



# BOTBLOQ: Ecosistema integral para el diseño, fabricación y programación de robots DIY

Proyecto Financiado por el Centro de Desarrollo Tecnológico Industrial (CDTI)

*EXPEDIENTE: IDI-20150289*

Cofinanciado por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) a través del Programa Operativo Plurirregional de Crecimiento Inteligente 2014-2020

*ACRÓNIMO DEL PROYECTO: BOTBLOQ*



Centro para el  
Desarrollo  
Tecnológico  
Industrial



UNIÓN EUROPEA  
Fondo Europeo de  
Desarrollo Regional (FEDER)  
*Una manera de hacer Europa*

## ENTREGABLE E.4.1. INFORME DETALLADO DEL ESTADO DEL ARTE.

---

### RESUMEN DEL DOCUMENTO

Descripción de las tecnologías modulares existentes: Análisis de fortalezas y debilidades. Espectro de usuarios.

Análisis de requisitos por parte del espectro de usuarios potenciales.

Definición de funcionalidades que debe aportar la estructura modular desarrollada en el proyecto: Objetivos de los robots objeto de diseño. Alcance del proyecto.

---

5 de febrero de 2016

# Índice

<b>1. Introducción</b>	<b>2</b>
<b>2. Descripción de las tecnologías modulares existentes</b>	<b>2</b>
2.1. Introducción . . . . .	2
2.2. Clasificación Robots Modulares . . . . .	4
2.3. Análisis de los Robots modulares más característicos . . . . .	10
2.3.1. Robots Comerciales . . . . .	14
2.3.2. Robots no comerciales . . . . .	31
2.4. Análisis del Hardware de Control . . . . .	41
2.4.1. Placas de desarrollo específicas en robots . . . . .	41
2.4.2. Placas de Desarrollo genéricas . . . . .	51
<b>3. Análisis de requisitos</b>	<b>54</b>
3.1. Ámbito profesional . . . . .	55
3.1.1. Parámetros de los robots industriales . . . . .	56
3.1.2. Tipos de robots industriales . . . . .	58
3.1.3. Robots industriales colaborativos . . . . .	62
3.2. Ámbito educativo . . . . .	64
3.2.1. Robots con ruedas . . . . .	64
3.2.2. Robots con patas . . . . .	69
3.3. Ámbito investigador . . . . .	72
3.3.1. Robots serpiente . . . . .	73
3.3.2. Robots flexibles . . . . .	74
3.3.3. Robots humanoides realistas . . . . .	74
3.3.4. Robots cuadrúpedos . . . . .	75
<b>4. Definición de funcionalidades</b>	<b>76</b>
<b>5. Anexo I. Placas de desarrollo genéricas</b>	<b>78</b>

## 1. Introducción

En este documento presentamos un extenso estado del arte de la robótica modular.

Primero realizamos una clasificación novedosa de los robots modulares según diferentes aspectos (Sección 2.2). Como resultado hemos clasificado un total de 86 robots modulares, detallando aquellos (tanto comerciales como de investigación) más importantes o relevantes para el proyecto (Sección 2.3).

En la Sección 2.4 analizamos también el hardware de control que podría incorporar nuestra estructura modular, realizando primero un estudio de las placas de control que incluyen ya los robots comerciales y de investigación, y de las placas de control genéricas disponibles en el mercado.

En la Sección 3 hemos estudiado los requisitos que debería cumplir una estructura robótica modular genérica analizando para ello los diferentes tipos de robots existentes, tanto en el ámbito de la robótica de servicio o robótica industrial.

En relación con el estudio anterior, en la Sección 4 enumeramos las funcionalidades que debería incluir la *estructura* modular de un sistema genérico que permitiera emular la mayoría de los robots existentes hoy en día.

## 2. Descripción de las tecnologías modulares existentes

### 2.1. Introducción

Desde principios de los años 90 la robótica modular ha estado en el foco de interés de muchos investigadores. La gran ventaja de este tipo de robots es la adaptabilidad, ya que modificando su estructura pueden abordar distintos problemas. La Figura 1, sacada del trabajo de Sprowitz et al., [38] muestra una tabla resumen de los trabajos más representativos en robótica modular hasta el año 2013. Dicha tabla solo muestra aquellos robots con propósito general, descartando aquellos con propósito específico como los robots serpiente o humanoides.

	Unit affiliation, Country	Reference	Year
1	<b>CEBOT</b> Japan, Science U. of Tokyo	[18,54,55]	1988
2	<b>RMMS</b> USA, CMU	[56,57]	1988
3	<b>PolyPod</b> USA, Stanford, PARC	[58,59]	1993
4	<b>Fractum, Fracta</b> Japan, AIST, MEI, MIT	[60]	1994
5	<b>Metamorphic</b> USA, Johns Hopkins U.	[61]	1994
6	<b>Biomorphs</b> USA, Los Alamos National Laboratory	[62]	1995
7	<b>MARS</b> Japan, Nippondenso Co. Ltd, Nagoya U.	[63]	1995
8	<b>TETROBOT</b> USA, Rensselaer Polytechnic Institute	[64]	1996
9	<b>3-D modular units</b> Japan, AIST, MEI, MIT	[21]	1998
10	<b>Molecule Robot (v1)</b> USA, Dartmouth Robotics Lab.	[50]	1998
11	<b>Self-organizing collective robots, Vertical</b> Japan, Riken, Meiji U.	[65]	1998
12	<b>CONRO</b> USA, USC, ISI	[66,67]	1999
13	<b>ICES Cubes, I-Cube</b> USA, CMU, ICES	[68,69]	1999
14	<b>Miniaturized Self-reconfigurable System</b> Japan, AIST	[70]	1999
15	<b>Reconfigurable Adaptable Micro-robot</b> USA, Michigan State U.	[71]	1999
16	<b>Crystalline Robot</b> USA, Dartmouth College	[72]	2000
17	<b>M-TRAN</b> Japan, TiTech, AIST	[49,33]	2000
18	<b>PolyBot</b> USA, Xerox PARC	[73]	2000
19	<b>Proteo</b> USA, Xerox PARC	[74]	2000
20	<b>Molecule (v2)</b> USA, Dartmouth Robotics Lab.	[51]	2002
21	<b>Pneumatic</b> Japan, TiTech	[75]	2002
22	<b>SMC Rover</b> Japan, TiTech	[76]	2002
23	<b>Telecubes</b> USA, Xerox PARC	[79]	2002
24	<b>M-TRAN II</b> Japan, AIST, TiTech	[48]	2003
25	<b>S-BOT (Swarm-bots)</b> Switzerland, EPFL, IDSIA, Belgium, CENOLI, IRIDIA, Italy, CNR	[17]	2003
26	<b>Atron</b> Denmark, USD	[13,77]	2004
27	<b>Random Parts</b> USA, MIT	[78,11]	2004
28	<b>Stochastic</b> USA, Cornell U.	[10,79]	2004
29	<b>Catom, Programmable matter, Claytronics</b> USA, CMU, Intel Research P.	[80-82]	2005
30	<b>HYDRA, Hydron</b> Switzerland, UnivZ, USD, U. Of Edinburgh England	[83]	2005
31	<b>Programmable Parts</b> USA, U. of Washington	[84]	2005
32	<b>Slimebot</b> Japan, Nagoya U., Tohoku U.	[85,86]	2005
33	<b>Stochastic-3D</b> USA, Lockheed Martin C., Cornell U.	[79]	2005
34	<b>AMAS</b> Japan, TiTech	[87,88]	2006
35	<b>Deformation</b> Denmark, USD	[89]	2006
36	<b>Superbot</b> USA, USC	[14]	2006
37	<b>Y1 Modules</b> Spain, UAM	[90]	2006
38	<b>YaMoR</b> Switzerland, EPFL	[91,15]	2006
39	<b>Amoeba-I</b> Japan, Hokkaido U.	[92]	2007
40	<b>CHOBIE II</b> Japan, TiTech	[93]	2007
41	<b>Miche, Michelangelo</b> USA, MIT	[47]	2007
42	<b>Molecube</b> USA, Cornell U.	[32,94]	2007
43	<b>Molecules open-source</b> USA, Cornell U.	[95,22]	2007
44	<b>Shady 3D</b> USA, MIT	[24,96]	2007
45	<b>TETWalker, ANTS</b> USA, U. of Kansas	[97]	2007
46	<b>Tribolon</b> Switzerland, UnivZ, Denmark, USD	[20]	2007
47	<b>XBot</b> USA, Penn	[98,99]	2007
48	<b>ckBot</b> USA, Penn, FAMU, FSU	[100]	2008
49	<b>Em-cube</b> Republic of Korea, DCS lab	[101]	2008
50	<b>GZ-I Modules</b> Germany, U. of Hamburg, Spain, UAM, China, ZUT	[102]	2008
51	<b>M-TRAN III</b> Japan, AIST, U. of Tsukuba, TiTech	[16]	2008
52	<b>MinDART</b> USA, U. of Minnesota	[103]	2008
53	<b>Morpho</b> USA, Harvard, MIT	[104]	2008
54	<b>Odin</b> Denmark, USD	[8]	2008
55	<b>Symbriion</b> Germany, U. of Stuttgart	[105]	2008
56	<b>Raupi</b> Germany, Ilmenau TU	[106]	2009
57	<b>Roombots</b> Switzerland, EPFL	[107,41]	2009
58	<b>Ubot</b> China, HIT	[108]	2009
59	<b>Actuated Responsive Truss</b> Canada, U. of Toronto	[109]	2010
60	<b>Factory Floor</b> USA, Penn	[110]	2010
61	<b>iMobot</b> USA, U. of California	[111]	2010
62	<b>Kilobot</b> USA, Harvard U.	[112]	2010
63	<b>Modular-Expanding Robots</b> USA, Franklin W. Olin CoE, Harvard U.	[113]	2010
64	<b>Pebbles</b> USA, MIT	[114]	2010
65	<b>Sambot</b> China, Beihang University	[115]	2010
66	<b>Thor modular robot</b> Denmark, USD	[116]	2010
67	<b>Vacubots</b> USA, Cornell U., Denmark, USD	[117]	2010
68	<b>HiTMSR II</b> China, HIT	[118]	2011
70	<b>ModRED</b> USA, UNL, UNO	[119]	2012
71	<b>Smart Blocks</b> France, U. de Franche-Compte, Germany, Ilmenau U. Of Technology	[120]	2012
72	<b>SMORES</b> Australia, U. of South Wales, USA, Penn	[121]	2012

Figura 1: Robots modulares desde 1988 a 2013 [38]

Utilizando como base esa tabla, y ampliándola a robots posteriores a 2013 y otros robots que no corresponden exactamente al concepto de estructura modular (e.g. robots tipo kit como Lego), se ha realizado una clasificación extendida que se presenta en la siguiente sección. Como resultado se ha generado una nueva tabla clasificatoria de los 80 robots modulares más importantes.

Los robots más representativos de dicha clasificación son estudiados en este documento en detalle. Los mecanismos de conexión de los robots modulares son analizados por separado debido a la importancia que tienen estos mecanismos a la hora del desarrollo de una estructura modular

## 2.2. Clasificación Robots Modulares

Se pueden realizar multiples clasificaciones de las diferentes estructuras modulares. En este documento vamos a analizar aquellas clasificaciones que aportan más información al futuro desarrollo del proyecto Botbloq.

- Clasificación comerciales/no comerciales. Una primera clasificación podría definir qué robots han llegado a comercializarse y cuáles no. Por ejemplo, los kits robóticos comerciales más extendidos son los Lego Mindstorms, que provienen del entorno del MIT. Los robots modulares Festo Molecubes [48] (ver figura 2) son también un producto que saltó de la investigación de un grupo de Cornell University a su comercialización. A nivel funcionalidad esta clasificación no aporta nada, pero es muy importante para ver que productos han tenido éxito y pueden ser referencia para la comercialización de Botbloq.



Figura 2: Robots modulares Molecubes de Festo [48]

- Clasificación según la topología. Otra clasificación posible es según la topología. Existen robots modulares, como Polybot, [45], con topología cadena

(chain), conectada en línea o en árbol (ver Figura 3). Existen robots con topología enrejada (lattice) como por ejemplo los robots Cubelets [35]. Con esta topología los módulos se conectan para formar patrones 3D (ver Figura 4). Hay algunos autores que hablan de topologías híbridas o auto-configurables [46] que pueden adquirir estructuras cadena o enrejado. Otros autores [22] consideran este tipo un caso particular de comportamiento de la topología enrejado, como puede verse en la clasificación de la Figura 5.

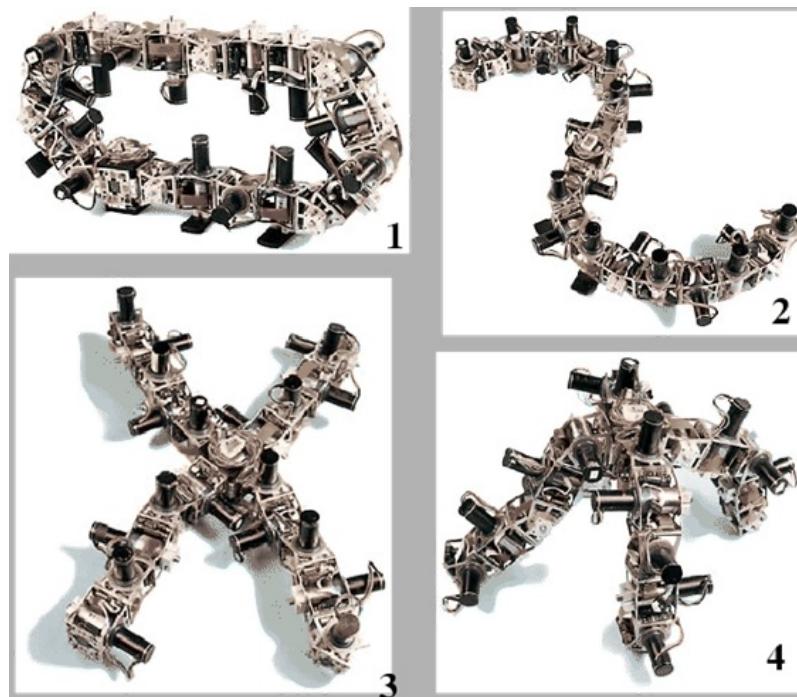


Figura 3: Patrones posibles con una topología cadena



Figura 4: Ejemplo topología enrejada

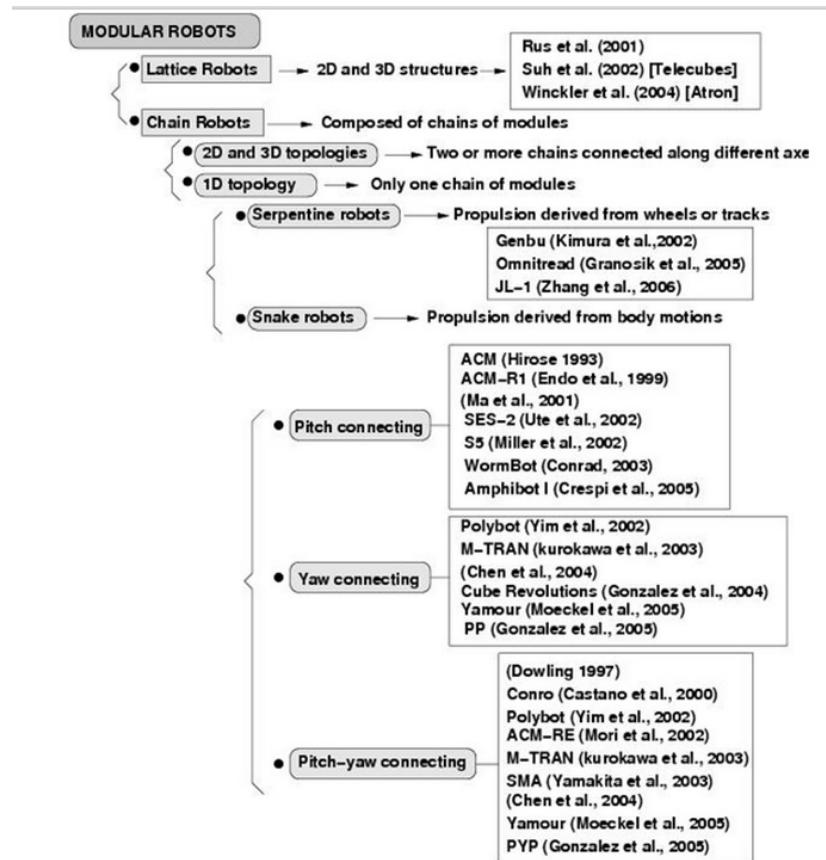


Figura 5: Clasificación de robots modulares según su topología [22]

Esta clasificación es muy útil para determinar que estructuras se necesitan

para construir nuestro “universo” de robots. Es decir, según las configuraciones de robots que abarquemos deberemos utilizar una u otra topología.

- Clasificación por geometría de los módulos. Esta clasificación está ligada estrechamente a la clasificación topológica. En la actualidad los robots modulares suelen estar compuestos por módulos con geometría en L, módulos cúbicos o módulos con geometría complementaria U-H. Un ejemplo es la tecnología ANAT, patentada por Robotics Design Inc. [26], que permite la creación de módulos U y H conectados en cadena. La gran ventaja de este tipo de módulos con respecto a los módulos con geometría en L es que este tipo de módulos soportan mejor las cargas y pares producidos en grandes cadenas al igual que distribuyen mejor la presión y los impactos. Este tipo de clasificación aporta información de cómo deben ser los módulos para la conexión que permita construir diferentes robots.
- Clasificación según la morfología de los bloques. En este proyecto proponemos una nueva división de las estructuras modulares según su diversidad de bloques. Según ello, podríamos dividir en homogéneos o heterogéneos. Más específicamente podríamos dividir en:
  1. Estructuras modulares Homogéneas o atómicas. En estos robots existe un único modulo, que incluye todo como control, batería, motores, sensores. Un ejemplo es el SAMBOT [43] (ver Figura 36)
  2. Estructuras modulares Heterogéneas cerradas. Robots con pocos elementos específicos, como pueden ser motor, unión, batería, controlador. Un ejemplo de robot modular con este tipo de estructuras es el Fable [28](ver Figura 7).
  3. Estructuras modulares Heterogéneas abiertas. Son estructuras con muchos módulos, al estilo de bloques como los robots tipo Lego, Fischer, o los recientes Tinkerbots [9] (ver Figura 8).

Esta clasificación nos aporta importante información a la hora de elegir una estructura adecuada para las ontología planteada en este proyecto. Está claro que la clasificación 3 es la que más se aleja de un concepto de robot modular, pero es necesaria para ubicar la filosofía de los robots Lego, Tinkerbots y otros parecidos en los que también se inspira el proyecto BotBloq.



Figura 6: Robot modular Sambot [43]

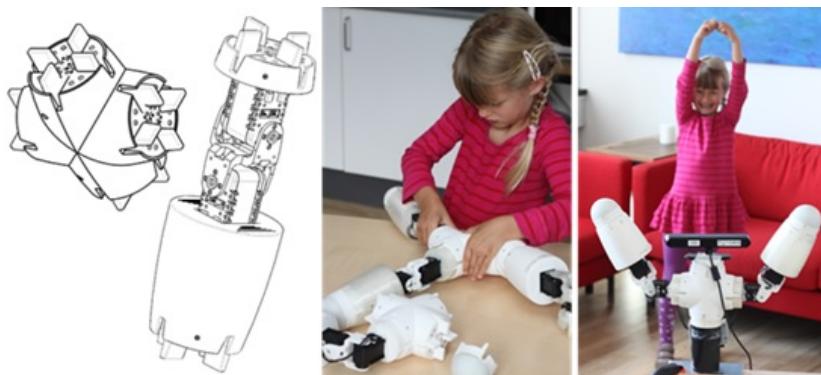


Figura 7: Robot modular Fable [28]

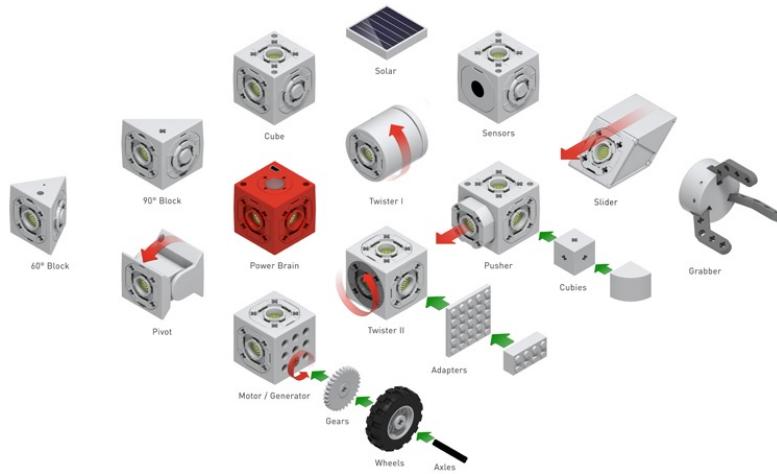


Figura 8: Robot modular Tinkerbot [9]

- Clasificación según el espectro de usuarios. Planteamos una división entre robots Educativos(e.g. Festo [48]), robots utilizados en investigación(e.g Roombot [38]) y robot profesionales(e.g. Schunk [3]) Los robots profesionales como los módulos de Schunk (Figura 9) tienen como objetivo la construcción de robots industriales con morfologías muy específicas (brazos robóticos con varios GDL). Los educativos y los de investigación por el contrario permite construir robots de diferentes morfologías de diferente complejidad. En este sentido, podríamos clasificar también los robots modulares según su complejidad.
  1. Podemos encontrarnos Kits básicos, destinados a los usuarios más jóvenes, aunque también permiten implementar dinámicas de movimiento complejas. En los casos en que es necesaria la programación, el software permite hacerlo de manera intuitiva y fácil, abstrayendo a los usuarios de una codificación compleja, siendo por lo general entornos de programación visuales y orientados a bloques con lógica sencilla. Un ejemplo son los robots de Robotis Ollo [42] y los Moss Cubelets [28].
  2. Kits intermedios, que permite desarrollos mas complicados pero que aun están destinados a estudiantes de primaria o secundaria. Algunos

de estos robots son por ejemplo los Lego Mindstorms, los Fischertechnik Kits, los VEX IQ Kits o el Abilix.

3. Por último los kits avanzados, que ya se utilizan para estudiantes más avanzados, como por ejemplo los VEX Robotics Kits, Multiplo, Robotis Bioloid.



Figura 9: Robot modular Shunk [3]

Se ha ampliado la tabla de la Figura 1 en una nueva (ver composición de Tablas 1, 2 y 3) que incluye la nueva clasificación propuesta en este documento, añadiendo los robots modulares aparecidos desde el año 2013 hasta la fecha de creación de este documento (diciembre 2015).

Los robots más importantes por sus características y similitud a este proyecto son analizados en el apartado siguiente.

### 2.3. Análisis de los Robots modulares más característicos

En esta sección repasamos las características más importantes de los robots modulares que presentan cierta similitud a la filosofía de nuestro proyecto. De las

Tabla 1: Clasificación Extendida de robots Modulares 1/3

<b>Id</b>	<b>Sistema</b>	<b>Autor</b>	<b>Año</b>	<b>AutoConf</b>	<b>Comercial</b>
1	CEBOT	Japan, Science U. of Tokyo	1988	Si	No comercial
2	RMMS	USA, CMU	1988	No	No comercial
3	PolyPod	USA, Stanford, PARC	1993	Si	No comercial
4	Fractron	Japan, AIST, MEL, MIT	1994	Si	No comercial
5	Metamorphic Robot	USA, Johns Hopkins U.	1994	Si	No comercial
6	Biomorphs	USA, Los Alamos National Laboratory	1995	Si	No comercial
7	MARS	Japan, Nippondenso Co. Ltd, Nagoya U.	1995	Si	No comercial
8	TETROBOT	USA, Rensselaer Polytechnic Institute	1996	Si	No comercial
9	3-D modular units (3D Fracta)	Japan, AIST, MEL, MIT	1998	Si	No comercial
10	Molecule Robot (v1)	USA, Dartmouth Robotics Lab.	1998	Si	No comercial
11	Self-organizing collective robots, Vertical	Japan, Riken, Meiji U.	1998	Si	No comercial
12	CONRO	USA, USC, ISI	1998	Si	No comercial
13	PolyBot	USA, Xerox PARC	1998	Si	No comercial
14	TeleCube	USA, Xerox PARC	1998	Si	No comercial
15	Crystalline	USA, Dartmouth College	1999	Si	No comercial
16	ICES Cubes, I-Cube	USA, CMU, ICES	1999	Si	No comercial
17	Miniatrized Self-reconfigurable System	Japan, AIST	1999	Si	No comercial
18	Reconfigurable Adaptable Micro-robot	USA, Michigan State U.	1999	No	No comercial
19	M-TRAN	Japan, TiTech, AIST	2000	Si	No comercial
20	Proteo	USA, Xerox PARC	2000	Si	No comercial
21	Molecule (v2)	USA, Dartmouth Robotics Lab.	2002	Si	No comercial
22	Pneumatic	Japan, TiTech	2002	Si	No comercial
23	SMC Rover (Uni Rover)	Japan, TiTech	2002	Si	No comercial
24	M-TRAN II	Japan, AIST, TiTech	2003	Si	No comercial
25	S-BOT (Swarm-bots)	IRIDIA, Italy, CNR	2003	Si	No comercial
26	Atron	Denmark, USD	2004	Si	No comercial
27	Stochastic	USA, Cornell U.	2004	Si	No comercial
28	Catom, Programmable matter, Claytronics	USA, CMU, Intel Research P.	2005	Si	No comercial
29	Programmable Parts	USA, U. of Washington	2005	Si	No comercial
30	Slimebot	Japan, Nagoya U., Tohoku U.	2005	Si	No comercial
31	Stochastic-3D	USA, Lockheed Martin C., Cornell U.	2005	Si	No comercial
32	AMAS	Japan, TiTech	2006	Si	No comercial
33	Deformatron	Denmark, USD	2006	Si	No comercial
34	Superbot	USA, USC	2006	Si	No comercial
35	Y1 Modules	Spain, UAM	2006	Si	No comercial
36	YaMoR	Switzerland, EPFL	2006	No	No comercial
37	CHOBIE II	Japan, TiTech	2007	Si	No comercial
38	Miche, Michelangelo	USA, MIT	2007	Si	No comercial
39	Molecule	USA, Cornell U.	2007	Si	No comercial
40	Shady 3D	USA, MIT	2007	No	No comercial
41	TETWalker, ANTS	USA, U. of Kansas	2007	No	No comercial
42	Tribolos	Switzerland, UnivZ, Denmark, USD	2007	Si	No comercial
43	XBot	USA, Penn	2007	Si	No comercial
44	ckBot	USA, Penn, FAMU, FSU	2008	Si	No comercial
45	Evoive	Singapore, NUS	2008	Si	No comercial
46	Em-cube	Republic of Korea, DCS lab	2008	Si	No comercial
47	GZ-I Modules	Germany, U. of Hamburg, Spain, UAM, China, ZUT	2008	Si	No comercial
48	The Distributed Flight Array	Switzerland, Zurich ETH	2008	Si	No comercial
49	M-TRAN III	Japan, AIST, U. of Tsukuba, TiTech	2008	Si	No comercial
50	MinDART	USA, U. of Minnesota	2008	Si	No comercial
51	Morpho	USA, Harvard, MIT	2008	Si	No comercial
52	Odin	Denmark, USD	2008	Si	No comercial
53	Symbriion	Germany, U. of Stuttgart	2008	Si	No comercial
54	Raupi	Germany, Ilmenau TU	2009	Si	No comercial
55	Roombots	Switzerland, EPFL	2009	Si	No comercial
56	Ubot	China, HIT	2009	Si	No comercial
57	Programmable Matter by Folding	USA, Harvard, MIT	2010	Si	No comercial
58	Actuated Responsive Truss	Canada, U. of Toronto	2010	No	No comercial
59	Factory Floor	USA, Penn	2010	Si	No comercial
60	iMobot	USA, U. of California	2010	Si	Comercial (Barobo)
61	Kilobots	USA, Harvard U.	2010	Si	Comercial (K-Team)
62	Modular-Expanding Robots	USA, Franklin W. Olin CoE, Harvard U.	2010	Si	No comercial
63	Pebbles	USA, MIT	2010	Si	No comercial
64	Sambot	China, Beihang University	2010	Si	No comercial
65	Thor modular robot	Denmark, USD	2010	Si	No comercial
66	Vacubes	USA, Cornell U., Denmark, USD	2010	Si	No comercial
67	HitMSR II	China, HIT	2011	Si	No comercial
68	The Milli-Motein	USA, MIT	2011	Si	No comercial
69	ModRED	USA, UNL, UNO	2012	Si	No comercial
70	Smart Blocks	France, U. de Franche-Compte, Germany, Ilmenau U. Of Tech.	2012	Si	No comercial
71	SMORES	Australia, U. of South Wales, USA, Penn	2012	Si	No comercial
72	ReBiS - Re-configurable Bipedal Snake	India, VNT	2014	Si	No comercial
73	Tinkerbots	Germany, Kinematics GmbH	Actualidad	No	Comercial
74	EZ- Robot	Canada, EZ-Robot	Actualidad	No	Comercial
75	VEX IQ	USA, VEX	Actualidad	No	Comercial
76	Multiplo	Actualidad	No	Comercial (abierto)	
77	M-Blocks	USA; MIT	Actualidad	Si	No comercial
78	Cubelets	USA, ModRobotics	Actualidad	No	Comercial
79	Moss	USA, ModRobotics	Actualidad	No	Comercial
80	LEGO Mindstorms	LEGO	Actualidad	No	Comercial
81	Fable	Denmark, DTU	2014	No	No comercial
82	Makeblock	China, Makeblock	Actualidad	No	Comercial
83	Robotis OLLO	Corea, Robotis Inc	Actualidad	No	Comercial
84	Abilix	China, Shanghai xPartner Robotics	Actualidad	No	Comercial
85	Hovis	USA, DST Robot Co.	Actualidad	No	Comercial
86	Robotis Bioloid	Korea, ROBOTIS	Actualidad	No	Comercial

Tabla 2: Clasificación Extendida de robots Modulares 2/3

<b>Id</b>	<b>Topología</b>	<b>Geometría</b>	<b>Morfología</b>	<b>Usuario</b>
1	Móvil	Carrito	Heterogéneo cerrado	Investigación
2	Cadena	Doble L (Z)	Heterogéneo cerrado	Investigación
3	Cadena	Cubo y cuña	Homogéneo total (2 versiones)	Investigación
4	Malla		Homogéneo total	Investigación
5	Malla		Homogéneo total	Investigación
6		Variada	Heterogéneo cerrado	Investigación
7	Cadena	Cubo	Homogéneo total	Investigación
8	Cadena	Barra (actuador lineal)	Heterogéneo cerrado	Investigación (NASA)
9	Malla	Cubo (con actuadores)	Heterogéneo cerrado	Investigación
10	Malla	Cubo	Homogéneo total	Investigación (Boeing)
11	Malla	Cubo	Homogéneo total	Investigación
12	Cadena	Rectangular	Homogéneo total	Investigación
13	Cadena	Doble U conectada	Homogéneo total	Investigación
14	Malla	Cubo	Homogéneo total	Investigación
15	Malla	Prisma	Homogéneo total	Investigación
16	Malla	Cubo	Heterogéneo cerrado	Investigación
17	Malla	Cruz	Homogéneo total	Investigación
18	-	Otra	Homogéneo total	Investigación
19	Híbrida	H	Homogéneo total	Investigación
20		Dodecaedro	Homogéneo total	Investigación
21	Malla	Cruceta	Homogéneo total	Investigación
22	Malla			Investigación
23	Mobile		Heterogéneo cerrado	Investigación
24	Híbrida	H	Homogéneo total	Investigación
25	Móvil	Cilindro sobre oruga	Homogéneo total	Investigación
26	Malla	Dos hemisferios	Homogéneo total	Investigación
27	Malla	Cuadrado y triángulo	Homogéneo total (2 versiones)	Investigación
28	Malla	Cilindro y plano	Homogéneo total	Investigación
29	Malla	Triangular	Homogéneo total	Investigación
30	Malla	Hexágono y semiesfera	Homogéneo total	Investigación
31	Malla	Cubo	Homogéneo total	Investigación
32	Malla	Cubo	Homogéneo total (Cubo y brazo)	Investigación
33	Malla	Piezas lego	Homogéneo total	Investigación
34	Híbrida	Doble U conectada	Homogéneo total	Investigación (NASA)
35	Cadena	Doble U conectada	Homogéneo total	Investigación
36	Híbrida	Prisma	Homogéneo total	Investigación
37	Híbrida	Cubo	Homogéneo total	Investigación
38	Malla	Cubo	Homogéneo total	Investigación
39	Híbrida	Cubo	Homogéneo total	Investigación (FESTO)
40	-			Investigación
41	-	Tetraedro		Investigación (NASA)
42	Malla	Quesito acuático	Homogéneo total	Investigación
43	Malla	Cruz	Homogéneo total	Investigación
44	Cadena	U y L7	Homogéneo total (2 versiones)	Investigación
45	Cadena	Doble U conectada	Homogéneo total	Investigación
46	Malla	Cubo	Homogéneo total	Investigación
47	Cadena	Doble U conectada	Homogéneo total	Investigación
48	Malla	Hexagonal (volador)	Homogéneo total	Investigación
49	Híbrida	H	Homogéneo total	Investigación
50			Homogéneo total	Investigación
51	Híbrida		Heterogéneo cerrado	Investigación
52	Híbrida		Heterogéneo cerrado	Investigación
53	Cadena	Cubo (muy pequeño)	Homogéneo total	Investigación
54	Cadena	Cubo	Homogéneo total	Investigación
55	Híbrida	Cubo (ppal)	Heterogéneo cerrado	Investigación
56	Híbrida	L y 7	Homogéneo total	Investigación
57	Lámina	Cuadrado de papel	Homogéneo total	Investigación
58	-	Actuadores	Heterogéneo cerrado	Investigación
59	Constructor	Variada	Heterogéneo cerrado	Investigación
60	Malla	Doble U conectada	Homogéneo total	Investigación
61	Colectivo	Pin	Homogéneo total	Investigación
62		Actuadores	Heterogéneo cerrado	Investigación
63	Híbrida	Cubo (1cm)	Homogéneo total	Investigación
64	Híbrida	Cubo cara extra rotatoria	Homogéneo total	Investigación
65			Heterogéneo cerrado	Investigación
66	Cadena	Cubo	Homogéneo total	Investigación
67	Cadena	L y 7	Homogéneo total (Activo y pasivo)	Investigación
68	Cadena		Homogéneo total	Investigación
69	Cadena	Doble U conectada	Homogéneo total	Investigación (NASA)
70		Cubo (como soporte 2D)	Homogéneo total	Investigación
71	Híbrida	U y 3 ruedas	Homogéneo total	Investigación
72	Cadena	U y 0 girada	Homogéneo total	Investigación
73	-	Cubo	Heterogéneo cerrado (compatible con LEGO)	Educativo
74	-		Heterogéneo cerrado (librería en web)	Educativo
75	-		Heterogéneo abierto	Educativo
76	-		Heterogéneo abierto (librería en web)	Educativo
77	Híbrida	Cubo	Homogéneo cerrado	Investigación
78	-	Cubo	Homogéneo en geometría	Educativo
79	-	Cubo	Heterogéneo cerrado	Educativo
80	-		Heterogéneo abierto	Educativo
81			Heterogéneo cerrado	Investigación
82	-		Heterogéneo abierto	Educativo/Profesional
83	-		Heterogéneo abierto	Educativo
84	-		Heterogéneo abierto	Educativo
85	-		Heterogéneo abierto	Educativo
86	-		Muchas robots (predeterminados)	Educativo

Proyecto Financiado por el Centro de Desarrollo Tecnológico Industrial (CDTI).  
Expediente IDI-20150289

Cofinanciado por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) a través del Programa  
Operativo Plurirregional de Crecimiento Inteligente 2014-2020

Tabla 3: Clasificación Extendida de robots Modulares 3/3

Id	Referencia más relevante
1	<a href="http://www.sciencedirect.com">http://www.sciencedirect.com</a>
2	<a href="http://www.cs.cmu.edu/~paredis/rmms/rmms.html">http://www.cs.cmu.edu/~paredis/rmms/rmms.html</a>
3	<a href="http://robotics.stanford.edu/users/mark/polyopd.html">http://robotics.stanford.edu/users/mark/polyopd.html</a>
4	<a href="https://staff.aist.go.jp/e.yoshida/papers/risp2003.pdf">https://staff.aist.go.jp/e.yoshida/papers/risp2003.pdf</a>
5	<a href="https://rpklcs.jhu.edu/wp-content/uploads/2014/08/Chirikjian94_c.pdf">https://rpklcs.jhu.edu/wp-content/uploads/2014/08/Chirikjian94_c.pdf</a>
6	<a href="http://robotics.cs.tamu.edu/dshell/cs643/papers/hasslacher95living.pdf">robotics.cs.tamu.edu/dshell/cs643/papers/hasslacher95living.pdf</a>
7	<a href="http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&amp;arnumber=525756">http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&amp;arnumber=525756</a>
8	<a href="http://ieeexplore.ieee.org/iel3/4292/12372/00570798.pdf">ieeexplore.ieee.org/iel3/4292/12372/00570798.pdf</a>
9	<a href="http://araa.asn.au/aca/aca2001/Papers/Jantapre.pdf">www.araa.asn.au/aca/aca2001/Papers/Jantapre.pdf</a>
10	<a href="http://groups.csail.mit.edu/dr1/modular_robots/molecule/molecule.html">http://groups.csail.mit.edu/dr1/modular_robots/molecule/molecule.html</a>
11	<a href="http://ci.nii.ac.jp/lognavi?name=nels&amp;lang=en&amp;type=pdf&amp;id=ART0006392390">http://ci.nii.ac.jp/lognavi?name=nels&amp;lang=en&amp;type=pdf&amp;id=ART0006392390</a>
12	<a href="http://www.isi.edu/robots/conro/">http://www.isi.edu/robots/conro/</a>
13	<a href="http://www2.parc.com/spl/projects/modrobots/publications/pdf/icra00.pdf">www2.parc.com/spl/projects/modrobots/publications/pdf/icra00.pdf</a>
14	<a href="http://seas.upenn.edu/modlab/publications/telecubes.pdf">www.seas.upenn.edu/modlab/publications/telecubes.pdf</a>
15	<a href="http://www.cs.dartmouth.edu/reports/TR99-348.pdf">http://www.cs.dartmouth.edu/reports/TR99-348.pdf</a>
16	<a href="http://repository.cmu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1536&amp;content=isr">repository.cmu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1536&amp;content=isr</a>
17	<a href="https://staff.aist.go.jp/e.yoshida/smanit/papers/iros99.pdf">https://staff.aist.go.jp/e.yoshida/smanit/papers/iros99.pdf</a>
18	<a href="http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=816634">http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=816634</a>
19	<a href="https://unit.aist.go.jp/is/frg/dsyl/dsyl/mtran3/">https://unit.aist.go.jp/is/frg/dsyl/dsyl/mtran3/</a>
20	<a href="https://books.google.es/books">https://books.google.es/books</a>
21	<a href="http://groups.csail.mit.edu/dr1/modular_robots/molecule/version2.html">http://groups.csail.mit.edu/dr1/modular_robots/molecule/version2.html</a>
22	<a href="http://www.springer.com">www.springer.com</a>
23	<a href="http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=1195203">http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=1195203</a>
24	<a href="https://unit.aist.go.jp/is/frg/dsyl/mtran3/">https://unit.aist.go.jp/is/frg/dsyl/mtran3/</a>
25	<a href="http://www.swarm-bots.org/index.php?main=3&amp;sub=31&amp;conpage=sbot.html">http://www.swarm-bots.org/index.php?main=3&amp;sub=31&amp;conpage=sbot.html</a>
26	<a href="http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&amp;arnumber=1389702">http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&amp;arnumber=1389702</a>
27	<a href="http://creativemachines.cornell.edu/papers/ICRA04_White.pdf">creativemachines.cornell.edu/papers/ICRA04_White.pdf</a>
28	<a href="http://www.cs.cmu.edu/~claytronics/">http://www.cs.cmu.edu/~claytronics/</a>
29	<a href="http://www.eecs.harvard.edu/~rad/courses/cs266/papers/klavins-iros05.pdf">www.eecs.harvard.edu/~rad/courses/cs266/papers/klavins-iros05.pdf</a>
30	<a href="http://ieeexplore.ieee.org/iel5/10495/33250/01570567.pdf?arnumber=1570567">ieeexplore.ieee.org/iel5/10495/33250/01570567.pdf?arnumber=1570567</a>
31	<a href="http://creativemachines.cornell.edu/sites/default/files/ICRA10-Neubert.pdf">creativemachines.cornell.edu/sites/default/files/ICRA10-Neubert.pdf</a>
32	<a href="http://ijr.sagepub.com/content/27/3-4/445.full.pdf">ijr.sagepub.com/content/27/3-4/445.full.pdf</a>
33	<a href="http://modular.tek.sdu.dk/uploads/publications/stoy_icra06.pdf">http://modular.tek.sdu.dk/uploads/publications/stoy_icra06.pdf</a>
34	<a href="http://www.isi.edu/robots/prl/salemi2006superbot.pdf">http://www.isi.edu/robots/prl/salemi2006superbot.pdf</a>
35	<a href="http://www.ii.uam.es/~ivan/cube-clawar04.pdf">www.ii.uam.es/~ivan/cube-clawar04.pdf</a>
36	<a href="http://infoscience.epfl.ch/record/58536/files/moeckel05.pdf">infoscience.epfl.ch/record/58536/files/moeckel05.pdf</a>
37	<a href="http://fiber.shimshu-u.ac.jp/koseki/publication/2006/IROS2006Chobi.pdf">fiber.shimshu-u.ac.jp/koseki/publication/2006/IROS2006Chobi.pdf</a>
38	<a href="https://groups.csail.mit.edu/dr1/wiki/images/b/b5/Miche-GilpinKotayRus-ICRA07.pdf">https://groups.csail.mit.edu/dr1/wiki/images/b/b5/Miche-GilpinKotayRus-ICRA07.pdf</a>
39	<a href="https://www.festo.com/rep/en_corp/assets/pdf/Molecubes_en.pdf">https://www.festo.com/rep/en_corp/assets/pdf/Molecubes_en.pdf</a>
40	<a href="http://groups.csail.mit.edu/dr1/wiki/images/6/68/ICRA_Yeoreum.pdf">http://groups.csail.mit.edu/dr1/wiki/images/6/68/ICRA_Yeoreum.pdf</a>
41	<a href="http://www.nasa.gov/vision/universe/roboticexplorers/ants.html">http://www.nasa.gov/vision/universe/roboticexplorers/ants.html</a>
42	<a href="http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=4651233">http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=4651233</a>
43	<a href="http://modlabupenn.org/xbot/">http://modlabupenn.org/xbot/</a>
44	<a href="http://modlabupenn.org/ckbot/">http://modlabupenn.org/ckbot/</a>
45	<a href="http://vadakkepat.com/web/content/view/137/339/">http://vadakkepat.com/web/content/view/137/339/</a>
46	<a href="http://www.na2.upc.es/vera/agents/A-2008_icra.pdf">www.na2.upc.es/vera/agents/A-2008_icra.pdf</a>
47	<a href="http://www.icerobotics.com/downloads/papers/AIM_2008-GZ-L.pdf">www.icerobotics.com/downloads/papers/AIM_2008-GZ-L.pdf</a>
48	<a href="http://www.sciencedirect.com">http://www.sciencedirect.com</a>
49	<a href="https://unit.aist.go.jp/is/frg/dsyl/mtran3/">https://unit.aist.go.jp/is/frg/dsyl/mtran3/</a>
50	<a href="http://www.aaai.org/Papers/Workshops/2002//WS-02-18/WS02-18-014.pdf">http://www.aaai.org/Papers/Workshops/2002//WS-02-18/WS02-18-014.pdf</a>
51	<a href="http://www.people.fas.harvard.edu/~chynu/iros_morpho.pdf">www.people.fas.harvard.edu/~chynu/iros_morpho.pdf</a>
52	<a href="http://modular.tek.sdu.dk/uploads/publications/Lyder-iros08.pdf">modular.tek.sdu.dk/uploads/publications/Lyder-iros08.pdf</a>
53	<a href="http://www.vernon.eu/euCognition/NA045-3/PerMIS08_SS1-SKernbach.pdf">www.vernon.eu/euCognition/NA045-3/PerMIS08_SS1-SKernbach.pdf</a>
54	<a href="http://ieeexplore.ieee.org/iel5/4799766/4803907/04803967.pdf?arnumber=4803967">ieeexplore.ieee.org/iel5/4799766/4803907/04803967.pdf?arnumber=4803967</a>
55	<a href="http://biorob.epfl.ch/roombots">http://biorob.epfl.ch/roombots</a>
56	<a href="http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&amp;arnumber=5980293">http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&amp;arnumber=5980293</a>
57	<a href="http://www.piias.org/content/107/28/12441.full.pdf">http://www.piias.org/content/107/28/12441.full.pdf</a>
58	<a href="http://archive-ca.com/page/1348875/2013-02-08/http://www.utra.ca/content/actuated-responsive-truss">http://archive-ca.com/page/1348875/2013-02-08/http://www.utra.ca/content/actuated-responsive-truss</a>
59	<a href="http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&amp;arnumber=5509878">http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&amp;arnumber=5509878</a>
60	<a href="http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=5509959">http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=5509959</a>
61	<a href="http://www.eecs.harvard.edu/ssr/papers/icra12-rubenstein.pdf">www.eecs.harvard.edu/ssr/papers/icra12-rubenstein.pdf</a>
62	<a href="http://www.eecs.harvard.edu/ssr/papers/icra2010-beliske-workshoppaper.pdf">http://www.eecs.harvard.edu/ssr/papers/icra2010-beliske-workshoppaper.pdf</a>
63	<a href="http://cba.mit.edu/docs/papers/10.05.knaian.ICRA.pdf">cba.mit.edu/docs/papers/10.05.knaian.ICRA.pdf</a>
64	<a href="http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&amp;arnumber=5509214">http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&amp;arnumber=5509214</a>
65	<a href="http://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-642-33926-4_62#page-1">http://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-642-33926-4_62#page-1</a>
66	<a href="http://creativemachines.cornell.edu/sites/default/files/ICRA10-workshop-Garcia.pdf">creativemachines.cornell.edu/sites/default/files/ICRA10-workshop-Garcia.pdf</a>
67	<a href="http://www.researchgate.net">http://www.researchgate.net</a>
68	<a href="http://cba.mit.edu/docs/papers/13.10.IROS.pdf">cba.mit.edu/docs/papers/13.10.IROS.pdf</a>
69	<a href="http://ewh.ieee.org/conf/icra/2010/workshops/PlanetaryRovers/13-Dasgupta-ModRED/Abstract_Dasgupta-ModRED.pdf">ewh.ieee.org/conf/icra/2010/workshops/PlanetaryRovers/13-Dasgupta-ModRED/Abstract_Dasgupta-ModRED.pdf</a>
70	<a href="http://femto-st.fr/~guillaume.laurent/papers/Moebees2012toward.pdf">www.femto-st.fr/~guillaume.laurent/papers/Moebees2012toward.pdf</a>
71	<a href="http://modlabupenn.org/wp-content/uploads/SMORES.pdf">http://modlabupenn.org/wp-content/uploads/SMORES.pdf</a>
72	<a href="http://rebis.inobotics.com/2014/08/rebis-robot-design.html">http://rebis.inobotics.com/2014/08/rebis-robot-design.html</a>
73	<a href="http://www.tinkerbots.com/en">http://www.tinkerbots.com/en</a>
74	<a href="https://www.ez-robot.com/">https://www.ez-robot.com/</a>
75	<a href="http://www.vexrobotics.com/vexiq">http://www.vexrobotics.com/vexiq</a>
76	<a href="http://multiplio.org/es">http://multiplio.org/es</a>
77	<a href="http://ppm.csail.mit.edu">ppm.csail.mit.edu</a>
78	<a href="http://www.modrobotics.com/cubelets/">http://www.modrobotics.com/cubelets/</a>
79	<a href="http://www.modrobotics.com/moss/">http://www.modrobotics.com/moss/</a>
80	<a href="http://www.lego.com/en-us/mindstorms/?domainredirect=mindstorms.lego.com">http://www.lego.com/en-us/mindstorms/?domainredirect=mindstorms.lego.com</a>
81	<a href="http://aut.electro.dtu.dk/staff/djchr/publications/Pacheco2013.pdf">aut.electro.dtu.dk/staff/djchr/publications/Pacheco2013.pdf</a>
82	<a href="http://makeblock.com/">http://makeblock.com/</a>
83	<a href="http://www.robotikidslab.es/Nosotros.aspx">http://www.robotikidslab.es/Nosotros.aspx</a>
84	<a href="http://www.aliexpress.com/">http://www.aliexpress.com/</a>
85	<a href="http://www.dongburobot.com/jsp/cms/view.jsp?code=100797">http://www.dongburobot.com/jsp/cms/view.jsp?code=100797</a>
86	<a href="http://www.robots.com/xe/bioloid_en">http://www.robots.com/xe/bioloid_en</a>

posibles clasificaciones expuestas en el apartado anterior hemos querido separar entre robots comerciales y robots no comerciales. En realidad, muchos de los robots comerciales presentados proceden del ámbito de la investigación y su paso a comercialización nos da información sobre el estado y las necesidades del mercado de robots modulares actual. Esta sección es una ampliación del estado de arte presentado en la memoria de la propuesta de proyecto.

### 2.3.1. Robots Comerciales

#### ■ Tinkerbots

Tinkerbots (ver Figura 10) es uno de los robots modulares con más parecido a la filosofía de BotBloq. Es un set de construcción de robots modulares con el objetivo de incentivar los niños a aprender electrónica y robótica jugando. Desarrollado por una empresa de origen alemán con base en Berlin. El proyecto TinkerBots fue financiado por crowdfunding a través de la plataforma indiegogo. Tiene bloques activos correspondientes a motores, sensores controlador además de bloques pasivos con compatibilidad de lego. El bloque principal *powerbrain* es el cerebro del robot. Este bloque contiene una batería de litio, un cargador USB, conectividad bluetooth, altavoz, giróscopo y acelerómetro. Además incluye un puerto serie, a modo de diana, para poder comunicar los diferentes módulos entre si. Los robots Tinkerbots se pueden programar directamente desde el bloque principal guardando los movimientos realizados manualmente por el usuario y luego reproducirlos. También se puede programar desde la tablet o móvil y desde el ordenador con entorno de Arduino. Características:

- Origen: Alemania.
- Precio del Kit: A partir de 135 EUR.
- Entorno de desarrollo: Arduino IDE
- Programación: Processing
- Integración Smartphones: Control Remoto a través de su app para Android.
- Ecosistema: Si.

- Entorno de Diseño CAD: No.
- Preparado para Impresión 3D: No.
- URL: <http://www.tinkerbot.net>
- Kit básico

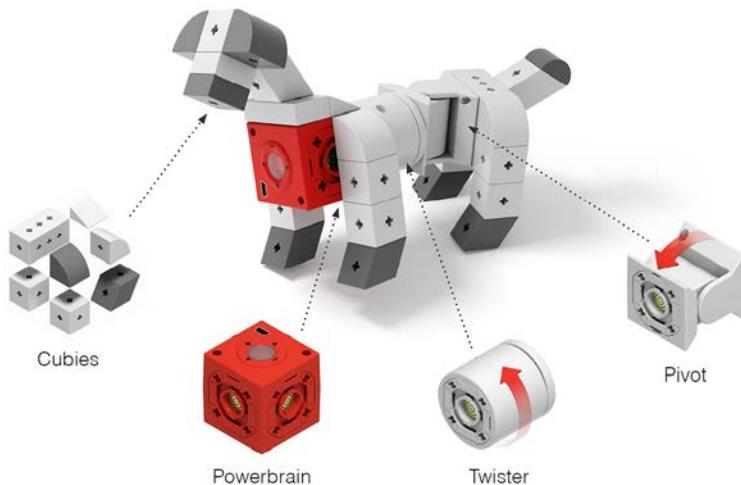


Figura 10: Robot modular Tinkerbots

#### ■ EZ Robots

EZ-Robot (ver Figura 11) es una plataforma de robótica modular pensada para i+d, experimentación y educación en competencias STEM. EZ-Robot tiene a la venta 8 tipos de kits de robots y un kit de desarrollador con el *ez-b v4* y servos para que el usuario cree los robots que quiera con piezas impresas en 3D por lo que también tiene gran relación con nuestra propuesta. La parte más importante de EZ-Robot es el cerebro *ez-b* es potente y compacto, para todos los niveles, desde principiante (para niños) hasta avanzado (para desarrollo). Disponen de servomotores de metal con una fuerza de 15kg/cm. Los robots EZ-Robots se pueden controlar con una aplicación de móvil/tablet, se puede programar con el ordenador y gracias a su cámara pueden aprender de forma visual, interaccionar con objetos, colores, caras, movimiento y leer códigos QR. Su aplicación móvil permite desarrollar aplicaciones para determinados robots y compartirlas por internet. Con la app se puede ver

en streaming lo que graba la cámara del robot. El software para programar con el ordenador se llama EZ-Builder. Dispone de un apartado de diseño 3D de partes del robot para ser impresas. El lenguaje de programación que se utiliza se llama EZ-Script. En la web hay tutoriales para aprender a montar y programar los distintos robots. Los usuarios, además, pueden enviar sus ideas de robots y compartirlas con los demás. Características:

- Origen: Canada.
- Precio del Kit: A partir de 150 EUR.
- Entorno de desarrollo: EZ-Builder
- Programación: EZ-Script
- Integración Smartphones: Control Remoto a través de su app para Android.
- Ecosistema: Si.
- Entorno de Diseño CAD: Si.
- Preparado para Impresión 3D: Si.
- URL: <http://www.ez-robot.com>
- Kit básico

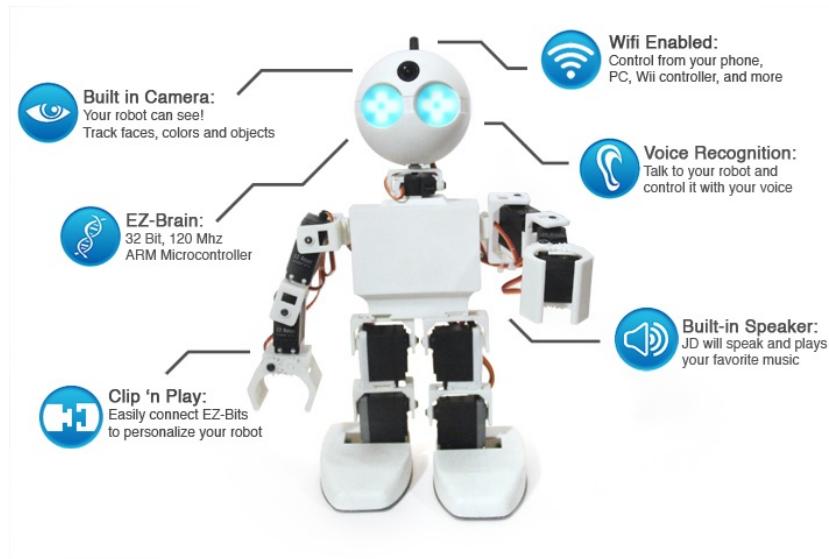


Figura 11: Robot modular Ez-Robot

■ Moss Cubelets

El sistema Cubelets (ver Figura 12) se basa en el principio de que los robots no deberían requerir grandes conocimientos técnicos y de ensamblaje para que estos puedan ser construidos por cualquier persona. El sistema utiliza un tipo de cubos modulares llamados “cubelets” los cuales se conectan fácilmente unos a otros para formar sistemas más complejos. Así por ejemplo sería posible conectar un “cubelet batería” a un “cubelet de distancia” para obtener un robot muy sencillo que se movería de acuerdo a la distancia respecto a un objeto. Este sistema es extremadamente sencillo para introducirse en etapas tempranas del sistema educativo, así como a niños como juguete tecnológico, si bien su precio, la complejidad técnica y la variedad de módulos necesarios la hace poco viable para su adopción masiva en colegios y escuelas de primaria. Características:

- Origen: USA.
- Precio del Kit: A partir de 150 USD.
- Entorno de desarrollo: Plugins para Scratch
- Programación: Lenguaje C. NodeJS. MOSS Software API
- Integración Smartphones: Control Remoto a través de su app para Android.
- Ecosistema: Si.
- Entorno de Diseño CAD: No.
- Preparado para Impresión 3D: No.
- URL: <http://www.modrobotics.com>
- Kit básico

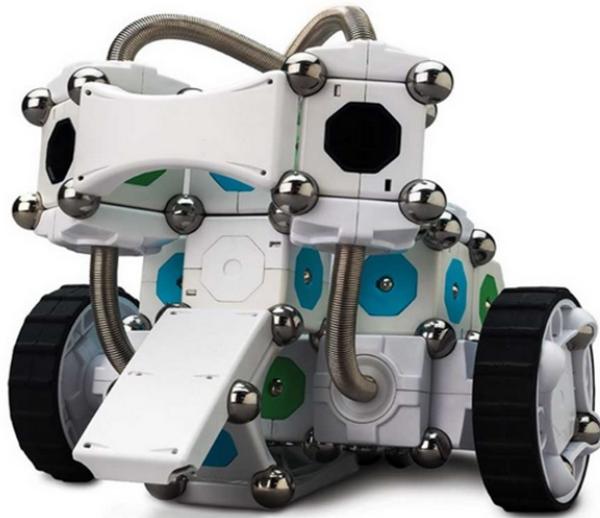


Figura 12: Robot modular Cubelets

■ Robotis OLLO

Los kits de Robotis OLLO (ver Figura 13) son relativamente baratos. Las estructuras de los robots se basan en un sistema modular de piezas de plástico. Los kits se distribuyen con un conjunto mínimo de piezas mientras que los más complejos incluyen un microcontrolador programable, varios motores y sensores. El usuario puede adquirir componentes y piezas por separado. Características:

- Origen: Korea.
- Precio Medio del Kit: A partir de 300 USD.
- Entorno de desarrollo: OpenCM IDE
- Programación: Lenguaje C. SDKs: Dynamixel
- Integración Smartphones: Control Remoto a través de su app para Android.
- Ecosistema: No.
- Entorno de Diseño CAD: No.
- Preparado para Impresión 3D: No.

- URL: [http://www.robotis.com/xe/ollo\\_en](http://www.robotis.com/xe/ollo_en)
- Kit Básico



Figura 13: Robot modular Ollo

■ LEGO Mindstorms

De la colaboración del MIT Media Lab con la danesa LEGO surgió en 1998 la primera versión de LEGO Mindstorms (ver Figura 14), un kit de motores y sensores que, junto con un pequeño ordenador central metido en una pieza ensamblable, permitían el montaje de pequeños robots programables. Lego Mindstorms EV3 es su versión actual. Se recomienda para niños de más de diez años. Se beneficia fundamentalmente del ecosistema de construcción con bloques de la misma marca, que ofrece infinitas posibilidades de diseño de las estructuras. Características:

- Origen: Dinamarca.
- Precio Medio del Kit: A partir de 300 USD.
- Entorno de desarrollo: EV3 LEGO Mindstorms, entorno orientado a bloques. Orientados a código: Visual Studio .NET, Eclipse, LabVIEW o muchos de los entornos que soporten el compilador y herramientas GCC
- Programación: Lenguajes ensamblador, C, C++, Java (lejOS), Ada, .NET (C#, Visual Basic), LabVIEW, Python, Ruby, MATLAB, NQC, NXC y RobotC

- Integración Smartphones: Sí.
- Ecosistema: Sí.
- Entorno de Diseño CAD: No
- Preparado para Impresión 3D: No.
- URL: [www.lego.com](http://www.lego.com)
- Kit dificultad intermedia



Figura 14: Robot modular Lego Mindstorm

#### ■ VEX IQ Kits

VEX Robotics Inc. Ofrece su gama VEX IQ (ver Figura 15) con el que quieren abordar el aprendizaje STEM e iniciar a los jóvenes ya desde una edad muy temprana en el mundo de la robótica. VEX IQ se basa en la experiencia adquirida por la marca durante los últimos años a nivel mundial tanto en proyectos como en competición para presentar un modelo de trabajo ligero capaz de ser manipulado por un público poco experto, pero siempre con la máxima eficiencia que caracteriza a una marca de nivel mundial. En palabras de sus responsables *Hemos utilizado nuestros años de experiencia en robótica*

*educativa en crear una plataforma simple, potente y flexible para estudiantes y profesores.* A diferencia de la mayoría de los kits de construcción modular, los kits robóticos VEX incluyen una amplia selección de componentes modulares de aluminio y piezas de plástico de alta resistencia. Esta combinación le permite construir robots más grandes. Robots VEX son ampliamente utilizados en las escuelas secundarias y universidades debido a su reutilización capacidad , robustez y contenidos educativos. Cada producto VEX tiene una página que describe su función y cómo utilizar como parte del sistema de VEX . El sistema VEX actual utiliza el potente microcontrolador Cortex-TEX", que permite el control remoto, control autónomo o una mezcla de los dos. Hay tres niveles diferentes de software : EasyC proporciona una interfaz gráfica , RobotC está basado en texto , pero incluye muchas funciones fáciles de usar , y MPLab es de nivel superior (el software a menudo se vende por separado de los kits). La línea de productos VEX es el más adecuado para los estudiantes de secundaria y de nivel universitario , y en muchas partes adicionales VEX están disponibles por separado. Características:

- Origen: USA.
- Precio Medio del Kit: A partir de 230 EUR.
- Entorno de desarrollo: ROBOTC for VEX Robotics 4.x (Cortex & VEX IQ), Modkit for VEX, , EasyC, MPLab.
- Programación: RobotC
- Integración Smartphones: No.
- Ecosistema: Sí.
- Entorno de Diseño CAD: VEX Assembler, compatible con AutoDesk 123
- Preparado para Impresión 3D: Sí.
- URL: <http://www.vexrobotics.com/vexiq>
- Kit dificultad intermedia



Figura 15: Robot modular Vex IQ

■ Abilix

El sistema de construcción Abilix (ver Figura 16) es un kit educativo STEM y estudiantes mayores de 12 años. El kit básico incluye una variedad de actuadores , sensores y dispositivos de salida que son fácilmente conectados en el microcontrolador principal. La programación se realiza a través de una interfaz gráfica. Hay instrucciones detalladas para ayudarle a construir una variedad de sistemas robóticos cada vez más complejas. Características:

- Origen: China.
- Precio Medio del Kit: A partir de 600 USD.
- Entorno de desarrollo: VJC (simulación, editor de acciones y programación con fluajogramas)
- Programación: C
- Integración Smartphones: No.
- Ecosistema: No.
- Entorno de Diseño CAD: No
- Preparado para Impresión 3D: No.
- URL: <http://www.abilix.com>

- Kit dificultad intermedia



Figura 16: Robot modular Abilix

- Fischertechnik Kits

Es una plataforma (ver Figura 17) con la que es posible construir modelos robustos y realistas de máquinas, robots, etc. gracias a su amplia colección de piezas y su microcontrolador Fischertechnik Robo TX Controller. Fischertechnik se centra principalmente en la automatización industrial (sistemas de transporte, los brazos robóticos y afines). El enfoque modular significa partes de un kit son directamente compatibles con otros kits, así como otros productos no robóticos Fischertechnik. Su microcontrolador es de 16 bits, y cuenta con entradas y salidas USB, puerto serie y conexiones para sensores y actuadores. Se trata de una excelente plataforma que sin embargo tiene un coste elevado y presenta cierta complejidad de uso. Características:

- Origen: Alemania.
- Precio Medio del Kit: A partir de 300 USD.
- Entorno de desarrollo: ROBO Pro-Software, entorno orientado a bloques.

- Programación: Lenguajes .NET, C/C++ y ensamblador.
- Integración Smartphones: Sí.
- Ecosistema: Sí.
- Entorno de Diseño CAD: No
- Preparado para Impresión 3D: No.
- URL: <http://www.fischertechnik.de/en/>
- Kit dificultad intermedia



Figura 17: Robot modular fishertechnik

■ Multiplo

Múltiplo (ver Figura 18) se anuncia como un "sistema de construcción de alta tecnología" de código abierto. Sus productos electrónicos son compatibles con Arduino y sus archivos de piezas son de libre acceso para descargar lo que no sólo puede crear virtualmente su robot antes de construirlo, sino también sus propias piezas de plástico de encargo compatibles de impresión 3D o máquina. El controlador "DuinoBot" Múltiplo puede interactuar directamente con el software de Arduino y una nueva interfaz de programación gráfica también está disponible. Características:

- Origen: USA.

- Precio Medio del Kit: A partir de 270 USD.
- Entorno de desarrollo: miniBloq, DuinoPack.
- Programación: Arduino
- Integración Smartphones: No.
- Ecosistema: No
- Entorno de Diseño CAD: No
- Preparado para Impresión 3D: Sí.
- URL: <http://www.multiplo.org>
- Kit avanzado



Figura 18: Robot modular multiplo

■ Makeblock

Makeblock (ver Figura 19 ) se basa en el popular microcontrolador Open Source Arduino. Realizado con aluminio reforzado, su exclusivo diseño permite que todas sus piezas puedan ensamblarse de forma muy sencilla. Gran estabilidad debido a su diseño modular de aluminio que permite construir desde robots a impresoras 3D y máquinas CNC. Características:

- Origen: China.

- Precio Medio del Kit: A partir de 270 USD.
- Entorno de desarrollo: Compatibles con Arduino.
- Programación: Arduino.
- Integración Smartphones: No.
- Ecosistema: No.
- Entorno de Diseño CAD: No
- Preparado para Impresión 3D: Sí.
- URL: <http://www.makeblock.cc>
- Kit dificultad avanzada



Figura 19: Robot modular Makeblock

■ Lynxmotion SES Kits

El kit Lynxmotion SES (ver Figura 20) utiliza un sistema de soporte modular de aluminio para crear robots complejos que van desde brazos robóticos hasta complejos robots de múltiples patas. Los robots de Lynxmotion permiten movimientos complejos de 18 y 24 grados de libertad en robots hexápodos. La electrónica se basa en un microcontrolador Arduino personalizado llamado el "BotBoarduino" o un controlador servo dedicado "SSC- 32". El kit de

construcción V1.1 SES permite crear diferentes tipos de robots ( brazo , rastreador 2WD , bípedos , cuadrúpedos y hexápodo) así como otros diseños libres. El kit incluye programas de Arduino , así como FlowBotics Studio. Características:

- Origen: USA.
- Precio Medio del Kit: A partir de 1.000 USD.
- Entorno de desarrollo: Compatibles con Arduino. FlowBotics Studio.
- Programación: Arduino.
- Integración Smartphones: No.
- Ecosistema: Sí.
- Entorno de Diseño CAD: No
- Preparado para Impresión 3D: No.
- URL: <http://www.lynxmotion.com>



Figura 20: Robot modular Lynxmotion

■ Hovis / HerculeX Kits

Los Kits Hovis (ver Figura 21) incorporan piezas modulares de plástico, así como partes con mejor *acabado* a fin de mejorar la estética. Esto significa que se puede optar por comprar un robot de estética modular o uno que incluye adicionalmente unas cubiertas de plástico que mejoran la estética del robot. La mayoría de los kits de construcción Hovis son de tipo *humanoide* e

incluyen servomotores inteligentes HERCULEX (servomotores que incluyen una variedad de sensores a bordo y que utilizan la comunicación en serie en lugar de R/C), varios sensores y un *controlador* principal. Una variedad de piezas adicionales Hovis y HERCULEX están disponibles para diseñar cualquier robot libremente.

- Origen: USA.
- Precio Medio del Kit: A partir de 1.000 USD.
- Entorno de desarrollo: Gostai Studio, DR-sim, DR-Visual Logic
- Programación: URB Script Library, Willow Garage ROS posible, GOSTAi API, C++, JW, MaLab, Python Compatible.
- Integración Smartphones: Sí.
- Ecosistema: Sí.
- Entorno de Diseño CAD: No
- Preparado para Impresión 3D: No.
- URL: <http://www.robotshop.com/en/hovis-eco-plus-humanoid-robot.html>



Figura 21: Robot modular Hovis

■ Robotis Bioloid Kits

Es una plataforma robótica (ver Figura 22) similar a LEGO Mindstorms NXT construida con tecnología inteligente servo-controlada. Está compuesto por un controlador, servomotores, sensores de proximidad y luminosidad frontal y lateral, un micrófono y un pequeño altavoz. El controlador contiene un microcontrolador 16 MHz con 128 KBytes de memoria flash, con puerto serie RS-232, comunicación inalámbrica y botones para su control. Es posible programar el controlador en lenguaje C mediante el compilador GNU GCC WinAVR. Los actuadores tienen un microcontrolador capaz de procesar 50 comandos, la mayoría de los cuales fijan o leen parámetros que definen su comportamiento (posición actual, la corriente consumida, o la variación de la temperatura del servo con la carga aplicada en el mismo), lo que permite control retroalimentado sofisticado controlando el par que soporta cada articulación del robot. Esto tiene aplicaciones por ejemplo en los robots bípedos, ya que sin necesidad de inclinómetros o acelerómetros, se pueden conseguir efectos de equilibrio.

- Origen: Korea.
- Precio Medio del Kit: A partir de 1.200 USD.
- Entorno de desarrollo: RoboPlus
- Programación: Lenguaje C. SDKs: Dynamixel
- Integración Smartphones: Control Remoto a través de su app para Android.
- Ecosistema: No.
- Entorno de Diseño CAD: No
- Preparado para Impresión 3D: No.
- URL: [http://www.robotis.com/xe/bioloid\\_en](http://www.robotis.com/xe/bioloid_en)



Figura 22: Robot modular Bioloid

■ Robobuilder

RoboBuilder (ver Figura 23) está basado en bloques reutilizables, que se caracterizan por ser fáciles de conectar y ensamblar mecánicamente entre sí con múltiples configuraciones y orientaciones. Esta plataforma incluye funcionalidades avanzadas no incluidas en otras plataformas como son: controles PID, detección de objetos, detección de sonido, control remoto por infrarrojos, y comunicaciones Bluetooth y vía serie. Los actuadores de la plataforma proporcionan realimentación de velocidad, posición y par. Cada actuador se puede programar con los límites de estas variables, además, los PID utilizados son totalmente parametrizables. Con un simple comando, los actuadores se pueden conmutar entre control angular (servo) al modo de rotación continua (motor DC), permitiendo ensamblar articulaciones y ruedas con los mismos módulos actuadores. La programación se puede realizar mediante el software proporcionado por RoboBuilder y en programación en C. Este último es el más indicado para los usuarios más avanzados. Características:

- Origen: Korea.

- Precio Medio del Kit: A partir de 500 USD.
- Entorno de desarrollo: Microsoft Robotics Develop Studio
- Programación: C/C++.
- Integración Smartphones: Sí.
- Ecosistema: Sí.
- Entorno de Diseño CAD: No.
- Preparado para Impresión 3D: No.
- URL: <http://rqworld.com/eng/sub/01/01.php>

ROBOBUILDER

RQ HUNO

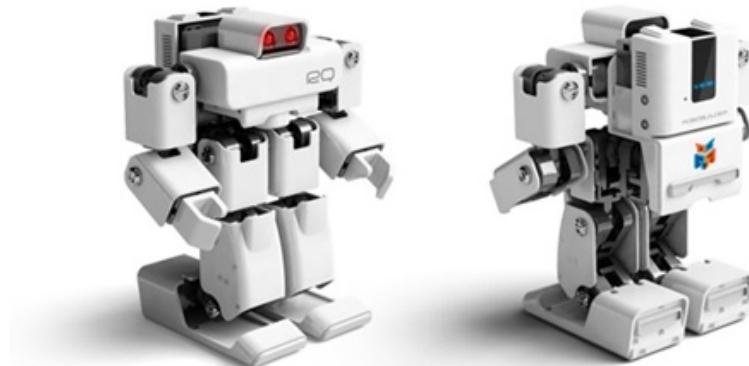


Figura 23: Robot modular Robobuilder

### 2.3.2. Robots no comerciales

Existen multitud de robot no comerciales tal como presentamos en la tablas 1 a 3. A continuación mostramos, de manera resumida, aquellos robots con características más llamativas o interesantes para nuestro proyecto, como pueden ser los mecanismos de unión entre módulos o los métodos de conexión eléctrica para las comunicaciones.

#### ■ Smores [17]

SMORES (Self-assembling MODular Robot for Extreme Shapeshifting) son unos módulos robóticos autoensamblables con cuatro grados de libertad. Han

sido desarrollados en el *Modular Robotics Laboratory* de la Universidad de Pensilvania. Este laboratorio es referente a nivel mundial por el desarrollo de multitud de robos modulares. El diseño de SMORES, ver Figura 24, le permite reordenar sus módulos en las 3 clases de configuraciones: Estilo reticular, tipo cadena y configuración móvil. Los módulos son independientes y son capaces de autoensamblarse con módulos desconectados. Los módulos se fijan unos a otros con imanes y tiene un mecanismo para soltarse, que consiste en un apéndice que sale del centro de cada cara.

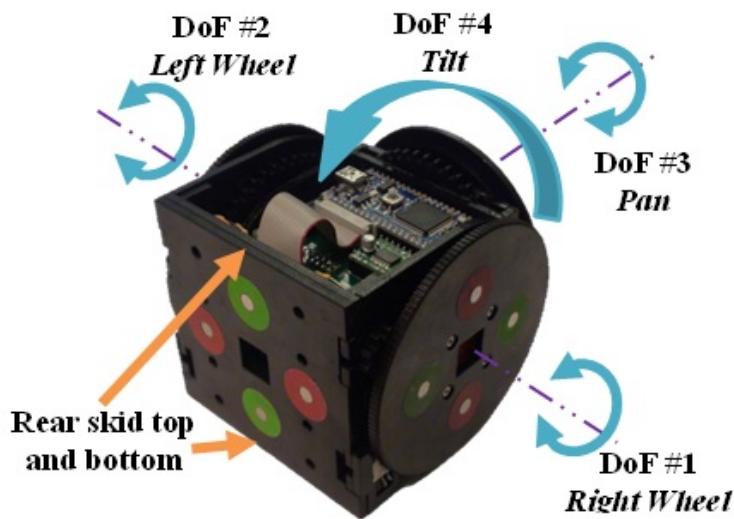


Figura 24: Robot modular Smores

- Self-organizing collective robots [25]

Aunque estos robots datan de finales de los 90, los destacamos por el diseño ingenioso en la forma de conexión entre los diferentes módulos, tal y como se muestra en la Figura 25. Básicamente disponen de un conector mecánico doblemente enlazado que le confiere resistencia en los enganches.

- Polybot [45]

Destacamos estos robots por su método de conexión. En particular, los módulos de Polybot tienen un modo de conexión entre sí mediante pines (tal y como usan otros muchos de los robots clasificados) (ver Figura 26). Para realizar este tipo de conectores hacen falta unas tolerancias muy precisas

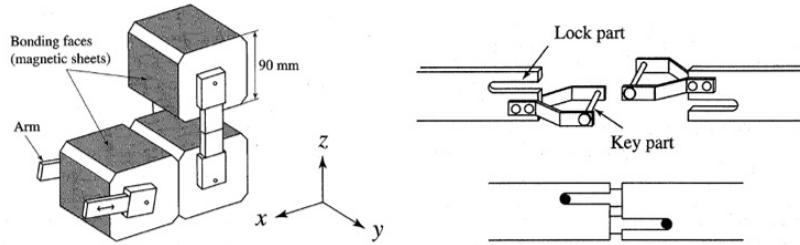


Figura 25: Robot modular en [25]

debido al tamaño de los pines y de los huecos lo que, a nuestro entender, hace de este método no adecuado para robots impresos 3D.

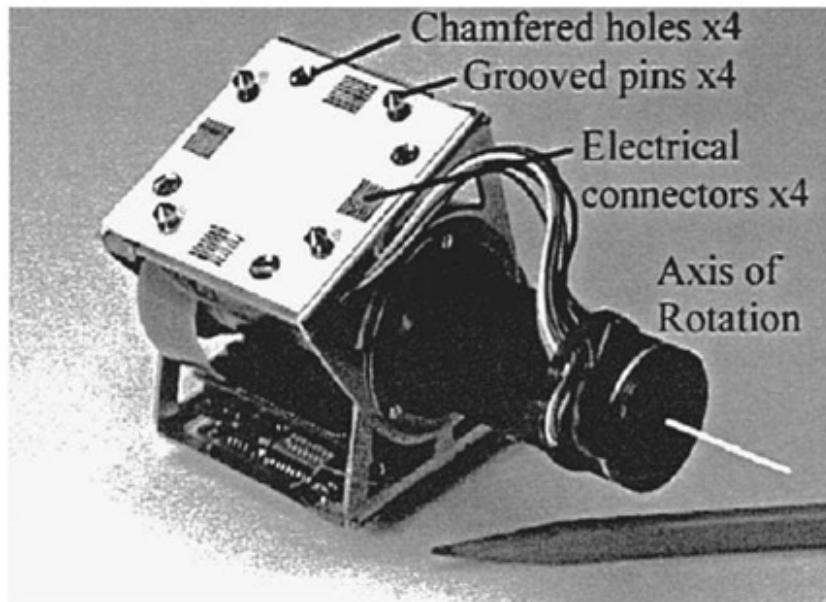


Figura 26: Robot modular Polybot

- ICES cubes [41]

Resaltamos de estos cubos autoensamblables, desarrollados en CMU a principios del 2000, los conectores con forma de cruz y el mecanismo de giro y bloqueo como aparece en la Figura 27. El sistema es parecido a una llave que al girar se bloquea e impide que el mecanismo se suelte.

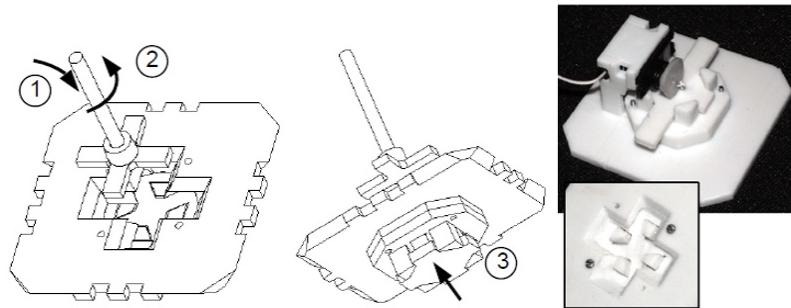


Figura 27: Robot modular ICES-cubes

- Stochastic Robot [44]

De los robots presentados en [44] podemos destacar el modo de conexión entre módulos, parecido a una estructura puzzle, lo que permite tener una gran cantidad de huecos en las caras (ver Figura 28). Este aspecto es interesante para la conexión electrónica.

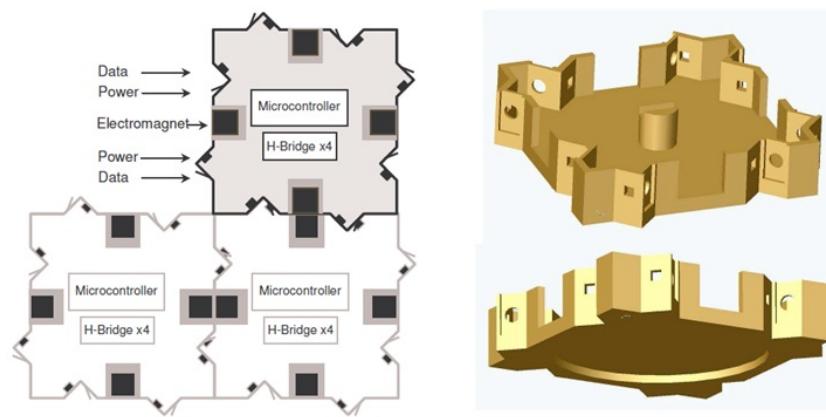


Figura 28: Robot modular en [44]

- Programmable parts [13]

Los módulos presentados en [13] destacan, desde el punto de vista del diseño, por tener una disposición interna con cajones que permite albergar elementos electrónicos (ver Figura 29). La conexión entre módulos se lleva a cabo a través de imanes al igual que muchos otros sistemas modulares ya estudiados.

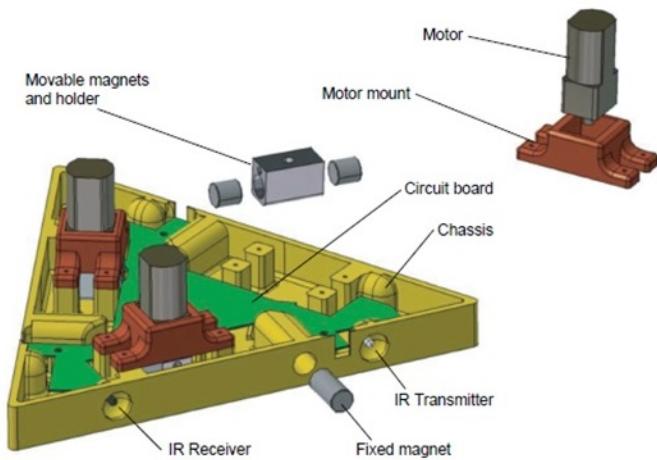


Figura 29: Robot modular en [13]

■ Slimebot [36]

Slimbot quizás sea el único robot de los clasificados en las tablas 1 a 3 que tiene una conexión mediante velcro (ver Figura 30). Aunque es una solución sencilla, y quizás útil en el ámbito de la educación, este tipo de robots no podría realizar tareas que requieran una cierta rigidez en la unión.

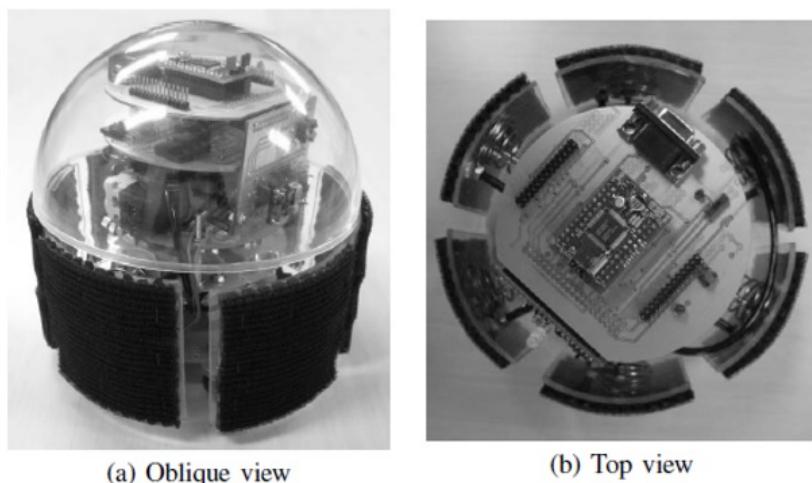


Figura 30: Robot modular Slimebot

- Stochastic-3D [31] Los módulos de estos robots son muy ingeniosos y destacan por su estructura externa, formada por un material tipo gel, que permite realizar uniones entre caras totalmente estancas. Una válvula de vacío impide que las caras se separen una vez en contacto (ver Figura 31) y el gel, por sus propiedades físicas, hace que las caras se fusionen una vez en contacto. La estructura interna de los módulos está realizada por impresión 3D por lo que presenta una buena idea hacia futuras versiones de robots modulares con materiales inteligentes.

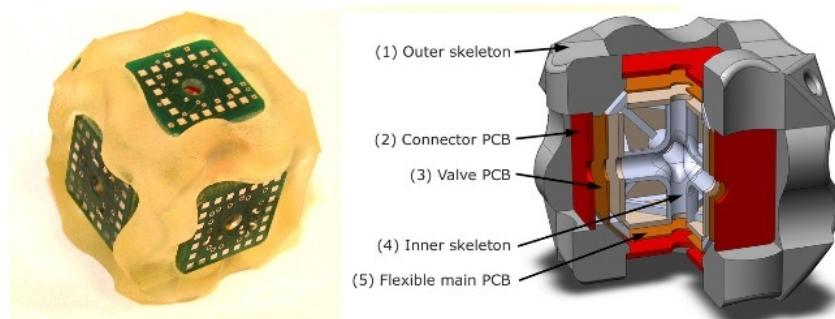


Figura 31: Robot modular en [31]

- AMAS [39]

Estos módulos cúbicos no son utilizados para construir robots sino para construir estructuras fijas de manera automática, pero destacan sobre todo por el mecanismo de conexión (idéntico al que posteriormente se usará en M-Tran III) (ver Figura 32). Es un sistema sencillo pero efectivo en el que un gancho situado en una cara se encaja a la pared de la cara del módulo opuesto cuando estos se presionan entre si.

- Superbot [34]

Superbot (Figura 33) es uno de los robots modulares más citados y combina en un solo módulo el tipo de módulo que tienen M-Tran y CONRO. Esta combinación permite un gran abanico de configuraciones con una estructura homogénea, aspecto muy deseable en nuestro proyecto Botbloq.

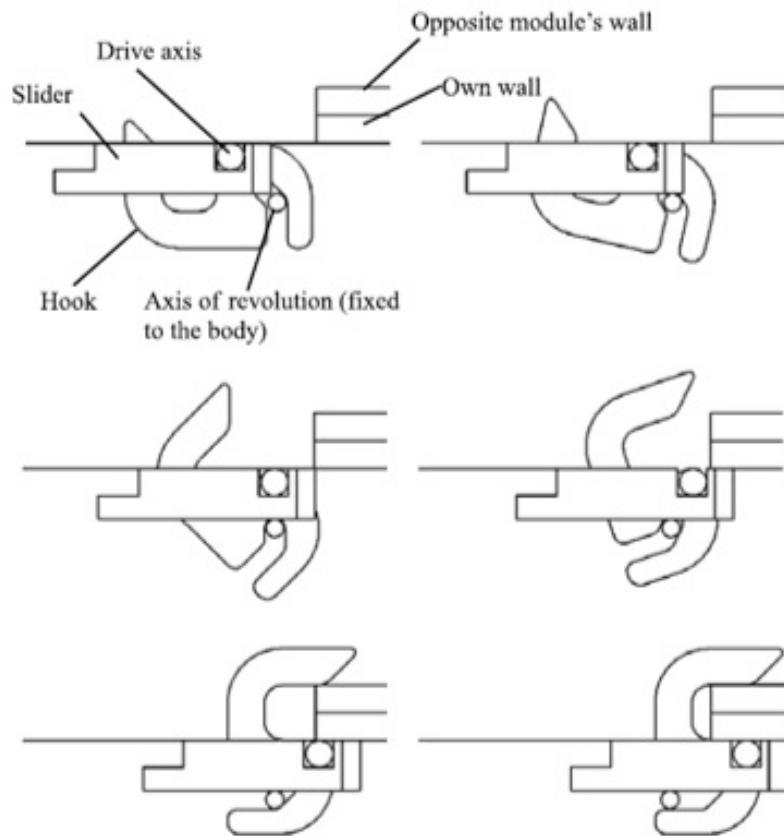


Figura 32: Modulos para construcción automática AMAS

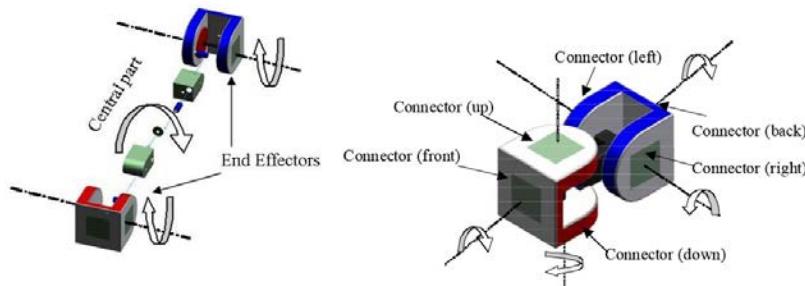


Figura 33: Robot Superbot

- Miche [21] Cabe destacar del diseño de este robot, desarrollado en el MIT, el uso de las placas de circuitos impresos como caras del cubo (ver Figura 34), lo cual permite ahorrar una cantidad de espacio considerable, permitiendo

así la creación de módulos muy pequeños.

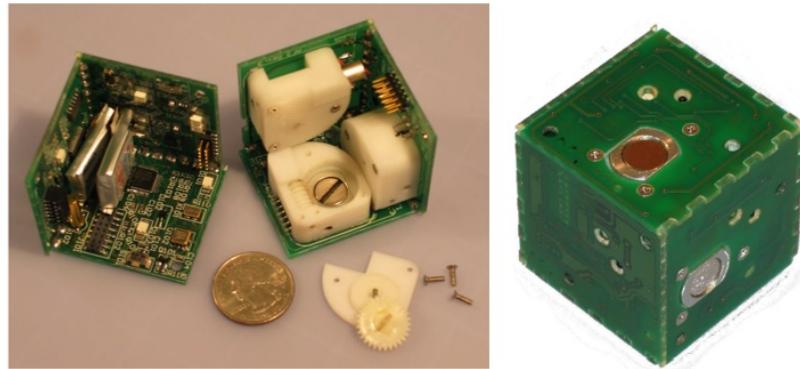


Figura 34: Robot Miche

- Molecube [48] Es uno de los mejores robots autoensamblables actuales creado por FESTO. Destaca el tipo de conexión mediante pines que usa, puesto que no son simples pines cilíndricos, sino que tienen una especie de placa que le atraviesa, proporcionando así más rigidez en la unión. Para realizar este tipo de uniones hace falta una gran tolerancia dimensional y geométrica. También destaca el método de transmisión de la información de un módulo a otro, como se puede comprobar en la Figura 35.



Figura 35: Robot Molecube

- Sambot [43] Estos robots destacan por el curioso mecanismo de autoacoplamiento entre módulos que permite una sujeción muy eficaz, aunque no carente de complejidad en el diseño como puede apreciarse en la Figura 36.

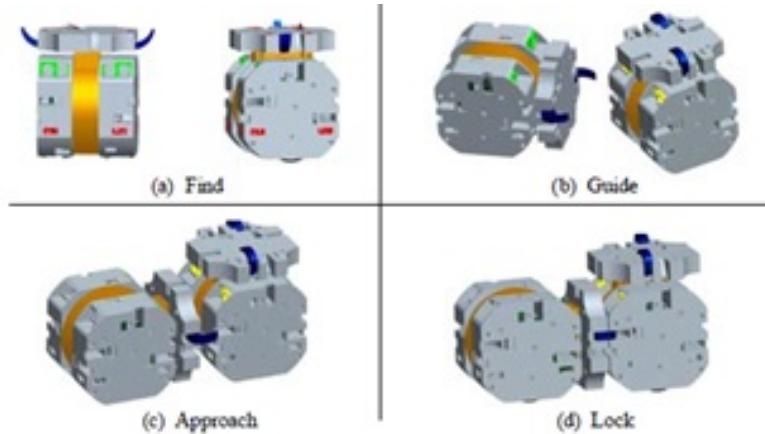


Figura 36: Robot Sambot

- M-Tran [30] La idea de conectar cualquiera de las caras entre sí hacen que M-Tran, con un sencillo diseño exterior (ver Figura 37), sea uno de los robots autoensamblables más conocidos del momento. Lo más destacable es el mecanismo de autoensamblaje que utiliza, puesto que hace sacar del módulo una especie de uñas que se acoplan directamente al módulo contiguo, permitiendo así la sujeción de los mismos. El mecanismo de acoplamiento está controlado de tal forma que se activa al detectar que hay un módulo contiguo a una de sus caras.



Figura 37: Robot M-Tran

- Fable [28] Lo más llamativo de Fable es el diseño de los conectores (ver Figura 38), que permite tener dos tipos de conexiones según el tamaño de la pieza a la que esté acoplada, pudiéndose obtener así una rigidez más adecuada en la conexión, a la par que una variedad de configuraciones de articulaciones y estructuras diferentes.

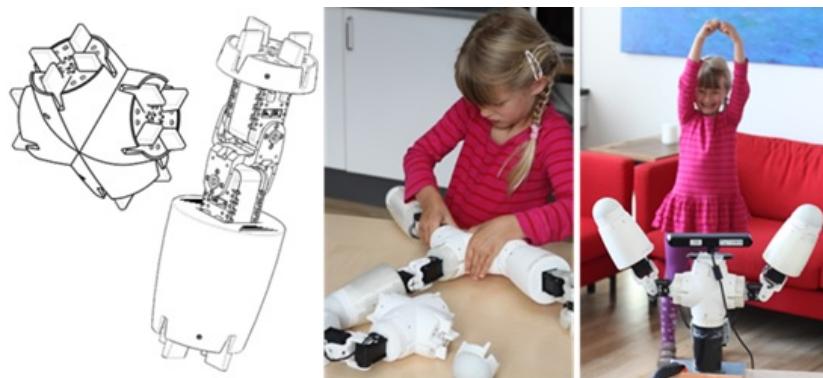


Figura 38: Robot modular Fable [28]

## 2.4. Análisis del Hardware de Control

En esta sección se va a analizar el hardware electrónico disponible para la fabricación de robots modulares. Por un lado primero se estudiaran las placas de desarrollo genéricas susceptibles de ser integradas en un proyecto de robótica modular. Seguidamente se estudiará que hardware incluyen algunos de los robots modulares más importantes hoy en día.

### 2.4.1. Placas de desarrollo específicas en robots

Se pueden encontrar placas especializadas para la creación de proyectos orientados a la robótica. La característica principal que define a estos productos es la integración de una etapa de potencia en la placa para conectar motores, así como algunos sistemas de comunicación habitualmente no presentes en las placas genéricas. A continuación distinguiremos entre las placas desarrolladas en entornos de Investigación y aquellas desarrolladas con fines comerciales.

- Placas de desarrollo específicas en robots de investigación

Los robots modulares en investigación llevan desarrollándose desde los años 80. En la tabla 4 se muestra un resumen de los controladores utilizados en las placas de control de los robots más destacados diseñados en los últimos 10 años. Es importante remarcar que a nivel de investigación los robots modulares tienen una finalidad distinta a los comerciales. Mientras que comercialmente se buscan robots que pueda construir el usuario, el entorno de investigación se centra en robots con capacidad de autoensamblaje, es decir, módulos que se mueven de forma autónoma para construir una configuración que le permite realizar una actividad, es por ello que las características de sus controladores suele ser diferente.

Tabla 4: Placas de desarrollo en robots de investigación

Año	Robot	Universidad	Controlador	Comun
2007	Miche	MIT, EE.UU	32 bits ARM + 8 bits PSoC	I2C
2008	CkBot	Penn University, EE.UU	PIC18f2680	CAN
2008	M-TRAN III	N. I. A. I. S. T. Japón	HD64F7047,F3687,2xF3694	
2009	Roombots	EPFL, Suiza	dsPIC33	
2010	Sambot	S. M. E. A., China	STM32 ARM	
2010	Kilobot	Harvard, EE.UU	ATmega328P	
2012	SMORES	Penn University, EE.UU	ARM Cortex-M3	X-Bee
2012	ModRED	Univ. of Nebraska, EE.UU	ATmega328P	
2014	Southeast U. Robot	Southeast University, China	32-bit RISC 2.4 GHz	

En la tabla puede verse grandes diferencias entre controladores, desde los más básicos de 8 bits hasta procesadores de 32 bits más potentes, algunos sistemas emplean incluso varios procesadores. Estas diferencias se basan en varios factores como son el tamaño del módulo o su capacidad de movimiento autónomo.

#### ■ Placas de desarrollo específicas en robots comerciales

Dentro de las placas específicamente diseñadas para robots comerciales, la tendencia predominante es la creación de una placa que une la electrónica de control con etapas de potencia para motores. Las placas más modernas están desplazándose a procesadores ARM de 32 bits, de forma que se abandona progresivamente los 8 bits. Aunque en muchas aplicaciones simples este desplazamiento puede estar injustificado, el aumento de potencia puede ser muy funcional otros desarrollos complejos. La tabla 5 muestra un resumen de las placas de control más destacables en algunos de estos robots modulares comerciales.

Tabla 5: Placas de Control en Robots modulares

Placa	Empresa	Controlador	Precio
Lego EV3	Lego	TI Sitara AM1808 (ARM 926E-J) 300 MHz	180 \$
VEX ARM	VEX Robotics	STMicrocontroller ARM Cortex M3	250 \$
Pic Micro	VEX Robotics	PIC18F8520	150 \$
Linkbot	Barobo	Atmel ATmega128RFA1 16MHz (1 x mod)	—
Moss	Modrobotics	—	60 \$
Cubelets	Modrobotics	— (1 x mod)	27 \$
TinkerBots	TinkerBots	ATmega328P	—
Open CM	Robotis	ARM Cortex-M3	20 \$
HummingBird Duo	HummingBird	ATmega32U4 + ATtiny24A	89 \$
Robocore	Robocore	ARM Cortex-M4 168MHz + Intel Edison	145 \$
Robocore mini	Robocore	ARM Cortex-M4 168MHz + Intel Edison	95 \$
3DR Pixhawk	3D Robotics	ARM Cortex-M4	200 \$
EZ-B v4 Wi-Fi Robot	EZRobot	ARM Cortex-M3 120MHz + PIC32 80MHz	80 \$

A continuación se detallan las características de las placas de la tabla 5.

- HummingBird Duo (Figura 39)

Tabla 6: Características Placa Humming Bird Duo

PROCESADOR	Atmel Atmega32U4 and ATtiny24A
MEMORIA	—
ALMACENAMIENTO	—
CONECTIVIDAD	—
OS	—
ALIMENTACIÓN	5-8V
POTENCIA	—
CONSUMO	—
INTERFACE	Puertos LED: 6 (4 normales y 2,tricolores) Puertos motores:2 Puertos sensores:4 Puertos Servos:4
SENSORES	—
ENTORNO DESARROLLO	Scratch, Snap!, Arduino IDE, Create Lab
TAMAÑO	—



Figura 39: Placa de Desarrollo Birdbrain

- ROBOCORE (Figura 40)

Tabla 7: Características Robocore

PROCESADOR	ARM Cortex M4 168 MHz
MEMORIA	196 KB RAM
ALMACENAMIENTO	1 MB Flash
CONECTIVIDAD	A TRAVÉS DE INTEL EDISON BT 4.0 WiFi 802.11 b/g/n
OS	—
ALIMENTACIÓN	6-14V
POTENCIA	—
CONSUMO	—
INTERFACE	Puertos LED: 6 (4 normales y 2, tricolores) Puertos motores: 6 (motor y encoder) Puertos sensores: 5 Puertos Servos: 0 (24 con placa expansión) CAN BUS: 1 SD CARD: 1 USB: 2
SENSORES	—
ENTORNO DESARROLLO	hFramework, C/C++, Python
TAMAÑO	—
OTROS	COMPATIBLE CON LEGO NXT y EV3

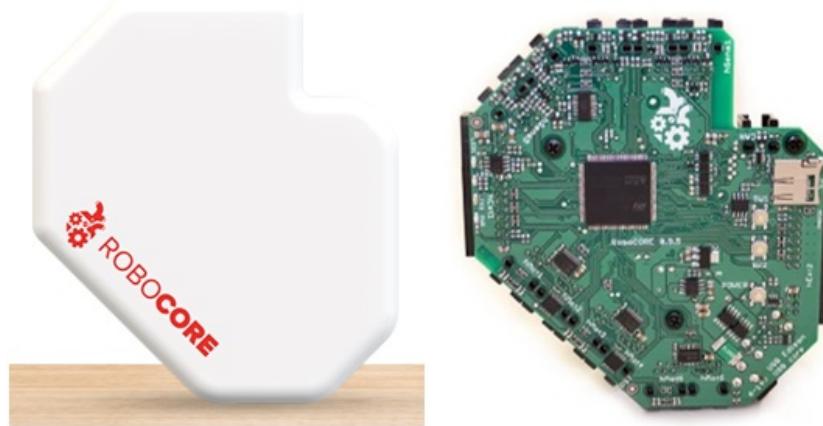


Figura 40: Placa de Desarrollo Robocore

- ROBOCORE MINI (Figura 41)

Tabla 8: Características Robocore Mini

PROCESADOR	ARM Cortex M4 168 MHz
MEMORIA	196 KB RAM
ALMACENAMIENTO	1 MB Flash
CONECTIVIDAD	A TRAVÉS DE INTEL EDISON BT 4.0 WiFi 802.11 b/g/n
OS	—
ALIMENTACIÓN	6-14V
POTENCIA	—
CONSUMO	—
INTERFACE	Puertos LED: 6 (4 normales y 2, tricolores) Puertos motores: 2 (motor y encoder) Puertos sensores: 4 Puertos Servos: 6 (24 con placa expansión) CAN BUS: 1 SD CARD: 1 USB: 1
SENSORES	—
ENTORNO DESARROLLO	hFramework, C/C++, Python
TAMAÑO	—
OTROS	COMPATIBLE CON LEGO NXT y EV3



Figura 41: Placa de Desarrollo Robocore Mini

- EZ-B v4 Wi-Fi Robot (Figura 42)

Tabla 9: Características Placa Desarrollo EZ-B v4 Wi-Fi Robot

PROCESADOR	32-bit ARM Cortex-M3 processor y microchip PIC32 80 MHz
MEMORIA	196 KB RAM
ALMACENAMIENTO	1 MB Flash
CONECTIVIDAD	WiFi 802.11 b/g/n
OS	—
ALIMENTACIÓN	6-14V
POTENCIA	—
CONSUMO	—
INTERFACE	AI 8 DIO 24 I2C 3 UART3
SENSORES	—
ENTORNO DESARROLLO	EZ-builder
TAMAÑO	—
OTROS	—



Figura 42: Placa de Desarrollo EZ-B v4 Wi-Fi Robot

- 3DR Pixhawk (Figura 43)

Tabla 10: Características 3DR

PROCESADOR	32-bit ARM Cortex-M4
MEMORIA	196 KB RAM
ALMACENAMIENTO	1 MB Flash
CONECTIVIDAD	WiFi 802.11 b/g/n
OS	NUTTX RTOS
ALIMENTACIÓN	6-14V
POTENCIA	—
CONSUMO	—
INTERFACE	AI 8 DIO 14 pWM I2C 1 UART 5 CAN 2 USB 1
SENSORES	Acelerómetro de 3 ejes,Giróscopo de 3 ejes,Magnetómetro de 3 ejes,Barómetro
ENTORNO DESARROLLO	Dronecode
TAMAÑO	50mm x 81.5mm x 15.5mm (38g)
OTROS	Unidad de Control para Drones



Figura 43: Placa de Desarrollo 3DR PIXhawk

- Robotis OPEN-CM (Figura 44)

Tabla 11: Características Robotis OPEN-CM	
PROCESADOR	32-bit ARM Cortex-M3 72MHz
MEMORIA	20 KB RAM
ALMACENAMIENTO	128 KB Flash
CONECTIVIDAD	—
OS	—
ALIMENTACIÓN	5-16V
POTENCIA	—
CONSUMO	—
INTERFACE	GPIO 26 AI 10 I2C 2 SPI 2 UART 1 CAN 1 USB 1 TTL port 4
SENSORES	—
ENTORNO DESARROLLO	ROBOPLUS 2.0
TAMAÑO	50mm x 81.5mm x 15.5mm(38g)
OTROS	Para ciertos Dinamixel hace falta una placa de expansión que cuesta 30\$

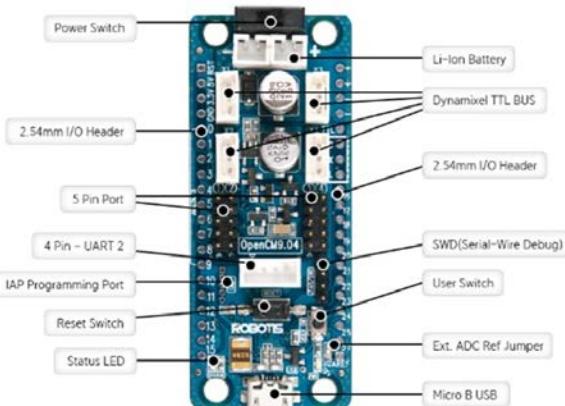


Figura 44: Placa de Desarrollo OpenCM

- TINKERBOT (Figura 45)

Tabla 12: Características Placa Desarrollo Tinkerbot

PROCESADOR	ATmega328P
MEMORIA	20 KB RAM
ALMACENAMIENTO	128 KB Flash
CONECTIVIDAD	BT
OS	—
ALIMENTACIÓN	5-16V
POTENCIA	—
CONSUMO	—
INTERFACE	Serial Bus
SENSORES	—
ENTORNO DESARROLLO	Arduino IDE
TAMAÑO	—
OTROS	—

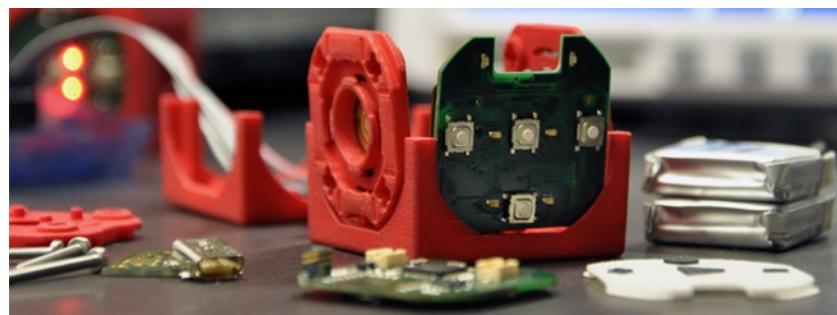


Figura 45: Placa de Desarrollo Tinkerbot

- Brick Lego Ev3 (Figura 46)

Tabla 13: Características Brick EV3

PROCESADOR	TI Sitara AM1808 (ARM 926E-J) 300 MHz
MEMORIA	—
ALMACENAMIENTO	—
CONECTIVIDAD	BT WIFI
OS	LINUX ADAPTADO
ALIMENTACIÓN	5-16V
POTENCIA	—
CONSUMO	—
INTERFACE	SD CARD USB PUERTO MOTORES 4 PUERTO SENSORES 4
SENSORES	—
ENTORNO DESARROLLO	Software EV3, Labview
TAMAÑO	—
OTROS	—



Figura 46: Brick de desarrollo de Lego Ev3

#### 2.4.2. Placas de Desarrollo genéricas

Las placas de desarrollo con microcontroladores llevan en el mercado décadas. Con la introducción de Arduino, su uso se extendió. Actualmente el auge del Internet de las Cosas (IoT) ha impulsado la creación de nuevas placas con muy

diversas funcionalidades. En este documento se realiza un análisis de algunas de las placas más interesantes que existen actualmente en el mercado. Debido a la extensión del documento, es estudio de estas placas se mostrará en el Anexo 5. La tabla 14 muestra un resumen de las características de dichas placas.

Tabla 14: Tabla resumen de Placas de Desarrollo

PLACA	PROC	BT	WIFI	GPS	ZigBee	AI	AO	GPIO	UART	USB	CAN	SD
Artik 1	DC 250+80MHz	S	N	N	x	x	x	x	x	x	x	x
Artik 5	ARM A7 Dual 1GHz	S	S	N	2	0	47	2	1	0	S	S
Intel Edison	DC Atom 500 MHz	S	S	N	6	0	40	2	1	0	S	S
Espruino	ARM Cortex M3 72MHz	N1	N	N	16	2	44	3	1	0	S	S
Espruino Pico	ARM Cortex M4	N	N	N	9	0	22	2	1	0	N	N
Photon	ARM Cortex M3 120MH	N	S	N	8	2	18	x	1	1	N	N
Bean +	Atmega 328p	S	N	N	6	0	16	x	x	0	N	N
MicroView	Atmega 328p	N	N	N	6	0	12	x	1	0	N	S
Piccolino	Atmega 328p	N	N	N	5	0	12	x	x	0	N	N
Arduino Zero	ARM Cortex M0 48MH	N	N	N	6	1	20	x	1	0	N	N
Apollo	ARM Cortex M3	S	S	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Wino	ARM Cortex M0 48MH	N	S	N	7	1	15	x	1	0	N	N
The Neutrino	ARM Cortex M0 48MH	N	N	N	6	1	20	x	1	0	N	N
MetaWear	ARM Cortex M0	S	N	N	0	0	2	0	1	0	N	S
Udo Neo	ARM Cortex A9 + M4	S	S	N	6	0	36	3	1	2	N	N
Chip	Allwinner A12 1Ghz	S	S	N	0	0	8	1	1	0	N	N
BeagleBone Black	ARM Cortex A8	N	N	N	65	6	1	0				

La Tabla15 muestra los precios de las placas de desarrollo evaluadas.

Tabla 15: Tabla de precios de las Placas de desarrollo

PLACA	PRECIO
Artik 1	x
Artik 5	x
Intel Edison	57 eur
Espruino	40 eur
Espruino Pico	32 eur
Photon	19 \$
Bean +	45 \$
MicroView	40 \$
Piccolino	37 \$
Arduino Zero	50 \$
Apollo	x
Wino	10 eur
The Neutrino	20 \$
MetaWear	35 \$
Udo Neo	70 \$
Chip	9 \$
BeagleBone Bl	61 eur

### 3. Análisis de requisitos

Se ha realizado un estudio de los requisitos que son deseables en un robot modular con un alto grado de versatilidad. Para ello se han estudiado tres ámbitos distintos extrayendo las características comunes de cada uno de ellos para tratar de trasladarlas a nuestro diseño estructural. Estos ámbitos son el profesional, el educativo y el investigador (ver ejemplos en Figura 47):

- En el **ámbito profesional** se requiere un alto grado de precisión y destreza, por ejemplo para los manipuladores industriales antropomórficos. Se incide en un aspecto novedoso de los robots industriales, que es la interacción con los humanos (HRI, del inglés Human-Robot Interaction) que da lugar a la

llamada robótica colaborativa.

- En un **ámbito educativo** se buscan robots robustos, sencillos de construir y versátiles, de modo que fomenten la imaginación en su morfología y, por tanto, en sus aplicaciones. Así, los robots móviles con ruedas (entre dos y cuatro) y los robots humanoides sencillos son los más utilizados y demandados.
- Por último en el **ámbito investigador** se exploran nuevas aplicaciones, lo que lleva a la existencia de una enorme variedad de morfologías y características. Debido a este amplísimo abanico, se muestran sólo unos pocos ejemplos representativos por la variedad morfológica que exhiben.



(a) Profesional.

(b) Educativo.

(c) Investigador.

Figura 47: Ejemplos de robots en distintos ámbitos.

### 3.1. Ámbito profesional

La IFR (*International Federation of Robotics*, [5]), de acuerdo con la Norma ISO 8378, define robot como un mecanismo programable accionado en dos o más ejes con un cierto grado de autonomía, entendiendo autonomía como la capacidad de realizar una tarea basándose en la situación actual y en lo que se recibe del medio, sin intervención humana. Según la IFR, los robots se dividen en dos grandes grupos: robots industriales y robots de servicio.

El ámbito profesional comprende los robots industriales, que son los utilizados en la automatización de procesos dentro de la industria. La Norma ISO 8378 los define como: manipuladores automáticos, reprogramable y multifuncionales con tres o más ejes, una posición fija o variable y utilizados en aplicaciones de automatización industrial.

En función de su morfología, los robots industriales se pueden clasificar en antropomorfos, cartesianos, cilíndricos, esféricos, paralelos y SCARA (*Selective Compliant Articulated Robot Arm*). Esta clasificación se basa en diferencias geométricas que se pueden cuantificar mediante una serie de parámetros característicos.

### 3.1.1. Parámetros de los robots industriales

Los parámetros morfológicos básicos de los robots industriales son los siguientes:

**Número de ejes** Un eje se define como una línea a partir de la que se puede definir el movimiento de un robot, ya sea de manera lineal o rotacional.

**Grados de libertad (gdl)** Dimensiones de movimiento de un robot. En un espacio tridimensional son necesarios tres gdl para alcanzar cualquier posición y tres gdl adicionales para que la orientación también pueda ser arbitraria.

**Número de eslabones** Elementos estructurales rígidos (aunque existen eslabones flexibles en algunos modelos de investigación) que conforman al robot. Unidos entre sí mediante articulaciones

**Número de articulaciones** Elemento de interconexión de dos eslabones que permite el movimiento relativo entre ellos. Según el movimiento, los tipos de articulaciones son:

- **Prismáticas o lineales:** Cuando el movimiento es lineal de un eslabón con respecto al siguiente. Generalmente se utilizan motores eléctricos unidos a mecanismos de tipo piñón-cremallera.
- **De rotación:** Se realiza un movimiento de rotación entre un eslabón y otro. Se suelen utilizar motores eléctricos junto con reductoras mecánicas. Dependiendo del eje relativo de giro se clasifican en

*Angular*: el segundo eslabón gira variando su ángulo respecto al primero.

*Torsional*: el segundo eslabón gira sobre su propio eje.

*De revolución:* el segundo eslabón gira de manera perpendicular al primero.

- **Cilíndrica:** Aúnan una articulación de revolución con una lineal. Aportan dos gdl.
- **Esférica:** Permiten el giro de un eslabón en cualquier eje de rotación. Aportan tres gdl.

Existen dos tipos de articulaciones más que son la planar y la de tornillo. La primera es prácticamente inexistente en la robótica actual, mientras que la segunda es conceptualmente equivalente a la prismática, por lo que no se tienen en cuenta en esta descripción. Un resumen de todas ellas aparece en la Figura 48.

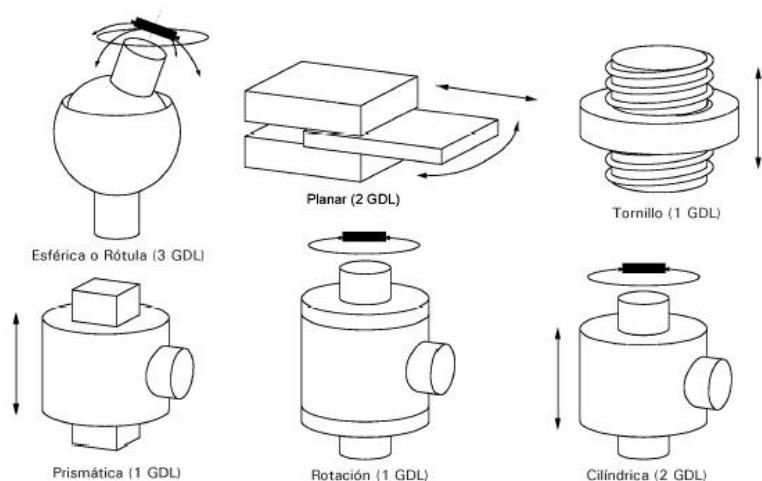


Figura 48: Tipos de articulaciones en robótica.

**Espacio de trabajo** Zona del espacio a la cual puede llegar el extremo del robot.

Existen otra serie de parámetros que se utilizan para caracterizar técnicamente a un robot, como la precisión, la resolución o la repetibilidad, pero dado que nuestros robots modulares serán realizados con impresoras 3D de no muy alta resolución, carece de sentido incorporarlos en la búsqueda de requisitos para nuestro diseño mecánico.

Sin embargo, una característica de relevancia a la hora del diseño de nuestra arquitectura modular para poder reproducir este tipo de robots, es el ángulo entre ejes de los robots industriales. Salvo en aplicaciones muy concretas y diseñadas *exprofeso*, el ángulo entre dos ejes consecutivos siempre es de  $90^\circ$ , por lo que los bloques de la estructura modular se pueden diseñar de tipo paralelepípedo sin perder capacidad de imitación de robots industriales reales.

### 3.1.2. Tipos de robots industriales

A continuación se describen los robots industriales más habituales en base a los parámetros anteriormente enumerados. El diseño mecánico de nuestro robot modular debe permitir la generación de robots de cualquiera de estos tipos.

**Robot antropomorfo** Constituido únicamente por articulaciones de rotación. Existen muchas modelos con pequeñas variaciones, pero el modelo más habitual tiene 6 gdl, con tres articulaciones de torsión (1, 4 y 6) y 3 articulaciones angulares (2, 3 y 5). El espacio de trabajo es aproximadamente esférico. Se muestra en la Figura 49.

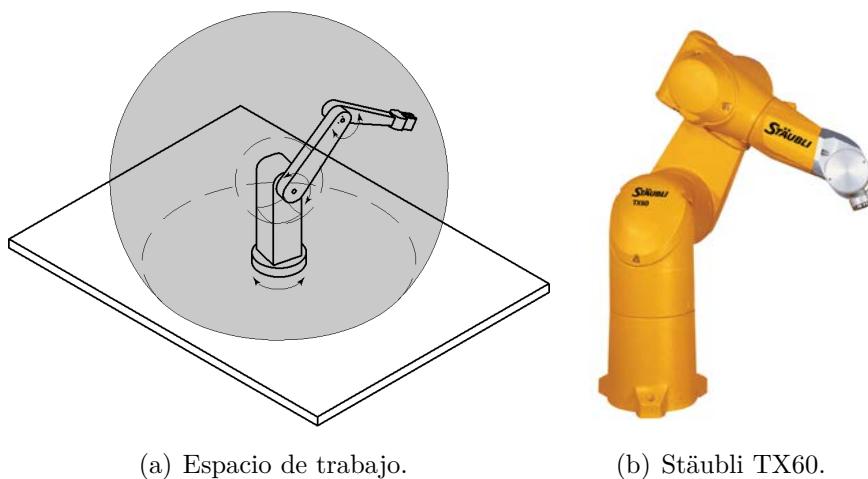


Figura 49: Robot antropomorfo.

**Robot cartesiano** Posee únicamente articulaciones prismáticas que producen movimiento en los ejes cartesianos (XYZ), aunque en el extremo el efecto puede ser muy variado. Suelen ser de 3 gdl y su espacio de trabajo es un prisma rectangular,

como se ve en la Figura 50. Un caso particular es el de los robots grúa, que consisten en un eslabón biapoyado en sus extremos.

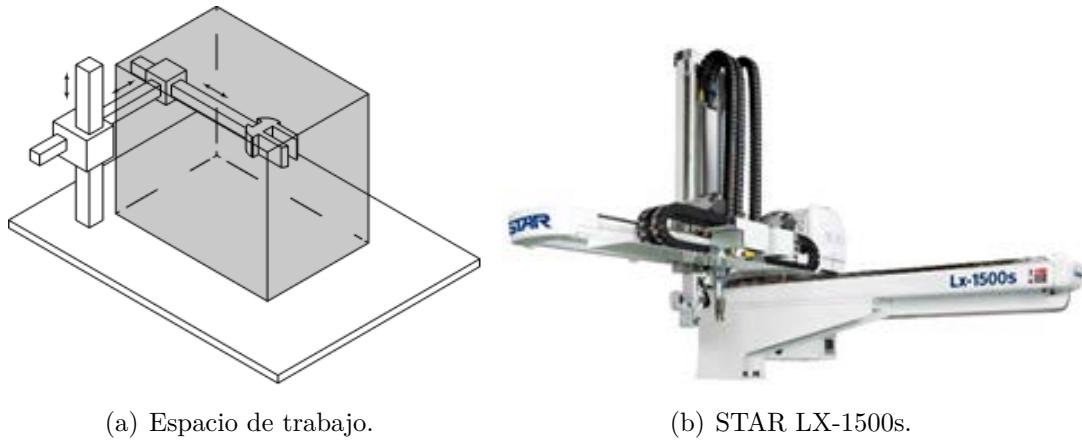


Figura 50: Robot antropomorfo.

**Robot SCARA** Robot de cuatro grados de libertad para posicionamiento horizontal. Tiene dos articulaciones de rotación angular y una articulación cilíndrica, según se puede ver en la Figura 51. Existe otra configuración con un doble brazo que aumenta la rigidez y por tanto el espacio de trabajo y la precisión.

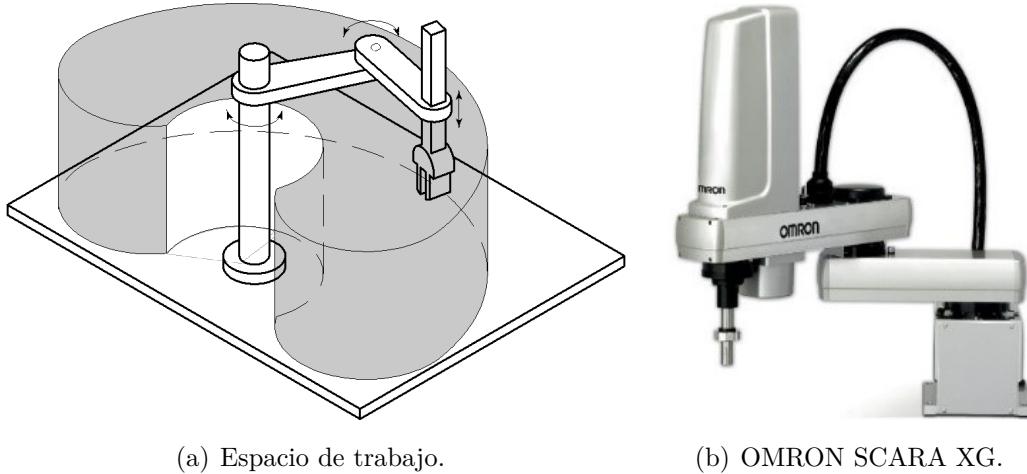


Figura 51: Robot SCARA.

**Robot paralelo** Son robots con cadenas cinemáticas paralelas (unidas en más de un punto). Existen dos configuraciones principales (Figura 52):

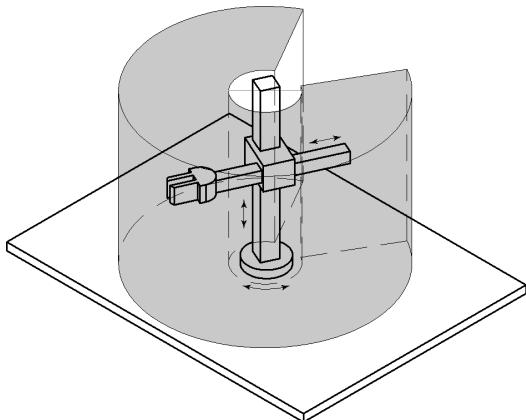


(a) Robot Delta ABB FlexPicker. (b) Plataforma Stewart PI H845.

Figura 52: Robots paralelos.

- **Robot Delta:** Consta de tres o cuatro cadenas serie que se conectan entre sí en la extremidad del robot, donde se coloca el efecto final. Tanto las cadenas serie, como la articulación final son de rotación angular.
- **Plataforma de Stewart:** Consta de dos plataformas paralelas: una base que permanece estática y una elevada cuyo estado (posición y orientación, 6 gdl en total) se controla mediante de seis cadenas cinemáticas en serie emparrujadas dos a dos. Cada cadena está formada por una articulación prismática y unida a la base mediante una articulación esférica.

**Robot cilíndrico** Sus ejes de articulación conforman un sistema de coordenadas cilíndricas (azimutal, vertical y radial). Tienen tres gdl (mas los del efecto final) con una articulación cilíndrica (azimutal y vertical) y otra prismática (radial). En la actualidad no son muy utilizados y han sido prácticamente sustituidos por los antropomorfos. Su espacio de trabajo y un robot para movimiento automático de probetas en laboratorios se muestran en la Figura 53.



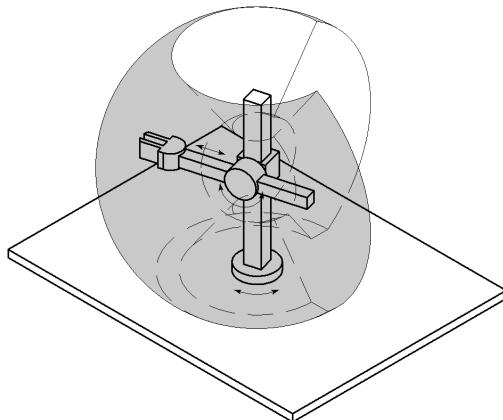
(a) Espacio de trabajo.



(b) Hudson PlateCrane.

Figura 53: Robot cilíndrico.

**Robot esférico** También conocido como robot polar, sus ejes conforman un sistema de coordenadas esféricas (azimutal, elevación y radial). Tienen 3 gdl (mas los del efecto final) con una articulación de torsión, la siguiente angular y la última prismática. Al igual que el cilíndrico, en la actualidad ha caído en desuso pero el modelo del primer robot industrial, el UNIMATE (Figura 54).



(a) Espacio de trabajo.



(b) Kawasaki UNIMATE 2000.

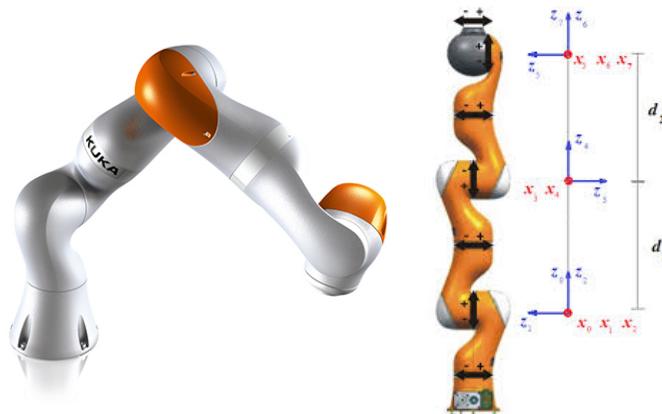
Figura 54: Robot esférico.

### 3.1.3. Robots industriales colaborativos

En su mayoría, los robots industriales son grandes, pesados, rápidos y rígidos, por lo que resultan bastante peligrosos. Un movimiento erróneo de un robot o un operario que se encuentren en el mismo espacio de trabajo puede causar lesiones graves e incluso fatales [47]. Además suelen estar programados para realizar una tarea muy concreta del modo más eficiente y trabajan aislados mediante vallas u otros elementos protectores para garantizar la seguridad del trabajador.

La robótica colaborativa [4] persigue la idea de obtener una HRI de la forma más versátil y segura posible. Si bien esta idea es la base de la robótica de servicios, en la robótica industrial no se ha incorporado hasta hace relativamente poco tiempo al diseño de robots.

Un ejemplo de este tipo de robots industriales es el KUKA LWR [12] (Figura 55, de 7 gdl con una articulación redundante en posición, lo que le permite más versatilidad de movimiento. Este robot posee articulaciones con elasticidad ajustable mediante software y un controlador híbrido posición-fuerza que permite una interacción tan suave como sea necesaria con un operario que trabaje de forma coordinada con él (e.g. para agarrar una plancha de metal de modo que el robot sujeté el peso y el operario realice el guiado de la plancha a su destino). De hecho, este modelo se está utilizando como brazo en numerosos robots de investigación de tipo humanoide como Apollo [29], del Max Planck Institute Tübingen, Rollin' Justin [19], del DFKI en Bremen, o Rosie [10], de la TUM en Munich.



(a) Imagen real del robot. (b) Esquema cinemático.

Figura 55: Robot KUKA LWR.

Sin embargo, el primer robot comercial de este tipo es Baxter de Rethink Robotics [7, 18], a la venta por un precio de 25.000 dólares, que se muestra en la Figura 56. Sus características principales son las siguientes:

- Dos brazos independientes de 7 gdl, lo que permite realizar dos tareas simultáneamente. Cada brazo tiene 4 articulaciones rotacionales de torsión y 3 de rotación angular.
- Control de elasticidad de las articulaciones y control posición-fuerza del extremo para una colaboración más fluida con el operario.
- Una pantalla para interacción con un operario para reprogramación y salida de información.
- Sistema de visión y sensores de ultrasonidos de 360° para desenvolverse en entornos no estructurados.
- Recubrimientos acolchados de los eslabones.
- Peso bastante reducido (75 kg.), alcance máximo de 1210 mm y capacidad de carga de 2.2kg.



Figura 56: Robot Baxter de Rethink Robotics.

### 3.2. Ámbito educativo

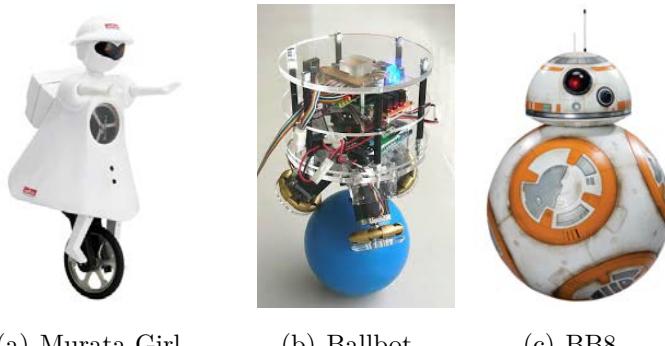
La formación en temas tecnológicos es uno de los mayores atractivos de los robots modulares. Diseños sencillos en los que se aplican conceptos científicos y técnicos permiten a los niños comenzar el contacto con la robótica desde la escuela primaria. En este ámbito, el diseño y la construcción de un robot se centran en estimular el interés de los estudiantes y en fomentar el trabajo en grupo y la discusión constructiva para solucionar problemas reales mediante la robótica. Desde ahí, se puede llegar hasta niveles de cómo automatizar la fabricación en una industria.

Aunque existen muchos criterios de clasificación de los robots educativos, y una gran variedad de éstos, vamos a seguir la división realizada habitualmente [37] en robótica móvil: robots con ruedas y robots con patas.

#### 3.2.1. Robots con ruedas

Los robots que usan ruedas como medio de locomoción son, en general, más fáciles de diseñar, construir y programar, a la par que más estables en sus desplazamientos, lo que los hace un ejemplo ideal para una primera toma de contacto con la robótica. Como contrapartida, no suelen ser aptos para terrenos poco uniformes, y necesitan de una superficie bastante plana para desplazarse correctamente.

**Robots de una rueda** Son la excepción a la regla de la simplicidad. Disponen de un único contacto con el suelo, lo que les convierte en péndulos físicos invertidos, complicando bastante su control. Como ejemplo tenemos el robot Murata Girl. Dentro de esta categoría también podemos encontrar los llamados Ballbot, cuya base es una esfera en lugar de una rueda. Recientemente estos robots han alcanzado gran popularidad debido al robot BB-8 de las '*Star Wars*', por lo que resultan muy atractivos para los estudiantes.



(a) Murata Girl. (b) Ballbot. (c) BB8.

Figura 57: Robots con un único contacto con el suelo.

**Robots de dos ruedas** En su mayoría carecen de estabilidad estática, puesto que sólo tienen dos puntos de apoyo con el suelo, pero su controlabilidad dinámica es mayor que con una rueda. Podemos dividirlos en dos grupos según cómo estén colocadas las ruedas:

- **En línea**, como en una bicicleta, en cuyo caso la rueda trasera se encarga de la tracción mientras que la delantera de encarga de la dirección, e.g. Murata Boy.
- **En paralelo**, donde cada rueda tiene su propio servomotor, lo que permite girar por diferencia de velocidad en ambas ruedas. Dependiendo de dónde tengan su punto de gravedad, podemos diferenciar entre:

*Equilibristas*: son los robots cuyo centro de gravedad está por encima del eje que une las ruedas. No tienen equilibrio estático, sino que su comportamiento es el de un péndulo invertido, que necesita control continuado, e.g. Segway.

*Estables:* son los robots cuyo centro de gravedad está en el eje que une las ruedas. Son estables en estado de reposo, e.g. Parrot Jumping Sumo.



(a) Murata Boy.



(b) Segway.



(c) Parrot Jumping Sumo.

Figura 58: Robots de dos ruedas.

**Robots de tres ruedas** Al poseer tres apoyos, estos robots son estables estáticamente siempre que el centro de gravedad esté situado sobre el triángulo definido por los apoyos (polígono de estabilidad). Podemos diferenciar los siguientes tipos:

- **Diferencial:** Poseen una configuración de robot de dos ruedas en paralelo (cada una tiene un motor propio) y una rueda loca (*castor wheel*) adicional. En ocasiones, puesto que esta tercera rueda no añade nada al sistema de locomoción, se sustituye por un apoyo en el suelo (o por una rótula libre), e.g. robot Renacuajo de BQ.
- **Triciclo:** Las dos ruedas traseras están unidas al mismo eje, accionado mediante un servomotor único, y se encargan de la tracción, mientras que la tercera rueda (delantera) es la que se controla la dirección a través de otro servomotor.
- **Omnidireccional:** Estos robots utilizan ruedas omnidireccionales (ruedas suecas con rodillos a 90°) colocadas a 120° en la base del robot, lo que permite que su movimiento sea holonómico, pudiendo desplazarse en cualquier dirección sin necesidad de maniobras previas, e.g. Rovio de WowWee Robotics.
- **Synchro-Drive:** Este sistema tiene dos motores que actúan sobre las tres ruedas a la vez, uno controla la orientación mientras que el otro se encarga

de la tracción. El mecanismo que permite la sincronización de las tres ruedas es bastante complejo, y el alineamiento de las mismas es crítico para un correcto funcionamiento. E.g. MRV4.



(a) Renacuajo.

(b) Rovio.

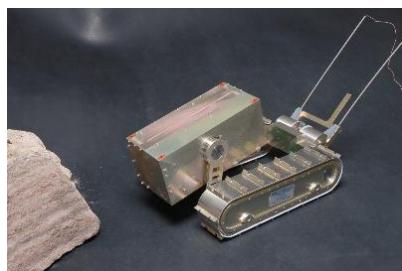
(c) MRV4.

Figura 59: Robots de tres ruedas.

**Robots de cuatro ruedas** Similares a los robots de tres ruedas, aunque con mayor estabilidad, puesto que el polígono definido por los apoyos es ahora un paralelogramo (mayor área). Algunas de las configuraciones existentes son:

- **Diferencial:** Similar al de tres ruedas (dos ruedas motrices cada una con un servomotor propio), pero con dos ruedas locas en lugar de una
- **Slip/Skid:** En esta configuración, cada tren lateral es actuado simultáneamente por un motor (o varios sincronizados). Es una generalización del diferencial, pero al no poseer un sistema de control de dirección de cada rueda, y por tanto no tener un Centro Instantáneo de Rotación (CIR), se basa en el deslizamiento de alguna de las ruedas en los giros (de ahí su nombre de Deslizamiento/Derrape). Esta configuración se usa en tanques, por ejemplo, aunque la transmisión de cada tren lateral en ese caso se realiza mediante orugas. E.g. Nanokhod.
- **Dirección Ackermann:** Dos de las ruedas se actúan con motores para producir la tracción, mientras que las otras dos controlan la orientación mediante otro motor y un mecanismo diferencial o Ackermann que desalinea ligeramente las ruedas para conseguir un CIR único. Tracción y dirección pueden aunarse en un mismo par de ruedas mientras que las otras dos son pasivas.

- **Mecanum:** Otro modelo omnidireccional que puede utilizar ruedas omnidiireccionales (suecas a 90°) o ruedas *mecanum* (ruedas suecas a 45°). Con respecto a los anteriores tiene la ventaja de que es un sistema de locomoción holonómico. E.g. KUKA YouBot.
- **Synchro-Drive:** Existe otra versión de este mecanismo para cuatro ruedas con las mismas características. E.g. Real World Interface's B21.



(a) Nanokhod.



(b) YouBot.



(c) B21.

Figura 60: Robots de cuatro ruedas.

**Robots de más ruedas** Existen robots en el que se añaden ruedas libres adicionales para tareas de odometría, pudiendo medir con mayor precisión como se mueve el robot. Si usamos odometría en las ruedas motrices del robot podemos eliminar el deslizamiento y otros movimientos que pueden provocar errores de medición.

Otros robots tienen un mayor número de ruedas porque son diseñados para tareas muy específicas en las que se requiere una estabilidad muy alta o la habilidad de superar obstáculos en un terreno irregular. Un claro ejemplo es el sistema de seis ruedas que incorporan los Rovers de la NASA enviados a explorar la superficie de Marte: Sojourner, Spirit, Opportunity y Curiosity. Tiene un sistema de suspensión (*rocker-bogie*) que le permite tener las 6 ruedas continuamente en contacto con el suelo y superar rocas y desniveles del terreno como se ve en la Figura 61. Este sistema ha probado ser el más estable de entre las opciones disponibles para estos rovers [40].

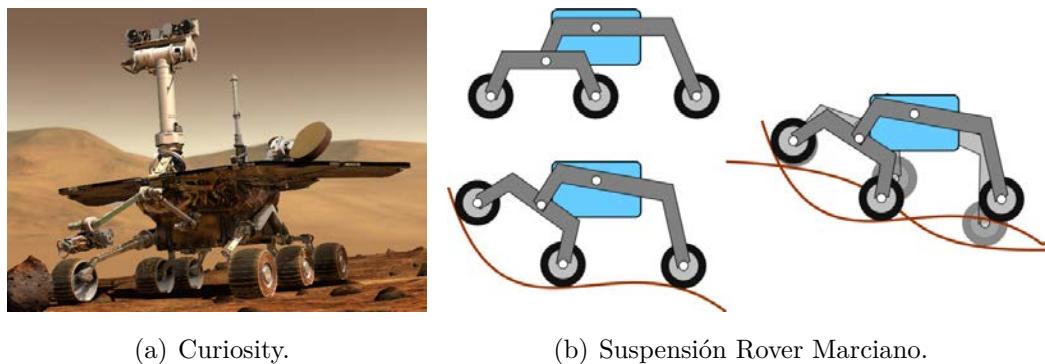


Figura 61: Rover de exploración espacial y su sistema de suspensión.

### 3.2.2. Robots con patas

Los robots con patas son matemáticamente mucho más complejos que los robots rodantes, ya que cada una de las patas puede ser tratada como un robot industrial con una cadena cinemática de al menos 3 gdl. A cambio presentan algunas ventajas, como la adaptabilidad y la maniobrabilidad en terrenos muy irregulares: sólo se necesitan unos pocos puntos de apoyo, sin importar el estado del terreno entre éstos, lo que les permite incluso superar grietas en las que un robot con ruedas quedaría atascado o caería.

**Robots con una pata** Los robots de una pata se mantienen de pie y se mueven a base de saltos. Este tipo de robots están presentes en campos dedicados a la investigación pero no han sido integrados en la robótica educativa debido a su poca eficiencia a la hora de moverse, e.g. Hopper del MIT.

**Robots bípedos** Es la base de la mayoría de robots humanoides. Se hacen estables estáticamente gracias a unas bases amplias en los puntos de apoyo. Estos robots, a su vez se pueden clasificar según el número de servos necesarios para la caminada (Figura 62).

- **Robot de dos servos:** El primer modelo se llamó BigFoot y fue creado en 1998 por David Buckley. Este robot es el bípedo más sencillo que se puede construir. Tiene un servo que balancea el peso del cuerpo sobre una pata y otro que se encarga de adelantar o retrasar la que queda levantada. Existen



(a) BigFoot.

(b) RoboBuilder.

(c) Darwin-Op.

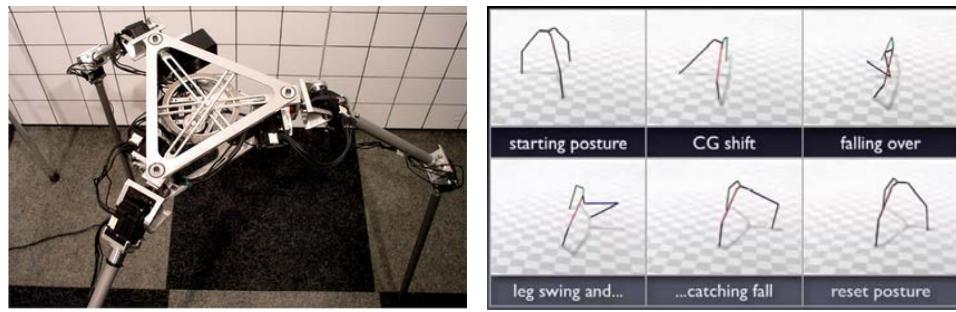
Figura 62: Robots bípedos.

otras versiones basadas en recoger una pata al avanzar para no tropezar con la otra.

- **Dos servos por pata:** Los servos están colocados en el tobillo y la cadera (no tiene rodilla), de modo que se controla la abducción y la pisada. Como ejemplo tenemos a Zowi, el robot para niños de BQ.
- **Tres servos por pata:** Es la configuración más habitual. Existen distintas posibilidades de colocación para los servos, pero suelen colocarse articulaciones rotacionales en cadera, rodilla y tobillo, consiguiendo 3 gdl (movimientos de abducción, flexión de cadera y flexión de rodilla).
- **Cinco servos por pata:** Para ayudar en la pisada y hacer que esta sea más natural, se pueden incluir uno o dos servos más en el tobillo, haciendo que el pie se pueda adaptar al terreno. Un ejemplo es la configuración de robot humanoide de Robobuilder.
- **Seis servos por pata:** Una de las configuraciones más complejas en robots que no son de investigación. Añaden un sexto grado de libertad incluyendo el movimiento de rotación externa de la cadera (yaw) con un servo adicional. El ejemplo más famoso es el robot Darwin-op, de Robotis.

**Robots con tres patas** No son muy habituales, (no existen ejemplos en la naturaleza), puesto que aunque poseen equilibrio estático en reposo, no lo tienen durante la caminada, ya que el polígono de estabilidad se reduce a una línea al

levantar una de las patas. Como ejemplo interesante de investigación tenemos el robot STriDER [24], de Virginia Tech, que camina balanceando una de sus piernas entre las otras dos y girando 180 grados el cuerpo en cada balanceo, según se muestra en la Figura 63.



(a) STriDER.

(b) Secuencia de movimiento.

Figura 63: Robot de tres patas.

**Robots cuadrúpedos** Es una de las configuraciones más utilizadas en robots móviles, ya que les permite mantener la estabilidad estática durante la caminada siempre que se mueva una única pata cada vez. Por su sencillez y estabilidad, existen numerosos juguetes tecnológicos con esta configuración, como el dinosaurio Pleo, o el ya desaparecido Aibo de Sony.

- **Un servo por pata** Un ejemplo es el juguete Teksta Robotic Puppy.
- **Dos servos por pata** Pueden colocarse en distintas configuraciones, pero las más habituales son las de rotación externa de la cadera y flexión, o las de flexión de cadera y flexión de rodilla, e.g. G-Dog.
- **Tres servos por pata** Igualmente existen distintas disposiciones de los tres servos. Dos de las más habituales son rotación externa de la cadera y doble flexión, e.g. Aibo de Sony, y abducción y doble flexión, e.g. robot cangrejo.

**Robots hexápodos** El movimiento de estos robots está inspirado en el de los insectos. Al tener 6 apoyos, pueden mover tres patas en cada paso manteniendo la estabilidad estática. Los movimientos de estos robots recuerdan los de las arañas



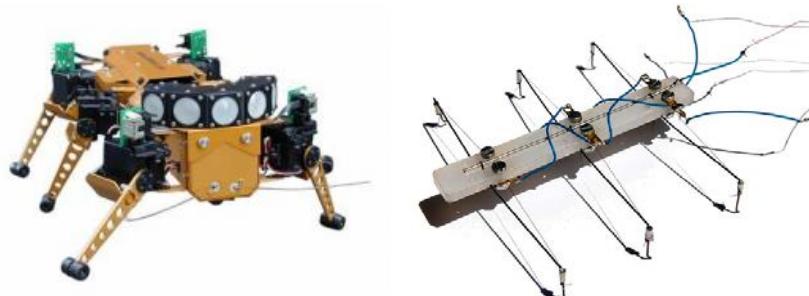
Figura 64: Robots cuadrúpedos.

y las configuraciones de los servos son idénticas a las de los robots cuadrúpedos: dos o tres servos para movimientos de rotación externa de cadera (o abducción) y flexión, e.g. Genghis del MIT [14].

Uno de los robots más famosos de este tipo fue Stiquito [8], ideado en 1994, que se mueve actuado mediante tendones de Nitinol, una aleación con memoria de forma (SMA) que se encoge o se estira en función de su temperatura. Ha sido utilizado en numerosas experiencias docentes debido a su sencillez [16].

### 3.3. Ámbito investigador

La elevada variedad de robots existentes en el ámbito investigador hace prácticamente imposible extraer características comunes que deba poseer nuestra estructura. Antes bien al contrario, lo que indica es que debemos conseguir la mayor versatilidad posible en los módulos si queremos satisfacer a los potenciales clientes en este ámbito. Por ello, se analizan únicamente algunos ejemplos de interés que muestran las posibilidades que podría cubrir el diseño de la arquitectura del robot



(a) Genghis.

(b) Stiquito.

Figura 65: Robots hexápodos.

modular.

### 3.3.1. Robots serpiente

Los robots serpiente [27] son robots de tipo ápodo (sin patas) y eminentemente modulares, por lo que su análisis es muy conveniente para extraer características para el diseño de un robot modular. No tiene ni ruedas ni patas, pero es capaz de desplazarse en línea recta mediante ondulaciones de su cuerpo, que se propagan desde la cola hasta cabeza. Está constituido por la unión en cadena de varios módulos con un único servo que se pueden colocar en diferentes configuraciones para conseguir movimientos distintos. Existen numerosos modelos de este tipo de robots, como Anna Konda, de la Universidad de Trondheim, MAKRO Plus, desarrollado por el Fraunhofer IAIS y comercializado por Inspector Systems, o Cube Revolutions, diseñado en la Universidad Autónoma de Madrid [23].



(a) Anna Konda.

(b) MAKRO.

(c) Cube Revolutions.

Figura 66: Robots serpiente.

### 3.3.2. Robots flexibles

Un fenómeno que se estudia en robótica desde hace varias décadas es la flexibilidad. En ocasiones vista como un problema que hay que solucionar debido a la necesidad de cancelar vibraciones no deseadas en aplicaciones de precisión [32], puede ser aprovechada en aplicaciones tales como sensores [11], agarre de objetos [33] o sistemas novedosos de locomoción.

Este último es el caso del robot RHex [20], inicialmente desarrollado por un consorcio de universidades americanas financiadas por la DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency), continuado en la Universidad de Pennsylvania, y actualmente comercializado por Boston Dynamics. Es un robot hexápodo cuyas piernas tienen forma de semicircunferencia que giran gracias a un servomotor como si fueran ruedas y poseen un cierto grado de flexibilidad, lo que absorbe impactos y le permite realizar saltos. Este mecanismo le permite desplazarse por superficies muy variadas, como arena, nieve o barro, y salvar obstáculos de su misma altura.



Figura 67: Robot de patas flexibles X-RHex.

### 3.3.3. Robots humanoides realistas

Desde la aparición de ASIMO, considerado el primer humanoide capaz de subir escaleras, los robots humanoides han sido objeto de una mejora sustancial en sus capacidades. En los últimos años se le ha dado una mayor relevancia a la investigación en este tipo de robots puesto que la DARPA lanzó en 2013 el *DARPA Robotics Challenge* (DRC) en el que se debían realizar una serie de tareas como conducir un vehículo, atravesar terreno irregular, subir escaleras y abrir puertas y válvulas

en un entorno diseñado para los seres humanos [2]. Para llevar a cabo las tareas, y tras la celebración de unas rondas clasificadorias, varios equipos fueron dotados de un Atlas, de Boston Dynamics, un robot de 28 gdl actuado hidráulicamente. Las finales se celebraron del 5 al 6 de Junio de 2015 en California, resultando vencedor el equipo coreano KAIST, que participaba con un robot de desarrollo propio: HUBO.



(a) ASIMO. (b) Atlas. (c) HUBO. (d) Petman.

Figura 68: Robots humanoides realistas.

Otro foco de investigación ha sido la imitación de los movimientos de los seres humanos, los cuales se han estudiado con profusión mediante técnicas de bioingeniería [15]. Una muestra es Petman [6], desarrollado para testar trajes de protección química, el cual tiene un gran repertorio de movimientos para someter estas ropas a situaciones realistas, pudiendo además simular la fisiología humana controlando temperatura, humedad y sudor dentro del traje. Estos robots humanoides están accionados mediante actuadores lineal de tipo hidráulico, con lo que consiguen mayor fuerza que los accionados mediante motores eléctricos.

### 3.3.4. Robots cuadrúpedos

Los referentes de investigación en robots cuadrúpedos corresponden a los prototipos desarrollados por Boston Dynamics. Probablemente el más conocido de ellos es BigDog [1], desarrollado como sistema de transporte para el ejército de tierra. Posee actuadores hidráulicos para generar el movimiento de cada una de las patas y elementos elásticos que le permiten absorber golpes y mantener el equilibrio

lateral. Puede moverse prácticamente por cualquier terreno, caminar, correr (no deja ningún apoyo en el suelo en este modo) e incluso saltar. Consta de gran cantidad de sensores entre los que destacan sensores de posición y fuerza articulares, giróscopos y un LIDAR, entre otros.



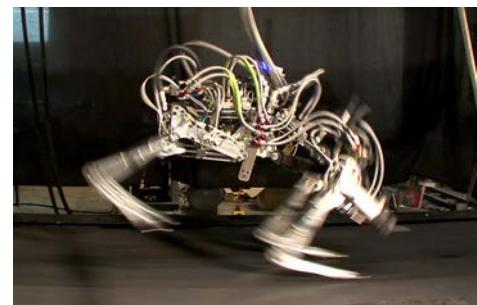
(a) BigDog.



(b) LittleDog.



(c) LS3.



(d) Cheetah.

Figura 69: Robots cuadrúpedos de Boston Dynamics.

A partir de éste se han creado robots similares como LittleDog, diseñado para investigar locomoción por aprendizaje (*learning locomotion*); Cheetah, el robot cuadrúpedo más rápido del mundo, que alcanza una velocidad de 29 mph (cerca de 47 km/h); la evolución de BigDog, llamada LS3; o más recientemente Spot, un cuadrúpedo diseñado para desenvolverse también en interiores y capaz de subir escaleras.

## 4. Definición de funcionalidades

La estructura modular debe poder realizar una serie de funciones que se han determinado en el apartado anterior mediante el estudio de los robots empleados

en distintos campos.

De forma general, cualquier tipo de robot necesita disponer de módulos con funciones de:

- Movimiento. Mediante articulaciones tanto lineales como rotativas. Estas últimas deben permitir giros axiales y radiales.
- Sensorización (proximidad, luz, posición, etc).
- Control. Este módulo debe encargarse del procesado de datos y control de todos los componentes.
- Soporte estructural. Módulos encargados de generar la estructura del robot y de conectar otros módulos.

Como vimos, en el sector de robótica de servicios, educativa y ocio las configuraciones más habituales son robots con ruedas (robots móviles de 2, 3 o 4 ruedas), con patas (robots humanoides o cuadrúpedos) o serpiente. La estructura modular propuesta deberá permitir realizar las funciones de cualquiera de estos robots que a modo de resumen podemos identificar en:

- Desplazamiento en el plano (por ejemplo robot con ruedas)
- Evitación de obstáculos en 3D (por ejemplo robots con patas)

La estructura modular también debe incorporar las funcionalidades, a menor escala, de los robots del sector industrial como robots antropomorfos, robots cartesianos, robots SCARA o robots paralelos (esta opción está aún por determinar debido a la complejidad estructural). En resumen podemos identificar las siguientes funcionalidades de estos tipos de robots:

- Desplazamiento del extremo en el espacio cartesiano (movimientos de posición y orientación)
- Capacidad de traslado de objetos (con diferentes cargas)
- Posibilidad de incorporar herramientas varias.

## 5. Anexo I. Placas de desarrollo genéricas

- Samsung Artik (Figura 70)
  - PROCESADOR  
Dual Core @250MHz + @80MHz;
  - MEMORIA  
1MB on-chip + 4 MB SPI Flash;
  - CONECTIVIDAD  
Bluetooth Low Energy (BLE) 4.0;
  - OS  
Nucleus OS;
  - SENSORES  
Acelorómetro de 3 ejes; Giróscopo de 3 ejes; Magnetómetro de 3 ejes;
  - ENTORNO DE DESARROLLO  
Arduino IDE; Samsung SDK; C/C++;
  - TAMAÑO  
12mm x 12mm;

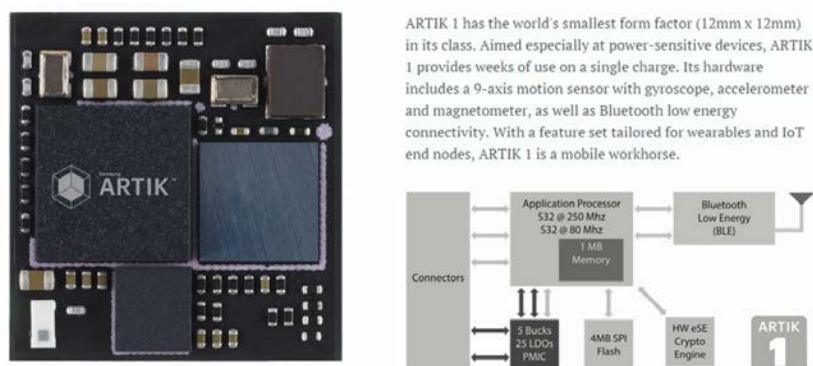


Figura 70: Placa de desarrollo Artik

- Samsung Artik 5 (Figura 71)

- PROCESADOR  
ARM A7 Dual + @ 1GHz;
  - MEMORIA  
512MB LPDDR3;
  - CONECTIVIDAD  
BT/BLE 4.0; WiFi 802.11 b/g/n; Zigbee Thread Planned;
  - OS  
Yocto 1.6 OS (Fedora);
  - ALIMENTACION  
3.4V – 5V ;
  - PONTECIA  
1.8V/100mA + 2.4V/100mA;
  - INTERFACE  
GPIO 47 (2 PWM output including); AI 2 (0 – 1.8V range); UART 2;  
I2C 4; SPI 1; I2S 1; USB 1; MMC 1 (TFlash); MIPI 1 DSI (2 LANE)  
+ 1 CSI (2 LANE);
  - ENTORNO DE DESARROLLO  
Arduino IDE; Samsung SDK; C/C++; Java; Groovy;
  - TAMAÑO  
29mm x 25mm x 3.5mm;
- Intel Edison (Figura 72)
- PROCESADOR  
Dual-core Intel® Atom™ at 500 MHz and a 32-bit Intel® Quark™;  
microcontroller at 100MHz;
  - MEMORIA  
1 GB LPDDR3 POP memory;
  - ALMACENAMIENTO  
4 GB eMMC;



ARTIK 5 uses Samsung's next-generation ePoP (package-on-package) technology to offer a broad cross-section of devices and applications the best combination of computing power and storage capacity at its size. ARTIK 5 offers a balance between performance and power consumption that is unique in the industry. Integrating ARM processors, best-in-class security features and a range of wireless connectivity options, ARTIK 5 delivers not only the essentials, but a new standard for IoT applications.

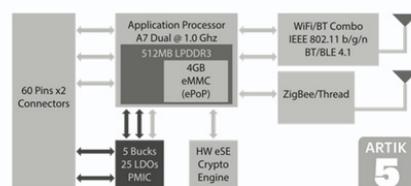


Figura 71: Placa de desarrollo Artik 5

- CONECTIVIDAD
  - BT 4.0; WiFi 802.11 b/g/n;
- OS Yocto 1.6 OS (Fedora);
  - RTOS;
- ALIMENTACIÓN —
- POTENCIA
  - 100 ma @3.3 V and 100 ma @ 1.8 V;
- CONSUMO
  - Standby (No radios): 13 mW ; Standby (Bluetooth 4.0): 21.5 mW (BTLE in Q4-14); Standby (Wi-Fi): 35 mW;
- INTERFACE
  - GPIO 40; AI 6; UART 2 (1 full flow control, 1 Rx/Tx); SD Card 1; I2C 2 ; SPI 1 con 2 chip selects; I2S 1 ; GPIO 12 Adicionales (4 con capacidad para PWM); USB 1 OTG; CLOCK OUT 32 kHz, 19.2 MHz;
- ENTORNO DE DESARROLLO
  - Arduino IDE; C/C++; Phyton; Intel XDK supporting: Node.JS and HTML5;
- TAMAÑO
  - 35.5mm x 25mm x 3.9mm;

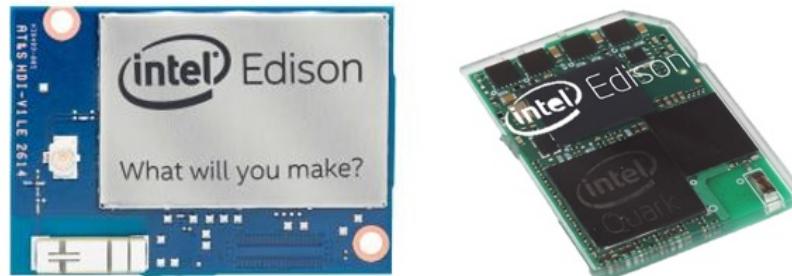


Figura 72: Placa de desarrollo Intel Edison

■ Espruino (Figura 73)

• PROCESADOR

STM32F103RCT6 32-bit 72MHz ARM Cortex M3 CPU;

• MEMORIA

256KB of Flash memory, 48KB of RAM;

• ALMACENAMIENTO

—

• CONECTIVIDAD

BT pads para montaje; WiFi pads para montaje;

• OS

—

• ALIMENTACIÓN

3.6V – 15V;

• POTENCIA

—

• CONSUMO

—

• INTERFACE

GPIO 44; AI 16; AO 2; PWM 26 pins; USART 3 ; SD Card 1; I2C 2;  
SPI 2; USB 1 Micro;

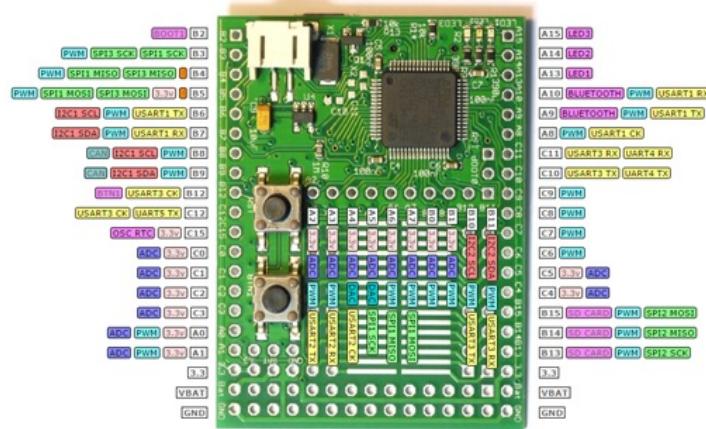


Figura 73: Placa de desarrollo Espruino

- ENTORNO DE DESARROLLO
  - JavaScript;
- TAMAÑO
  - 54mm x 41mm;
- Espruino Pico (Figura 74)
  - PROCESADOR
    - STM32F401 CPU - ARM Cortex M4;
  - MEMORIA
    - 384kb flash, 96kb RAM;
  - ALMACENAMIENTO
    -
  - CONECTIVIDAD
    - BT pads para montaje; WiFi pads para montaje;
  - OS
    -
  - ALIMENTACIÓN
    - 3.6V – 16V;

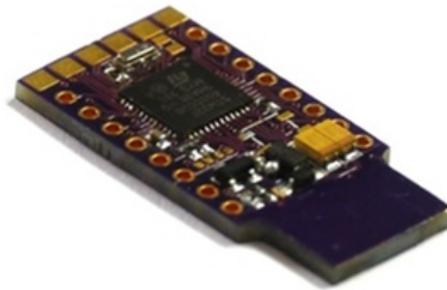


Figura 74: Placa de desarrollo Espruino Pico

- POTENCIA
    - On-board 3.3v 150mA voltage regulator;
  - CONSUMO
    - Current draw in sleep: <0.05mA - over 2.5 years on a 2500mAh battery;
  - INTERFACE
    - GPIO 22; PWM 21 pins; AI 9; UART 2; I2C 3; SPI 3; USB 1 Tipo A;
  - ENTORNO DE DESARROLLO
    - JavaScript;
  - TAMAÑO
    - 32mm x 15mm;
- Photon (figura 75)
- PROCESADOR
    - STM32F205 120Mhz ARM Cortex M3;
  - MEMORIA
    - 128KB RAM;
  - ALMACENAMIENTO
    - 1 MB flash;
  - CONECTIVIDAD
    - WiFi 802.11 b/g/n;

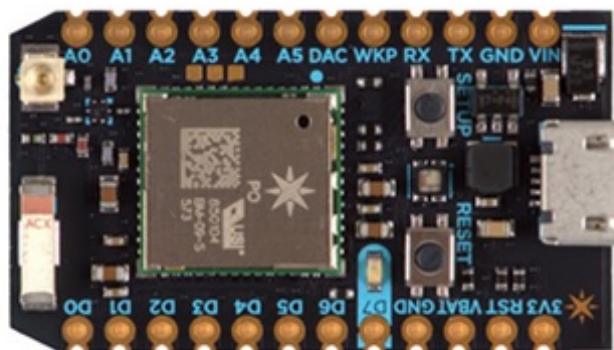


Figura 75: Placa de desarrollo Photon

- OS  
FreeRTOS;
- ALIMENTACIÓN  
3.6V – 5.5V ;
- POTENCIA  
100 mA @3.3 V;
- CONSUMO  
Operating Current (Wi-Fi on) 80 100 mA; Operating Current (Wi-Fi on, w/powersave) 18 100 mA; Operating Current (Wi-Fi off) 30 40 mA;
- INTERFACE  
GPIO 18; AI 8; AO 2; I2C 1; SPI 2; I2S 1; CAN 1; USB 1;
- ENTORNO DE DESARROLLO  
Arduino IDE; C/C++; Phyton; Intel XDK supporting: Node.JS and HTML5;
- TAMAÑO  
36.58mm x 20.32mm x 6.86mm (5 gramos);
- Bean + (Figura 76)
  - PROCESADOR

Atmega328p;

- MEMORIA

—

- ALMACENAMIENTO

—

- CONECTIVIDAD

BTL 4.0;

- OS

—

- ALIMENTACIÓN

—

- POTENCIA

—

- CONSUMO

—

- INTERFACE

GPIO 16 ;

- SENsoRES

Acelerómetro de 3 ejes; Sensor de temperatura;

- ENTORNO DE DESARROLLO

Arduino IDE; LightBlue API;

- TAMAÑO

3.5mm x 6.5mm;

- OTROS

Incluye una LiPO para su funcionamiento;

- MicroView (Figura 77)

- PROCESADOR

ATmega328P;

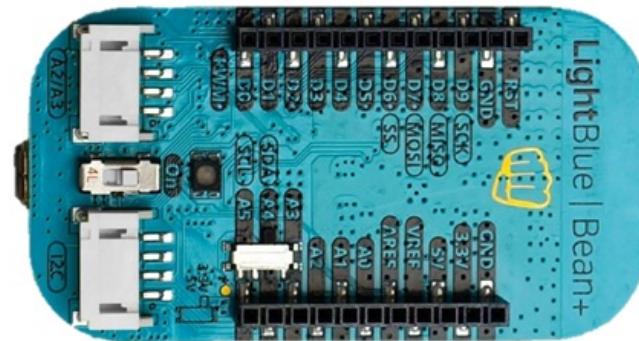


Figura 76: Placa de desarrollo Bean +

- MEMORIA  
2 KB;
- ALMACENAMIENTO  
32 KB;
- CONECTIVIDAD  
—
- OS  
—
- ALIMENTACIÓN  
3.3VDC - 16VDC ;
- POTENCIA  
—
- CONSUMO  
—
- INTERFACE  
DIO 12 (3 con PWM); AI 6;
- ENTORNO DE DESARROLLO  
Arduino IDE;
- OTROS  
Incluye pantalla OLED;

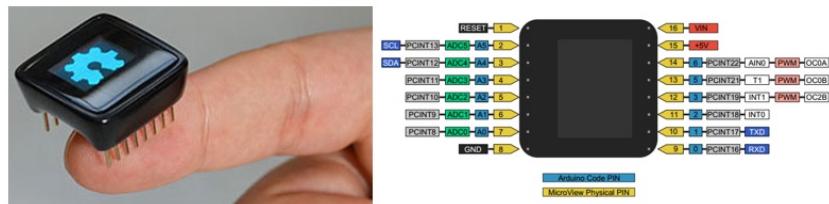


Figura 77: Placa de desarrollo Microview

■ Piccolino (figura 78)

- PROCESADOR  
ATmega328P 16Mhz;
- MEMORIA  
2 KB;
- ALMACENAMIENTO  
32 KB;
- CONECTIVIDAD  
WiFi 802.11 b/g/n;
- OS  
—
- ALIMENTACIÓN  
3.3VDC - 16VDC ;
- POTENCIA  
—
- CONSUMO  
—
- INTERFACE  
DIO 12 (3 con PWM); AI 5; I2C 1; SPI 1; SD Card;
- ENTORNO DE DESARROLLO  
Arduino IDE;
- OTROS  
Incluye pantalla OLED;



Figura 78: Placa de desarrollo Piccolino

- Arduino Zero (Figura 79)

- PROCESADOR

ATSAMD21G18, 32-Bit ARM Cortex M0+ 48Mhz;

- MEMORIA

32 KB;

- ALMACENAMIENTO

256 KB;

- CONECTIVIDAD

—

- OS

—

- ALIMENTACIÓN

6 a 20V;

- POTENCIA

—

- CONSUMO

—

- INTERFACE

GPIO 20 ; AI 6 ; AO 1; DIO 14 (12 con PWM); USB 1;

- ENTORNO DE DESARROLLO

Arduino IDE;

- TAMAÑO

35.5mm x 25mm x 3.9mm;



Figura 79: Placa de desarrollo Arduino Zero

- Apollo (Figura 80)

- PROCESADOR
  - ARM Cortex-M3;
- MEMORIA
  -
- ALMACENAMIENTO
  -
- CONECTIVIDAD
  - BT; WiFi; GPS;
- SENSORES
  - Temperatura; Presión; Humedad; Intensidad de la luz (infrarroja y ultravioleta); Acelerómetro de 3 ejes; Giróscopo de 3 ejes; Magnetómetro de 3 ejes;
- OS
  -
- ALIMENTACIÓN
  -
- POTENCIA
  -



Figura 80: Placa de desarrollo Apollo

- CONSUMO
  -
- INTERFACE
  -
- ENTORNO DE DESARROLLO
  -
- TAMAÑO
  -
- OTROS

Incluye pantalla OLED. Ideado para control de cohetes

■ Wino (Figura 81)

- PROCESADOR
  - Atmel ATSAMD21 ARM Cortex M0 48Mhz;
- MEMORIA
  - 16 KB;
- ALMACENAMIENTO
  - 256 KB;
- CONECTIVIDAD
  - WiFi 802.11 b/g/n;

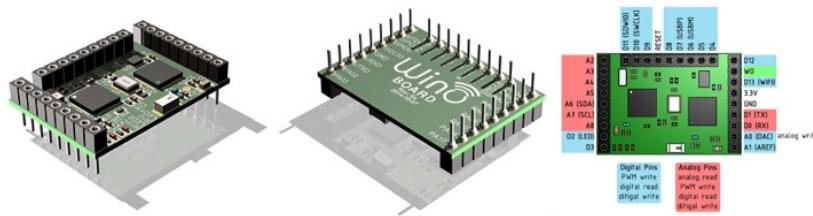


Figura 81: Placa de desarrollo Wino

- OS
    -
  - ALIMENTACIÓN
    - 6 a 20V
  - POTENCIA
    -
  - CONSUMO
    - Microcontrolador (SAMD21) Encendido 1-5 mA; Microcontrolador (SAMD21)  
En espera 3 mA; WIFI-Chip (ESP8266) Enviando 150 mA; WIFI-Chip  
(ESP8266) Recibiendo 50 mA; WIFI-Chip (ESP8266) Dormido 1-15  
mA;
  - INTERFACE
    - AI 7; AO 1; DIO 15;
  - ENTORNO DE DESARROLLO
    - Arduino IDE;
  - TAMAÑO
    - 18.5mm x 26.5mm
- The Neutrino (Figura 82)
- PROCESADOR
    - ATSAMD21G18, 32-Bit ARM Cortex M0+ 48Mhz;
  - MEMORIA
    - 32 KB;

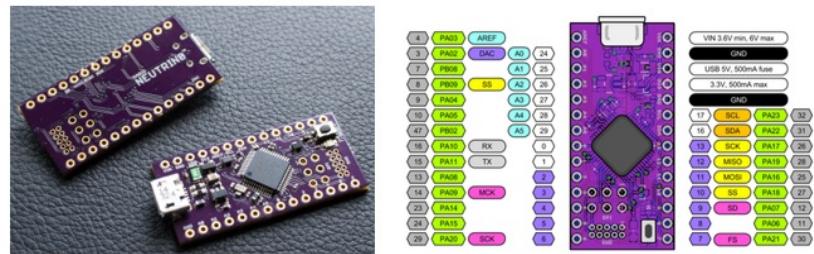


Figura 82: Placa de desarrollo Neutrino

- ALMACENAMIENTO
    - 256 KB;
  - CONECTIVIDAD
    -
  - OS
    -
  - ALIMENTACIÓN
    - 3.7 a 6V;
  - POTENCIA
    -
  - CONSUMO
    -
  - INTERFACE
    - GPIO 20 ; AI 6 ; AO 1; DIO 14 (12 con PWM); USB 1 ;
  - ENTORNO DE DESARROLLO
    - Arduino IDE;
  - TAMAÑO
    - 38mm x 18mm
- MetaWear (Figura 83)
- PROCESADOR
    - Nordic BLE SOC + ARM Cortex M0;

- MEMORIA  
8 KB;
  - ALMACENAMIENTO  
256 KB;
  - CONECTIVIDAD  
Bt 4.0;
  - OS  
—
  - ALIMENTACIÓN  
—
  - POTENCIA  
—
  - CONSUMO  
—
  - INTERFACE  
GPIO 2; USB 1;
  - SENSORES  
Acelerómetro de 3 ejes; Sensor de temperatura; Vibrador (no es un sensor);
  - ENTORNO DE DESARROLLO  
Arduino IDE;
  - TAMAÑO 38mm x 18mm
- Udo Neo (Figura 84)
- PROCESADOR  
Freescale™ i.MX 6SoloX with an embedded ARM Cortex-A9 core and a Cortex-M4 Core;
  - MEMORIA  
1 GB DDR3;

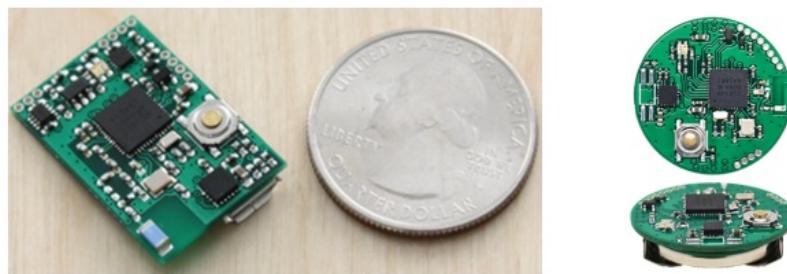


Figura 83: Placa de desarrollo Metawear

- ALMACENAMIENTO
  -
- CONECTIVIDAD
  - BT 4.0; WiFi 802.11 b/g/n; Ethernet;
- OS
  - Android; Linux;
- ALIMENTACIÓN
  - 6-15V;
- POTENCIA
  -
- CONSUMO
  -
- INTERFACE
  - GPIO 36 (8 PWM); AI 6; I2C 1; SPI 1; UART 3; CAN bus 2; SD Card;
- SENSORES
  - Acelerómetro de 3 ejes; Giróscopo de 3 ejes; Magnetómetro de 3 ejes;
- ENTORNO DE DESARROLLO
  - Arduino IDE; C/C++ ; Python; Php/LAMP; Java; Android Programming;
- TAMAÑO
  - 85mm x 59.3mm

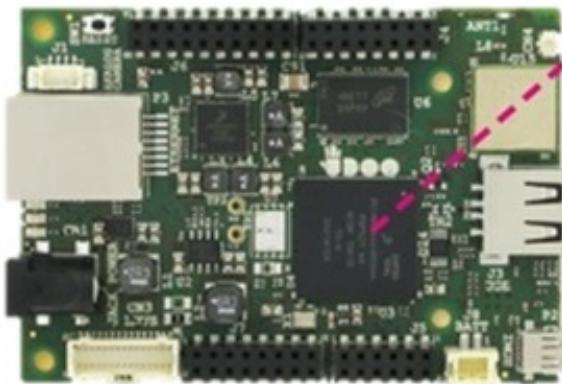


Figura 84: Placa de desarrollo Udo Neo

- CHIP (Figura 85)
  - PROCESADOR  
Allwinner A12 1Ghz
  - MEMORIA  
512 MB DDR3 ;
  - ALMACENAMIENTO  
4GB;
  - CONECTIVIDAD  
BT 4.0; WiFi 802.11 b/g/n;
  - OS  
Linux Debian;
  - ALIMENTACIÓN  
6-15V;
  - POTENCIA  
—
  - CONSUMO  
—
  - INTERFACE  
GPIO 8; I2C 1; SPI 1; UART 1;

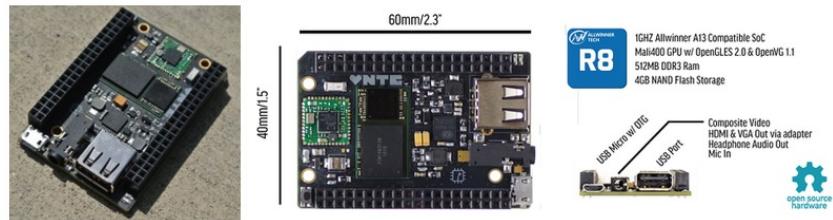


Figura 85: Placa de desarrollo Chip

- SENSORES
- 
- ENTORNO DE DESARROLLO
- 
- TAMAÑO 60mm x 40mm
- BeagleBone Black (Figura 86)
  - PROCESADOR  
AM335x 1GHz ARM® Cortex-A8
  - MEMORIA  
512 MB DDR3
  - ALMACENAMIENTO  
4GB eMMC
  - CONECTIVIDAD  
Ethernet;
  - OS  
Linux; Android; QNX; ThreadX;
  - ALIMENTACIÓN  
5V;
  - POTENCIA
  - 
  - CONSUMO
  -

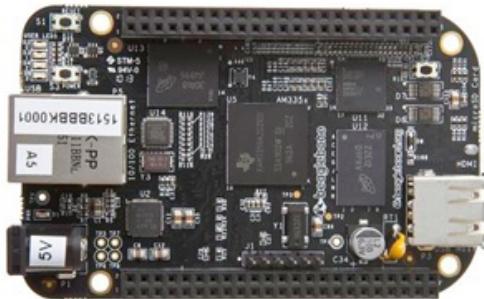


Figura 86: Placa de desarrollo BeagleBone

- INTERFACE
  - GPIO 65; I2C 3; SPI 2; UART 6; USB 1;
- SENsoRES
- 
- ENTORNO DE DESARROLLO
- 
- TAMAÑO
  - 86.36mm x 53.34mm x 4.77mm (39.68g);
- OTROS
  - HDMI;

## Referencias

- [1] Big dog. [http://www.bostondynamics.com/robot\\_bigdog.html](http://www.bostondynamics.com/robot_bigdog.html). Último acceso: 2015-12-23.
- [2] Darpa robotics challenge. <http://www.theroboticschallenge.org/>. Último acceso: 2015-12-23.
- [3] <http://www.schunk-modular robotics.com>.
- [4] International collaborative robots workshop 2015. [www.robotics.org/icrw2015](http://www.robotics.org/icrw2015). Último acceso: 2015-12-12.

- [5] International federation of robotics. <http://www.ifr.com>. Último acceso: 2015-12-10.
- [6] Petman. [http://www.bostondynamics.com/robot\\_petman.html](http://www.bostondynamics.com/robot_petman.html). Último acceso: 2015-12-23.
- [7] Rethink robotics. <http://www.rethinkrobotics.com/baxter/>. Último acceso: 2015-12-10.
- [8] Stiquito, the inexpensive hexapod robot. <http://www.stiquito.com/>. Último acceso: 2015-12-10.
- [9] [www.tinkerbots.com](http://www.tinkerbots.com).
- [10] M. Beetz, D. Jain, L. Mösenlechner, and M. Tenorth. Towards Performing Everyday Manipulation Activities. *Robotics and Autonomous Systems*, 58(9):1085–1095, 2010.
- [11] C. F. C. Berrio. *Design, Modelling and Control of Two Degrees of Freedom Flexible Antenna Sensors*. PhD thesis, Universidad de Castilla-La Mancha, 2016.
- [12] R. Bischoff, J. Kurth, G. Schreiber, R. Koeppe, A. Albu-Schaeffer, A. Beyer, O. Eiberger, S. Haddadin, A. Stemmer, G. Grunwald, and G. Hirzinger. The kuka-dlr lightweight robot arm - a new reference platform for robotics research and manufacturing. In *Robotics (ISR), 2010 41st International Symposium on and 2010 6th German Conference on Robotics (ROBOTIK)*, pages 1–8, June 2010.
- [13] J. Bishop, S. Burden, E. Klavins, R. Kreisberg, W. Malone, N. Napp, and T. Nguyen. Programmable parts: A demonstration of the grammatical approach to self-organization. In *Intelligent Robots and Systems, 2005.(IROS 2005). 2005 IEEE/RSJ International Conference on*, pages 3684–3691. IEEE, 2005.
- [14] R. Brooks. A robot that walks; emergent behaviors from a carefully evolved network. *Neural Computation*, 1(2):253–262, June 1989.

- [15] C. Chevallereau, G. Bessonnet, G. Abba, and Y. Aoustin. *Bipedal Robots: Modeling, Design and Walking Synthesis*. Wiley-ISTE, 2010.
- [16] J. Conrad and J. J. Brickley. Using stiquito in an introduction to engineering skills and design course. In *Frontiers in Education Conference, 1997. 27th Annual Conference. Teaching and Learning in an Era of Change. Proceedings.*, volume 3, pages 1212–1214 vol.3, Nov 1997.
- [17] J. Davey, N. Kwok, and M. Yim. Emulating self-reconfigurable robots-design of the smores system. In *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2012 IEEE/RSJ International Conference on*, pages 4464–4469. IEEE, 2012.
- [18] C. Fitzgerald. Developing baxter. In *Technologies for Practical Robot Applications (TePRA), 2013 IEEE International Conference on*, pages 1–6, April 2013.
- [19] M. Fuchs, C. Borst, P. Giordano, A. Baumann, E. Kraemer, J. Langwald, R. Gruber, N. Seitz, G. Plank, K. Kunze, R. Burger, F. Schmidt, T. Wimboeck, and G. Hirzinger. Rollin' justin - design considerations and realization of a mobile platform for a humanoid upper body. In *Robotics and Automation, 2009. ICRA '09. IEEE International Conference on*, pages 4131–4137, May 2009.
- [20] K. C. Galloway, G. C. Haynes, B. D. Ilhan, A. M. Johnson, R. Knopf, G. Lynch, B. Plotnick, M. White, and D. E. Koditschek. X-rhex: A highly mobile hexapedal robot for sensorimotor tasks. Technical report, University of Pennsylvania, 2010.
- [21] K. Gilpin, K. Kotay, D. Rus, and I. Vasilescu. Miche: Modular shape formation by self-disassembly. *The International Journal of Robotics Research*, 27(3-4):345–372, 2008.
- [22] J. Gonzalez-Gomez, H. Zhang, E. Boemo, and J. Zhang. Locomotion capabilities of a modular robot with eight pitch-yaw-connecting modules. In *9th international conference on climbing and walking robots*, 2006.
- [23] J. González-Gómez. *Robótica Modular y Locomoción: Aplicación a Robots Ápodos*. PhD thesis, Universidad Autónoma de Madrid, 2008.

- [24] J. Heaston, D. Hong, I. Morazzani, P. Ren, and G. Goldman. Strider: Self-excited tripodal dynamic experimental robot. In *Robotics and Automation, 2007 IEEE International Conference on*, pages 2776–2777, April 2007.
- [25] K. Hosokawa, T. Tsujimori, T. Fujii, H. Kaetsu, H. Asama, Y. Kuroda, and I. Endo. Self-organizing collective robots with morphogenesis in a vertical plane. In *Robotics and Automation, 1998. Proceedings. 1998 IEEE International Conference on*, volume 4, pages 2858–2863. IEEE, 1998.
- [26] B. Le Boudec, M. Saad, and V. Nerguzian. Modeling and adaptive control of redundant robots. *Mathematics and Computers in Simulation*, 71(4):395–403, 2006.
- [27] P. Liljeback, K. Y. Pettersen, O. Stavdahl, and J. T. Gravdahl. *Snake Robots: Modelling, Mechatronics, and Control*. Advances in Industrial Control. Springer-Verlag, 2013.
- [28] A. Magnússon, M. Pacheco, M. Moghadam, H. H. Lund, and D. J. Christensen. Fable: Socially interactive modular robot. In *The Eighteenth International Symposium on Artificial Life and Robotics 2013*, 2013.
- [29] A. Marco, P. Hennig, J. Bohg, S. Schaal, and S. Trimpe. Automatic lqr tuning based on gaussian process global optimization. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA) 2016*. IEEE, May 2016.
- [30] S. Murata, E. Yoshida, A. Kamimura, H. Kurokawa, K. Tomita, and S. Kokaji. M-tran: Self-reconfigurable modular robotic system. *Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on*, 7(4):431–441, 2002.
- [31] J. Neubert, A. P. Cantwell, S. Constantin, M. Kalontarov, D. Erickson, and H. Lipson. A robotic module for stochastic fluidic assembly of 3d self-reconfiguring structures. In *Robotics and Automation (ICRA), 2010 IEEE International Conference on*, pages 2479–2484. IEEE, 2010.
- [32] E. Pereira, J. Becedas, I. Payo, F. Ramos, and V. Feliu. *Robot Manipulators Trends and Development*, chapter Control of Flexible Manipulators. Theory and Practice, pages 268–296. InTech, 2010.

- [33] R. F. Rodríguez. *Manipulación Robótica Con Estructuras Flexibles*. PhD thesis, Universidad de Castilla-La Mancha, 2016.
- [34] B. Salemi, M. Moll, and W.-M. Shen. Superbot: A deployable, multi-functional, and modular self-reconfigurable robotic system. In *Intelligent Robots and Systems, 2006 IEEE/RSJ International Conference on*, pages 3636–3641. IEEE, 2006.
- [35] E. Schweikardt. Modular robotics studio. In *Proceedings of the fifth international conference on Tangible, embedded, and embodied interaction*, pages 353–356. ACM, 2011.
- [36] M. Shimizu, A. Ishiguro, and T. Kawakatsu. Slimebot: A modular robot that exploits emergent phenomena. In *Robotics and Automation, 2005. ICRA 2005. Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on*, pages 2982–2987. IEEE, 2005.
- [37] R. Siegwart and I. R. Nourbakhsh. *Autonomous Mobile Robots*. MIT Press, 2004.
- [38] A. Spröwitz, R. Möckel, M. Vespignani, S. Bonardi, and A. Ijspeert. Room-bots: A hardware perspective on 3d self-reconfiguration and locomotion with a homogeneous modular robot. *Robotics and Autonomous Systems*, 62(7):1016–1033, 2014.
- [39] Y. Terada and S. Murata. Automatic modular assembly system and its distributed control. *The International Journal of Robotics Research*, 27(3-4):445–462, 2008.
- [40] T. Thueer, R. Siegwart, and P. Backes. Planetary vehicle suspension options. In *Aerospace Conference, 2008 IEEE*, pages 1–13, March 2008.
- [41] C. Ünsal and P. K. Khosla. Mechatronic design of a modular self-reconfiguring robotic system. In *Robotics and Automation, 2000. Proceedings. ICRA '00. IEEE International Conference on*, volume 2, pages 1742–1747. IEEE, 2000.
- [42] J. Walsh. Robotis ollo education series robots flexible, programmable construction kits for rolling and walking robots. *Robot-Congers*, (25):74, 2010.

- [43] H. Wei, Y. Cai, H. Li, D. Li, and T. Wang. Sambot: A self-assembly modular robot for swarm robot. In *Robotics and Automation (ICRA), 2010 IEEE International Conference on*, pages 66–71. IEEE, 2010.
- [44] P. White, K. Kopanski, and H. Lipson. Stochastic self-reconfigurable cellular robotics. In *Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA '04. 2004 IEEE International Conference on*, volume 3, pages 2888–2893. IEEE, 2004.
- [45] M. Yim, D. G. Duff, and K. D. Roufas. Polybot: a modular reconfigurable robot. In *Robotics and Automation, 2000. Proceedings. ICRA '00. IEEE International Conference on*, volume 1, pages 514–520. IEEE, 2000.
- [46] M. Yim, W.-M. Shen, B. Salemi, D. Rus, M. Moll, H. Lipson, E. Klavins, and G. S. Chirikjian. Modular self-reconfigurable robot systems [grand challenges of robotics]. *Robotics & Automation Magazine, IEEE*, 14(1):43–52, 2007.
- [47] M. Zinn, O. Khatib, B. Roth, and J. Salisbury. Playing it safe [human-friendly robots]. *Robotics & Automation Magazine, IEEE*, 11(2):12–21, June 2004.
- [48] V. Zykov, A. Chan, and H. Lipson. Molecubes: An open-source modular robotics kit. In *IROS-2007 Self-Reconfigurable Robotics Workshop*, pages 3–6. Citeseer, 2007.