
Robótica colaborativa

PID_00253865

Carles Soler Puig

Tiempo mínimo de dedicación recomendado: 5 horas



**Carles Soler Puig**

Ingeniero de Telecomunicación por la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC) y MBA por ESADE Business School. Experto en robótica colaborativa, actualmente es director de Casiopea Robotics. Preside la Fundación educaBOT. Miembro de la Comisión Industria 4.0 de Enginyers de Catalunya.

Índice

1. Introducción a la robótica.....	5
1.1. Definición	5
1.2. Antecedentes	6
1.3. Robótica industrial y robótica de servicio	8
1.4. Tipos de robots industriales	9
1.4.1. Articulado o antropomórfico	9
1.4.2. Cartesiano	10
1.4.3. Cilíndrico	10
1.4.4. Delta o paralelo	10
1.4.5. Esférico o polar	11
1.4.6. SCARA (Selective Compliant Assembly Robot Arm o Selective Compliance Articulated Robot Arm)	11
1.5. Principales características de los robots industriales	12
1.6. Elementos terminales	13
1.6.1. Pinzas (<i>gripper</i>)	13
1.7. Programación	15
1.7.1. Codificación <i>offline</i>	15
1.7.2. Consola	15
1.7.3. <i>Teaching by demonstration</i>	15
1.7.4. Simulación	16
1.8. Mercado de la robótica industrial	16
1.8.1. Sectores	16
1.8.2. Ventas anuales	17
1.8.3. Proveedores	17
1.9. Tendencias	18
2. Robótica colaborativa.....	19
2.1. Situación de partida	19
2.2. Robot colaborativo	20
2.3. Tipos de operaciones colaborativas	20
2.3.1. Parada controlada de seguridad	21
2.3.2. Monitorización de velocidad y separación	21
2.3.3. Guiado a mano	22
2.3.4. Limitación de fuerza y potencia	22
2.4. Aparición de los robots colaborativos	23
2.5. Consolidación de la oferta	24
2.5.1. Los fabricantes ya establecidos	25
2.5.2. Los fabricantes tradicionales de robots industriales	26
2.5.3. Nuevos fabricantes	27
2.6. Propuestas actuales de mercado	28
2.7. Propuestas de valor de los robots colaborativos	28
2.7.1. Facilidad	28

2.7.2.	Flexibilidad	29
2.7.3.	Coste reducido	29
2.8.	Evolución del mercado	30
2.9.	Elementos terminales colaborativos	30
2.9.1.	Sensores	31
3.	Procedimiento de implantación.....	32
3.1.	Optimización de procesos	32
3.2.	Identificación de los procesos para robotizar	33
3.2.1.	Actividades que hay que eliminar	33
3.2.2.	Reducción de costes	33
3.2.3.	Mejora de las prestaciones	33
3.2.4.	Impacto en la fuerza laboral	34
3.3.	Análisis de los procesos robotizables	34
3.4.	Selección del robot	36
3.5.	Cálculo del ROI	37
4.	Consideraciones de seguridad en robótica colaborativa.....	39
4.1.	Antecedentes	39
4.2.	Legislación general	40
4.2.1.	Legislación europea y española	41
4.2.2.	Normativas técnicas	41
4.3.	ISO/TS 15066:2016	42
4.3.1.	Nivel de lesión	43
4.3.2.	Análisis de riesgos	45
4.4.	Seguridad informática	48
5.	Aplicaciones colaborativas en entornos de producción.....	50
5.1.	Movimiento de piezas	50
5.1.1.	<i>Machine tending</i>	51
5.1.2.	<i>Pick and place</i>	52
5.1.3.	Empaquetado	52
5.1.4.	Paletizado	53
5.2.	Operaciones sobre piezas	54
5.2.1.	Ensamblado	54
5.2.2.	Atornillado	55
5.2.3.	Encolado	55
5.2.4.	Acabado	56
5.3.	Actuaciones de calidad	56
5.3.1.	Inspección	57
5.3.2.	Test	57

1. Introducción a la robótica

1.1. Definición

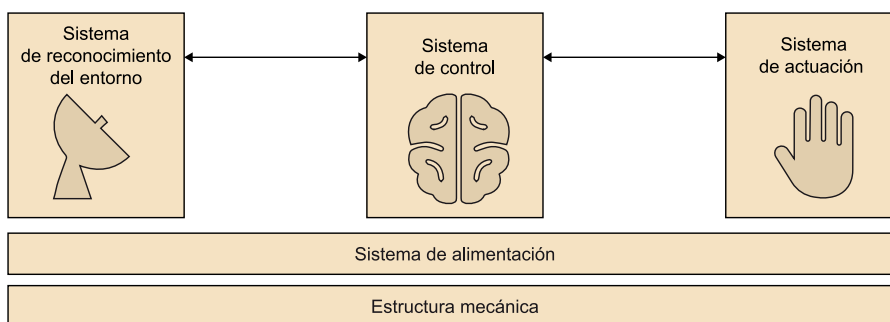
Existen múltiples definiciones de "robot". La que podría ser considerada como oficial, la del vocabulario de la ISO (norma ISO 8373:2012), dice que un robot es un

"mecanismo programable en dos o más ejes, con un cierto grado de autonomía, que se mueve dentro de su entorno para realizar las tareas previstas".

Esta es una definición muy genérica, inclusiva con los dispositivos que hoy se califican de robots de primera generación: manipuladores mecánicos multifuncionales con un sencillo sistema de control.

Actualmente están operativos los robots de cuarta generación, el llamado "robot inteligente" (figura 1). Podemos definirlo como un dispositivo electromecánico que tiene capacidad para captar información de su entorno (a través de sensores: contacto, luz, temperatura...), procesarla (mediante un procesador electrónico con algún programa incorporado) y actuar en consecuencia (básicamente efectuando algún movimiento, pero también emitiendo señales acústicas o lumínicas), todo ello soportado sobre una estructura física (así, un programa de ordenador no es un robot) y alimentado con algún sistema de energía.

Figura 1. Estructura básica de un robot de cuarta generación



Fuente: elaboración propia.

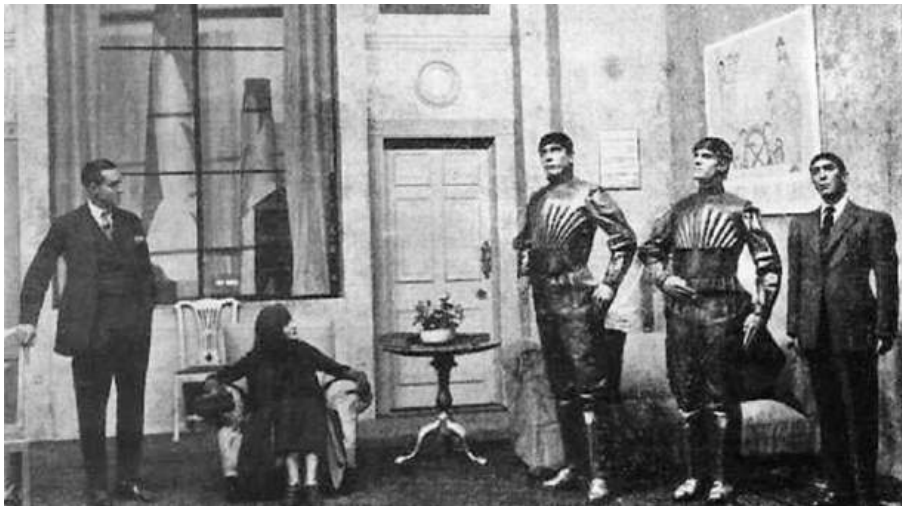
Paradójicamente, esta definición no aceptaría como robot muchos dispositivos a los que hoy nadie duda en dar esa consideración (robots industriales, médicos...), los cuales sí se adecúan a la definición normativa de la ISO.

1.2. Antecedentes

Desde siempre, el ser humano se ha caracterizado por la construcción de dispositivos que le ayudaran en sus actividades. Con el tiempo, estos dispositivos han aumentado en su grado de autonomía. Así, inicialmente las herramientas permitían "hacer" (cortar, serrar, pulir...) cuando eran directamente manipuladas. Más evolucionados, los sistemas automatizados podían adaptar mecánicamente su actuación según su entorno. Actualmente, los robots adaptan dicha actuación a partir de algún tipo de algoritmo programado, lo que algunos podrían calificar, de manera poco acertada, como "pensar".

Por otra parte, el ser humano ha tenido fascinación por construir máquinas y dispositivos que lo imitaran. Los antiguos egipcios unieron brazos mecánicos a las estatuas de sus dioses, que eran operados por sacerdotes. Los griegos construyeron estatuas que maniobraban con sistemas hidráulicos y les dieron el nombre de *automatos* (del cual deriva la palabra *autómata*, 'máquina que imita la figura y movimientos de un ser animado'). Los cuadernos de Leonardo da Vinci contienen dibujos de un caballero mecánico de armadura que era capaz de agitar los brazos, mover la cabeza y la mandíbula, y sentarse (aunque no se tiene constancia de que llegara a construirlo). Durante los siglos XVII y XVIII en Europa se construyeron muñecos mecánicos muy ingeniosos orientados a la diversión: bailarinas, músicos, dibujantes...

Figura 2: Representación de R.U.R.

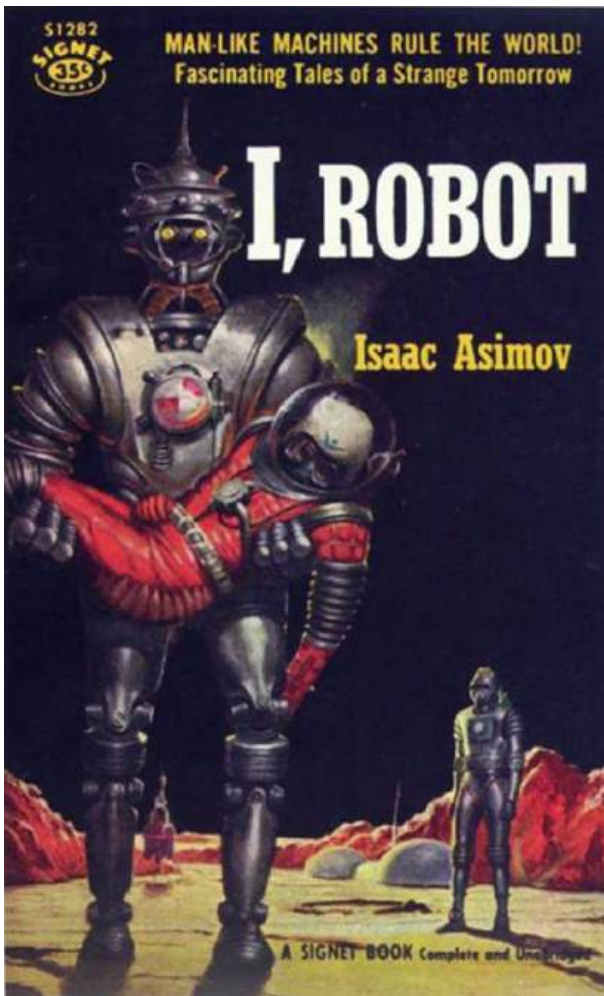


Fuente: Wikipedia.

La palabra *robot* aparece por primera vez en la obra teatral del autor checo Karel Čapek titulada *R.U.R.* (iniciales de *Rossumovi Univerzální Roboti*, o *Robots Universales de Rossum*), escrita en 1920. El vocablo checo *robota* significa 'trabajo forzado' o 'servidumbre'. Los robots de *R.U.R.* eran máquinas androides fabricadas por un brillante científico llamado Rossum que servían a sus jefes humanos desarrollando todos los trabajos físicos, hasta que finalmente se rebelaron contra sus dueños y destruyeron toda la vida humana a excepción de uno de sus creadores, con la frustrada esperanza de que les enseñara a reproducirse.

El primer robot que aparece en una película fue Maria, personaje de la película *Metrópolis*, de Fritz Lang. Pero fue Isaac Asimov quien popularizó el concepto a partir de una colección de nueve relatos de ciencia ficción que aparecieron originalmente en las revistas americanas *Super Science Stories* y *Astounding Science Fiction* entre 1940 y 1950, y que en 1950 fueron compiladas en el libro *I, Robot*. En uno de esos relatos es donde aparecieron por primera vez las famosas Tres Leyes de la Robótica.

Figura 3. Portada del libro *I, Robot*



Fuente: Wikipedia

El primer dispositivo del mundo real que podemos denominar robot fue el Unimate #001 (figura 4). La primera unidad se instaló en 1961 en una línea de ensamblaje de una planta de fundición por inyección que General Motors tenía en Trenton, Nueva Jersey. Concebido a partir del diseño para un brazo mecánico patentado en 1954 por el ingeniero George Devol, el Unimate fue desarrollado como resultado de la perspicacia empresarial de otro ingeniero, Joseph Engelberger, considerado el padre de la robótica y en cuyo homenaje se establecieron los Joseph Engelberger Awards, la distinción más prestigiosa del mundo de la robótica.

Figura 4. Joseph Engelberger (con pajarita) observando el Unimate #001



Fuente: International Federation of Robotics.

A finales de los sesenta y principios de los setenta se crean departamentos de investigación en robótica en las universidades. En ese momento se ponen las bases de los diseños actuales de brazos manipuladores con el diseño del brazo de Stanford, primer manipulador controlado por ordenador y con accionamiento eléctrico, al que seguiría el robot PUMA (figura 5), uno de los robots industriales más famosos y utilizados.

Figura 5. Robot PUMA



Fuente: RP Automation.

1.3. Robótica industrial y robótica de servicio

Una primera clasificación en la robótica es la que se deriva de su ámbito de aplicación. Así, aparecen dos grandes ámbitos, de los que siguen sus definiciones ISO:

- **Robot industrial:** manipulador reprogramable, multifuncional, controlado automáticamente, con tres o más ejes programables, que puede estar fijo o móvil, para uso en aplicaciones de automatización industrial.
- **Robot de servicio:** robot que realiza tareas útiles para el ser humano o un equipamiento, con exclusión de aplicaciones de automatización industrial.

Es decir, un robot industrial es aquel que se usa en una aplicación industrial y un robot de servicio es el que tiene otras aplicaciones. Esta definición implica la paradoja de que un mismo robot puede catalogarse de industrial o de servicio según el uso que se le dé. Esta distinción, que puede parecer irrelevante, tiene consecuencias en seguridad, ya que la normativa vigente está orientada a aplicaciones industriales, no de servicios, de manera que para un mismo robot podemos vernos obligados a usar unas medidas de seguridad o no según el uso que le demos.

1.4. Tipos de robots industriales

Tras el Unimate #001 han aparecido multitud de robots industriales. De los diversos criterios de clasificación, uno de los más habituales es el de la tipología según la forma física del brazo. Así, existen los siguientes tipos de robots:

1.4.1. Articulado o antropomórfico

Brazo con un mínimo de tres articulaciones rotatorias. Suelen incorporar una muñeca articulada para controlar la orientación del elemento terminal. Actualmente, la mayor parte de robots industriales instalados son de tipo articulado, ya que son los más versátiles (figura 6).

Figura 6. Robot articulado



Fuente: Kuka Robotics.

1.4.2. Cartesiano

Sus tres ejes de control son lineales (no rotan, sino que se mueven en línea recta) y forman ángulos rectos unos respecto de los otros, por lo que utilizan tres dispositivos deslizantes perpendiculares entre sí para generar movimientos de acuerdo a los tres ejes cartesianos (X, Y, Z) (figura 7).

Figura 7. Robot cartesiano



Fuente: Yamaha Motor.

1.4.3. Cilíndrico

Se basa en una columna vertical que gira sobre la base, sobre la que se sitúan dos dispositivos deslizantes que pueden generar movimientos sobre los ejes X y Z (figura 8).

Figura 8. Robot cilíndrico



Fuente: CMT Monitoring System.

1.4.4. Delta o paralelo

Tres brazos articulados que se unen en una plataforma terminal. El concepto clave es el uso de paralelogramos que restringen el movimiento de la plataforma final a la simple translación, es decir, movimiento en X, Y o Z sin ninguna rotación. Desarrollan altas velocidades (figura 9).

Figura 9. Robot delta



Fuente: ABB Robotics.

1.4.5. Esférico o polar

Utiliza un brazo telescópico que bascula en torno a un eje horizontal y que está montado sobre una base giratoria. Las articulaciones proporcionan al robot la capacidad de desplazar el brazo en una zona esférica (figura 10).

Figura 10. Robot esférico



Fuente: Wikipedia.

1.4.6. SCARA (Selective Compliant Assembly Robot Arm o Selective Compliance Articulated Robot Arm)

Brazo rígido en el eje Z y flexible en los ejes X e Y. Se trata de una columna que gira sobre la base y un brazo que contiene una articulación y solo puede realizar movimientos en un plano. En el extremo del brazo, un eje deslizante se desplaza en el eje Z. Se caracterizan por su rápida velocidad de trabajo y excelente repetibilidad (Figura 11).

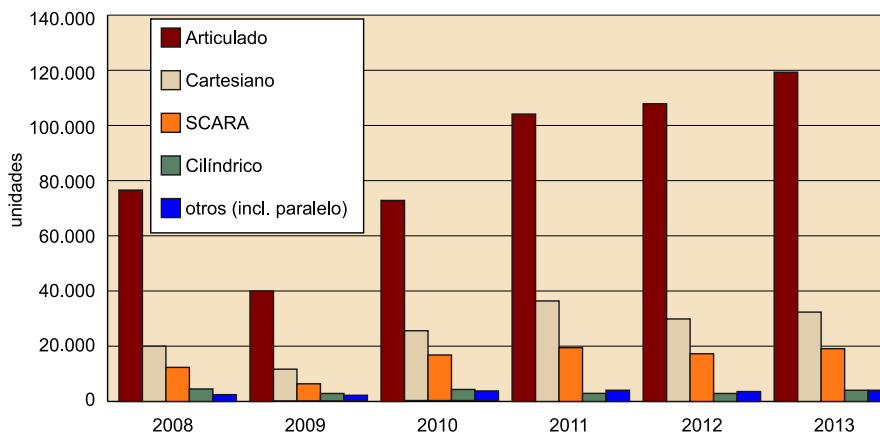
Figura 11. Robot SCARA



Fuente: Omron.

Según la Federación Internacional de Robótica (IFR, International Federation of Robotics), la distribución a nivel global de robots según su tipología física se muestra en la siguiente figura 12:

Figura 12. Unidades de robots industriales instalados según su tipo



Fuente: International Federation of Robotics – World Robotics Report 2014.

1.5. Principales características de los robots industriales

Un robot industrial viene definido por diversas características. A continuación se presentan las principales:

- **Tipo.** Configuración mecánica. Presentados en el apartado 1.4.
- **Grados de libertad (GDL).** Suma de los grados de libertad de las articulaciones que componen el robot, siendo los GDL de una articulación cada uno de los movimientos independientes (giros y desplazamientos) que puede realizar con respecto a la anterior.
- **Carga.** Peso que puede mover, incluido el elemento terminal.
- **Velocidad.** Máxima velocidad que alcanzan el punto terminal y las diferentes articulaciones.
- **Alcance.** Distancia a la que se puede situar el punto terminal.
- **Repetibilidad.** Capacidad de regresar a un punto con precisión, es decir, el grado de exactitud en la repetición de los movimientos.

Contenido complementario

La repetibilidad se indica en milímetros de precisión. Dicha precisión puede verse afectada por diversos factores (fricción, deformación estructural, dilatación térmica...), por lo que el robot no se posiciona de forma exacta en un punto. Las distintas posiciones alrededor del punto pueden ser modelizadas a partir de una función de probabilidad sobre cada punto, por ejemplo, por una distribución normal, y la repetibilidad representa tres veces la desviación estándar.

1.6. Elementos terminales

El elemento terminal es el dispositivo que realiza la mayoría de las funciones que debe llevar a cabo un robot. El brazo lleva el elemento terminal hasta donde necesita ir y es este el que ejecuta la acción. Así, un robot es útil en la medida de que dispone de un elemento terminal que le permite interactuar con el entorno.

Existen dos grandes categorías de elementos terminales:

1.6.1. Pinzas (*gripper*)

Se utilizan para tomar un objeto, normalmente la pieza de trabajo, y sujetarlo durante el ciclo de trabajo del robot. Hay diversidad de métodos de sujeción:

Mecánicas

Método obvio de agarre de la pieza, entre dos o más dedos, rígidos o flexibles (*soft*) (figuras 13, 14 y 15).

Figura 13. Pinza de dos dedos



Fuente: Schunk.

Figura 14. Pinza de tres dedos



Fuente: Robotiq.

Figura 15. Pinza flexible



Fuente: Soft Robotics.

De vacío

Utiliza ventosas como dispositivo de agarre. Proporciona una buena manipulación si los objetos son lisos, planos y limpios.

Figura 16. Pinza de vacío



Fuente: Schmalz.

Magnéticas

Utilizado como terminal para agarrar materiales férricos.

Figura 17. Pinza magnética



Fuente: Schunk.

Herramientas

Actuador final en aplicaciones en que se exige al robot realizar alguna operación sobre la pieza de trabajo: soldadura por puntos, soldadura por arco, pintura por pulverización, taladro, atornillado, lijado... En cada caso, la herramienta particular está unida a la muñeca del robot para realizar la operación.

1.7. Programación

En la actualidad existen diversos métodos de programación de robots. Cada uno de ellos tiene sus ventajas y desventajas.

1.7.1. Codificación *offline*

La primera opción al pensar en programación es la codificación de bajo nivel. Casi todos los fabricantes de robots han desarrollado su propio lenguaje de programación, lo que ha sido uno de los problemas de la robótica industrial, ya que aunque tienen una filosofía parecida, es necesario un proceso de aprendizaje específico para cada uno de ellos.

En los últimos años, se ha popularizado ROS (Robot Operating System), un entorno para el desarrollo de *software* para robots, con licencia BSD de *software* libre, que provee la funcionalidad de un sistema operativo: abstracción del *hardware*, control de dispositivos de bajo nivel, implementación de funcionalidades de uso común, paso de mensajes entre procesos... Además, incorpora un conjunto de paquetes aportados por la contribución de los usuarios que implementan funcionalidades tales como localización y mapeo simultáneo, planificación, percepción, simulación...

Contenido complementario

ROS fue desarrollado originalmente en 2007 por el Laboratorio de Inteligencia Artificial de Stanford y está auspiciado actualmente por la Open Source Robotics Foundation.

1.7.2. Consola

La consola es, hoy en día, el método más popular para programar un robot. Las consolas actuales son tabletas con pantalla táctil en las que el operador, mediante botones o directamente en la pantalla, mueve el robot de punto a punto, lo que permite un posicionamiento preciso, y guarda cada posición individualmente. Una vez introducidos los puntos de paso, el robot puede reproducir la secuencia a toda velocidad.

Aunque suponen una simplificación respecto a la codificación, requieren de un entrenamiento y su aprendizaje puede no ser evidente para los operadores.

1.7.3. *Teaching by demonstration*

En este sistema el operario manipula directamente el robot, moviéndolo a través de su recorrido y almacenando cada posición, lo que hace que sea muy intuitivo, ya que la tarea está programada casi de la misma manera como la realizaría un operador humano y es muy eficiente para tareas que requerirían

muchas líneas de código para lograr el mismo efecto, como soldar o pintar formas intrincadas. Por el contrario, es menos preciso que trabajar con coordenadas numéricas.

1.7.4. Simulación

La simulación consiste en programar un robot mediante una maqueta virtual. En un entorno virtual es fácil probar diferentes propuestas para un mismo problema, lo que sería ineficaz para los otros métodos de programación.

Dado que los programas se desarrollan *offline*, el robot solo tiene que detenerse mientras se descarga y prueba el nuevo programa, por lo que se reduce el tiempo de inactividad del robot y se mejora la eficiencia respecto a la programación por consola o *teaching by demonstration*.

Los programas de simulación suelen ser intuitivos y fáciles de usar, pero como los modelos virtuales casi nunca representan el mundo real con el 100 % de precisión, los programas pueden tener que ser ajustados una vez aplicados al robot.

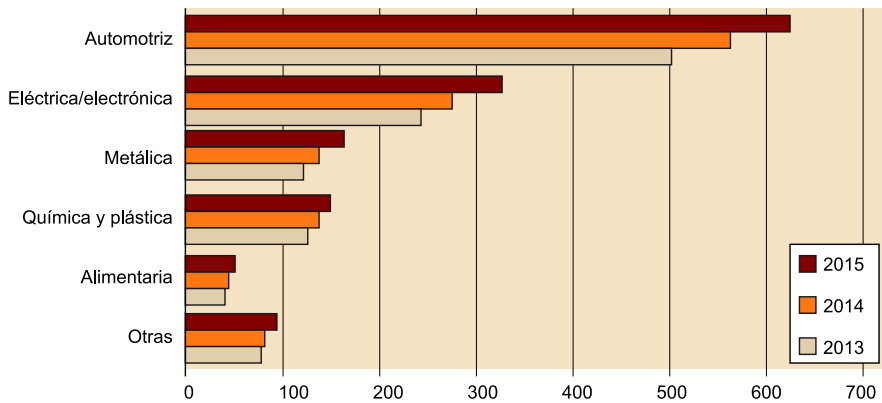
1.8. Mercado de la robótica industrial

1.8.1. Sectores

La robótica nació en el sector de la automoción y en él es donde se concentran cerca del 50 % de la base total de robots instalados. Existe una clara correlación entre los países principales fabricantes de automóviles y los países con una mayor tasa de robots por cada 10.000 trabajadores.

Por su parte, la creciente demanda de productos electrónicos y la necesidad de automatizar la producción de ordenadores, equipos de radio y TV, y teléfonos móviles (especialmente en los países de bajos salarios) ha llevado al sector de la electrónica a la segunda posición en implantación de robots.

Figura 18. Unidades de robots industriales instalados por sector productivo

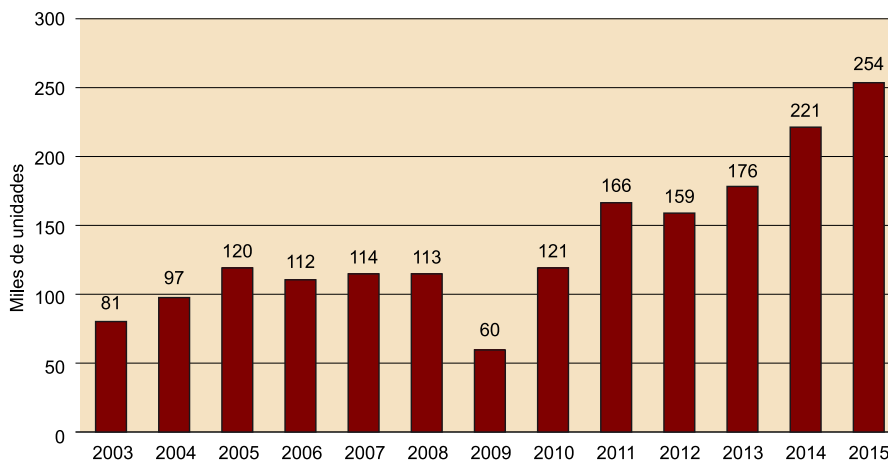


Fuente: International Federation of Robotics - World Robotics Report 2016.

1.8.2. Ventas anuales

Después de unos años de un cierto estancamiento, con un anómalo 2009 en el que cundió el pánico por el inicio de la crisis, se ha producido un incremento sostenido y muy significativo en el número de unidades vendidas. Así, desde el año 2010 se están batiendo cada año los récords absolutos de ventas: se vendieron 254.000 robots en 2015.

Figura 19. Ventas anuales de robots industriales



Fuente: International Federation of Robotics - World Robotics Report 2016.

Esta evolución esconde una pequeña trampa, ya que no todo el mercado tiene un comportamiento homogéneo, sino que es el mercado asiático, y especialmente China, el que está tirando de ese crecimiento. Esta situación se prevé que se acentúe durante los próximos años. Así, China se ha convertido en el mayor mercado para la robótica industrial y, al ritmo que lleva, no tardará en convertirse en el país con mayor base instalada.

1.8.3. Proveedores

El mercado de la robótica ha sido un mercado relativamente estable durante años. Cuatro fabricantes, dos japoneses (Fanuc y Yaskawa) y dos europeos (ABB y Kuka) eran considerados los *big four*, los principales actores, aunque a nivel

de base instalada otros dos fabricantes japoneses (Kawasaki i Nachi) superaban Kuka. Un conjunto relativamente reducido de segundas marcas completaban el mercado.

Esta situación se prevé que se volverá mucho más agitada en un futuro próximo, no solo por la irrupción de la robótica colaborativa, de la que se hablará en detalle en el próximo capítulo, sino por la aparición de fabricantes chinos. El gran auge de su mercado ha llevado asociada la proliferación de productores locales, que han pasado de proveer el 0 % de su mercado interior en 2012 al 30 % en 2015. Ciertamente, la calidad aún no es homologable a la de los fabricantes tradicionales, pero viendo como han evolucionado otros mercados, sería ingenuo pensar que van a quedarse siempre en productos con bajas prestaciones. En un sorprendente movimiento, Kuka ha sido comprado en 2016 por Midea, el mayor fabricante chino de electrodomésticos, por lo que ya se ha modificado el reparto de los grandes entre Europa y Japón.

1.9. Tendencias

Todo el campo de la robótica, y por tanto también la robótica industrial, está evolucionando según ciertas características comunes, entre las que podemos destacar:

- Mejora en los sistemas de percepción, gracias a las mejoras en el campo de la sensorica y, especialmente, a la integración cada vez más simple de los sistemas de visión.
- Incremento de la autonomía. La integración de inteligencia artificial y análisis de datos en tiempo real permite a los robots un comportamiento más autónomo en entornos complejos.
- Mejora en los sistemas de manipulación. Pinzas de mayor sensibilidad manejadas con mayor destreza permiten actuar sobre el entorno con más versatilidad.
- Mayor movilidad. Nuevos sistemas de navegación facilitan el movimiento incluso en entornos desconocidos.
- Interacción natural con el ser humano. Nuevas interfaces hombre-robot permitirán que el ser humano se relacione con un robot cada vez de manera más natural.
- Cooperación. Compartir sistemas de control en la nube facilita el comportamiento colectivo de robots (*swarming*).

Finalmente, una última tendencia adicional es que las economías de escala de todas las tecnologías implicadas comportan que la mejora de prestaciones vaya pareja a una bajada de costes.

2. Robótica colaborativa

2.1. Situación de partida

La evolución de la robótica industrial presentada en el apartado anterior ha llevado al desarrollo de unos dispositivos que aportan a los sistemas de producción, cuando están bien integrados, una alta productividad gracias a su capacidad de mover objetos de peso elevado a altas velocidades, de manera altamente repetitiva a lo largo del tiempo.

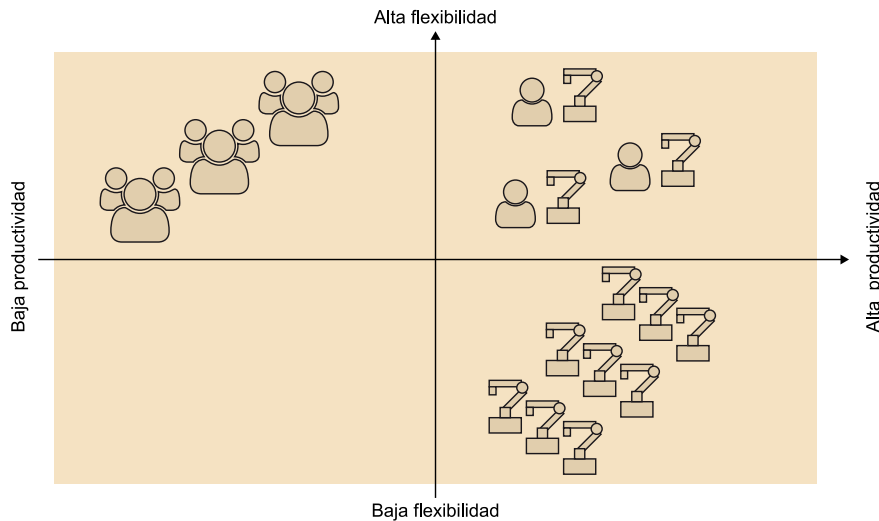
La contrapartida es que las instalaciones robotizadas tienen una baja flexibilidad, principalmente por dos razones:

- La complejidad de su programación comporta que cuando una instalación robótica está optimizada se tienda a modificarla lo menos posible.
- Dado que un dispositivo que mueve altos pesos a altas velocidades es potencialmente peligroso para las personas que están en su proximidad, existe una normativa de seguridad muy estricta que obliga a que los robots industriales cuenten con mecanismos de protección, principalmente barreras físicas de seguridad, que una vez instaladas constituyen una dificultad para modificar la línea de producción.

En contraposición, los operarios de planta tienen una alta flexibilidad, pero la productividad está limitada por sus condicionantes físicos, y es claramente inferior a la de las líneas mecanizadas o robotizadas.

Es inmediato identificar que sería óptimo poder combinar en una instalación la alta capacidad de los robots con la alta flexibilidad de las personas, realizando operaciones de manera conjunta. A dichas operaciones la ISO (International Organization for Standardization) las ha definido (ISO 8373:2012) como "Operaciones colaborativas", aquellas en las que robots específicamente diseñados para ese propósito trabajan en cooperación directa con un ser humano dentro de un espacio de trabajo definido. A este espacio se le llama "espacio de trabajo colaborativo".

Figura 20. Gráfica Productividad / Flexibilidad



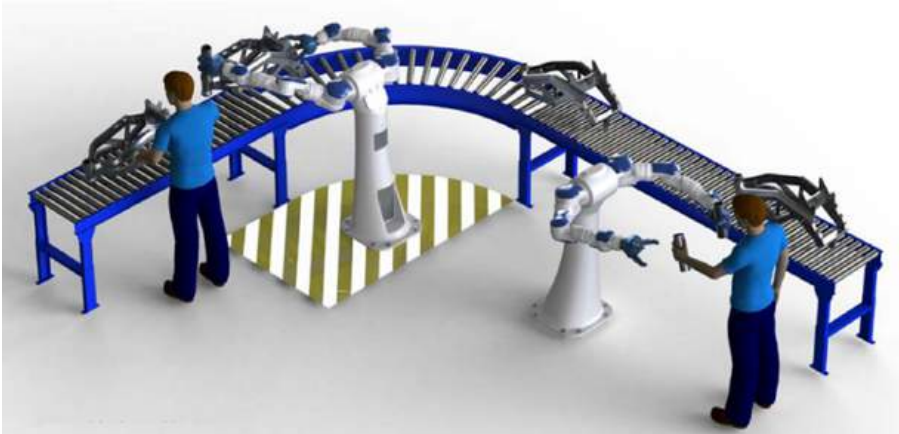
Fuente: Elaboración propia.

2.2. Robot colaborativo

A partir de la definición de operaciones colaborativas, la ISO define un robot colaborativo como aquel que ha sido diseñado para la interacción directa con un ser humano, independientemente de si es en entornos industriales o no.

Una imagen intuitiva de lo que puede ser un robot colaborativo efectuando operaciones colaborativas con un operario humano en una línea de producción está representada en la figura 21.

Figura 21. Robots colaborativos



Fuente: Yaskawa Motoman.

2.3. Tipos de operaciones colaborativas

En la norma ISO 10218 (ver 3.2.2) se definen cuatro tipos de operaciones colaborativas, es decir, cuatro situaciones en las que un robot y un operario pueden interactuar compartiendo el espacio de trabajo de manera segura. Son las siguientes:

2.3.1. Parada controlada de seguridad

Una parada controlada de seguridad se produce cuando el robot detiene su movimiento al detectar que un ser humano ha entrado en una zona restringida predeterminada, considerada zona de seguridad. Hay que notar que el robot no se apaga (estado *off*), sino que se mantiene encendido (estado *on*) pero frenado. Una vez que el operario sale de la zona de seguridad el robot reanuda su acción sin intervención externa, es decir, efectúa un rearranque automático.

Es evidente que una instalación que funcione con este tipo de operación debe disponer de dispositivos de seguridad (sensores de presencia...) que detecten al operario en su proximidad.

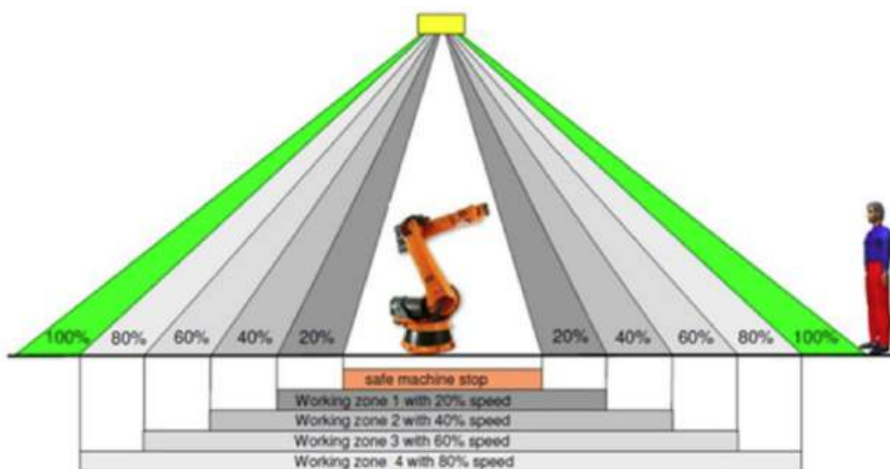
Este tipo de operación colaborativa se puede utilizar si un robot trabaja mayoritariamente por su cuenta, pero ocasionalmente un ser humano puede tener que entrar en su espacio de trabajo, por ejemplo, para carga o descarga de material en el robot, o para breves inspecciones durante el proceso de trabajo. Si las interacciones fueran frecuentes se perdería mucho tiempo ya que el robot se detendría continuamente.

2.3.2. Monitorización de velocidad y separación

En este caso, el robot reduce su velocidad en función de la proximidad de la persona.

Se definen diversas zonas de seguridad en el entorno del robot, que son monitorizadas por algún tipo de sensor (láser, visión...). Cuando el operario entra en una zona, el robot varía su velocidad a la designada para esa zona, menor cuanto más cercana al robot. En la zona más próxima al robot se produce una parada controlada.

Figura 22. Monitorización de velocidad y separación



Fuente: KUKA roboter.

Este tipo de operación colaborativa puede utilizarse para operaciones que requieren una presencia frecuente de los trabajadores en las proximidades del robot.

2.3.3. Guiado a mano

En este tipo de operación colaborativa, tras una parada controlada de seguridad el operario guía a mano el movimiento de un robot. Así, por ejemplo, se puede utilizar para "enseñar" rápidamente rutas en aplicaciones de soldadura.

El operador debe activar la función de guiado a mano para que el robot entre en este modo. El robot reanudará su funcionamiento normal una vez el operador haya salido de la zona de seguridad y, preferiblemente, active alguna verificación adicional, como por ejemplo un botón de reinicio.

Figura 23. Guiado a mano



Fuente: Yaskawa Motoman.

2.3.4. Limitación de fuerza y potencia

En este tipo de operación, el sistema es intrínsecamente seguro, es decir, se presupone que un contacto directo de un operario con el robot, el elemento terminal o la carga no le producirá ningún daño. Este es el tipo de robot al que todo el mundo llama robot colaborativo (o *cobot*), ya que puede trabajar junto a los seres humanos sin ningún dispositivo adicional de seguridad (vallado...)

Los elementos de seguridad del propio robot pueden ser:

- Pasivos: diseño físico con contornos redondeados (sin cantos) y sin puntos de atrapamiento, aberturas mínimas, con cubiertas blandas, materiales de poco peso, velocidad máxima reducida para producir impactos con inercia baja...

Contenido complementario

Los robots que utilizan la operación de guiado a mano necesitan un dispositivo que le permita detectar la fuerza ejercida sobre el elemento terminal del robot, como sensores de fuerza en su muñeca.

Contenido complementario

Es importante resaltar que el hecho de que un robot sea intrínsecamente seguro no implica que el sistema robótico completo lo sea. Así, por ejemplo, una aplicación de soldadura nunca podrá ser una operación colaborativa dada la capacidad de producir quemaduras del elemento terminal. Para determinar si una aplicación concreta es colaborativa o no debe hacerse un análisis de riesgos, como se verá en el capítulo siguiente.

- Activos: sensores de fuerza o detectores de colisión incorporados para detener de inmediato el movimiento si se detecta un contacto con un elemento externo imprevisto, motores *backdrivable* que dejan de ejercer par si detectan un obstáculo, actuadores elásticos, recubrimientos capacitivos que detectan presencia cercana para anticipar colisiones y sirven de cojín extra en caso de impacto...

2.4. Aparición de los robots colaborativos

En 2003, tres estudiantes de doctorado de la Syddansk Universitet Odense (Dinamarca) analizaron el mercado de la robótica y llegaron a la conclusión de que estaba dominado por robots pesados, caros y poco manejables. Como consecuencia, desarrollaron la idea de crear un robot ligero que fuera fácil de instalar y programar, con el objetivo de hacer accesible la tecnología robótica a las pequeñas y medianas empresas, especialmente de la industria alimentaria, y que les permitiera un rápido retorno de la inversión (ROI).

En 2005 constituyeron la empresa Universal Robots A/S, con el apoyo del fondo de inversión Syddansk Innovation, al que posteriormente se unió el fondo de inversión del Estado danés.

En diciembre de 2008 se instaló el primer robot de UR, una unidad del modelo UR5 con capacidad de carga de hasta 5 kg y un radio de acción de 850 mm, en un proveedor danés de plásticos y caucho para aplicaciones industriales, y fue utilizado para alimentar una máquina CNC (de control numérico).

Figura 24. UR5



Fuente: Universal Robots.

En paralelo, Rodney Brooks, quien había sido profesor de robótica en el MIT (Massachusetts Institute of Technology) y fundador de iRobot, el fabricante del robot aspirador Roomba, tuvo la visión de proporcionar un nuevo tipo de herramienta para la automatización de procesos, una que fuera segura para trabajar al lado de los operarios, fácilmente programable por no ingenieros, flexible para moverse rápidamente entre puestos de trabajo, y asequible para empresas de todos los tamaños. Con este objetivo en 2008 fundó Rethink Robotics, empresa ubicada en Boston, y en 2012 lanzó el robot Baxter.

Figura 25. Baxter



Fuente: Rethink Robotics.

La campaña de comunicación de Baxter fue espectacular, con una aparición constante en prensa generalista y especializada, y popularizó ampliamente el concepto de "robot colaborativo". Pero su diseño tecnológico provocaba una muy baja repetibilidad, lo que le hacía poco apto para gran parte de las aplicaciones industriales, por lo que el principal beneficiario de dicha campaña fue UR, quien en 2012 había ampliado su gama de productos con el UR10, con capacidad de carga de hasta 10 kg.

2.5. Consolidación de la oferta

Inicialmente, la aparición del nuevo segmento de producto fue recibido con un gran escepticismo por parte de los fabricantes tradicionales de robots. Acostumbrados a una evolución en la que los robots habían ido aumentando progresivamente su capacidad de carga y velocidad, consideraban que unos dispositivos lentos y capaces de mover solo objetos ligeros no eran competencia. Pero el mercado reaccionó de manera distinta. Aunque las cifras cuantitativas eran aún reducidas, el crecimiento de UR fue espectacular, y dobló año tras año el número de unidades vendidas en el anterior.

Tal como se ha comentado, Baxter tenía un nivel de ventas insignificante pero ayudaba a consolidar la idea de que la robótica colaborativa ofrecía tanto soluciones distintas a clientes de la robótica tradicional como, especialmente, soluciones a unos sectores de mercado a los que hasta el momento no se había ofrecido una propuesta de valor.

En 2015, de manera repentina, el mercado de los robots colaborativos se pobló con nuevas propuestas provenientes de tres vías:

- Los fabricantes ya establecidos

- Los fabricantes tradicionales de robots industriales
- Nuevos fabricantes

2.5.1. Los fabricantes ya establecidos

Universal Robots amplió su gama con un tercer miembro de la familia, el UR3. En este caso un robot de menor capacidad de carga, solo 3 kg, pero que ofrecía una gran flexibilidad debido a su tamaño reducido.

Rethink Robotics arrinconó a Baxter al mercado de la enseñanza y el I+D, y con el lanzamiento de Sawyer, ahora sí un robot competitivo, entró de lleno en el mercado de los procesos industriales.

Figura 26. UR3



Fuente: Universal Robots.

Figura 27. Sawyer



Fuente: Rethink Robotics.

2.5.2. Los fabricantes tradicionales de robots industriales

Después de más de ocho años de desarrollo, ABB lanzó al mercado su proyecto FRIDA (Friendly Robot for Industrial Dual-Arm) con el nombre comercial de YuMi. Se trata de un *dual-arm* orientado principalmente al mercado de la industria electrónica.

Igualmente tras un largo proceso con el proyecto LWR (Lightweight Robot), del cual hubo 5 versiones de desarrollo, Kuka se decidió a comercializar el iiwa (Intelligent Industrial Work Assistant), con el que quiso ir más allá del robot colaborativo e introdujo el concepto de "robot sensitivo", con alta sensibilidad para detectar la fuerza aplicada en el elemento terminal.

Fanuc sorprendió al mercado con el CR-35iA, un robot colaborativo con una capacidad de carga extraordinaria en el momento de su presentación: 35 kg.

Finalmente, Yaskawa, el último gran fabricante que faltaba por presentar su robot colaborativo, lo hizo ya avanzado 2016: el HC 10.

Figura 28. YuMi



Fuente: ABB Robotics.

Figura 29. LBR iiwa



Fuente: Kuka Robotics.

Figura 30. CR-35iA



Fuente: Fanuc.

Figura 31. HC 10



Fuente: Yaskawa Motoman.

2.5.3. Nuevos fabricantes

Aprovechando la receptividad del mercado, empezaron a aparecer propuestas desde nuevas *start-ups* que presentaban soluciones alternativas. Este segmento fue creciendo extraordinariamente a partir de 2015, y fue muy destacable la aparición de empresas de origen chino, algunas de ellas con una estrategia competitiva de bajos precios.

2.6. Propuestas actuales de mercado

La disponibilidad de un robot en el mercado no depende únicamente de su existencia, sino también del acceso a un servicio técnico para la instalación, formación inicial y posible necesidad de mantenimiento o reparación. En el momento de elaborar este contenido (agosto de 2017) los robots colaborativos disponibles en el mercado español son los indicados en la tabla 1.

Figura 32. Robots colaborativos disponibles en el mercado español

	ABB	FANUC			KUKA	RETHINK ROBOTICS	UNIVERSAL ROBOTS			YASKAWA
	YUMI	CR-4iA	CR-7iA	CR-35iA	LBR IIWA	SAWYER	UR 3	UR 5	UR 10	HC10
Precio	~40.000 €	~34.000 €	~37.000 €	~80.000 €	~60.000 €	~28.000 €	16.500 €	22.500 €	28.500 €	39.000 €
Velocidad (end effector)	1.5 m/s	0.5 m/s	0.5 m/s	0.25 m/s			1 m/s	1 m/s	1 m/s	
Alcance	500 mm	550 mm	717 mm	1813 mm	800 mm 820 mm	1260 mm	500 mm	850 mm	1300 mm	911 mm
Carga	0.5 kg	4 kg	7 kg	35 kg	7 kg 14 kg	4 kg	3 kg	5 kg	10 kg	10 kg
Repetibilidad	± 0.02 mm	± 0.02 mm	± 0.02 mm	± 0.08 mm	± 0.10 mm ± 0.15 mm	± 0.10 mm	± 0.10 mm	± 0.10 mm	± 0.10 mm	± 0.03 mm
Ejes	14 (2 arms)	6	6	6	7	7	6	6	6	6
Peso	38 kg	48 kg	53 kg	990 kg	23.9 Kg 29.9 Kg	19 kg	11 kg	18.4 kg	28.9 kg	
Altura	1018 mm			2843 mm	1266 mm 1306 mm			850 mm	1300 mm	

Fuente: Elaboración propia.

2.7. Propuestas de valor de los robots colaborativos

El éxito de cualquier nuevo segmento de producto siempre está directamente relacionado con el hecho de que en el mercado exista una necesidad que no estaba siendo adecuadamente cubierta. En el caso de la robótica colaborativa puede parecer sorprendente que un producto con características técnicas objetivamente y claramente inferiores a la de los productos existentes (principalmente velocidad y capacidad de carga) haya triunfado. En la estrategia competitiva clásica, el precio es un elemento que puede hacer atractivo un producto con menores prestaciones, pero inicialmente los robots colaborativos no presentaban ventajas significativas en este ámbito. ¿Porqué han triunfado, pues, los robots colaborativos?

2.7.1. Facilidad

Sin duda alguna, el valor que ha permitido que el concepto se haya introducido y asentado en el mercado es el de la "facilidad". Hay que destacar que este no es un concepto ligado directamente al de los robots colaborativos, sino que fue una propuesta de los primeros fabricantes: Universal Robots y Rethink Robotics.

Esta "facilidad" se encuentra a diversos niveles:

- Por una parte, el uso, ya que el operario interactúa con el robot mediante una consola gráfica de interpretación intuitiva.
- Por otra, la instalación y primera programación, ya que cualquier técnico medianamente formado, aunque no sea un especialista en robótica, puede entender muy fácilmente los conceptos asociados.
- Finalmente, la reprogramación. La adaptación de una instalación a una configuración distinta puede ser inmediata aun con conocimientos muy básicos.

Es interesante analizar como los fabricantes tradicionales han renunciado a esta propuesta de valor, priorizando la integración con sus sistemas de control ya existentes y confiando en la capacidad de su potente red comercial para introducir sus productos en el mercado.

2.7.2. Flexibilidad

Tres elementos han convergido para conseguir que los robots colaborativos destaquen por su flexibilidad:

- La poca necesidad de espacio que requieren (lo que se conoce como "*foot-print* reducido") los hace fácilmente integrables en líneas de producción ya existentes.
- Al no ser necesarias barreras físicas de protección y dado su peso reducido, un robot colaborativo es fácilmente y rápidamente reubicable dentro de una instalación productiva.
- La facilidad de programación. Cuando el robot dispone de esta característica, hace posible que adaptar el robot a una nueva tarea pueda ser realizado en un tiempo breve.

Esta flexibilidad permite que aunque en el futuro varíen las necesidades de producción (cambio en los productos a producir, crecimiento o decrecimiento del negocio...) el robot pueda seguir operativo en planta, en otras líneas o realizando otras funciones, tras reconfigurar el espacio de trabajo.

2.7.3. Coste reducido

Ya se ha comentado que el precio de un robot colaborativo no es significativamente distinto al de un robot tradicional de capacidad de carga equivalente. Pero en el coste de incorporar un robot en una línea de producción hay que tener en cuenta varios elementos más allá del precio del robot: el coste del integrador, que será directamente proporcional al tiempo que dure la instalación y puesta en marcha, y el coste de los elementos periféricos, entre los que hay que contar con los elementos de seguridad.

Aunque cada instalación requiere un análisis específico y existen múltiples factores que pueden influir en el precio final, existe un cierto consenso en el mercado en el hecho de que, como promedio, una instalación realizada con un robot colaborativo de programación simple supone un 30 % de ahorro respecto a la misma instalación realizada con un robot industrial clásico, dado el menor tiempo de instalación y la no necesidad de vallado.

2.8. Evolución del mercado

Es evidente que la robótica industrial clásica tiene un mercado muy consolidado al que le ofrece un valor indiscutible. La propuesta de los nuevos robots colaborativos puede ser interesante en algunas aplicaciones ya cubiertas, pero su principal aportación es introducir la robótica en sectores y aplicaciones en los que hasta su aparición no era planteable.

Así, ahora es posible analizar la instalación de un robot en procesos de tiradas cortas, en procesos en los que debe interactuar o estar físicamente próximo a un operario y en empresas con personal de cualificación profesional no especializada en robótica. Es decir, ahora es posible plantearse la introducción de un robot en muchas pequeñas y medianas empresas para las que hasta el momento no tenía sentido. Ello debería tener como consecuencia que en un futuro no lejano el mercado de la robótica colaborativa supere al de la robótica industrial tradicional, tanto en unidades vendidas como en volumen de facturación.

2.9. Elementos terminales colaborativos

Anteriormente ya se ha comentado que en las operaciones colaborativas todo el sistema debe ser seguro, no solo el robot. Por tanto, el elemento terminal no debe hacer la aplicación más peligrosa que el robot o la carga. Para ello, aparte de no poder causar una lesión directa (corte, quemadura...) debe tener una limitación en la presión que puede ejercer sobre un miembro agarrado (básicamente un dedo o una mano), no debe poder atrapar un miembro con el elemento o el posible cable de alimentación, y debe tener un agarre suficiente para que la carga no se caiga o salga disparada como un proyectil.

Teniendo en cuenta la flexibilidad de los robots colaborativos, es interesante que los terminales colaborativos, especialmente las pinzas, puedan adaptarse a diferentes geometrías de la carga y sean de fácil programación.

Algunos robots colaborativos ya llevan integrados sus elementos terminales, en este caso, pinzas. Pero en general son elementos adicionales que se incorporan según el requerimiento de la tarea a realizar.

2.9.1. Sensores

Hay dos tipos principales de sensores que pueden ayudar en las aplicaciones colaborativas: visión y detección de fuerza.

- **Visión.** Tener un sistema de visión puede ser útil en ciertas aplicaciones, pero puede ser complejo de integrar; tal vez por ello no han sido muy aplicados en el mundo de la robótica colaborativa. Es posible que esto varíe a partir de la reciente aparición de algunos robots con visión integrada en el extremo del brazo.
- **Sensor de fuerza.** Este sensor proporciona sentido del tacto al robot. Los robots colaborativos, en general, no tienen una sensibilidad de fuerza muy precisa. Por eso, añadir este tipo de sensor puede incrementar mucho sus prestaciones en determinadas aplicaciones.

3. Procedimiento de implantación

Las promesas de la incorporación de robots colaborativos en los procesos de producción son las mismas promesas generales que ofrece la automatización: reducir los costes de producción y así ser más competitivo en el mercado, y producir consistentemente un producto de mayor calidad, lo que permite hacer crecer un negocio de manera sostenible. Estas promesas son ciertas, pero con la condición de que la implantación se lleve a cabo de manera adecuada. Para ello, es necesario seguir un procedimiento de implantación que maximice las probabilidades de éxito. En este capítulo se desarrolla una posible propuesta.

- Optimización de procesos
- Identificación de los procesos para robotizar
- Análisis de los procesos robotizables
- Selección del robot
- Cálculo del ROI

3.1. Optimización de procesos

La optimización de procesos no es estrictamente un paso del procedimiento de implantación de un robot colaborativo en una línea de producción, sino una etapa previa al inicio de cualquier automatización. Todo proceso productivo busca la optimización de su resultado. Cuando se ponen en marcha se hace teniendo en cuenta las condiciones de entorno (físicas, tecnológicas...) de ese momento. Es posible que con el tiempo esas condiciones hayan variado, de manera que propuestas que podían ser válidas inicialmente hayan dejado de serlo. Así, si robotizamos un proceso sin hacer ninguna reflexión al respecto, corremos el peligro de estar robotizando ineficiencias o derroches.

En este sentido es interesante ver la aprensión con la que los sistemas de producción *lean manufacturing* han valorado habitualmente la incorporación de robots en plantas productivas, ya que siempre los han visto como puntos de inflexibilidad en los procesos, y justamente una de las bases del *lean manufacturing* es disponer de la máxima flexibilidad.

La aparición de la robótica colaborativa y el hecho de poderla introducir sin necesidad de vallados de seguridad ha hecho variar la valoración *lean* del posible uso de robots, pero en cualquier caso planteando su implantación siempre después de haber optimizado el proceso.

3.2. Identificación de los procesos para robotizar

La tecnología actual permite robotizar muchos procesos. Que sea posible no quiere decir que sea adecuado. En primer lugar debemos identificar qué procesos nos puede interesar robotizar.

Las razones por la que nos puede interesar robotizar una aplicación pueden ser varias:

- Puede ser recomendable que un operario deje de hacer una actividad
- Se puede buscar una reducción de costes
- Se puede desear una mejora en determinadas prestaciones

3.2.1. Actividades que hay que eliminar

Hay diversos motivos que pueden recomendar eliminar la ejecución de una actividad por parte de un operario humano. Tradicionalmente se han agrupado bajo el epígrafe de "las 3 D": *dangerous, dull, dirty*.

- Por su peligrosidad. Tareas muy repetitivas o ejecutadas a alta velocidad son una frecuente causa de lesiones. Algunas incluso pueden llegar a suponer un riesgo para la vida del operario.
- Por ser altamente repetitivas y, por tanto, aburridas y muy poco motivadoras.
- Por ser desagradables o penosas en su ejecución, dadas las condiciones en las que se desarrollan (temperatura, confinamiento...).

3.2.2. Reducción de costes

La presión competitiva empuja constantemente a la búsqueda de reducción de costes. Dado el peso de la masa salarial de la mano de obra directa en el coste final de un producto, se puede buscar substituir dicha mano de obra por robots.

- Las primeras actividades para robotizar, total o parcialmente, pueden ser aquellas más intensivas en personal.
- También son de interés las actividades que comportan que un operario tenga muchos tiempos de espera y, por tanto, improductivos.

3.2.3. Mejora de las prestaciones

Las prestaciones de los operarios sin duda mejoran con el entrenamiento y la práctica, pero los seres humanos tenemos limitaciones (fuerza, velocidad, destreza, visión, capacidad de concentración...) que impiden que podamos alcanzar según qué nivel de prestaciones. En algunos casos, el uso de maquinaria se hace imprescindible, para alcanzar:

- Mayor calidad de las piezas acabadas
- Mayor consistencia / homogeneidad en la calidad de las piezas
- Mayor velocidad en el proceso

3.2.4. Impacto en la fuerza laboral

La progresiva incorporación de robots en los procesos productivos tiene como consecuencia que los operarios queden liberados de tareas repetitivas y puedan dedicarse a realizar tareas de mayor valor, complejidad y satisfacción profesional. Si existen suficientes tareas de mayor valor para poder mantener los puestos de trabajo de todos los operarios desplazados, ello es motivo de controversia, y existen defensores de todas las posturas: aquellos que dicen que todos los operarios pueden reubicarse; aquellos que aceptan que individualmente será difícil recolocar a ciertos perfiles de bajo nivel pero que, globalmente, como sociedad y pasado un tiempo, aparecerán nuevos puestos de trabajo que compensarán los que inicialmente se pierdan, y aquellos que avisan que el impacto de la robotización de forma global transformará drásticamente el mercado laboral hasta el punto de hacer insostenible el sistema actual de distribución de rentas a través del trabajo.

Como siempre será la realidad la que dé y quite razones, y dado el avance extraordinariamente rápido de esta evolución, no será necesario esperar mucho tiempo. En cualquier caso, salvo un cataclismo de dimensiones globales (guerra nuclear, impacto de un meteorito...), la robotización no es una opción, sino una consecuencia ineludible del actual progreso tecnológico.

Sea cual sea la visión del responsable de la robotización en la empresa, la primera entrada de un robot en una línea de producción genera, cuando menos, suspicacias entre los trabajadores. Si se quiere mantener un buen clima laboral y favorecer el éxito en la introducción de un robot habrá que explicar muy claramente cuáles son los beneficios, tanto en la mejora de la productividad como en las condiciones laborales.

3.3. Análisis de los procesos robotizables

Una vez se han identificado qué procesos se consideran de interés robotizar, se deben analizar las características de dichos procesos, lo cual nos permitirá priorizar entre las diferentes opciones. Posiblemente aquellos procesos que parecían buenos candidatos no son la mejor opción. Se debe empezar por proyectos simples, ya que ello maximiza las opciones de éxito y facilita que posteriormente se puedan llevar a cabo otros proyectos.

Para determinar la sencillez de un proyecto podemos tener en cuenta las siguientes características:

- Tipo de pieza

- Es más simple un proceso en el que las piezas implicadas son homogéneas (forma, dimensiones, peso...) que uno en el que hay variabilidad.
- Es más simple tratar con piezas rígidas que con piezas deformables, y con piezas consistentes que con piezas frágiles.
- Presentación de la pieza
 - Es más simple que las piezas se presenten en una posición única (alimentador de posición conocida) que en diversas posiciones (por ejemplo, una bandeja). En cualquier caso, esto último puede resolverse con facilidad ya que diversos fabricantes incluyen en su programación rutinas que simplifican la gestión de recogida de piezas en matrices.
 - Es más simple que las piezas se presenten siempre en la misma posición y orientación que de manera aleatoria o desestructurada (por ejemplo, sin ningún orden dentro de una caja).
 - Es más simple que el punto de agarre sea estático que móvil (por ejemplo, una cinta transportadora).
- Interacción con otros dispositivos
 - Es más simple un proceso en el que el robot no tiene que interactuar con ningún dispositivo externo.
 - Suele ser más simple una interacción física con una interfaz humana (botón, puerta...) que una comunicación electrónica.
- Tipo de tarea
 - Es más simple una tarea repetitiva que una que implica la aplicación de una cierta lógica programada con variabilidad de acciones a partir de la identificación de ciertas condiciones.
 - Es más simple una tarea que implica únicamente movimiento que otra que efectúa alguna operación.
 - Es más simple una tarea para la que un operario no requiere ningún tipo de destreza especial.
 - La necesidad de utilizar sensores (sistemas de visión, sensores de fuerza...) para identificar condicionantes en el proceso añade dificultad a la robotización de ese proceso.
- Tipo de elemento terminal
 - Es más simple una tarea que puede robotizarse usando un elemento terminal estándar (básicamente una pinza) que una que tenga que desarrollar un elemento terminal a medida.
 - Es más simple utilizar una única herramienta que tener que utilizar multiherramienta.

3.4. Selección del robot

Una vez identificada la aplicación para robotizar se debe identificar qué robot se integrará en el proceso. En el apartado 2.6 se presentó la oferta actual en el mercado español. A escala global han aparecido muchas opciones, pero la disponibilidad de un robot, igual que la de cualquier dispositivo tecnológico, no depende únicamente de su existencia, sino también del acceso a un servicio técnico para la instalación, formación inicial y posible necesidad de mantenimiento o reparación.

Para valorar la adecuación de un robot concreto a un proceso debemos tener en cuenta, principalmente, las siguientes características del robot:

- **Carga.** La carga es el peso máximo que el robot puede manejar, incluyendo el elemento terminal. Ello implica que si es necesario un elemento terminal muy pesado puede quedar considerablemente limitada su carga útil. En general, las cargas de los robots colaborativos son reducidas y, en cualquier caso, muy inferiores a las que puede alcanzar un robot tradicional.
- **Alcance.** El alcance es la distancia máxima a la que el elemento terminal del robot puede llegar. Como en el caso de la carga, el alcance medio de los robots colaborativos es relativamente reducido.
- **Velocidad.** Por definición, los robots colaborativos son dispositivos relativamente lentos. En cualquier caso, lo significativo no es la velocidad en sí, sino si dicha velocidad es suficiente para cumplir el tiempo de ciclo del proceso.
- **Facilidad de programación.** A pesar de que propiamente no es una especificación del robot, ya que no es posible cuantificarla, sin duda es una característica que debe conocerse antes de adquirir un robot colaborativo. En el apartado 2.7.1 se comentaron las ventajas que aporta disponer de un robot de fácil programación. Sin tener que ser obligatoriamente una característica limitante, es muy adecuado conocer el tipo de programación del robot que se plantea incorporar en la línea de producción.

En algunas ocasiones, también puede ser adecuado analizar otras características:

- **Repetibilidad.** La repetibilidad estándar de los robots colaborativos es suficiente para la mayor parte de aplicaciones habituales, pero en alguna tarea que requiere una alta precisión esto puede suponer una limitación.
- **Peso.** El peso del robot puede ser crítico si tiene que situarse sobre una mesa (u otra superficie) o adosarlo a otra máquina. Igualmente puede tener importancia si el robot debe moverse entre diferentes ubicaciones de la planta productiva (aunque sea montado sobre una estructura móvil).
- **Grado de protección IP.** Si el robot tiene que ser resistente al agua, al polvo, o estará sujeto a situaciones ambientales duras, se deberá tener en cuenta su grado de protección IP (*Ingress Protection*, norma IEC 60529). En algunos casos es posible agregar una cubierta de protección adicional.

- **Footprint.** El conocido como *footprint* es el espacio ocupado por el robot en funcionamiento. Cuando se trata de incorporar un robot en un proceso existente, el espacio disponible puede ser una limitación si este es pequeño y no puede aumentarse.

Finalmente, también puede ser de interés analizar algunas características del elemento terminal:

- **Carga.** La carga de la pinza es un parámetro independiente de la carga del robot. Así, la carga de la aplicación será el mínimo de los dos valores.
- **Apertura de la pinza.** Una vez abierta al máximo, la apertura entre los dedos de la pinza limita el tamaño de las piezas que se pueden coger.
- **Facilidad de integración.** Cuanto más fácil sea instalar y programar un elemento terminal en un robot, mucho mejor. Algunos fabricantes preparan sus elementos terminales para que se integren con el método de programación de algunos robots. Esto facilita la instalación inicial y los sucesivos cambios que se quieran hacer en la aplicación.

Finalmente, y tal como sucede en la selección de cualquier otro dispositivo, antes de decidimos por un robot se deben valorar elementos tradicionales en la selección de cualquier proveedor e integrador; esto es, nuestra posible relación previa, el grado de experiencia que demuestre en proyectos similares, la proximidad geográfica y capacidad de rápida reacción...

3.5. Cálculo del ROI

Antes de tomar la decisión final debemos validar si la robotización propuesta será rentable, por lo que se puede calcular el ROI. Es en este momento y no antes porque es ahora cuando, tras la selección de la solución concreta, conocemos los gastos implicados.

Para un buen cálculo debemos ser muy honestos con los valores que introduciremos en las fórmulas. Puede haber la tentación de exagerar los retornos y minimizar los gastos para justificar la razonabilidad de la inversión. Ello no llevará sino a decepciones posteriores.

Por otra parte, el cálculo del ROI se puede llegar a hacer muy complejo si pretendemos tener en cuenta todos los factores que pueden llegar a intervenir, algunos de ellos, además, de cuantificación muy difícil.

Como mínimo, a nivel de ingresos deben tenerse en cuenta los elementos detallados a continuación:

- Impacto en los costes de personal. Es decir, el ahorro en el salario de los operarios que dejan de estar dedicados a la actividad.
- Impacto en la producción:

- Incremento del valor de las unidades adicionales de producto producidas por la incorporación del robot. Aunque la velocidad del robot puede llegar a ser inferior a la de un operario, trabajar con menos paros habitualmente hace aumentar la producción.
- Disminución de las pérdidas por unidades que dejan de desecharse por no conformidad en la calidad.

En cuanto a gastos, debemos considerar estos costes:

- Coste del robot
- Coste del elemento terminal
- Coste de otros elementos físicos. Que en las aplicaciones colaborativas no haya vallados no quiere decir que no se puedan necesitar otros componentes mecánicos: alimentador de piezas, pedestal para desplazar el robot...
- Coste de la integración / puesta en marcha
- Coste de la formación de los operarios
- Coste del consumo de energía
- Coste del mantenimiento

Aunque cada instalación requiere un análisis específico y existen múltiples factores que pueden influir en el cálculo del ROI, hay un cierto consenso en el mercado en el hecho de que, como promedio, una instalación realizada con un robot colaborativo de programación simple tiene un ROI de menos de un año.

4. Consideraciones de seguridad en robótica colaborativa

4.1. Antecedentes

Para empezar, es importante tener en cuenta que la seguridad es un concepto relativo, que ha variado a lo largo del tiempo y tiene concepciones distintas en distintas zonas geográficas. Así, hoy nos puede parecer entrañable la *Locomotive Act* (también conocida como *Red Flag Act*), una ley del Reino Unido promulgada en 1865 que limitaba la velocidad del recién aparecido automóvil a 2 millas por hora (3,2 km/h) en las áreas urbanas y exigía que siempre tuvieran una tripulación de tres personas: un conductor, un fogonero y un hombre que caminara delante del vehículo ondeando una bandera roja.

Figura 33. Locomotive Act



Fuente: Wikipedia.

En la actualidad y en nuestra zona económica occidental, es obvio pero conveniente recordar que la seguridad de los trabajadores tiene la máxima consideración y es una condición irrenunciable en cualquier puesto de trabajo.

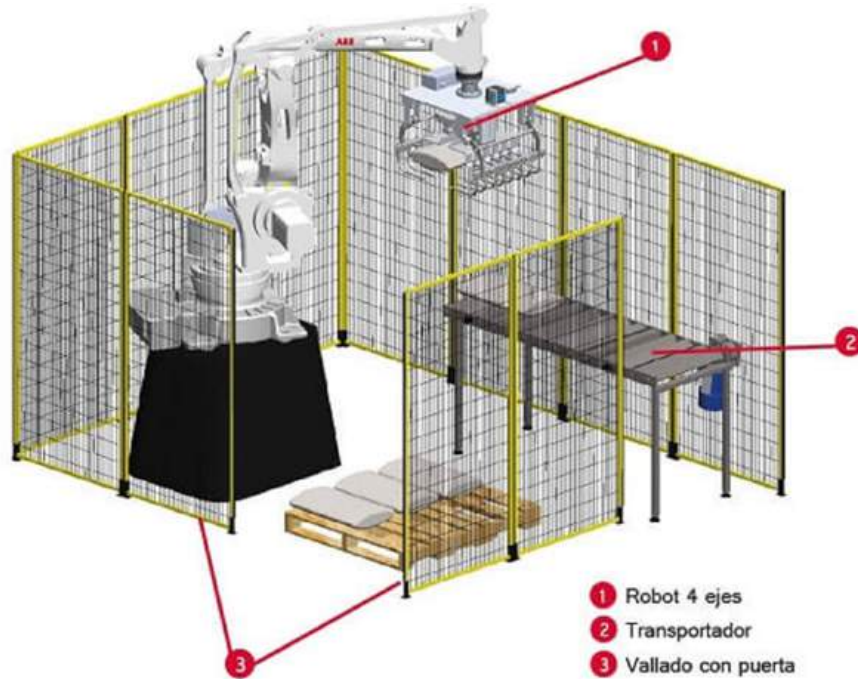
Cuando la evolución tecnológica de los robots aumentó su velocidad y capacidad de carga, los convirtió en elementos peligrosos para los operarios que estaban a su alrededor. Dada la lógica falta de normativa al respecto –inicialmente no tenía ningún sentido legislar sobre ello– las medidas de seguridad podían ser inexistentes, por lo que empezaron a suceder accidentes, cada vez de mayor gravedad.

Contenido complementario

Robert Williams tiene el triste privilegio de ser el primer muerto documentado por accidente con robot. Sucedió en una fábrica de la empresa Ford, en Michigan, en 1979.

Finalmente, se regularon las condiciones de operación de los robots industriales. La primera normativa al respecto es el estándar norteamericano ANSI/RIA 15.06-1986. En él se pusieron los fundamentos de lo que es la configuración de seguridad de la robótica clásica, en la que el robot y el operador están separados por barreras físicas (típicamente un vallado) que impiden el acceso de los operarios a la zona de trabajo. A dicha zona se accede a través de una entrada accesible tras activar un botón de parada del robot. Es decir, el espacio de seguridad viene definido por condiciones de *hardware*.

Figura 34. Separación física de la zona de trabajo de un robot industrial clásico



Fuente: MEKKAM Packaging Solutions. <http://www.mekkam.com/robotica-industrial/paletizadores-automaticos/robot-paletizador-basico/>

A pesar de que la normativa evolucionó y a partir de 2006 estaba aceptado instalar sistemas de protección menos "intrusivos" (barreras ópticas, escáneres, sensores de presencia...), el mercado no los aceptó y continuó considerando básicamente las vallas como el sistema de seguridad que se tenía que aplicar.

4.2. Legislación general

Antes de entrar en el detalle de la legislación actualmente aplicable es adecuado distinguir entre leyes y normativas técnicas. Las leyes son de obligado cumplimiento; en cambio, las normativas y estándares de las diferentes organizaciones (ISO, ANSI, RIA, UNE...) son recomendaciones. Pero dado que los aspectos técnicos pueden evolucionar más rápidamente y ser más específicas que las leyes, los legisladores incluyen en ellas las normas a las que se da presunción de conformidad, de manera que cumplir la norma implica cumplir la ley.

4.2.1. Legislación europea y española

El marco normativo de la Unión Europea viene definido por Directivas que los Estados transponen a su ámbito nacional. En este ámbito existen dos Directivas principales a considerar:

Directiva 2006/42/CE

Conocida como Directiva de máquinas. Afecta al fabricante del robot y al integrador. Su objetivo principal es garantizar un nivel de seguridad común en las máquinas puestas en el mercado. Dispone que el fabricante está obligado a analizar los peligros de su maquinaria con el objetivo de identificar todos aquellos que estén presentes, para diseñarla y construirla teniéndolos en cuenta.

La transposición de esta Directiva en el Estado español es el Real Decreto 1644/2008, por el que se establecen las normas para la comercialización y puesta en servicio de las máquinas con el fin de garantizar la seguridad de las mismas.

Directiva 2009/104/CE

Afecta al usuario de la instalación robótica. Su objetivo es establecer las disposiciones mínimas de seguridad y salud para la utilización por los trabajadores de los equipos de trabajo. En ella se indica que el empresario debe adoptar las medidas necesarias con el fin de que los equipos de trabajo puestos a disposición de los trabajadores sean adecuados y convenientemente adaptados para el trabajo que deba realizarse, de forma que garanticen la seguridad y la salud de los trabajadores al utilizarlos.

La transposición de esta Directiva en el Estado español es el Real Decreto 1215/1997.

4.2.2. Normativas técnicas

Existen normativas técnicas para distintos ámbitos geográficos: ANSI y RIA para Estados Unidos, UNE para España... En este apartado consideraremos únicamente las normas ISO (International Organization for Standardization) ya que son las de ámbito más general.

Yendo de lo general (maquinaria) a lo particular (robots colaborativos), las principales normas ISO de aplicación para la robótica colaborativa son:

ISO 12100:2010 - *Safety of machinery*

Especifica la terminología básica, los principios y una metodología para lograr la seguridad en el diseño de la maquinaria. Especifica los principios para la evaluación de riesgos y su reducción, con el fin de ayudar a los diseñadores a

Contenido complementario

Es interesante comentar que un robot no tiene consideración legal de máquina, sino de cuasimáquina, así que no dispone de marcado CE ni tiene declaración de conformidad (sino declaración de incorporación). Por eso, en el proceso de integración de un robot en una línea de producción alguien debe hacer su marcado CE –proceso mediante el cual se informa de que el equipo cumple con la legislación obligatoria en materia de requisitos esenciales– ya sea el integrador o el propio cliente, requisito indispensable para poner la línea en marcha.

lograr este objetivo. Se describen procedimientos para identificar los riesgos, estimarlos y evaluarlos durante las fases pertinentes del ciclo de vida de la máquina, y para la eliminación de peligros o la reducción suficiente del riesgo. Adicionalmente, se dan orientaciones sobre la documentación y verificación de la evaluación de riesgos y el proceso de su reducción.

ISO 13849:2015 - *Safety standards for control systems*

Proporciona requisitos de seguridad y directrices sobre los principios para el diseño e integración de los sistemas de control relacionados con la seguridad, incluyendo el diseño de *software*. Para estas partes especifica, entre otros, el nivel de rendimiento requerido para llevar a cabo las funciones de seguridad.

ISO 10218:2011 - *Safety requirements for industrial robots*

Consta de dos partes:

- ISO 10218-1: *Robots*. Especifica los requisitos y directrices para el diseño seguro inherente, y medidas de protección e información para el uso de robots industriales. Describe los riesgos básicos asociados con los robots y proporciona los requisitos para eliminar o reducir adecuadamente los riesgos asociados con estos peligros.
- ISO 10218-2: *Robot systems and integration*. Especifica los requisitos de seguridad para la integración de robots industriales, lo cual incluye el diseño, la fabricación, la instalación, la operación, el mantenimiento y el desmantelamiento del sistema o célula de robot industrial.

ISO/TS 15066:2016 - *Safety of collaborative robots*

Especifica los requisitos de seguridad para los sistemas de robots industriales colaborativos y su entorno de trabajo, y complementa los requisitos y directrices sobre el funcionamiento de un robot industrial dados en las normas ISO 10218-1 e ISO 10218-2.

A diferencia de las anteriores, que son normas de pleno derecho, la ISO/TS 15066:2016 es una TS (*Technical Specification*). Una especificación técnica indica que aún está en desarrollo. Se publica para uso inmediato, pero también para obtener retroalimentación del mercado, con el objetivo de transformarla y republicarla antes de un período máximo de 5 años, entonces ya sí como norma internacional.

4.3. ISO/TS 15066:2016

Hasta la publicación de la ISO/TS 15066:2016 en febrero de 2016 no existía una legislación específica para los robots colaborativos. Su marco legal de referencia era la ISO 10218, orientada a los robots industriales clásicos y, por tanto, poco adaptada a las especificidades de los colaborativos. Ello generaba muchas controversias conceptuales y una cierta sensación de inseguridad legal

ante posibles incidentes. Evidentemente su publicación, aún en forma de TS, ha ayudado a clarificar la situación. A pesar de ello, todavía existen diferentes interpretaciones, algunas más restrictivas, otras más permisivas, que pueden llevar a diferentes propuestas para asegurar la seguridad en una misma instalación.

En la ISO/TS 15066:2016 la seguridad pivota sobre dos conceptos clave: el nivel de lesión y el análisis de riesgos.

4.3.1. Nivel de lesión

El impacto de cualquier objeto con el cuerpo humano lleva asociado una consecuencia, que podemos caracterizar en distintos niveles: sensación de contacto, sensación de dolor, que provoque una lesión reversible, que provoque una lesión irreversible y, en el caso extremo, que provoque la muerte.

La robótica colaborativa debe trabajar en el rango por debajo de la sensación de dolor.

Dado que en una situación de operaciones colaborativas entre un humano y un robot seguro que se producirán situaciones de contacto, deseamos que las consecuencias de este se sitúen como límite, en el umbral de la sensación de dolor.

Para que la clasificación anterior –en la que los umbrales identificados son conceptuales– tenga aplicación práctica, estos umbrales deben objetivarse de algún modo. Ello se consigue a partir de un estudio realizado por la Universidad de Maguncia. Dicho estudio consistió en lo siguiente:

- Se identificaron diferentes partes del cuerpo humano.
- Se golpeó a un variado grupo de voluntarios en sus diferentes partes del cuerpo.
- Se encontraron los valores de fuerza y presión para los que, según los voluntarios, alcanzaron el umbral del dolor.

Dado que la sensación de dolor puede variar mucho entre diferentes personas, el grupo de estudio debe ser suficientemente numeroso y diverso (en edad, sexo y constitución). De él se deducen valores promedio.

Se definen dos tipos de contacto: transitorio (la parte del cuerpo en contacto con el robot puede retroceder libremente sin ninguna restricción) y casies-tático (el robot atrapa la parte del cuerpo contra un objeto fijo). Los valores permitidos en colisión son el doble que en atrapamiento, a excepción de la cabeza, en la que no están permitidos.

Los valores obtenidos por el estudio y que la norma ISO/TS 15066:2016 adopta como válidos son los expresados en la tabla de la figura 35.

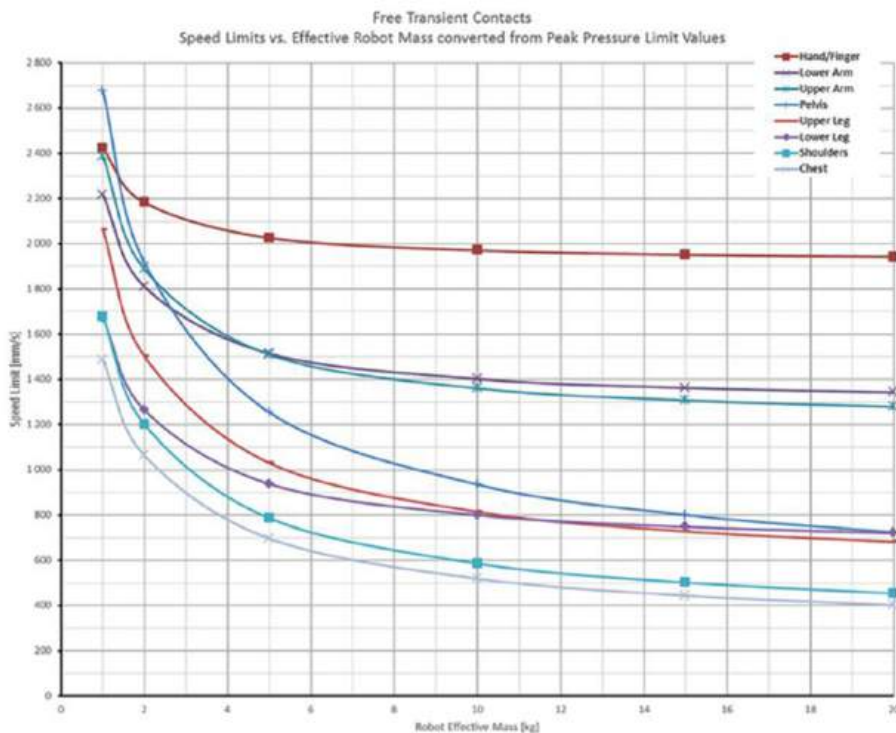
Figura 35. Tabla de la Universidad de Maguncia para el umbral de dolor

Body region	Specific body area		Quasi-static contact		Transient contact	
			Maximum permissible pressure ^a P_s N/cm ²	Maximum permissible force ^b N	Maximum permissible pressure multiplier ^c F_T	Maximum permissible force multiplier ^c F_T
Skull and forehead ^d	1	Middle of forehead	130	130	not applicable	not applicable
	2	Temple	110		not applicable	not applicable
Face ^d	3	Masticatory muscle	110	65	not applicable	not applicable
Neck	4	Neck muscle	140	150	2	2
	5	Seventh neck muscle	210		2	
Back and shoulders	6	Shoulder joint	160	210	2	2
	7	Fifth lumbar vertebra	210		2	2
Chest	8	Sternum	120	140	2	2
	9	Pectoral muscle	170		2	
Abdomen	10	Abdominal muscle	140	110	2	2
Pelvis	11	Pelvic bone	210	180	2	2
Upper arms and elbow joints	12	Deltoid muscle	190	150	2	2
	13	Humerus	220		2	
Lower arms and wrist joints	14	Radial bone	190	160	2	2
	15	Forearm muscle	180		2	
	16	Arm nerve	180		2	
Hands and fingers	17	Forefinger pad D	300	140	2	2
	18	Forefinger pad ND	270		2	
	19	Forefinger end joint D	280		2	
	20	Forefinger end joint ND	220		2	
	21	Thenar eminence	200		2	
	22	Palm D	260		2	
	23	Palm ND	260		2	
	24	Back of the hand D	200		2	
25	Back of the hand ND	190	2			
Thighs and knees	26	Thigh muscle	250	220	2	2
	27	Kneecap	220		2	
Lower legs	28	Middle of shin	220	130	2	2
	29	Calf muscle	210		2	

Fuente: ISO/TS 15066:2016.

A efectos prácticos, es complejo calcular sobre el terreno la fuerza de impacto en una posible colisión. En cambio, sí es fácil identificar la masa que interviene en el impacto y su velocidad. Por ello, y dado que lo que provoca una lesión es la energía transferida en una colisión, a partir del estudio físico del cálculo de energía según la fuerza y presión, se puede derivar la relación entre masa y velocidad máxima. Esta relación es la que se observa en la gráfica de la figura 36.

Figura 36. Velocidades máximas del robot permitidas en una colisión sobre diferentes partes del cuerpo, en función de la masa efectiva del robot



Fuente: ISO/TS 15066:2016.

La masa efectiva del robot es el conjunto de masa móvil que interviene en la colisión con el cuerpo humano: ejes finales del robot, herramienta y carga transportada.

4.3.2. Análisis de riesgos

El análisis de riesgos es un proceso iterativo que nos permite alcanzar un nivel aceptable de riesgo potencial de daño a un trabajador humano durante el funcionamiento de un sistema robótico. Consta de 4 fases:

- Identificación de riesgos
- Estimación del riesgo
- Análisis de riesgos
- Reducción del riesgo

Hay que tener en cuenta que el análisis debe realizarse sobre toda la instalación, no solo sobre el robot, por lo que deben incluirse elementos terminales y otros posibles dispositivos periféricos.

Identificación de riesgos

Para estructurar la identificación de riesgos, se pueden utilizar como base los listados de referencia de la normativa sobre este ámbito:

- La norma ISO 12100 da un listado de todo tipo de peligros genéricos para maquinaria: situaciones de contacto esperadas, situaciones accidentales debido al mal uso razonablemente previsible, posibles fallos en el sistema de mando y en las medidas de seguridad...
- En el anexo A de la norma ISO 10218-2 se da un listado específico de peligros asociados al robot y al sistema robótico (herramienta, pieza de trabajo, posición del operario...).

Contenido complementario

Hay que ser razonable con la identificación de riesgos, ya que puede convertirse en un ejercicio sin límite. Así, es adecuado confiar en que los fabricantes de robots y dispositivos de seguridad proporcionan productos plenamente certificados.

Estimación del riesgo

Estimar el riesgo implica determinar un valor numérico para cada peligro identificado. Para ello existen diferentes procedimientos. Uno de los más intuitivos y habituales es el método del HRN (*Hazard Rating Number*), mediante el cual se evalúan las consecuencias del evento en función del daño a las personas. El HRN cuantifica cada riesgo basándose en el producto de cuatro factores:

- LO: posibilidad de que ocurra el peligro (valor comprendido entre 0 = imposible y 15 = cierto).
- FE: frecuencia de la exposición al peligro (entre 0,1 = no frecuente y 5 = constante).
- DPH: máxima pérdida probable (entre 0,1 para arañazos y 15 para muerte).
- NP: número de personas sometidas al peligro (entre 1 para 1 o 2 personas y 12 para 50 personas o más)

La cuantificación del riesgo viene dada por la fórmula $HRN = LO * FE * DPH * NP$

El producto de estos cuatro factores puede dar como resultado valores desde 0 hasta más de 10.000. El resultado del HRN se asocia a una valoración cualitativa del riesgo:

- $HRN \leq 5$: Despreciable
- $5 < HRN \leq 50$: Bajo pero relevante
- $50 < HRN \leq 500$: Alto
- $500 < HRN$: Inaceptable

Análisis de riesgos

El análisis de riesgos consiste, básicamente, en listar los posibles riesgos identificados en la instalación a analizar, asignarles una estimación de riesgo y describir las medidas de control existentes. Para que el documento sea válido debe estar firmado por alguien, que es quien asume la responsabilidad.

La normativa no especifica quien debe realizar el análisis ni quien debe firmarlo. Por tanto, es posible que sea algún responsable de la empresa, que se derive la responsabilidad en el integrador o que se contrate alguna empresa especializada en el tema.

En caso de incidente, solo se incurrirá en algún tipo de falta si no existiera el análisis de riesgos o se hubiera realizado de manera negligente.

Reducción del riesgo

Según la valoración del riesgo, puede ser necesaria realizar alguna acción.

- **Despreciable:** No se necesita mejorar la acción preventiva. Se requieren comprobaciones periódicas para asegurar que se mantiene la eficacia de las medidas de control.
- **Bajo pero relevante:** Se deben hacer esfuerzos para reducir el riesgo, determinando las inversiones precisas y el plazo de aplicación.
- **Alto:** No debe comenzarse el trabajo hasta que se haya reducido el riesgo. Si el riesgo corresponde a un trabajo que ya se está realizando, debe remediarse en un tiempo inferior al de los riesgos moderados.
- **Inaceptable:** No debe comenzar ni continuar el trabajo hasta que se reduzca el riesgo. Si no es posible reducir el riesgo, debe prohibirse el trabajo.

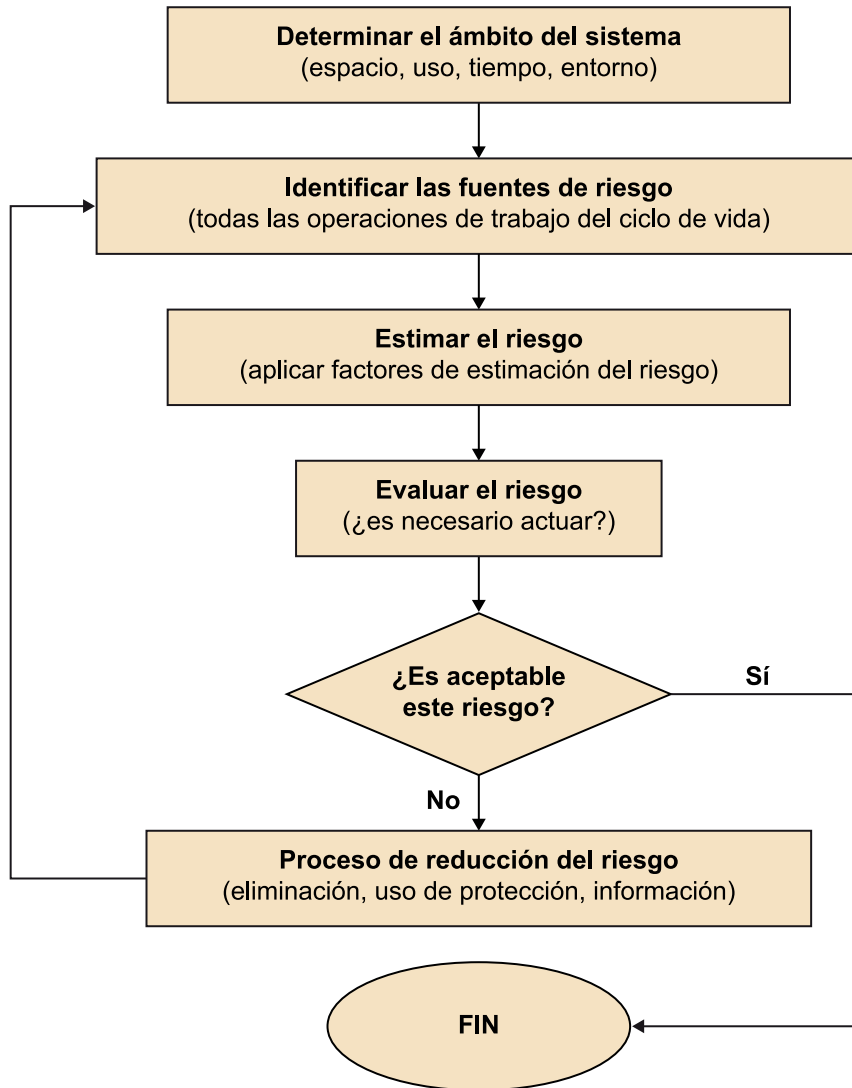
Las medidas a llevar a cabo para la reducción del riesgo pueden ser, de mayor a menor complejidad:

- Nuevo diseño de la instalación
- Instalación de equipos de protección colectiva
- Recomendación / obligatoriedad de uso de equipos de protección individual
- Información de los riesgos y formación a los operarios

Una vez que se han llevado a cabo las modificaciones identificadas como necesarias, se debe reiniciar el proceso para asegurarse que la modificación no introdujo riesgos adicionales.

El proceso completo de reducción de riesgo puede verse en la figura 37.

Figura 37. Proceso de reducción de riesgos



4.4. Seguridad informática

Cuando se habla de seguridad en el ámbito de la robótica colaborativa siempre se hace referencia al concepto anglosajón de *safety*, es decir, proteger al operario de la máquina; pero la palabra *seguridad* es polisémica y también significa proteger al sistema de los individuos, o sea, *security*.

Mientras los robots ha sido dispositivos sin conexión externa, esta era una cuestión absolutamente intrascendente, pero en el ámbito de la Industria 4.0, en el que toda la maquinaria de los procesos industriales está conectada entre sí y con la nube, no contar con medidas adecuadas de seguridad es altamente temerario. Afortunadamente el ámbito de la ciberseguridad se ha desarrollado ampliamente en el sector de las tecnologías de la información y existen muchas buenas prácticas y soluciones para no dejar "la puerta abierta" a posibles intrusos que podrían tomar el control de un robot para, entre otros:

- Obtener datos sobre su operativa, lo que podría aportar información confidencial a la competencia.

- Detener su actividad, ya sea completamente o de manera aleatoria, con la consiguiente pérdida de productividad.
- Modificar su comportamiento para actuar de manera distinta a la prevista, lo que puede provocar problemas de calidad en el producto final (imaginemos una deficiente dispensación de cola).
- Obligar al robot a realizar acciones forzadas que en el límite podrían causar averías o su rotura.
- Provocar movimientos bruscos o modificar los límites de acción, lo que puede comprometer la seguridad de la instalación y poner en riesgo físico a los operarios.

5. Aplicaciones colaborativas en entornos de producción

En el apartado anterior se definieron las operaciones colaborativas como aquellas en las que robots específicamente diseñados para ese propósito trabajan en cooperación directa con un ser humano dentro de un espacio de trabajo definido. En este capítulo nos centraremos en las aplicaciones colaborativas en entornos de producción, es decir, en el ámbito industrial.

No existe una clasificación normativa de aplicaciones robóticas, de manera que distintos autores pueden considerar distintos criterios de agrupación. La que podría tener un mayor reconocimiento es la de la IFR (International Federation of Robotics), pero en este documento se propone una clasificación alternativa, que consideramos más coherente. En cualquier caso, el listado de aplicaciones que sigue no debe considerarse completo ni definitivo, ya que es posible que no se haya incluido alguna aplicación actualmente muy minoritaria o que en el futuro aparezca alguna nueva aplicación.

Las aplicaciones identificadas son:

- Aquellas relacionadas con el movimiento de piezas:
 - *Machine tending*
 - *Pick and place*
 - Empaquetado
 - Paletizado

- Aquellas relacionadas con las operaciones sobre piezas:
 - Ensamblado
 - Atornillado
 - Encolado
 - Acabado

- Aquellas relacionadas con las actuaciones de calidad:
 - Inspección
 - Test

5.1. Movimiento de piezas

En las líneas de producción existe un grupo de tareas que consisten, básicamente, en desplazar piezas de un lugar a otro. En ellas, la tarea del robot es aplicar un movimiento a dichas piezas.

Es muy habitual que en una misma línea pueda haber cambios en el producto que se trabaja, que tienden a ser más frecuentes cuanto menor es la dimensión de la empresa. Para estos casos ya se comentó que los robots colaborativos pueden aportar una mayor flexibilidad y capacidad de adaptación que los industriales clásicos. En estas situaciones, tan importante como el propio robot es disponer de un elemento terminal flexible, adaptable a diferentes geometrías, texturas y materiales.

5.1.1. *Machine tending*

Por *machine tending* entendemos básicamente una aplicación en la que un robot sitúa una pieza en una máquina para que sea procesada (figura 38); esto es, carga una pieza en una máquina (principalmente CNC o de inyección de plástico), activa un ciclo de acción (probablemente tras cerrar una puerta y pulsar un botón), la máquina ejecuta su programa, el robot saca la pieza terminada (probablemente tras abrir una puerta) y carga la máquina con otra pieza en bruto. Este proceso puede realizarse en un bucle durante un número infinito de veces, siempre que el robot reciba continuamente piezas sin procesar.

Figura 38. Machine tending



Fuente: KUKA

Estas tareas suelen ser monótonas y a veces peligrosas (caso de prensas y cizallas). La precisión con respecto a cómo se coloca la pieza en la máquina entra dentro de los límites de los robots colaborativos. Una solución colaborativa puede justificar un valor diferencial respecto a una solución que incorpore un robot clásico en la flexibilidad y fácil reprogramación ante los frecuentes cambios de producto en este tipo de maquinaria, especialmente en pequeñas y medianas empresas.

La introducción de un robot colaborativo en una aplicación de *machine tending* modifica la actividad del operario que la atendía. De realizar una simple tarea manual y de espera delante de la máquina pasa a tener que reprogramar

Contenido complementario

Machine tending es una de las aplicaciones estrella de los robots colaborativos. Ello se debe a que, como se presentó en el punto 2.4, la primera instalación operativa de un UR5 fue alimentar una máquina CNC, para sorpresa de los fundadores de Universal Robots, que no habían identificado inicialmente esta aplicación como una hacia la que orientaban su producto. Tras hacer un vídeo promocional de la solución adoptada, otros posibles clientes decidieron empezar el despliegue de robots colaborativos copiando la idea, lo que tuvo un efecto expansivo.

el robot ante un cambio de pieza, además de poder centrarse en la calidad del producto y su verificación, en la optimización del proceso y en el mantenimiento más frecuente del equipo.

Finalmente, indicaremos que la comunicación entre el robot y la máquina puede ser realizada replicando la actuación física del operario (típicamente, apretar un botón) o mediante la comunicación directa a través de señales de entrada y salida electrónicas.

5.1.2. *Pick and place*

Las operaciones de *pick and place* son aquellas en las que un robot realiza un movimiento en el que recoge un objeto y simplemente lo desplaza hasta otro punto de la línea de producción: caja, mesa, cinta transportadora... A veces complementa el movimiento con una reorientación del objeto.

Son tareas muy comunes, pero pesadas y repetitivas. Aunque, sin duda, un robot puede realizarlas con mayor precisión y consistencia que un ser humano, antes de robotizar la tarea es adecuado reflexionar si la tarea en sí es necesaria. Dado que el mero transporte del material es una actividad sin ningún valor añadido, siempre es interesante repensar el proceso con el objetivo de identificar un rediseño que evite el movimiento. Estas consideraciones se ampliarán en el punto 5.1.

5.1.3. Empaquetado

Empaquetar no deja de ser un caso particular de *pick and place*, ya que consiste en coger un producto y situarlo en una ubicación determinada, dentro de su embalaje.

Igual que las anteriores, empaquetar es una tarea aburrida y sin valor añadido (aunque alguien pudiera argumentar que el embalaje sí aporta un valor, se considera una aproximación estricta del concepto "valor añadido"). Los robots colaborativos pueden ser fácilmente programados para cargar piezas o elementos en cualquier orientación, para cualquier contenedor y en cualquier tipo de matriz que se requiera (figura 39).

Figura 39. Empaquetado



Fuente: Rethink Robotics.

En los casos de embalaje especial en los que aún es más efectivo un operario humano, puede haber otros artículos adjuntos (instrucciones, manuales, tarjetas de garantía...) que se pueden cargar fácilmente con un robot.

En líneas de producción de alta cadencia, la baja velocidad de un robot colaborativo puede ser un inconveniente. Estos casos pueden resolverse con la incorporación de más de un robot o con elementos terminales especiales que manejen varios productos simultáneamente.

5.1.4. Paletizado

Paletizar (figura 40) es disponer una mercancía sobre un palé para su almacenaje y transporte. Encima de los palés se suelen colocar cajas y otros embalajes agrupados de forma que se aproveche el espacio y la carga se mantenga estable.

Figura 40. Paletizado



Fuente: Universal Robots.

La carga máxima de los robots colaborativos puede ser una limitación en la operación de paletizar. Lo que es inviable con la mayoría de ellos es mover el palé una vez confeccionado, lo cual es una aplicación bastante común de la robótica industrial clásica.

5.2. Operaciones sobre piezas

Bajo el epígrafe de aplicaciones de "operación" agrupamos aquellas en las que el robot realiza directamente alguna transformación sobre la pieza que está siendo tratada.

Entre estas operaciones no encontraremos algunas de las aplicaciones más clásicas de la robótica industrial, como soldadura o pintura, ya que por propia concepción no pueden realizarse en un espacio compartido entre el operario y el robot, dada su peligrosidad. Por tanto, por definición no son aplicaciones colaborativas. Ello no quiere decir que no puedan realizarse con robots colaborativos, sino que al ser la aplicación no colaborativa deberán aplicarse las medidas de seguridad tradicionales, básicamente la instalación de un vallado.

5.2.1. Ensamblado

Ensamblar es unir diversas piezas entre sí para conseguir un nuevo elemento compuesto (figura 41). En muchas ocasiones, el ensamblado de piezas requiere una alta flexibilidad y sensibilidad del elemento terminal, especialmente cuanto menor es el tamaño de las piezas para ensamblar.

Son habituales puestos de ensamblado en los que el robot realiza tareas preparatorias y el operario, la acción del ensamblado en sí. Tanto en estos casos como en los que el robot realiza toda la acción, suelen ser adecuados sistemas de alimentación de piezas, con el fin de homogeneizar su entrada en el proceso. En su ausencia, con toda probabilidad será necesario un sistema de visión para identificar la posición de las piezas.

Figura 41. Ensamblado



Fuente: ABB Robotics.

5.2.2. Atornillado

Atornillar implica habitualmente tener que aplicar un par alto en rotación continua, por lo que en la mayoría de ocasiones el robot no realiza propiamente la tarea, sino que guía una máquina específica de atornillado.

Una posible configuración alternativa es que el robot realice una tarea previa, de preatornillado, y posteriormente un operario la finalice aplicando un par alto con un atornillador mecánico.

Para asegurar una alta productividad es necesario que la instalación disponga de un sistema automatizado de alimentación de tornillos.

5.2.3. Encolado

Al igual que en muchas de las operaciones, la tarea del robot es acompañar la herramienta que propiamente realiza la operación; en este caso, el dispensador de cola. La aparición de nuevos *composites* hace que esta aplicación sea cada vez más habitual.

En el caso del encolado, el mayor valor aportado por una solución robótica es la capacidad para aplicar una cantidad constante de adhesivo en el transcurso de una trayectoria larga (como puede ser la puerta de un automóvil).

Debido a que los materiales adhesivos son caros, minimizar el desperdicio es importante. Optimizar su uso entra dentro del ámbito del diseñador del dispensador, pero una solución robótica permite un uso más eficiente que una gestionada por un operario humano.

5.2.4. Acabado

Bajo esta denominación común se pueden agrupar aplicaciones como el pulido, lijado, cepillado o desbarbado de superficies y cantos (figura 42).

Las tareas de acabado están entre las más desagradecidas en los procesos de fabricación, ya que a menudo se realizan en condiciones polvorrientas, en posiciones incómodas y usando herramientas ruidosas y vibrantes.

Figura 42. Acabado



Fuente: Universal Robots.

En este tipo de aplicaciones, la consistencia (es decir, la consecución de un mismo resultado a lo largo del tiempo) tiene tanta importancia como la calidad del acabado, lo que es mucho más fácil de conseguir con un robot que con un operario.

En estas aplicaciones es necesario medir con precisión la fuerza ejercida durante la aplicación, por lo que suele ser interesante incorporar un sensor de fuerza.

5.3. Actuaciones de calidad

El tercer grupo de aplicaciones que identificamos en el presente documento son las relacionadas con el ámbito de calidad.

5.3.1. Inspección

La acción propiamente de inspección es realizada por un sistema que básicamente consiste en una cámara que toma imágenes en algún rango de frecuencias (ya sea del espectro visible o en cualquier otro), con luz natural o láser, en una, dos o tres dimensiones. Posteriormente sobre estas imágenes debe aplicarse algún algoritmo de análisis para poder obtener un resultado (conformidad de calidad, recuento de unidades, medida...). Es evidente que la complejidad del sistema y su gran valor está en la aplicación de inspección, y el robot es simplemente una herramienta que facilita la captura de la imagen.

La acción del robot puede ser doble:

- Coger la pieza, situarla delante de la cámara y rotarla para que sea inspeccionada en sus diferentes partes.
- Coger la cámara y seguir una trayectoria a lo largo de la pieza para inspeccionar.

5.3.2. Test

En los últimos años se ha incrementado el número de ensayos requeridos para garantizar el cumplimiento de las características de rendimiento y el estándar de funcionamiento de los productos, a la vez que se pide la reducción en los tiempos de producción.

Un robot permite automatizar las pruebas de calidad. Ello es especialmente interesante cuando estas pruebas implican la repetición de una misma acción.

