil que los operarios que tenían que trabajar bajo el agua dispusieran de facilidades para hacer la tarea más rápida y sencilla. Una de los trabajos que más tiempo llevaban en el puerto eran los de inspección bajo el agua para certificar el estado de las estructuras o diagnosticar algún tipo de fallo que se debía solventar. Por ello en el año 1984 se desarrolló la primera versión del Aquarobot, llegando a tener este hasta tres versiones diferentes haciendo mejoras sobre lo ya propuesto.

El diseño básico del robot era una estructura con 6 patas capaz de andar bajo el agua. Los motores que empleaban eran de corriente continua (no neumáticos) colocados en cada una de las patas que iban selladas de forma estanca para impedir la entrada del agua. Además el robot era controlado por un pequeño procesador incluido en el mismo al que se le conectaban cables para comunicarlo con una computadora o un mando de control. El Aquarobot disponía asimismo de una cámara integrada que permitía ver en tiempo real lo que el robot observaba, de forma que los técnicos podían visualizar el estado del puerto sin necesidad de bajar ellos al agua.

Cada pata tenía 3 grados de libertad con los que el robot podía andar y rotar sobre sí mismo. El peso aproximado de este robot era de unos 857 kilogramos en su primera versión y de unos 280 en la tercera. El sistema con el que se manipulaba al robot y los patrones de movimiento que se le definían en su propio procesador estaba programados en C++. El tiempo en el que el robot era capaz de responder a las órdenes que se le daban era de unos 50 milisegundos, gracias a la conexión que se tenía mediante cable.

3.6.7. Honda y el gran avance

La compañía Honda Motors, normalmente conocida por la fabricación de coches, tuvo un papel muy importante en el desarrollo de los robots antropomórficos y bípedos con sus series de robots, desde la serie E experimental, pasando por la P hasta los más que conocidos robots ASIMO que perduran actualmente.

La serie de robots Honda E contó con 7 modelos, desde el 0 hasta el 6 desarrollados entre los años 1986 y 1993. Esta serie experimental comenzó en el mismo punto que el robot WAP, desarrollando un sistema que podía caminar sobre dos piernas. Estos robots, desde la versión 0, mejoraron enormemente los tiempos conseguidos por sus predecesores necesitando, “únicamente”, 5 segundos para dar un paso completo. Este modelo contaba con 6 grados de libertad y con las articulaciones similares a las de una pierna humana, una cadera, la rodilla y el tobillo. En la versión 1 se mejoró la velocidad de movimiento pero se aumentó el peso haciendo que fuera notablemente más grande que su versión anterior, además se le añadió un sistema mucho más complejo de articulaciones que le permitían tener 12 grados de libertad. En las versiones 2,3,4 y 5 se mejoró tanto el peso

como la velocidad al andar, logrando que el robot anduviera de forma autónoma y dinámica llegando a los 4.7 kilómetros por hora. Cabe destacar que el diseño acabó con una cabeza muy grande y un peso de 150 kilogramos (comparados con los 16.5 de la versión 0). En la última versión no se modificó tanto el diseño y la velocidad al andar, si no que se centraron en que el robot fuera capaz de controlar el equilibrio de forma inteligente y fuese capaz de esquivar obstáculos e incluso no andar sobre un suelo liso.

Tras el gran avance que lograron los ingenieros de Honda en cuanto a la capacidad de desplazamientos de la serie E, decidieron tomar todos esos avances y añadir más elementos para que pareciera cada vez más una persona. Tras la serie E vino la P con la intención de tomar lo obtenido de forma experimental en la anterior serie para continuar su camino hacia los robots antropomórficos. Estos robots fueron desarrollados entre los años 1993 y 2000. El primer modelo de la serie P supuso una transición en la cual se le añadieron brazos que, aunque no eran capaces de llevar una carga, le servían al robot para interactuar con el medio con acciones tales como abrir puertas o encender y apagar interruptores. En el modelo P2 Honda quiso marcar un precedente en la historia de la robótica haciendo que se pudiera desplazar andando, subir escaleras, empujar objetos e incluso llevar carga en las manos. El robot fue el primero en el que no se utilizaron cables para la comunicación con el mismo, para lo cual llevaba una batería incluida que permitía que trabajase alrededor de unos 15 minutos. La opinión pública se sorprendió enormemente, ya que este fue el primer robot conocido que tuvo un movimiento muy similar al humano. Tras el segundo modelo honda sacó el P3, cuyo objetivo con respecto a la versión anterior era reducir el peso, cosa que consiguieron ya que se pasó de 210 kilogramos a 130 sin variar las dimensiones del mismo más que en la profundidad del cuerpo del robot. El diseño además adquirió una semejanza mayor aún a los humanos con respecto al P2 y se mejoró la eficiencia de uso en la batería lo que permitió una autonomía de 25 minutos en lugar de los 15 minutos del P2. Por último se sacó el Honda P4, el que fue el último en la serie P de robots. Las dimensiones no variaron con respecto al P3 pero si el peso que se redujo a 80 kilogramos. Además este robot fue el que consiguió un movimiento más completo de la serie P con 34 grados de libertad contando brazos y piernas pero no se profundizó especialmente en esta versión puesto que los robots ASIMO estaban ya en desarrollo y Honda decidió acabar esta serie para dedicar todos sus esfuerzos en la nueva gama de robots.

La serie de robots ASIMO o (Advanced Step in Innovative Mobility) fueron la continuación de la serie P de Honda en cuanto a la creación de un robot humanoide. Los robots ASIMO tuvieron diferentes revisiones, esta vez no divididas en diferentes versiones. La primera versión se sacó a la luz en el año 2000 para después tener nuevas mejoras en los años 2002, 2005, 2007 y 2011. Los ASIMO comenzaron teniendo una altura de 120 centímetros y 54 kilogramos de peso, un gran avance comparando los pesos y alturas con los obtenidos en la serie P que llegaban a pesar 210 kilogramos. ASIMO mejoró en la velocidad en la que andaba pasando de 1.6 kilómetros por hora a 2.7 kilómetros por hora. En sus primeros modelos ASIMO no era capaz de correr pero en el modelo de 2004 la funcionalidad se añadió comenzando a correr a 3 kilómetros por hora hasta los 9 de la versión de 2011. La batería que incorporaban los Honda P fue reutilizada en las primeras versiones de los ASIMO pero ésta cambió a una batería de ión de litio desde el 2004 para llegar a dar una hora completa de batería en uso mixto (andando y corriendo). Además los grados de libertad que obtuvo la versión de 2011 fueron 57, un número muy superior a los 26 del modelo del año 2000 que permitía movimientos no sólo de brazos y piernas si no también movimientos completos de los dedos de la mano con lo que la última versión es capaz de hacer gestos con la misma y movimientos complejos parecidos a los que podemos realizar

con nuestra mano. Además en la última versión se le añadió un sistema de voz con el que las personas nos podemos comunicar con ASIMO para pedirle tareas específicas. En su última versión el robot ASIMO es capaz de reconocer el entorno que le rodea mediante cámaras y sensores de visión incorporados en su casco con los cuales ASIMO no sólo es capaz de interactuar con las personas por voz, si no que también es capaz de analizar los movimientos y comportamientos de las mismas para actuar en función de ello. Además en cuanto a la interfaz oral no sólo responde mediante altavoces para continuar la conversación, si no que además también gesticula para dar una interacción más humana.

Con los robots ASIMO Honda completó una era en cuanto a los movimientos en la robótica al conseguir un movimiento al caminar natural y rápido y una interacción con el medio a través de las manos y brazos muy extensa. Tras esto los robots antropomórficos han seguido avanzando pero todos utilizando en gran medida la senda que Honda marcó con su series E, P y ASIMO.

3.7. iRobot

En el camino de la creación de robots hasta este momento se habían diseñado pensando siempre en su aplicación empresarial o industrial. ASIMO pudo ser el primero en el que la gente se pudiera replantear su utilidad dentro de una casa para cumplir tareas sencillas, pero debido a su alto precio (incluso no fueron comercializados más allá de hacer demostraciones para empresas) no eran accesibles a nadie o casi nadie. En este punto surgió la compañía iRobot Corporation, una compañía fundada por tres ingenieros del MIT: Rodney Brooks, Colin Angle y Helen Greiner quienes venían de trabajar y estudiar en el Laboratorio de Inteligencia Artificial del MIT.

iRobot cambió un poco la perspectiva de las personas al hacer que se incluyeran en casa robots de un precio asequible cuyas aplicaciones reales eran verdaderamente útiles (no como un asistente ASIMO en una casa).

La compañía fue fundada en 1990, época por la cual trabajaban con robots aplicados a la tecnología militar, como fue su robot PackBot usado en las guerra de Iraq y Afghanistan como apoyo a las tropas. El robot era útil puesto que incorporaba un sistema que le permitía superar obstáculos tales como piedras, escaleras, huecos, etc gracias a las orugas con las que se desplazaba. iRobot además no sólo tuvo contratos con la industria militar si no que, además, mantuvo relaciones con la NASA desarrollando robots para ellos también.

Tras los contratos mencionados anteriormente iRobot comenzó su andadura en los robots de ámbito doméstico con robots dedicados a la limpieza y ampliamente conocidos: los Roomba, Braava y Mirra. De aquí los más conocidos son los del modelo Roomba. Este robot actualmente es capaz de barrer y fregar una casa de forma autónoma y aunque nos parezca trivial o de poca relevancia no lo es en absoluto. Estos robots incorporan todo el desarrollo de los mencionados anteriormente, no sólo la capacidad de moverse y limpiar, si no también la capacidad de aprender de su entorno haciendo un mapa de las habitaciones, ser capaz de esquivar obstáculos y recalcular su trayectoria, así como la capacidad de volver al punto de donde partió (su base de carga). Este modelo en concreto es un hito en la historia de la robótica al traer a casa tecnología muy avanzada en cuestión de robótica y domótica a un precio más asequible que los robots diseñados hasta el momento.

3.8. State of Art de la Robótica

Hasta ahora hemos visto cómo la robótica dió sus primeros pasos tras la concepción de los laboratorios de Inteligencia Artificial por todo el mundo, con lo que se produjo un boom en las técnicas y el desarrollo de la robótica. No se le escapará a nadie que actualmente

a la cabeza de la robótica podemos encontrar ciertas secciones o categorías que se están desarrollando por encima del resto ya sea por su utilidad, por lo vistosos que son o por el simple hecho de buscar un desarrollo en dicho campo. Estas categorías podrían ser: los robots usados en el espacio o expediciones espaciales, los robots usados en la industria militar, los robots diseñados mediante la IA para algún tipo de tarea concreta o los robots que imitan cualidades humanas.

A continuación trataremos de discutir el actual estado de los robots en estas categorías.

3.8.1. NASA

Dentro del panorama aeroespacial la agencia que lidera actualmente el desarrollo en la exploración fuera de la Tierra es la NASA. Gracias a esto la agencia espacial estadounidense ha desarrollado un programa de robótica muy amplio y robusto, con robots que van desde la asistencia en viajes espaciales hasta exploración del espacio, telescopios o robots usados en exploraciones planetarias.

Entre los robots diseñados por la NASA no sólo hay robots pensados para la exploración de planetas, también se han ideados robots de asistencia para los astronautas. En este grupo de robots podemos meter a la serie Robonaut con las dos versiones desarrolladas hasta el momento. Esta gama de robots están pensados para la asistencia tanto dentro de la nave espacial como fuera de la misma, por ejemplo en tareas de reparación o acoplamiento de módulos. El primer modelo, el Robonaut 1 o R1 nunca llegó al espacio, si no se que empleó como un primer prototipo para estudio y desarrollo. El robot consistía de un torso con forma humana y con la parte de abajo intercambiable, de esta forma se podía adecuar el mismo para la exploración de planetas o colocarle módulos como el Zero-G Leg, pensado para poder engancharse a las barras exteriores que se le suelen colocar a los módulos, naves y estaciones espaciales para facilitar el desplazamiento de los astronautas por el exterior de las mismas (en esta misma línea la NASA tiene un concepto de robot llamado Spidernaut). De esta manera se demostraba que este robot, si se diseñara de forma adecuada, sería útil en misiones de reparación en el exterior de las naves o de asistencia. En su segunda versión el robot mejoró todas sus capacidades y el diseño se convirtió realmente en algo funcional siendo lanzado en 2011 a la ISS (Estación Espacial Internacional). El primer modelo que se envió a la estación no era capaz de moverse pero sí de llevar cosas y mover sus brazos de forma que era útil para sostener cosas como herramientas o moverlas de un sitio a otro con la rotación del torso. Tras ese paso se enviaron a la ISS piernas y módulos extra al robot de forma que ahora ya es capaz de moverse dentro de la estación y es capaz de ver y analizar su entorno. Por el momento no se ha conseguido presurizar el cuerpo lo suficiente como para poder emplearlo en misiones fuera de la estación. Actualmente esta es la línea de desarrollo del robot tanto para misiones fuera de la estación como para misiones de exploración del espacio profundo.

En este mismo sentido la compañía canadiense MDA, en su aportación a la ISS, diseñó el robot Dextre con una funcionalidad muy parecida a la ideada para Robonaut. El robot consiste de un cuerpo de enormes dimensiones con dos brazos robóticos capaces de moverse muy rápido. El objetivo de este robot es que sea capaz de realizar tareas para las que antes se requería la salida de alguno de los astronautas de la ISS al exterior de la misma. Este hecho se ha conseguido de tal forma que ni siquiera se tiene por qué operar desde la ISS, si no que se puede realizar el manejo del mismo desde la Tierra. De esta forma, tal y como ocurrió en su primera misión, se pueden realizar tareas de mantenimiento sin necesidad de que los miembros de la ISS estén disponibles o incluso aunque estos estén dormidos. El robot tiene un cuerpo que mide unos 3.5 metros de longitus y dos brazos de 3.5 metros cada uno pesando en total más de 1600 kilogramos.

La NASA también tiene robots que aún no han sido empleados en misiones reales pero sí se sigue avanzando en su desarrollo, como es el caso del RASSOR (Regolith Advanced Surface Systems Operations Robot). Este robot está diseñado para operaciones de construcción y alisamiento del terreno, extracción de agua, eliminar el hielo de una zona concreta, retirar arena, etc. El RASSOR actualmente está en fase de pruebas, pero se le espera un buen futuro por su mínimo coste de producción y por la versatilidad del mismo, puesto que sería capaz de trabajar unas 16 horas por día durante muchos años. El robot además, por su diseño, está pensado para superar los obstáculos que se le presenten y para poder corregir su posición incluso si vuelca. Para las tareas que se planean que pueda realizar el robot incorpora dos ruedas como las de una trituradora industrial (una en la parte delantera y otra en la trasera) capaces de ser movidas de forma independiente.

En último lugar en los robots creados por la NASA tenemos el que actualmente es la punta de lanza de la compañía: el Curiosity. Este modelo es un vehículo terrestre con componentes robóticos que aglomera todos los conocimientos obtenidos por la NASA en cuanto a robótica. Este robot pertenece a la serie de los Rovers y actualmente está cumpliendo su misión de exploración de la superficie marciana. El Curiosity fue lanzado hacia Marte en el año 2011 y aterrizó en el año 2012 tras un viaje de unos 8 meses. El robot tiene un complejo sistema de análisis que permite que opere de forma autónoma, ya que en este caso la distancia del operador (la Tierra) y el vehículo es tan grande que llevaría unos 14 minutos mandar una orden desde las oficinas de la NASA y que el Curiosity la recibiera. El robot pesa unos 900 kilogramos, midiendo 2.9 metros de largo, 2.7 metros de ancho y 2.2 metros en altura. En cuanto a capacidad de computación se incorporan chips de IBM diseñados específicamente para el mismo, ya que al estar en Marte y haber tenido que soportar el viaje por el espacio se requiere que todos los dispositivos tales como microprocesadores, memoria RAM y memoria flash vayan convenientemente aisladas de la radiación, pues podrían verse alterados los datos o incluso dejar de funcionar. Para alimentar los sistemas eléctricos, el Curiosity incorpora un generador de energía por radioisótopos con lo que lleva incluido 4.8 kilogramos de dióxido de plutonio 238 que le dan una autonomía mínima de 14 años desde su despliegue. En cuanto a el equipo robótico el Curiosity incorpora un sistema de suspensiones y ruedas pensadas para poder superar fácilmente los obstáculos del terreno marciano tales como roca o arena. Todo el sistema de movilidad del robot está diseñado para que, mediante un sistema complejo de cámaras llamadas Hazcams (Hazard Cameras) se detecte el terreno del rover en un entorno circular de 3 metros a su alrededor de forma que sea capaz de predecir si un obstáculo será o no superable para él. La velocidad del vehículo no es nada elevada siendo su velocidad media 30 metros por hora, pudiendo llegar al pico de 90 metros por hora.

En cuanto al equipamiento técnico para obtener datos de Marte el Curiosity incorpora los siguientes elementos:

1. MastCam (Mast Camera): está compuesta por dos cámaras independientes capaces de sacar fotos true-color y vídeo a 10 fotogramas por segundo. Cada cámara incorpora una memoria de 8 GB capaces de almacenar 5500 imágenes sin compresión.
2. ChemCam (Chemistry and Camera complex): este sistema de cámaras incorpora un sistema de análisis por rayos X, espectrómetros y cámaras que analizan muestras del suelo marciano para obtener su composición.
3. SAM (Sample Analysis at Mars): el objetivo de este módulo es analizar compuestos orgánicos y gases tanto de la atmósfera como de muestras sólidas. Incorpora un espectrómetro de masas, un cromatógrafo de gases y un espectrómetro laser.

4. DRT (Dust Removal Tool): esta herramienta sirve al robot para limpiar el polvo de las rocas o terreno sobre el que se quiere obtener una muestra.
5. RAD (Radiation assessor detector): esta herramienta fue diseñada para medir la radiación a la que se expone una nave en un viaje interplanetario con la intención de saber qué requisitos deben tener las naves espaciales para poder llevar personas en distancias tan largas. Además, actualmente, este módulo se está usando para saber los niveles de la radiación en el propio planeta.
6. DAN (Dynamic Albedo of Neutrons): este tubo de neutrones se utiliza para poder obtener medidas de hidrógeno, agua o hielo en la superficie de Marte.
7. MARDI (Mars Descent Imager): la función que cumplió este módulo fue tomar un buen número de imágenes durante el aterrizaje para poder hacer un mapeado del terreno alrededor del Curiosity, de forma que se tuviera una información de qué terreno rodeaba al robot y localizar su posición de aterrizaje.
8. Brazo robótico: el Curiosity incorpora un único brazo robótico de 2.1 metros de largo y 30 kilogramos de peso. El brazo sirve al robot para poder tomar las muestras y mover elementos como por ejemplo pinzas para tomar muestras, un taladro de pequeñas dimensiones para tomar muestras sólidas, el DRT, etc.

Estos avances han sido cruciales en el desarrollo de la ciencia y la tecnología tanto por las altas inversiones de dinero que fomentan la investigación como por los experimentos realizados gracias a la tecnología desarrollada por la NASA. Actualmente se siguen liderando propuestas innovadoras tales como Mars 2020 o el reciente proyecto (ya aterrizado en Marte) Mars InSight.

3.8.2. Robots militares

En el ámbito de la industria militar y el equipo empleado en la guerra se ha realizado un avance enorme en el tipo de tecnología que se involucra en la robótica. En esta área no se persiguen interfaces conversacionales complejas ni robots con forma humana (por el momento) si no que está más enfocada en vehículos no tripulados que se manejen por sí solos o teleoperados de forma que la guerra, en su gran mayoría no sea un combate cuerpo a cuerpo para minimizar las pérdidas humanas desde el lado del atacante. En este sentido la robótica comenzó a formar parte desde la Segunda Guerra Mundial y la posterior Guerra Fría, época en la que la inversión en el material militar aumentó considerablemente tanto en Europa en general como en Estados Unidos y Rusia en particular, por lo que estos países jugarán una baza importante en el desarrollo de la tecnología al ser los implicados directamente en los conflictos bélicos.

Actualmente hay muchos robots en desarrollo que serán importantes en un futuro en las misiones a las que se los destine, pero podemos destacar desde un punto de vista de la relevancia y actualidad de los mismos a los siguientes modelos:

1. Daksh de DRDO: este robot no está pensado para el uso directo en el combate atacando objetivos, si no que se ideó con el propósito de que fuese capaz de inutilizar material explosivo antes de que las tropas pasaran por un lugar concreto. El robot funciona mediante baterías y es capaz de operar por él solo levantando objetos y remolcando vehículos para despejar el camino. Además incorpora un mecanismo de desactivación de bombas que consiste en inyectar agua a alta presión para inutilizar el material. Todas estas labores las puede hacer el robot por sí mismo, por lo que

está diseñado para analizar el terreno a su alrededor, ser capaz de esquivar o superar obstáculos y organizar las tareas que debe llevar a cabo para desactivar bombas. A pesar de todo esto, si el equipo de combate necesita operarlo manualmente, incorpora un sistema de comunicación que permite su operación remota.

2. Elbit Hermes 450: este vehículo aéreo entra dentro de la categoría de los llamados UAV (Unmanned Aerial Vehicle). El objetivo de este vehículo es la exploración del terreno y detección de posibles objetivos y peligros. Actualmente muchos países han adquirido este UAV que es capaz de operar durante 17 horas seguidas. El robot tiene un alto grado de independencia de los operadores, puesto que se puede pedir que explore una zona concreta y él lo hará todo autónomamente, aún así también se incorpora un sistema de comunicación por satélite para operarlo manualmente si se requiere. Aunque en un principio se diseñó como vehículo exploratorio, actualmente hay algunos países como Estados Unidos que han incorporado misiles a este UAV, de forma que también se podría emplear en el derribo de objetivos. Dentro de esta misma categoría podríamos meter a los MQ-9 de Estados Unidos cuya misión es la misma que la que cumple el Elbit Hermes 450.
3. Goalkeeper CIWS (Close-in Weapon System): el Goalkeeper es un sistema autónomo de defensa de embarcaciones de corto alcance. El sistema incorpora una metralleta GAU-8 de calibre 30 capaz de, mediante un sistema de reconocimiento de objetivos, fijar la mayor amenaza que tiene el barco y comenzar el ataque hacia la misma. Este propósito es resuelto mediante dos radares con los que se pueden obtener los objetivos a atacar, calcular la distancia y posición de los mismos y poder detectar el que él considera mas amenazador. Además el sistema es capaz de detectar la velocidad a la que viaja el enemigo y predecir la trayectoria, cosa que es imprescindible para poder acertar en el blanco.
4. Guardium: también se requieren en la industria robots que operen de forma autónoma en el ámbito terrestre en la batalla. Actualmente este modelo ha sido empleado por Israel en la franja de Gaza. El robot puede operar de forma autónoma fijándole objetivos o teleoperado con lo que un militar podría dirigir el robot hacia el objetivo manualmente. El robot va equipado con una armadura externa para resistir los impactos de bala y armamento tanto de supresión del enemigo (no letal) como armamento pesado de guerra. Incorpora cámaras infrarrojas, radares, micrófonos de alta sensibilidad y un conjunto de sensores capaces de detectar de dónde vienen los disparos para poder protegerse. Si el robot entra en modo autónomo analiza sus alrededores y toma decisiones sobre las localizaciones a las que se debe dirigir identificando al enemigo. El robot tiene una autonomía de 103 horas de uso continuado y se suele utilizar en rondas de vigilancia para protección de las personas en zonas de conflicto. Las cámaras no sólo duran las 103 horas comentadas, si no que además incorporan un sistema de emergencia que podrían hacer que las cámaras funcionasen 24 horas extra por si son necesarias en alguna misión de vigilancia.
5. TALON: El TALON es un robot terrestre no tripulado usado en la guerra de Bosnia con la intención de reducir las amenazas por explosivos a las tropas que se desplazan de forma terrestre. El robot está diseñado de forma modular, de esta manera cada país puede adaptarlo mediante la incorporación o retirada de sensores del mismo. El robot está pensado para poder desplazar los elementos de su entorno con la intención de despejar el camino e investigarlo. Para ello tiene una capacidad de carga de 45 kilogramos, una capacidad de tomar 77.11 kilogramos con su pinza, remolcar

340 kilogramos y la capacidad de levantar hasta 9 kilogramos con su brazo. El robot incorpora micrófonos para escuchar su entorno y altavoces para que sirva de elemento de comunicación de ser necesario. Adicionalmente TALON puede incorporar sensores de detección de gases, químicos, radiación, temperatura, GPS y brújula. Si se requiere que el mismo tenga una mayor fuerza y capacidad de carga con su brazo se le puede añadir un eje de rotación mejor que ayudaría a llevar por ejemplo armas de largo alcance. En el terreno de la desactivación de explosivos también pueden incorporarse al mismo sensores de rayos X, una escopeta, herramientas de corte de cables, etc. El robot es operado mediante un portátil y joysticks que controlan tanto el movimiento como el brazo y los elementos añadidos al mismo. Para ello el robot incorpora baterías recargables y un paquete de baterías extra no recargables para casos de emergencia. Además la comunicación se realiza mediante un sistema de cámaras rotatorias, cámaras térmicas y micrófonos de forma que el operador tenga una información muy detallada de lo que rodea al TALON.

6. SGR-A1: Este robot es una ametralladora automática pensada para disparar sin la necesidad de un humano. Este tipo de ametralladoras están pensadas para la defensa continua de una zona conflictiva, actualmente este modelo está siendo empleado en la zona desmilitarizada que une Corea del Norte y Corea del Sur (una de las fronteras más conflictivas del mundo). El proyecto está clasificado por su reciente creación, con lo que no tenemos información muy precisa de su funcionamiento. Lo que si sabemos es que funciona mediante cámaras infrarrojos, cámaras térmicas y cámaras normales para detectar figuras humanas como posibles blancos, la distancia que hay hasta ellas y las posibles coberturas que tiene la misma. Además está pensada para operar tanto de día como de noche. Esta arma tiene dos maneras de disparar: una en la que no se necesita ninguna intervención humana y otra en la que se necesita que reciba un comando de voz para que comience a disparar. La primera de las opciones ha creado un revuelo importante entorno a los derechos humanos y la atribución de las muertes, ya que esta arma está considerada la primera en matar de forma autónoma sin la orden expresa de un operador.

Como podemos ver en el ámbito de la industria militar se han desarrollado enormemente las capacidades de movilidad de los robots tanto aéreamente como de forma terrestre con lo que ello conlleva en los sistemas de cámaras y comunicación con los mismos.

3.8.3. Avances de la IA

Como hemos podido ver la Inteligencia Artificial ha acompañado a todos los modelos que hemos ido viendo a lo largo de la historia moderna de la robótica por lo que, lo presentado en esta sección, no va a estar alejado del resto de los apartados pero sí podemos destacar algunas de las intervenciones de la IA en algunos campos concretos en los que se han logrado grandes avances.

Para analizar estos avances vamos a dividir la sección en diferentes temáticas relacionadas con aplicaciones reales para contextualizarlos:

1. Salud: En el ámbito de la salud se han realizado muchas contribuciones en el tema debido a la complejidad a la hora de abordar la detección de enfermedades. Este hecho no es algo trivial ni mucho menos y, aunque el médico esté muy bien formado y tenga experiencia, no estamos seguros de que éste se confunda en el diagnóstico. Por ello algunas herramientas muy útiles (diseñadas por ejemplo por Microsoft) son las que aprenden sobre las enfermedades para ayudar al médico a reconocerlas y escoger

el tratamiento más efectivo para la misma. En este ámbito podemos destacar las adaptaciones que sufrió el Watson de IBM para aprender sobre las enfermedades y poder contestar a preguntas de los médicos. En el tema sanitario también se están haciendo muchos avances en lograr un sistema robótico que facilite las tareas en el quirófano como por ejemplo un brazo robótico de alta precisión que ayude al cirujano en la misma. Incluso se planea que en un futuro las operaciones se puedan realizar de forma autónoma por robots siendo supervisados por médicos para poder deterlos si cometen algún fallo durante el proceso.

2. Automoción: en el ámbito de la automoción no es difícil imaginar los avances que la Inteligencia Artificial ha logrado con compañías como por ejemplo Tesla, Mercedes o Google. En este sentido tenemos dos objetivos actualmente en el sector: facilitar la conducción y sustituir al piloto. En el primer caso tenemos el ejemplo de compañías como Tesla o Mercedes que han incorporado los sistemas llamados Autopilot en los que el coche es capaz de analizar el entorno con el tráfico y las señales pudiendo operarse por él mismo fijando un destino en el sistema GPS incluido en el propio coche. En este tipo de avances ha sido muy importante el desarrollo de la visión por computador y la detección de señales y vehículos. Además este hecho no es trivial, puesto que en las decisiones que se le piden tomar a la máquina se incluyen dilemas que pertenecen más al ámbito de lo ético y moral que de lo puramente técnico. Por ejemplo, qué sería preferible: ¿atropellar a los tres peatones que están cruzando la calle con el semáforo en rojo o atropellar a un peatón inocente que está en la acera al intentar esquivar a los que cruzan? En el segundo punto, el de la sustitución del conductor, tenemos a compañías como Google o Apple que están liderando proyectos que ya son capaces de operar de forma completamente autónomas y están siendo refinadas. Además este sector se enfrenta a una regulación de los vehículos sin conductor a la que se tendrán que adaptar puesto que de momento, al ser la tecnología muy reciente, los países se encuentran reticentes a dejar a estos coche circular libremente por las ciudades.
3. Economía: actualmente los bancos, bolsas y agentes financieros en general están constantemente haciendo uso de la IA tanto para predecir los movimientos del mercado como para hacer un análisis constante de las operaciones en tiempo real y poder aprender de ellas. No es raro que los bancos quieran obtener información de los usuarios (pues les reporta un gran beneficio a costa de los mismos) y para ello emplean técnicas muy avanzadas de predicción de movimientos financieros y categorización del nivel económico de las personas en función del tipo de operaciones que realizan. También, en este sentido, se están empleando programas que usan la inteligencia artificial para intentar tomar la mejor decisión en cada momento en para realizar inversiones en bolsa o comprar empresas pero este tipo de programas están siendo legislados ya que, por la rapidez de su toma de decisiones, ninguna persona podría competir contra este tipo de programas.
4. Publicidad: en cuanto al tema publicitario las empresas que se encargan de gestionar los anuncios y la atracción de los clientes usan de forma constante los datos que los mismos generan para obtener información relevante para anunciar sus productos. Esto no sólo es aplicable a productos comerciales, si no que por ejemplo podría ser aplicable también a partidos políticos, los cuales podrían estudiar cuál es la mejor forma de hacer “engagement” con sus posibles votantes. En este ámbito del uso de la Inteligencia Artificial debemos de ser cuidadosos pues estamos traspasando la línea de lo que podría considerarse incluso como manipulación.

Hemos visto en estos ejemplos que la IA puede ser de una utilidad enorme para la humanidad por la gran versatilidad que tiene, al poder aplicarse a una variedad enorme de temas, pero tenemos que tener en cuenta que esta herramienta puede llegar a ser un peligro si no se usara de forma correcta. En este ámbito podríamos poner lo que se conoce como Ingeniería Social (un eufemismo de manipulación) en la cual la IA nos podría dar una forma de obtener información de las personas, extraer conocimiento de dicha información y acabar manipulando al sujeto para que, por ejemplo, vote al partido político que nos interese. Debemos de valorar el potencial que tenemos con este tipo de herramientas pero sin despegarnos del hecho de que siempre se pueden utilizar de forma malintencionada.

3.8.4. Robots humanoides

Una de las fantasías y sueños del hombre ha sido el de poder crear un robot que imitara tan fielmente el comportamiento de un humano que nos pasara desapercibido como tal. En este terreno, Turing por ejemplo pensó en un test que delimitaba (o eso pensaba él) la frontera a partir de la cual un robot y una persona son indistinguibles. En este sentido hemos avanzado enormemente con robots como los ya visto tales como los primeros WABOT con forma humana hasta los ASIMO. Entramos ahora en un terreno mucho más avanzado en el que empezamos a hablar de posturas faciales e incluso de sentimientos y estados de ánimo. A continuación vamos a describir los robots que han representado un mayor avance o una mayor innovación en este terreno:

1. Actroid: este robot fue diseñado en la universidad de Osaka y revelado en el año 2003. Hasta ahora, hemos explicado como los robots imitaban la forma de andar y comportarse de las personas, pero si observamos imágenes de los citados hasta el momento veremos que el parecido con los humanos no es para nada sorprendente. Este robot es el primero que mencionamos que realmente supone un salto en apariencia física, ya que es realmente parecido a un humano. El robot intenta no sólo parecerse físicamente, si no que también intenta que los movimientos que realiza sean lo más naturales y parecidos a los que podríamos hacer nosotros. El recubrimiento del robot está hecho de silicona intentando imitar la textura y consistencia de la piel. Además el robot actúa por él solo mediante el reconocimiento del terreno para intentar tener una interacción gestual adecuada con las personas. El punto más pobre de este diseño fue la asistencia por voz, la cual sólo implementaba un módulo de conversaciones sencillas que no permitían llevar una conversación fluida.
2. Wakamaru: en el terreno justo complementario a Actroid había compañías como Mitsubishi Heavy Industries (parte del grupo Mitsubishi) que apostaban no sólo por la creación de robots con un parecido humano razonable, si no también por una interfaz conversacional más completa. Wakamaru fue sacado al mercado en el año 2005 con el propósito de poder interactuar con las personas de forma hablada. Sólo fue programado para reconocer el idioma Japonés siendo capaz de reconocer hasta 10.000 palabras. El robot estaba conectado a Internet para poder responder las consultas del usuario como por ejemplo el tiempo o algún dato que requiriera de búsquedas en Internet. El robot era capaz de desplazarse en superficies sencillas como las que podemos encontrar en una casa (sin incluir escaleras) para lo cual incorpora un sistema de cámaras para detectar el entorno. El robot funciona mediante una batería que le da una autonomía de 2 horas moviéndose él solo hasta su estación de carga cuando su batería está baja. El robot fue ampliamente criticado debido a que su precio rondaba los 15.000 dólares, lo cual es un precio realmente alto para una interfaz conversacional que anda.

Referencias

- [1] ACMVI.
<https://www.computerhistory.org/revolution/artificial-intelligence-robotics/13/293/1280>.
- [2] Aquarobot cyberneticzoo.
<http://cyberneticzoo.com/underwater-robotics/1985-aquarobot-aquatic-walking-robot-japanese/>.
- [3] Archive PUMA.
<https://web.archive.org/web/20080228225812/http://www.roboticonline.com/public/articles/details.c>
- [4] ASIMO.
<https://en.wikipedia.org/wiki/ASIMO>.
- [5] ASIMO honda.
<https://www.honda.mx/asimo/>.
- [6] Brazos robóticos.
https://en.wikipedia.org/wiki/Robotic_arm.
- [7] Carnegie mellon university.
https://en.wikipedia.org/wiki/Carnegie_Mellon_University.
- [8] ComputerHistory t3.
<http://www.computerhistory.org/collections/catalog/102640478>.
- [9] Honda e.
https://en.wikipedia.org/wiki/Honda_E_series.
- [10] Honda p.
https://en.wikipedia.org/wiki/Honda_P_series.
- [11] Honda serie p robotsvoice.
<http://www.robotsvoice.com/honda-p2-and-p3/>.
- [12] Informe del instituto de puertos sobre el aquarobot.
http://www.iaarc.org/publications/fulltext/Field_test_of_Aquatic_walking_robot_for_underwater
- [13] Laboratorios de IA del MIT.
https://en.wikipedia.org/wiki/MIT_Computer_Science_and_Artificial_Intelligence_Laboratory.
- [14] Phony pony.
<http://cyberneticzoo.com/walking-machines/1968-phony-pony-frank-mcghee-american/>.
- [15] PUMA.
https://en.wikipedia.org/wiki/Programmable_Universal_Machine_for_Assembly.
- [16] RB robotics RB5x.
<http://www.rbrobotics.com/Products/RB5X.htm>.
- [17] RB5x.
<https://en.wikipedia.org/wiki/RB5X>.

- [18] RB5x cyberneticzoo.
<http://cyberneticzoo.com/robots/1982-rb5x-the-intelligent-robot-joseph-bosworth-american/>.
- [19] Robotics institute.
https://en.wikipedia.org/wiki/Robotics_Institute.
- [20] Robotics institute.
<https://www.ri.cmu.edu/>.
- [21] SCARA.
<https://en.wikipedia.org/wiki/SCARA>.
- [22] SCARA machinedesign.
<https://www.machinedesign.com/motion-control/difference-between-cartesian-six-axis-and-scara-robots>.
- [23] SCARA toshiba machines robotics.
<http://www.tmrobotics.co.uk/scara-robot-range/>.
- [24] SCARA yamaha.
<https://global.yamaha-motor.com/business/robot/lineup/application/ykxg/index.html>.
- [25] Shigeo hirose.
https://en.wikipedia.org/wiki/Shigeo_Hirose.
- [26] SRI international.
https://en.wikipedia.org/wiki/SRI_International.
- [27] Stanford arm.
<http://infolab.stanford.edu/pub/voy/museum/pictures/display/1-Robot.htm>.
- [28] Stanford cart cyberneticzoo.
<http://cyberneticzoo.com/cyberneticanimals/1960-stanford-cart-american/>.
- [29] T3 anil89cs.
<https://anil89cs.wordpress.com/2009/07/26/cincinnati-milacron-t3-robot-arm/>.
- [30] T3 lakshmimenon.
<https://lakshmimenon.wordpress.com/2009/07/26/cincinnati-milacron-t3-robot-arm/>.
- [31] Timeline robotshop.
<https://www.robotshop.com/media/files/PDF/timeline.pdf>.
- [32] Timeline wikipedia.
<https://en.wikipedia.org/wiki/Robotics#History>.
- [33] Vehículo highlander.
<https://en.wikipedia.org/wiki/Highlander>.
- [34] Vehículo sandstorm.
[https://en.wikipedia.org/wiki/Sandstorm_\(vehicle\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Sandstorm_(vehicle)).
- [35] WABOT.
http://www.humanoid.waseda.ac.jp/booklet/kato_2.html.

- [36] WAP cyberneticzoo.
<http://cyberneticzoo.com/walking-machines/1967-71-waseda-anthropomorphic-pneumatically-activated-pedipulators-ichiro-kato-japanese/>.
- [37] WAP researchgate.
https://www.researchgate.net/figure/Biped-robots-WAP-1-left-and-WL-9DR-right_fig7_258995388.
- [38] WAP waseda.
http://www.humanoid.waseda.ac.jp/booklet/kato_4.html.
- [39] Rami Abielmona. Historia de la robótica de la universidad de ottawa.
<https://www.site.uottawa.ca/~rabielmo/miniCourse06/lecture1.pdf>.
- [40] Wolfram Burgard Antonio Bicchi. *Robotics Research*, volume 1. Springer.
- [41] Atsuo Takanishi Hun-ok Lim. Walking machines. 365(1850):16.
https://www.jstor.org/stable/25190427?read-now=1&seq=2#page_scan_tab_contents.
- [42] Jose A. Tenreiro Machado Manuel F. Silva. A historical perspective of legged robots.
https://www.researchgate.net/publication/258995388_A_Historical_Perspective_of_Legged_Robots
- [43] Bruno Santidrián. Historia de la IA.
<https://bruno-sm.github.io/2018-07-29-historia-de-la-ia/>.