



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

SENSORIZACIÓN DE ROBOTS TRADICIONALES PARA ENTORNOS COLABORATIVOS

Autor:

Oubara Oulbagri, Oussama

Tutores:

González Sánchez, José Luis

**Ingeniería de sistemas y
automática**

Gayubo Rojo, Fernando

**Ingeniería de sistemas y
automática/CARTIF**

Valladolid, 12 de Julio de 2024



Universidad de Valladolid





Agradecimientos

El hecho de estar haciendo este trabajo es gracias al apoyo de mi familia, que me han dado ánimos y todo lo que necesito para llegar hasta este punto, es por ello que les agradezco todo lo que han hecho por mí.

Agradecer también a mis tutores de la universidad, Fernando Gayubo Rojo y José Luis González Sánchez, por la paciencia que han tenido y por su gran ayuda, sus consejos y el todo tiempo que me han otorgado.



Universidad de Valladolid





RESUMEN

Un entorno colaborativo se refiere a un espacio de trabajo en el cual humanos y robots interactúan y colaboran directamente para completar tareas compartidas de manera segura, eficiente y sin necesidad de barreras físicas que los separen. En estos entornos, se suelen integrar robots conocidos como cobots (robots colaborativos) que tienen varias características específicas que facilitan su integración en entornos colaborativos, por ejemplo, disponen de sensores internos de proximidad y fuerza (cumplen con normas internacionales de seguridad, como la ISO/TS 15066, que especifica los límites de fuerza y presión), están preparados para limitar la potencia y velocidad, suelen tener bordes redondeados y superficies suaves para reducir el riesgo de lesiones por contacto, etc.

En este trabajo nos preguntamos si se puede adaptar un robot industrial tradicional para que pueda operar de manera segura en un espacio colaborativo con humanos. Consideramos que sí, pero que es necesario agregar una serie de sensores y tecnologías, para conseguir que tenga una noción del entorno y pueda trabajar en equipo con operarios sin llegar a dañarlo, mostrando una zona de trabajo segura y colaborativa.

En este trabajo analizamos diferentes tipos de sensores y proponemos un primer nivel de sensorización asociada al robot: internos (sensores de corriente), superficiales (sensores de contacto) y de proximidad.

PALABRAS CLAVE

Sensorización, entorno colaborativo, robot industrial, robot tradicional, trabajo con robots.



ABSTRACT

A collaborative environment refers to a workspace where humans and robots interact and collaborate directly to complete shared tasks safely, efficiently, and without the need for physical barriers separating them. In these environments, robots known as cobots (collaborative robots) are typically integrated, featuring several specific characteristics that facilitate their integration into collaborative settings. For example, they are equipped with internal proximity and force sensors (complying with international safety standards such as ISO/TS 15066, which specifies force and pressure limits), are designed to limit power and speed, and often have rounded edges and soft surfaces to reduce the risk of injury from contact, among other features.

In this work, we question whether a traditional industrial robot can be adapted to operate safely in a collaborative space with humans. We believe that it is possible, but it requires adding a series of sensors and technologies to enable the robot to perceive its environment and work as a team with operators without causing harm, thereby creating a safe and collaborative workspace.

In this study, we analyze different types of sensors and propose a first level of sensorization associated with the robot: internal (current sensors), surface (contact sensors), and proximity sensors.

KEYWORDS

Sensorization, collaborative environment, industrial robot, traditional robot, working with robots.



ÍNDICE GENERAL:

OBJETIVOS	11
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	17
ESTADO DEL ARTE.....	21
3.1. Tipos de robots [5].....	24
3.1.1. Tipos de robots industriales.....	24
3.2.1. Sensores de posición, velocidad y aceleración	32
3.2.2. Sensores de nivel y proximidad	35
3.2.3. Sensores de humedad y temperatura.....	38
3.2.4. Sensores de fuerza y deformación	39
3.2.5. Sensores de flujo y presión	40
3.2.6. Sensores de color, luz y visión	42
3.2.7. Sensores de corriente	43
3.3. Tipos de corrientes usadas en los motores eléctricos de los robots industriales	46
3.3.1. Corriente continua [20]	46
3.3.3. Corriente discontinua	46
3.3.3. Corriente alterna	47
ANÁLISIS DEL CONTROL DE UN ROBOT INDUSTRIAL	49
CONTROL DE PROXIMIDAD.....	55
5.1 Sensores de ultrasonido	57
5.2. Sensores ópticos	59
5.3. Sensor de movimiento PIR.....	59
5.4. Sensores inductivos y capacitivos.....	60
5.5. Sensores de temperatura y cámaras térmicas/IR	61
5.6. Cámaras VIS.....	62
5.7. Sensores RADAR.....	63
5.7. Sensores LIDAR	65
5.7. Sensores de Campos Electromagnéticos Controlados (CEMF).....	66
CONTROL DE CONTACTO	69
6.1. Sensores de fuerza puntual.....	71
6.1.1. Sensores de fuerza puntual tradicionales	72
6.1.2. Galgas extensométricas	72
6.2. Sensores de presión.....	73



6.2.1. Sensores de presión absoluta y manométrica.....	73
6.2.2. Sensores de presión en placas	74
6.2.3. Alfombrilla de presión	76
6.2.4. Sensor de mapa de presiones	77
CONTROL INTERNO	79
7.1. Sensores de corriente industrial	82
7.2. Sensor de corriente RS	82
PROTOTIPO.....	85
ESTUDIO ECONÓMICO	91
9.1. Costes directos.....	93
9.1.1. Costes personales.....	93
9.1.2. Costes materiales.....	94
9.2. Costes indirectos.....	94
9.2.1. Costes por viajes	95
9.2.2. Costes por consumo energético.....	95
9.3. Costes totales.....	95
CONCLUSIÓN Y LÍNEAS FUTURAS.....	97
REFERENCIAS	105
ANEXOS	111

ÍNDICE DE ANEXOS:

Anexo A. Carga_De_Librerías	111
Anexo B. Movimiento_Del_Robot.....	111
Anexo C. Descarga_De_Librerías.....	111
Anexo D. LecturaIR.....	111

ÍNDICE DE FIGURAS:

Figura 1. Modos de operación colaborativos. [1]	14
Figura 2. Instalaciones globales anuales de robots industriales y desarrollo de stocks. [3]	19
Figura 3. Robot antropomórfico. [6]	25
Figura 4. Robot cartesiano. [7]	27
Figura 5. Robot cilíndrico. [8]	28
Figura 6. Robot Delta o paralelo [9]	29
Figura 7. Robot SCARA. [10].....	30
Figura 8. Potenciómetro estándar de una resistencia variable por eje giratorio. [12].....	33
Figura 9. Esquema de funcionamiento de un encoder óptico. [13].....	33
Figura 10. Esquema de funcionamiento de un encoder magnético. [14].....	34
Figura 11. Esquema de funcionamiento de un LVDT. [15].....	35
Figura 12. Esquema de funcionamiento de un sensor ultrasónico. [16]	36
Figura 13. Configuración de foco fijo. [11].....	37
Figura 14. Funcionamiento de un sensor. [11]	37
Figura 15. Esquema mostrando el funcionamiento del efecto Hall. [17].....	38
Figura 16. Explicación del efecto Hall. [18]	43
Figura 17. Sensor basado en el efecto Hall. [19].....	44
Figura 18. Configuración de foco fijo. [11].....	44
Figura 19. Campo magnético en un conductor. [11]	45
Figura 20. Corriente continua en función del tiempo. [21].....	46
Figura 21. Corriente discontinua en función del tiempo. [20].....	47
Figura 22. Corriente alterna en función del tiempo. [21]	47
Figura 23. Primera estructura de control para integración del robot en un entorno colaborativo.....	53
Figura 24. Sensor de ultrasonido. [22]	58
Figura 25. Sensor óptico. [23]	59
Figura 26. Sensor de movimiento PIR. [25].....	60
Figura 27. Sensor inductivo. [27]	61
Figura 28. Sensor capacitivo. [29].....	61
Figura 29. Sensor de temperatura [30]	62
Figura 30. (a) Sensor de radar, (b) Sensor de radar de ondas milimétricas para automoción [32]	65
Figura 31. Placa base para el control del sensor LIDAR. [34]	66
Figura 32. Sensor LIDAR. [35].....	66
Figura 33. Sensor de fuerza de compresión. [38].....	72
Figura 34. Galga extensometría. [39].....	73
Figura 35. Sensor de presión manométrico. [40].....	74
Figura 36. Sensor de presión absoluta. [41]	74
Figura 37. sensores de presión desarrollados por AIRSKIN. [42].....	75
Figura 38. Robot EPSON SCARA T602S-1. [44].....	76
Figura 39. Colocación de los sensores. [43].....	76



Figura 40. Alfombrilla de presión. [24]	77
Figura 41. Sensor de mapa de presiones. [45].....	78
Figura 42. Sensor de corriente industrial. [49]	82
Figura 43. Sensor de corriente de RS. [50].....	83
Figura 44. Robot quieto.	88
Figura 45. Posición de parada por el sensor.....	89

ÍNDICE DE TABLAS:

Tabla 1. Cálculo de días laborables.	93
Tabla 2. Horas dedicadas al trabajo.	94
Tabla 3. Costes materiales.	94
Tabla 4. Costes directos.....	94
Tabla 5. .Costes indirectos.....	95
Tabla 6. Costes totales.....	95
Tabla 7. Comparación de sensores comerciales.	100



CAPÍTULO 1

OBJETIVOS



Universidad de Valladolid





Un **entorno de trabajo colaborativo humano-robot** se puede definir como un espacio donde humanos y robots interactúan y cooperan de manera segura y eficiente para completar tareas compartidas o complementarias. Este entorno se caracteriza por la integración de tecnologías avanzadas que permiten una comunicación fluida y una colaboración armoniosa entre humanos y robots.

La seguridad es primordial en un entorno colaborativo. Esto incluye la implementación de sistemas de sensorización avanzados que permitan detectar la presencia de humanos en la proximidad de los robots y reaccionar adecuadamente para evitar colisiones.

Habitualmente los robots en estos entornos deben estar preparados y equipados con sensores que les pueden permitir tener una percepción detallada y en tiempo real del entorno. Además, los robots en un entorno colaborativo deben ser altamente adaptables para responder a cambios dinámicos en el entorno de trabajo.

La colaboración efectiva requiere que tanto humanos como robots puedan compartir información y coordinar sus acciones en tiempo real. Esto implica el uso de sistemas de comunicación y control que permiten la sincronización precisa de movimientos y tareas.

El diseño físico del entorno debe facilitar el acceso y la movilidad tanto de humanos como de robots. Espacios de trabajo compartidos deben estar organizados para minimizar el riesgo de accidentes y optimizar el flujo de trabajo. Las estaciones de trabajo y herramientas deben estar dispuestas de manera que favorezcan la colaboración y la eficiencia.

Por otro lado, el entorno debe facilitar una interacción intuitiva y natural entre humanos y robots.

Para establecer la seguridad en los entornos colaborativos se publicó la norma ISO/TS 15066: "Robots y Dispositivos Robóticos - Robots Colaborativos" que proporciona directrices específicas para la seguridad de los robots colaborativos, que están diseñados para trabajar en estrecha proximidad y cooperación con los seres humanos. La norma complementa las normas ISO 10218-1 e ISO 10218-2, abordando los aspectos únicos y desafíos de seguridad asociados con los robots colaborativos. Establece los requisitos de seguridad para colaboración humano-robot. La norma establece que se debe integrar sensores avanzados para detectar la presencia humana y ajustar el comportamiento del robot en consecuencia. Los sistemas críticos de seguridad

deben tener redundancias y ser lo suficientemente fiables para garantizar la seguridad durante todas las fases de operación.

Un aspecto particular que establece la norma es limitar las fuerzas y presiones que pueden ser ejercidas por los robots en contacto con los humanos, basados en estudios biomecánicos. Estos umbrales están diseñados para evitar lesiones durante el contacto físico.

También, la norma define modos de operación colaborativa, mostrados en la figura 1.

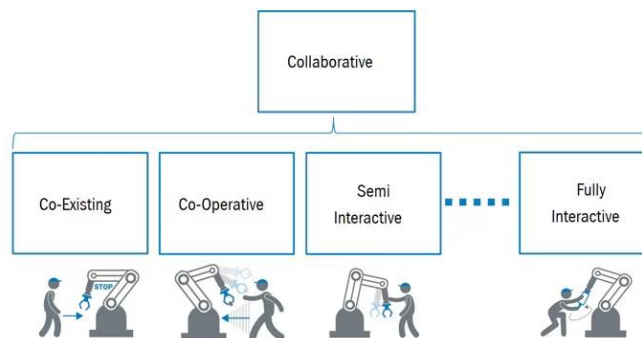


Figura 1. Modos de operación colaborativos. [1]

La norma establece aspectos de diseño para estos robots, incluyendo el diseño de bordes redondeados y superficies suaves para reducir el riesgo de lesiones por contacto.

En los entornos colaborativos se suelen integrar los llamados robots colaborativos (cobots) que están diseñados expresamente para poder plantear una colaboración directa en entornos dinámicos donde la presencia humana es constante. Vienen equipados de sensores avanzados. Estos robots por su facilidad de programación/reprogramación son especialmente útiles en entornos donde se requieren cambios frecuentes en la producción o en la personalización de productos.

Frente a los robots llamados colaborativos nos encontramos con los robots industriales o tradicionales que suelen operar en áreas separadas, aisladas de los trabajadores humanos por barreras físicas (vallados) para evitar accidentes. La interacción con humanos es mínima o inexistente durante su operación. Las tareas de programación y mantenimiento se realizan cuando el robot está inactivo. Debido a la potencia y velocidad de estos robots, las precauciones de seguridad son rigurosas para proteger a los operarios ¿Pueden integrarse robots tradicionales en entornos colaborativos?



En el presente trabajo se analiza brevemente y plantea una solución a la colaboración en el mismo ambiente de trabajo entre un robot industrial o tradicional y un ser humano, sin necesidad de utilizar elementos de seguridad (vallados) o protocolos como se indican en las normativas ISO 10218, EN 1525 y ISO 45001.

Brevemente, la ISO 10218-1:2011 “*Robots and Robotic Devices – Safety Requirements for Industrial Robots*” especifica los requisitos de seguridad para el diseño, la fabricación, la operación y el mantenimiento de los robots industriales. Se centra en aspectos como: (1) requisitos de diseño, que incluye características de diseño necesarias para garantizar la seguridad, como sistemas de parada de emergencia, reducción de la velocidad y potencia cuando sea necesario, y requisitos para la fiabilidad del software; (2) requisitos operativos, definiendo las medidas de seguridad que deben implementarse durante la operación del robot, incluyendo el uso de dispositivos de protección y la implementación de procedimientos seguros de trabajo. La ISO 10218-2:2011 complementa la ISO 10218-1 y se centra en la integración y el uso seguro de los robots industriales en el lugar de trabajo. Se abordan las consideraciones para la instalación segura de sistemas robóticos completos, incluyendo la disposición física y los controles de seguridad. También define las responsabilidades de los integradores de sistemas y de los usuarios finales en la implementación y el mantenimiento de las medidas de seguridad. La EN 1525: “*Safety of Industrial Trucks - Driverless Trucks and their Systems*” se aplica a los vehículos industriales sin conductor y sus sistemas. Propone sistemas de detección de obstáculos y mecanismos de parada de emergencia. La UNE-EN-ISO 10218-2: “*Robots y Dispositivos Robóticos – Requisitos de Seguridad para Robots Industriales – Parte 2: Sistemas e Integración*” es la versión española de la ISO 10218-2 Medidas de protección y seguridad: Incluye requisitos para la implementación de medidas de protección, como barreras físicas, sistemas de monitoreo y dispositivos de emergencia. La ISO 45001: “*Sistemas de Gestión de la Seguridad y Salud en el Trabajo*” establece un marco para un sistema de gestión de seguridad y salud en el trabajo (SST), con el objetivo de mejorar la seguridad de los trabajadores, reducir los riesgos en el lugar de trabajo, para lograr este objetivo, se emplearán diferentes sensores, consiguiendo que el robot tenga percepción (“sentidos”) y pueda detectar al personal de trabajo con este, estos sensores estarán programados de tal forma que se logre que el robot se detenga cuando detecta a trabajadores cercanos en el menor tiempo posible.

En este TFG, los objetivos son los siguientes:

01: Revisión de diferentes morfologías de robots industriales tradicionales

- Realizar una revisión de varios tipos de robots industriales tradicionales, incluyendo robots articulados, cartesianos...



- Evaluar brevemente las características morfológicas específicas de estos robots, como sus grados de libertad, capacidad de carga, precisión y velocidad operativa.
- En su caso, identificar algunas limitaciones y desafíos asociados con la adaptación de estos robots para entornos colaborativos, enfocándose en seguridad, flexibilidad e interacción humano-robot.

02: Comprender qué es un sensor, tipos de sensores y sus potenciales usos

- Definir qué es un sensor y explicar los principios fundamentales de su operación.
- Revisar diferentes tipos de sensores relevantes para la robótica, incluyendo sensores de proximidad, sensores táctiles, sensores de corriente, sensores de visión...
- Breve revisión de las aplicaciones y limitaciones de cada tipo de sensor en el contexto de la robótica industrial y colaborativa.

03: Revisar diferentes tipos de sensores comerciales con potencialidad para adaptar robots industriales tradicionales a entornos colaborativos

- Revisar diferentes sensores comerciales disponibles, valorando su potencial para adaptar robots a entornos colaborativos

04: Propuesta de una primera solución y primeras conclusiones

- Sintetizar los hallazgos de los objetivos anteriores para desarrollar una solución para el primer nivel de sensorización que permita la adaptación de robots industriales tradicionales a espacios colaborativos.



CAPÍTULO 2

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA



Universidad de Valladolid



Gracias al desarrollo de nuevas tecnologías, la industria, con el fin de mejorar la calidad de vida de las personas y reducir el impacto de la producción en la naturaleza, ha mejorado considerablemente, pasando de la industria tradicional, o industria 1.0 (uso del agua y vapor en las máquinas) hasta la industria 4.0 (digitalización de la industria), en la cual se tiene las fábricas inteligentes o *smart factories* debidas a la digitalización de las fábricas [2].

La digitalización de la industria se ha llevado a cabo gracias a varios factores, uno de ellos es la implementación de robots en la fabricas [3], en la figura 2 se puede comprobar que la instalación de robots en la industria ha aumentado en los últimos años, además de los datos de stock IFR y PIM, el stock de robots se calcula según el método de inventario perpetuo (PIM por sus siglas en inglés) con depreciación continua (5%, 10% o 15%) de un período a otro. Estos robots tienen como objetivo ayudar y mejorar en las líneas de producción.

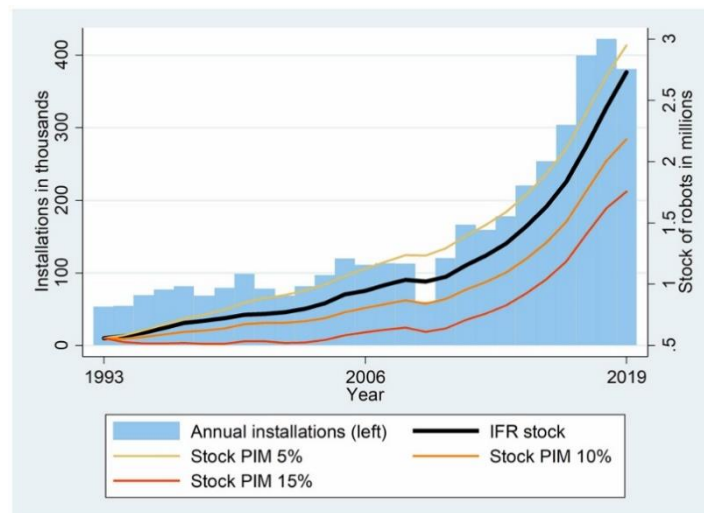


Figura 2. Instalaciones globales anuales de robots industriales y desarrollo de stocks. [4]

“Un brazo robótico mata a un trabajador después de confundirlo con una caja de pimientos rojos” [5] esta es una noticia de *korea joongang daily* que redacta la muerte de un trabajador en corea del sur. Esta noticia se hizo muy famosa y dio a entender un grave problema que tenían los robots industriales: son peligrosos. Ya existen normas tales como las normativas ISO 10218 que se encargan de que, si se siguen adecuadamente, se pueda evitar lesiones graves en los trabajadores. Estas normas, en general, recomiendan instalar elementos de seguridad como rendijas o puertas alrededor de los robots industriales, suponiendo la dificultad para que un operario tenga interacción con el robot. Hay a ocasiones en las que el robot tiene que interactuar con un operario o el robot necesite una conexión con elementos externos a la línea y evitar estos elementos pasivos. Para solventar el problema causado por los elementos



físicos, que separan al operario de un robot, se plantea la utilización de sensores para conseguir que el robot detecte el entorno de trabajo y a los operarios en él (que se traduce en volver medianamente colaborativo al robot industrial). Los sensores pretenden detectar operarios cercanos y mandar la información de su presencia al robot, consiguiendo que se detenga si el operario puede sufrir lesiones. Para solventar el problema causado por los elementos físicos, que separan al operario de un robot, se plantea la utilización de sensores para conseguir que el robot detecte el entorno de trabajo y a los operarios en él (que se traduce en volver medianamente colaborativo al robot industrial). Los sensores pretenden detectar operarios cercanos y mandar la información de su presencia al robot, consiguiendo que se detenga si el operario puede sufrir lesiones.



CAPÍTULO 3

ESTADO DEL ARTE



Universidad de Valladolid





La robótica colaborativa surge de la necesidad de combinar las capacidades humanas y robóticas en entornos de trabajo compartidos para aumentar la eficiencia y la seguridad.

¿en que es mejor un robot frente a un operario humano? Los robots pueden realizar tareas con un alto grado de precisión, que es esencial en muchas aplicaciones y pueden repetir la misma tarea miles de veces sin pérdida de precisión, lo que es crucial para la producción en masa. También los robots pueden operar en condiciones que serían peligrosas para los humanos, como en entornos con altas temperaturas o productos químicos tóxicos. Además, pueden trabajar en turnos largos sin descanso, manteniendo un rendimiento constante. Los robots pueden manipular cargas pesadas y realizar trabajos físicamente exigentes y pueden realizar ciertas tareas mucho más rápido que los humanos. También los robots permiten garantizar una calidad consistente del producto final, eliminando la variabilidad que puede introducir el factor humano.

¿en que es mejor un operario humano frente a un robot? Los humanos pueden adaptarse a cambios rápidos en el entorno o en las tareas, lo que es esencial en entornos de producción dinámica. También pueden identificar y resolver problemas imprevistos, algo en lo que los robots aún son limitados. Los operarios humanos pueden mejorar procesos existentes y desarrollar nuevos métodos de trabajo basados en su experiencia y conocimientos, algo en lo que los robots aún están limitados. También los operarios humanos pueden evaluar situaciones complejas y tomar decisiones informadas, considerando múltiples factores simultáneamente, y pueden entender el contexto más amplio de una tarea o proceso, algo que es difícil de programar en un robot. Los operarios humanos pueden comunicarse de manera efectiva entre sí, coordinando actividades y compartiendo información crítica, algo en lo que los robots aún están limitados.

La robótica colaborativa tiene sus raíces en la robótica industrial tradicional. Los primeros robots industriales fueron diseñados para realizar tareas repetitivas y peligrosas, aislados de los trabajadores por barreras físicas para evitar accidentes. Estos robots operaban en entornos controlados y su interacción con los humanos era limitada y mediada por estrictas medidas de seguridad.

Con la creciente demanda de flexibilidad en las líneas de producción, se comenzó a explorar la posibilidad de una interacción más cercana y segura entre humanos y robots. En las décadas de 1980 y 1990, se produjeron importantes avances en tecnologías de sensores y algoritmos de control, lo que permitió a los robots obtener una mejor percepción del entorno y reaccionar de manera más inteligente y adaptativa.

La seguridad siempre ha sido una preocupación en la robótica. La publicación de normas específicas, como la ISO/TS 15066 en 2016, que complementaban otras como la ISO 10218, han sido fundamentales para establecer un marco seguro y estandarizado para la integración de robots en entornos colaborativos. La adopción de la robótica colaborativa en la industria se aceleró con el impulso de empresas como Universal Robots, KUKA y ABB.

En la actualidad ya se han pensado diferentes ideas y formas de obtener un trabajo en colaboración con un humano y un robot, puesto que el problema planteado lleva siendo un rompecabezas desde la implementación de la robótica en los sistemas de producción y fabricación.

Para entender el problema y proponer diferentes soluciones se plantea una clasificación de los diferentes robots (que proporciona una visión general de los robots y su comportamiento en el ámbito de trabajo) y sensores (que permitirá conseguir una solución práctica y eficiente).

3.1. Tipos de robots [6]

Comenzando por los robots, según la norma ISO 8373:2012, se define al robot como “mecanismo programable en dos o más ejes, con cierto grado de autonomía, que se mueve en su entorno para realizar tareas previas”, esta definición es vaga, pero proporciona una pequeña idea de que es un robot. Según la norma ISO mencionada, los robots tiene una clasificación en función de su uso, que se resume a continuación:

- Robots industriales: Robot con uso en aplicaciones de automatización industrial.
- Robots de servicio: Robot encargado de las tareas de un ser humano o un equipamiento, que no están relacionado con el ámbito industrial.

3.1.1. Tipos de robots industriales

En este trabajo, interesan los robots industriales. Existen varias formas de clasificar los robots industriales, una buena forma de clasificarlos es según la forma física del brazo, puesto que permite entender el movimiento del robot de una manera más sencilla. Por la forma mencionada de clasificar a los robots, se tendría los siguientes grupos: articulados o antropomórficos, cartesianos, cilíndricos, delta o paralelo y SCARA.

3.1.1.1. Articulado o antropomórfico

Son los más utilizados en la industria debido a su versatilidad. Estos robots poseen un brazo con al menos tres articulaciones rotativas, lo que les proporciona una amplia gama de movimientos similares a los del brazo humano. Esta configuración les permite realizar tareas complejas y precisas en una variedad de entornos industriales.

En la figura 3 se muestra un ejemplo de este tipo de robot.



Figura 3. Robot antropomórfico. [6]

La integración de robots articulados en procesos industriales implica varios pasos críticos, desde la selección del robot adecuado hasta su programación y configuración. Las siguientes son algunas consideraciones clave para la integración:

- Selección del robot: dependiendo de la aplicación, se debe elegir un robot con la capacidad de carga, alcance y precisión necesarios.
- Programación: los robots articulados deben ser programados para realizar tareas específicas. Esto puede hacerse utilizando lenguajes de programación específicos de robots o mediante la enseñanza manual, donde el operario guía físicamente al robot a través de las tareas.
- Configuración del espacio de trabajo: es crucial diseñar el espacio de trabajo del robot para optimizar la eficiencia y minimizar los riesgos. Esto incluye la disposición de estaciones de trabajo, sistemas de alimentación y descarga, y áreas de acceso seguro para los operarios humanos.

La seguridad es una preocupación principal al integrar robots articulados en entornos colaborativos. Los problemas de seguridad incluyen:

- Los robots articulados pueden chocar con operarios u otros objetos en el entorno de trabajo (colisiones), lo que puede causar lesiones o daños. Para mitigar esto, se tienen que utilizar sensores que permitan al robot detectar la presencia de humanos y reducir su velocidad o detenerse.
- La fuerza aplicada por un robot articulado durante una colisión puede ser peligrosa. La norma ISO/TS 15066 establece límites para las fuerzas y presiones que los robots colaborativos pueden ejercer para asegurar la seguridad humana.
- Los fallos en el sistema de control del robot o en sus componentes mecánicos pueden llevar a comportamientos imprevistos. Es crucial implementar redundancias y sistemas de parada de emergencia que detengan al robot en caso de fallo.

Algunos de los problemas que pueden surgir en la adaptación de este tipo de robots a entornos colaborativos son las siguientes:

- Dado su amplio rango de movimientos y velocidad, es crucial implementar sensores avanzados de proximidad y fuerza para detectar la presencia de operarios y evitar colisiones.
- Aunque son altamente versátiles, la programación para tareas específicas y la integración de medidas de seguridad adicionales pueden ser complejas. Es necesario implementar algoritmos de control que ajusten dinámicamente la velocidad y fuerza del robot en función de la información sensorial. Estos algoritmos permiten que el robot reaccione rápidamente a cambios en su entorno, garantizando la seguridad (control Adaptativo).
- Hay que “adaptar” el robot y el espacio de trabajo para minimizar los riesgos (diseño ergonómico). Los robots articulados tradicionales no suelen tener bordes redondeados y superficies suaves para reducir el riesgo de lesiones en caso de contacto, por lo que “añadir” elementos para reducir este inconveniente.

3.1.1.2. *Cartesiano*

El robot cartesiano es el robot más simple. Como su nombre indica, el esquema de su movimiento se basa en el sistema de ejes cartesianos X-Y-Z como se muestra en la Figura 4.



Figura 4. Robot cartesiano. [7]

Los robots cartesianos, también conocidos como robots lineales o rectilíneos, operan en un sistema de coordenadas cartesianas (X-Y-Z), lo que facilita movimientos lineales precisos. Estos robots son ideales para tareas que requieren movimientos rectilíneos y repetitivos, como el manejo de materiales, operaciones de ensamblaje, impresión 3D y máquinas CNC. La estructura de un robot cartesiano generalmente consiste en tres ejes lineales perpendiculares entre sí que permiten una excelente precisión y repetitividad en las tareas realizadas.

Algunos problemas para su adaptación a entornos colaborativos son los siguientes:

- Los robots cartesianos están diseñados para realizar movimientos lineales en los ejes X, Y y Z. Esta limitación de movimiento puede dificultar su capacidad para adaptarse a entornos colaborativos dinámicos donde se requieren movimientos más complejos y flexibles.
- La configuración fija de su espacio de trabajo puede limitar la adaptabilidad del robot a cambios en el entorno.
- Aunque el movimiento de los robots cartesianos es predecible y lineal, la seguridad sigue siendo una preocupación.

3.1.1.3. Cilíndrico

A diferencia del robot cartesiano, los robots cilíndricos tienen la particularidad de que solo puede moverse de forma lineal en un plano, pero puede rotar en el eje perpendicular a este plano (Figura 5).



Figura 5. Robot cilíndrico. [8]

Estos robots combinan movimientos lineales y rotacionales, permitiendo desplazamientos lineales en un plano y rotación alrededor de un eje perpendicular. Son útiles en aplicaciones que requieren acceso a diferentes alturas y rotaciones dentro de un área específica.

Algunos problemas para su adaptación a entornos colaborativos son los siguientes:

- La necesidad de monitorizar tanto movimientos lineales como rotacionales requiere una combinación sofisticada de sensores para asegurar la seguridad en entornos colaborativos.
- La adaptación puede verse limitada por la necesidad de definir claramente el espacio de trabajo seguro y accesible.

3.1.1.4. Delta o paralelo

Consiste en el uso de paralelogramos que restringen el movimiento de una plataforma a la que se unen los brazos articulados y solo permite el movimiento lineal en una dirección (Figura 6).



Figura 6. Robot Delta o paralelo [9]

Como utilizan paralelogramos para restringir el movimiento de una plataforma, permiten desplazamientos rápidos y precisos en un plano. Son comunes en aplicaciones de alta velocidad como el empaquetado y la manipulación de objetos ligeros.

Algunos problemas para su adaptación a entornos colaborativos son los siguientes:

- Su velocidad puede representar un riesgo significativo para los operarios, lo que requiere sistemas avanzados de detección y control de movimientos.
- Su capacidad de movimiento está limitada a ciertos planos, lo que puede restringir su flexibilidad en entornos colaborativos.

3.1.1.5. SCARA (Selective Compliant Assembly Robot Arm)

Este robot (Figura 7) es capaz de generar un movimiento en un plano X-Y, pero no puede moverse en el eje Z perpendicular a al plano X-Y, solo puede rotar en este eje. Son especialmente útiles para tareas de ensamblaje y pick-and-place.



Figura 7. Robot SCARA. [10]

Algunos problemas para su adaptación a entornos colaborativos son los siguientes:

- La incapacidad de moverse en el eje Z puede restringir ciertas interacciones colaborativas.
- Requieren sensores que no solo detecten proximidad, sino que también controlen la fuerza y la velocidad de rotación para evitar accidentes.

Esta son algunos de los robots usados en la industria en función del movimiento del brazo robótico, que es lo que interesa para este estudio, puesto que el movimiento de brazo es lo que determina si el robot puede llegar a golpear a un trabajador o no.

Los robots antropomórficos o articulados son los más comunes en aplicaciones industriales debido a su gran versatilidad y capacidad para realizar tareas complejas. Sin embargo, su integración en entornos colaborativos presenta numerosos desafíos debido a su amplio rango de movimientos y velocidad. Por su problemática, en este TFG nos centramos en este tipo de robot.

En resumen, los principales desafíos para su integración en entornos colaborativos son los siguientes:

- Dado su amplio rango de movimientos y velocidad, es crucial implementar sensores avanzados para detectar la presencia de operarios y evitar colisiones (objetivo del TFG).
- Aunque los robots articulados son altamente versátiles, la programación para tareas específicas y la integración de medidas de seguridad adicionales pueden ser complejas. Es necesario implementar algoritmos de control que ajusten dinámicamente la velocidad y fuerza del robot en función de la información sensorial (control adaptativo), que permiten que el robot reaccione rápidamente a cambios en su entorno, garantizando la seguridad.
- Para minimizar los riesgos, es esencial "adaptar" el robot y el espacio de trabajo, lo que implica un diseño ergonómico. Los robots articulados tradicionales no suelen tener bordes redondeados y superficies suaves para reducir el riesgo de lesiones en caso de contacto. Por lo tanto, es necesario "añadir" elementos como recubrimientos en las partes móviles del robot para suavizar los bordes y superficies. 3.2. Tipos de sensores [11]

Según la RAE se define de sensor como sensor aquel dispositivo que detecta una determinada acción externa (temperatura, presión, etc) y la transmite adecuadamente. Esta definición da a entender que los sensores son aparatos capaces de observar y cuantificar las variables y atribuciones físicas. La posibilidad que tienen los sensores de medir las variables y atribuciones físicas es gracias al uso de principios físicos y químicos, aprovechando la conservación de la energía para digitalizar el valor deseado.

Es importante no confundir los sensores con los transductores (capaz de convertir una variable física a otro dominio) y los actuadores (se encargan de realizar acciones descritas por un sistema de procesamiento de información). Los transductores y los sensores pueden confundirse debido a las definiciones mencionadas, pero un sensor transforma una magnitud física a un sistema de procesamiento de información, pudiendo utilizar esta magnitud física, mientras que el transductor solo cambia de dominio la variable física (no la magnitud de la variable).

Una vez aclarado que es un sensor, queda por decidir una forma de clasificarlos. La forma más común y sencilla de clasificar a los sensores es mediante la variable física que se encargan de medir. Esta clasificación permite aclarar los diferentes sensores que existen y, en función de la variable física medida, tantear que sensores son los que mejor se adaptan a una solución del problema planteado. Al clasificar los sensores por las variables físicas medidas,



se obtienen los siguientes grupos: sensores de posición, velocidad y aceleración, sensores de nivel y proximidad, sensores de humedad y temperatura, sensores de fuerza y deformación, sensores de flujo y presión, sensores de color, luz y visión, sensores de gas y pH, sensores biométricos y sensores de corriente. Los sensores de gas y pH y los sensores biométricos no tienen mucha relación con este trabajo, por ello, se descartar la explicación básica de su funcionamiento.

3.2.1. Sensores de posición, velocidad y aceleración

Estos sensores se usan para medir las variables cinemáticas, en general, de los objetos. Existen varios elementos usados para medir estas variables: potenciómetros, Encoders, tacogeneradores, LVDTs (por sus siglas en inglés, *Linear Variable Differential Transformor*), GPSs (por sus siglas en inglés, *Global Positioning System*), acelerómetros, giroscopios y compás o magnetómetros.

3.2.1.1. Potenciómetros

El potenciómetro es un elemento capaz de interpretar la posición (lineal o radial) de un objeto y variar una resistencia en función de esta posición. Consta de tres terminales, uno en los extremos de un material y otro que recorre el cuerpo del material, de tal manera que cuando cambia de posición la terminal móvil varía la resistencia entre el éste y uno de los fijos, creando una diferencia de voltaje, en la figura 8 se puede apreciar un esquema del funcionamiento y la forma estándar de este elemento.

Algunas de las formas comunes usadas para fabricar un potenciómetro son: potenciómetros por bobina, películas de carbono, elementos plásticos conductores, películas metálicas y Cermet.

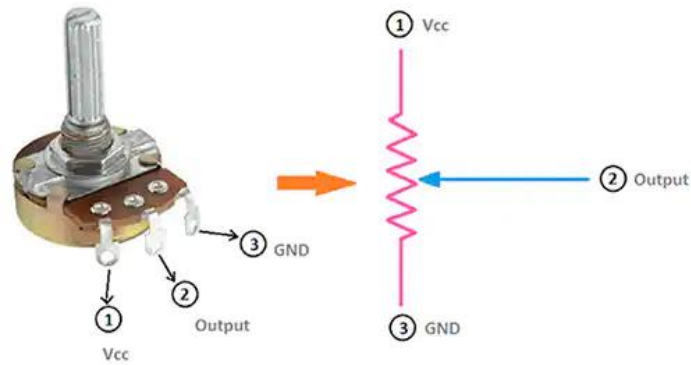


Figura 8. Potenciómetro estándar de una resistencia variable por eje giratorio. [12]

3.2.1.2. Encoder

Se utilizan principalmente en la medición de sistemas rotativos, aunque se usan también para medir movimientos lineales.

La mayoría de estos elementos son ópticos o magnéticos, pero también existen encoders mecánicos.

3.2.1.2.1 Encoders ópticos

Los encoders ópticos (figura 9). en general, consiste en dos dispositivos optoelectrónicos, uno emisor y el otro receptor y entre estos dispositivos hay un disco ranurado acoplado al eje del elemento del cual se desea medir la velocidad o posición.

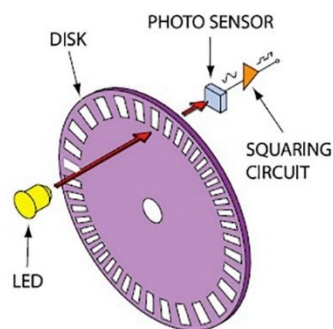


Figura 9. Esquema de funcionamiento de un encoder óptico. [13]

3.2.1.2.2. Encodes magnéticos

Los encoders magnéticos (figura 10) hacen uso de los sensores de efecto Hall y existen dos tipos de configuraciones para este tipo de encoders. En una de

las configuraciones, el imán se coloca en el eje del que se desea medir la velocidad angular y el sensor de efecto Hall este fijo, producido un cambio de estado cada vez que el imán pasa por el sensor de efecto Hall. En el otro tipo de configuración, el imán y el sensor de efecto Hall están fijos y entre ellos pasa un disco ranurado.

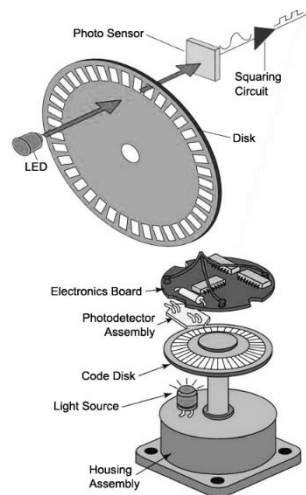


Figura 10. Esquema de funcionamiento de un encoder magnético. [14]

3.2.1.3. Tacogeneradores

Se basa en el principio de transducción de reluctancia variable, pudiendo medir la velocidad de un elemento rotativo gracias al uso de la ley de Faraday.

3.2.1.4. Transformador diferencial de variación lineal (LVDT)

Es un transformador diferencial de variable lineal basado en el principio de transducción de inductancia variable y se usa para medir desplazamientos lineales. Este tipo de sensores consta de tres bobinas, una alimentada con un voltaje variable en el tiempo (C.A.), que, por inducción, pasara a las otras dos bobinas, las cuales se conectan de forma que la salida del voltaje de las bobinas secundarias es la diferencias entre los voltajes de cada una de estas. Entre la bobina primaria y las bobinas secundaria existe un núcleo permeable que será el que proporcione el movimiento a medir, en la figura 11, se puede entender mejor el funcionamiento del dispositivo.

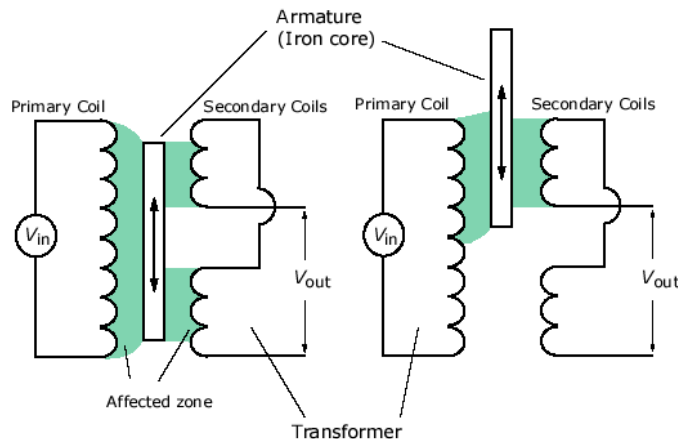


Figura 11. Esquema de funcionamiento de un LVDT. [15]

3.2.1.5. Sistemas de posicionamiento global (GPS)

Consiste en el uso de tres satélites, que determinan la distancia a la que se encuentra el usuario y trazan un círculo cada satélite, la intersección de los tres satélites será la posición del usuario portador de una antena.

3.2.1.6. Acelerómetros

Se usa principalmente para detectar la inclinación, aceleración y vibración de un objeto. Este sensor usa el principio de transducción piezoresistivo, piezoeléctrico o capacitivo y su funcionamiento se basa en el uso de las leyes de Newton y la Ley de Hook.

3.2.1.7. Giroscopios

Permiten relacionar la rotación relativa con un voltaje y lo consiguen gracias a las fuerzas de Coriolis presentes en los movimientos de rotación.

3.2.1.8. Compás (magnetómetros)

Está compuesto de un magnetómetro y un acelerómetro dispuestos en un solo chip, pudiendo entregar una señal que depende de unos valores de aceleración o valores magnéticos.

3.2.2. Sensores de nivel y proximidad

Son usados en muchas aplicaciones industriales y se encargan de medir la proximidad de un objeto con respecto al sensor. En función del principio de funcionamiento usado, los sensores de nivel o proximidad se pueden clasificar en 7 tipos de sensores: Ultrasónicos, resistivos, óptico, capacitivos, Reed switch y efecto Hall.

3.2.2.1. Ultrasónicos

Los sensores de ultrasonido utilizan el efecto Doppler para comprobar la proximidad de un objeto a este sensor, como se muestra en la figura 12. Un

elemento ultrasónico emite una onda ultrasónica que es absorbida y reflejada por el objeto a interceptar y, mediante la atenuación de la onda percibida por otro elemento receptor y el tiempo que tarda esta onda en ser detectada se puede medir la distancia del objeto al sensor.

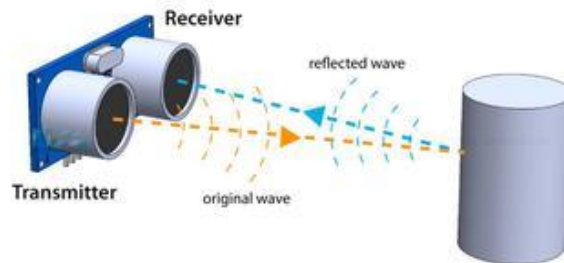


Figura 12. Esquema de funcionamiento de un sensor ultrasónico. [16]

3.2.2.2. Resistivos

Se basan en el mismo principio que usan los potenciómetros, dos terminales fijos y uno móvil, este último se encarga de variar las resistencias de los terminales fijos, con la diferencia de que, en este caso, el elemento móvil es un flotador que se sitúa dentro de un recipiente y, en función del nivel del recipiente, el flotador (terminal móvil) se mueve o no.

3.2.2.3. Ópticos

Este tipo de sensores constan de dos elementos principales, un emisor de luz infrarroja y un receptor. Estos dos elementos están colocados en una capsula y la forma más común de colocarlos es la configuración conocida como foco fijo (figura 13).

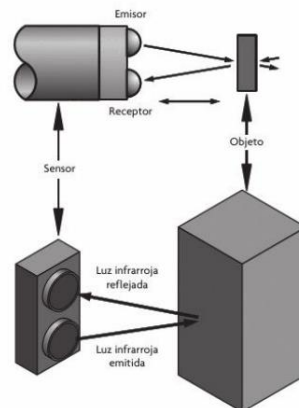


Figura 13. Configuración de foco fijo. [11]

3.2.2.4. Capacitivos

Usan el principio de transducción capacitiva para la detección de objetos próximos, generando un campo electrostático y cuando un objeto se aproxima al sensor e interactúa con el campo electrostático, el sensor cambia la capacidad equivalente del circuito, modificando su estado. En la figura 14 se muestra un funcionamiento simplificado.

También están los sensores capacitivos *touch*, que se usan principalmente en las pantallas táctiles y usan el mismo principio que los sensores capacitivos, con la diferencia de que son más sensibles a materiales conductores.

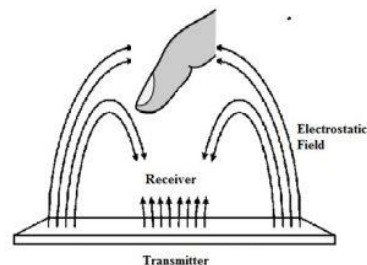


Figura 14. Funcionamiento de un sensor. [11]

3.2.2.5. Reed switch

Los sensores *Reed switch* o interruptores de lengüeta es un transductor entre un campo magnético y un contacto mecánico. Está compuesto de dos laminas ferromagnéticas que, en presencia de un campo magnético, se atraen entre sí. El sensor detecta un campo magnético cuando existe una carga en movimiento.

3.2.2.6. Efecto Hall

Estos sensores funcionan gracias al principio de transducción de efecto Hall, que requiere un campo magnético permanente y una placa conductora. El

principio básico de este sensor se basa en la creación de un voltaje a partir de un campo magnético (figura 15).

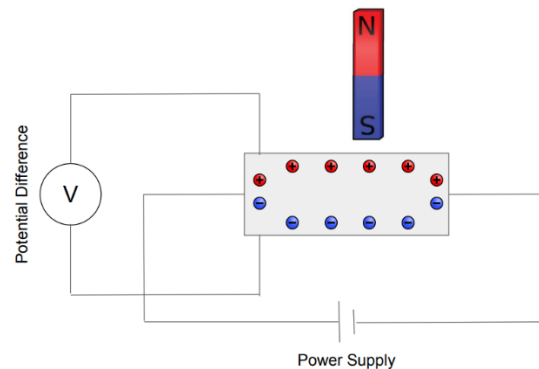


Figura 15. Esquema mostrando el funcionamiento del efecto Hall. [17]

3.2.3. Sensores de humedad y temperatura

Este tipo de sensores miden la temperatura y la humedad, los sensores de temperatura se ocupan de transformar la energía térmica del sistema en energía eléctrica y los sensores de humedad se encargan de medirla la cantidad de agua que hay en la atmosfera.

Respecto a los sensores de temperatura, existen varios fenómenos para obtener la temperatura de un sistema y, por tanto, varias formas de fábricas un sensor. Algunas de estos sensores son: Termómetros (de líquidos, que usan la propiedad de algunos éstos para modificar su volumen en función de la temperatura), sistemas termales (líquidos orgánicos, vapor orgánico, gas y mercurio) y termoelectrónicos (termistor, termopar, bulbo de resistencia eléctrica y pirómetro).

Generalmente, en la industria se usan los sensores termoelectrónicos, ya que son los que permiten conseguir una señal eléctrica, pudiendo manipular esta señal para obtener valores digitales. Estos sensores se basan en materiales semiconductores que varían una resistencia en función de la temperatura.

Al igual que el resto de los sensores, los sensores termoelectrónicos se pueden clasificar según el método usado para transformar en energía eléctrica la señal obtenida, y los sensores más comunes son: termistor, termopar, RTD (por sus siglas en inglés, *Resistance Temperature Detector*), diodos y sensores IC (por sus siglas en inglés, *Integrated Circuit*).

También existen sensores que pueden medir temperaturas altas. Los sensores mencionados tienen el inconveniente que deben estar cerca del objeto del que se desea conocer la temperatura, por ello, se han desarrollado sensores capaces de medir temperaturas gracias a la radiación emitida por el objeto, estos sensores se le conoce con el nombre de pirómetros y se clasifican en dos tipos principales: ópticos y de radiación.

3.2.3.1. Termistor

Estos dispositivos están contruidos a base materiales semiconductores que varían su valor resistivo en función de los cambios térmicos.

3.2.3.2. Termopar

Es uno de los dispositivos más usados en la industria para medir la temperatura. Estos dispositivos cuentan con dos conductores con diferentes propiedades que están unidos y, en el punto de unión, tienen diferentes temperaturas, generando una corriente eléctrica. Este fenómeno se puede explicar gracias al efecto Peltier y Thomson.

3.2.3.3. Sensores de temperatura resistiva (RTD)

Utilizando el principio de los cambios en la resistencia eléctrica de los metales puros, este tipo de sensores consigue medir la temperatura del ambiente. Normalmente, el material usado es una película delgada de platino.

3.2.3.4. Diodos y circuitos integrados (IC)

Utilizan el diodo, el cual es un semiconductor, para medir la variación de temperatura. Los diodos presentan una curva intensidad-velocidad que también cambia en función de la temperatura y, midiendo este cambio, se obtiene la temperatura.

3.2.3.5. Pirómetros ópticos

Mediante la variación del ancho de banda de la radiación, consiguen medir la temperatura de los objetos, ya que este ancho de banda cambia para cada solido según la temperatura a la que está sometido.

3.2.3.6. Pirómetros de radiación

Tiene la capacidad de captar la mayor parte de la radiación que emite un cuerpo, obteniendo una medida más precisa que los pirómetros de radiación. Estos dispositivos se basan en la ley de Stefan-Boltzmann para el funcionamiento.

Los sensores de humedad están relacionados con los señores de temperatura, ya que la variación de la temperatura implica una variación del volumen del sistema a estudiar. Aunque también existen sensores exclusivos para la humedad como es el sensor de bulbos húmedos y secos.

3.2.4. Sensores de fuerza y deformación

Los sensores de medida de fuerza, par y deformación son muy útiles para la medida de las fuerzas externas y deformaciones que puede sufrir un objeto. Aunque existen varias formas de medir estas variables, en este trabajo se comentaran las más empleadas y comercializadas: Los fenómenos piezoeléctricos y piezoresistivos.

3.2.4.1. Piezoeléctricos

Este fenómeno consiste en la utilización de materiales como cuarzo, fosforo de galio, algunos polímeros, etc... para para medir las variables dichas. Son más compactos, más sensibles, pero menos estables y con un comportamiento menos líneas que los sensores piezoresistivos. Existen dos grandes tipos de este tipo de sensores: sensores de fuerza y sensores de momento o torque.

3.2.4.1.1. Sensores de fuerza

Gracias al diseño que tiene el sensor y a un material activo que se coloca entre dos placas se puede permitir tener una sensibilidad a la fuerza.

3.2.4.2. Piezoresistivos

El principio piezoresistivo es muy utilizado en la medición de fuerza y deformaciones. Los sensores más populares son las galgas extensométricas, aunque existen otros tipos de sensores de fuerza que usan el principio mencionado.

3.2.4.2.1. Galgas extensométricas

Se usan para medir las deformaciones y los esfuerzos que causa estas deformaciones. Las galgas extensométricas se basan en el principio de piezoresistivo, descubierto por lord Kelvin, el cual explica que la resistencia eléctrica de un material cambia con la deformación a la que se expone.

3.2.5. Sensores de flujo y presión

3.2.5.1. Sensores de presión

Un sensor de presión transforma la fuerza aplicada en un área determinada en una señal eléctrica. Este tipo de sensores se pueden clasificar como un tipo específico de sensores de fuerza, pero existe una diferencia entre los sensores de presión y los sensores de fuerza: los sensores de presión miden la fuerza ejercida en un área gracias a un diafragma, pudiendo medir la presión de un fluido.

Este tipo de sensores se pueden clasifican según la presión medida, y pueden ser sensores diferenciales o sensores de presión de presión absoluta, pero también se pueden clasificar según el principio de transducción usado.

3.2.5.1.1. Según la presión medida

3.2.5.1.1.1. Sensores de presión absoluta

Los sensores de presión absoluta tienen una cámara sellada con una presión de referencia (normalmente 0 Pa), dentro de esta cámara existe un diafragma, que se encarga de medir la presión deseada

3.2.5.1.1.2. Sensores de presión diferencial

Los sensores de presión diferencial funcionan con una diferencia d , una presión de referencia dada y otra presión detectada. En este tipo de sensores, el diafragma se diseña de manera más precisa.

3.2.5.1.2. Según el principio de transducción

Los sensores de presión también se pueden clasificar en función del principio de transducción que utilizan, obteniendo los siguientes sensores: variación de resistencia, galgas extensiométricas, variación de reluctancia, piezoeléctricos, basados en osciladores, basados en la variación de capacitancia y manómetros.

3.2.5.1.2.1. Variación de resistencia

El elemento móvil de un potenciómetro está acoplado al diafragma sensitivo por medio de un tubo de Bourdon, consiguiendo que el desplazamiento que sufre el diafragma sea transmitido al elemento móvil de un potenciómetro.

3.2.5.1.2.2. Galgas extensométricas

Mediante el uso de elementos piezoresistivos se configura una galga extensométrica capaz de detectar el cambio de presión por el cambio de resistividad de la galga extensométrica. Existen varias formas de configurar una galga extensométrica, las formas más comunes de configurarlas son las galgas basadas en películas delgadas, las galgas metálicas, las galgas basadas en microelectrónica y las galgas de alambre tenso.

3.2.5.1.2.3. Variación de reluctancia

Se basa en la reluctancia de un circuito magnético, la cual se obtiene al exponer un diafragma a la presión.

3.2.5.1.2.4. Materiales piezoeléctricos

Los materiales piezoeléctricos tienen la posibilidad de transformar una fuerza en voltaje, este es el principio que usa este tipo de sensores para detectar la presión medida.

3.2.5.1.2.5. Osciladores (sensores de fuelle)

El acoplamiento de un elemento vibrante y un fuelle mecánico permiten detectar la presión en la zona deseada. El fuelle se encarga de detectar la presión y transferirla al elemento vibrante, el cual está acoplado a un circuito magnético que se encarga de transformar la energía mecánica (vibración) en energía eléctrica (voltaje).

3.2.5.1.2.6. Medición de capacitancia variable

El diafragma que experimenta una determinada presión desplaza uno de los electros de un capacitor variable, obteniendo una variación en el voltaje.

3.2.5.1.2.7. Manómetros

Consiste en un tubo de vidrio en forma de U que contiene un líquido. Los extremos del tubo se colocan en diferentes zonas de presión y, con la diferencia de altura del líquido dentro del tubo, se puede calcular la diferencia de presiones con la ecuación de Bernoulli.

3.2.5.1.3. Sensores de flujo

Este tipo de sensores se encargan de medir el flujo de gases o líquidos. Para conseguirlo, hacen uso de principios básicos de mecánica de fluidos y los sensores vistos con anterioridad, tales como los sensores de ultrasonido, electromagnéticos o sensores de Corloilis.

3.2.6. Sensores de color, luz y visión

Antes de hablar de los sensores de luz, es importante conocer que la luz se concibe como un fotón y como una onda electromagnética y esta onda puede tener una cantidad de energía que se representa en el espectro electromagnético. Para el análisis de las variables físicas color, luz y visión, se interpretará a la luz como un haz, ignorando su comportamiento de onda electromagnético.

Es habitual clasificar a los sensores de luz en sensores de fotorresistencias, fototransistores y fotodiodos. A los sensores de color se suelen clasificar en sensores basados en filtros y basados en fuentes fijas de luz. Mientras que los sensores de visión se clasifican en sensores CCD (*Charge Coupled Device*) y CMOS (*Complementary Metal Oxide Semiconductor*).

3.2.6.1. Sensores de luz

Por lo común este tipo de sensores se usan acompañados de encoders. Gracias a un elemento emisor y un elemento receptor de la luz infrarroja, se detecta los cambios de posición de un disco ranurado.

El elemento emisor consiste en un diodo conocido como emisor de luz infrarroja (LED, por sus siglas en inglés). La luz emitida está fuera del espectro electromagnético visible.

Los elementos encargados de interceptar la luz infrarroja reciben el nombre de fototransistor o fotodiodo. Estos elementos son capaces de detectar un haz de luz y transformar la luz emitida en voltaje.

3.2.6.2. Sensores de color

Este tipo de sensores emiten un voltaje determinado en de los colores que componen un elemento, consisten en tres diodos y amplificadores seguidos de éstos, cada uno de estos diodos detecta uno de los tres colores principales: rojo, azul y verde.

En función del voltaje que se obtiene en cada diodo, se puede reconstruir el color que inicialmente se quiere medir.

3.2.6.3. Sensores de visión

También llamados *chips de visión* que, en general son cámaras, capaces de detectar un entorno completo. Este sensor está formado por varios sensores, capaces de digitalizar una foto.

3.2.7. Sensores de corriente

Los sensores de corriente usan determinados principios físicos para transformar las variaciones de corriente en variaciones de voltaje. Son muy usados para la implementación de circuitos de control donde se impliquen cambios bruscos de potencia eléctrica consumida.

Existen varios principios que se encargan de conseguir relacionar la variación de corriente y el voltaje: basados en la ley de Ohms, basados en el efecto Hall, basados en transformadores.

3.2.7.1. Basados en el efecto Hall

El efecto Hall, descubierto por Edwin F. Hall, establece que una corriente que fluye a través de un conductor en presencia de un campo magnético se ejercerá una fuerza de Lorentz transversal que busca equilibrar el efecto de dicho campo, produciendo un voltaje, conocido como voltaje Hall. En la figura 16 se muestra un esquema del efecto Hall donde I es la corriente a medir, F_m es la fuerza transversal que busca contrarrestar la fuerza eléctrica, B es el campo magnético mencionado y V_H es el voltaje obtenido.

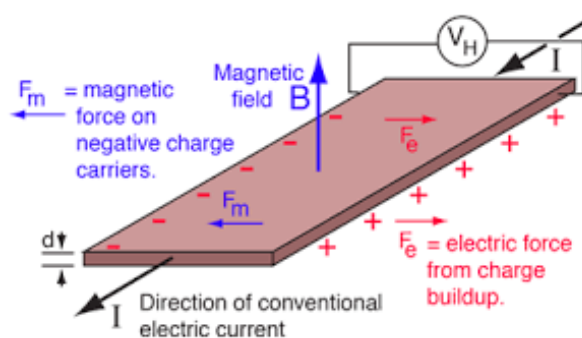


Figura 16. Explicación del efecto Hall. [18]

Los sensores de corriente que se basan en el efecto Hall, que suelen tener forma circular para introducir el cable del que se desea medir la corriente (figura 17), utilizan placas de un determinado material para convertir un campo magnético en un voltaje equivalente mediante el efecto Hall. Este tipo de sensores están aislados del circuito eléctrico, por lo que no se comparten conexiones eléctricas y es posible medir la corriente eléctrica sin interferir en el circuito eléctrico.



Figura 17. Sensor basado en el efecto Hall. [19]

3.2.7.2. Basados en la ley de Ohm

Para entender este tipo de sensores es necesario analizar el circuito de la figura 18.

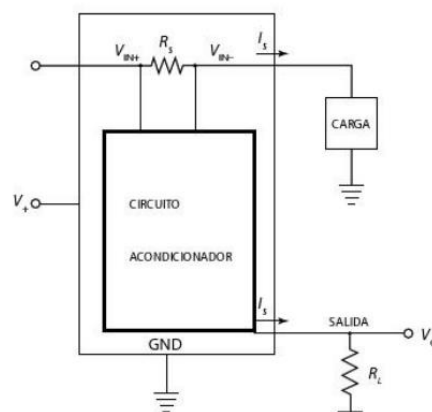


Figura 18. Configuración de foco fijo. [11]

La resistencia R_s genera un voltaje que servirá para la digitalización de la medida de la corriente, este voltaje será proporcionado por una corriente I_s . El voltaje V_{in+} y V_{in-} entra al circuito acoplado y convierte la corriente proporcional a I_s , que es la corriente a medir. Este circuito solo se encarga de medir la corriente deseada, no interactúa con el circuito que proporciona la corriente a medir. Una vez la corriente I_s es transferida al circuito de medida, se transforma en voltaje con una carga resistiva R_i .

3.2.7.3. Basados en transformadores

Este tipo de sensores se usan cuando la corriente a medir es elevada. Aunque tienen la ventaja de no alterar la corriente medida, pueden llegar a desfasar una décima de grado y el núcleo usado en estos transformadores puede llegar a saturarse, este último problema se puede solucionar usando materiales de alta permeabilidad. En este tipo de sensores, se distinguen las bobinas de Rogowski.

Las bobinas de Rogowski utilizan la relación entre el campo magnético generado alrededor de un cable por el que circula una corriente con dicha corriente, como se muestra en la figura 19. La relación que existe entre el campo magnético y la corriente es la fuerza electromotriz que genera la corriente al variar en el tiempo.

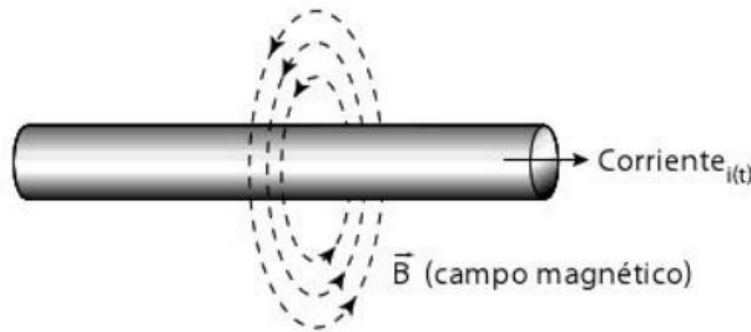


Figura 19. Campo magnético en un conductor. [11]

Ahora que se tiene un esquema de los tipos sensores en función de la magnitud medida, surge la duda de si la interacción entre los sensores y el robot pueden ser problemática. Las variables principales debidas al robot que pueden afectar a la medida de una magnitud por un sensor colocado en este robot son: el material con el que se fabrica el robot, incluyendo el material usado para la fabricación de componentes electrónicos y los motores, el tipo de alimentación del robot y el movimiento del robot. Para poder hacer un buen uso de los sensores en el robot, es necesario conocer estas variables.

El movimiento del robot dependerá de la tarea a realizar por el robot y del tipo de robot. Esta variable requerirá de una simulación de las tareas que realizará el robot y los movimientos que ejecutará para una correcta colocación de los sensores.

El material usado dependerá del fabricante del robot, de los fabricantes de la electrónica y de los fabricantes de motores, aunque generalmente se usa metales para la fabricación de estos tres elementos.

Generalmente, los robots industriales se alimentan con energía eléctrica, esto se debe a que la causa del movimiento de los robots son los motores eléctricos, ya que presentan un rendimiento muy buen en comparación a otro tipo de motores y, puesto que en la mayoría de las tareas industriales el robot estará colocado de forma estática, se puede enchufar un cable que le proporcione la energía eléctrica necesaria.

La energía eléctrica puede tener diferentes formas de ser utilizada en los motores de los robots, dependiendo del tipo de motor que se tiene en el robot. Para entender con claridad el tipo de energía eléctrica usada en los motores de los robots, se hará una clasificación del tipo de corriente eléctrica que se

alimenta al motor de un robot. Se puede calcular la potencia eléctrica con ecuación 1, donde I es la corriente eléctrica y V el voltaje, ambas variables pueden depender o no del tiempo y ambas variables está relacionada entre sí mediante varios modelos matemáticos.

$$P = I * V$$

Ecuación 1

Puesto que ambas variables (I y V) están relacionadas, se puede usar una sola variable para entender la alimentación de los motores usados en los robots, que será la corriente, puesto que ya existen clasificaciones de los motores en función de la corriente eléctrica que se adaptara al propósito mencionado. La clasificación que se mostrará a continuación está en función del tipo de alimentación que le llega al motor, no la que se proporciona a la fuente de alimentación de este.

3.3. Tipos de corrientes usadas en los motores eléctricos de los robots industriales

Para esta clasificación, solo se tendrá en cuenta la forma gráfica corriente en el tiempo con la que se alimenta robot, esto implica que un motor de corriente continua engloba todo motor en el cual la corriente en función del tiempo sea constante. Para esta clasificación tampoco se tendrá en cuenta si la corriente es trifásica o monofásica.

3.3.1. Corriente continua [20]

Los motores de corriente continua son muy usados en la robótica, la forma de la corriente en función del tiempo en este tipo de motores es la mostrada en la figura 20.

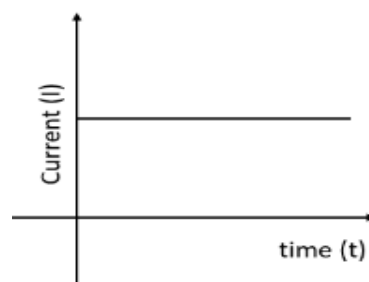


Figura 20. Corriente continua en función del tiempo. [21]

3.3.3. Corriente discontinua

Aunque en los libros, por lo general, en el apartado "motores de corriente continua" se suelen englobar todo motor que se alimenta con corriente continua, en ocasiones la corriente que se alimenta a los motores de corriente

no tiene una forma constante en el tiempo, si no que varía de una manera u otra. Este efecto se logra gracias a convertidores de corriente o tensión y se consigue regular la corriente como se desea para el control de los parámetros de un motor de corriente continua.

En figura 21 se puede ver uno los casos en los que la variación de la corriente y el voltaje en el tiempo no es continua, pero tampoco es senoidal como en el caso de la corriente alterna.

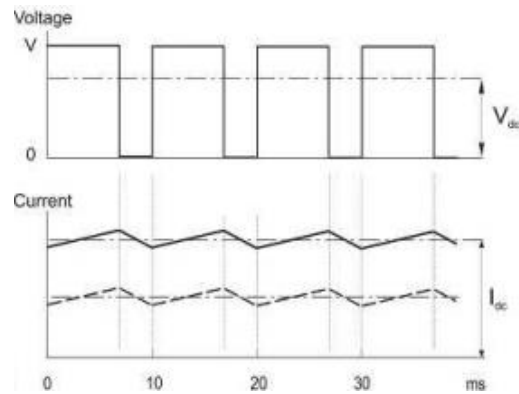


Figura 21. Corriente discontinua en función del tiempo. [20]

3.3.3. Corriente alterna

Este tipo de corriente tiene una forma senoidal en la gráfica tiempo-corriente, como se muestra en la figura 22. Se usa para alimentar motores asíncronos y síncronos.

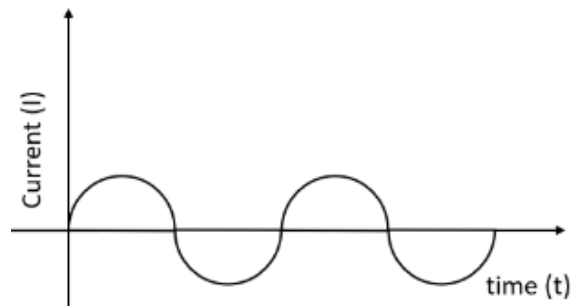


Figura 22. Corriente alterna en función del tiempo. [21]



Universidad de Valladolid





CAPÍTULO 4

ANÁLISIS DEL CONTROL DE UN ROBOT INDUSTRIAL



Universidad de Valladolid



Una vez clasificados en base a los criterios mencionados los robots y sensores, habrá que seleccionar el tipo de sensores que mejor se adapten a la sensorización de un robot industrial genérico y “transformarlo”, en la medida de lo posible, en un robot colaborativo. El robot industrial que mejor se adapta al perfil de “robot industrial genérico” y en el que se basara el análisis es el robot antropomórfico, como el que se muestra en la figura 2, puesto que normalmente tiene bastantes grados de libertad, pudiendo cubrir un amplio rango de espacio en el puesto de trabajo.

Antes de continuar, cabe resaltar que en caso de que un trabajador deba interactuar con un robot industrial, se debe tener en cuenta que el robot es un dispositivo peligroso en el puesto de trabajo y que hay que tener precaución en el funcionamiento normal y estar atento a los posibles fallos de funcionamiento del robot.

Los robots industriales pueden ser peligrosos por varias razones debido a su diseño, capacidades y el entorno en el que operan. Estos robots están diseñados para realizar tareas que requieren alta fuerza y velocidad. Pueden manipular objetos pesados y realizar movimientos rápidos, lo que puede resultar en lesiones graves o fatales si un humano se encuentra en su trayectoria. Sus movimientos pueden generar grandes cantidades de inercia y momento. Incluso si un robot se detiene rápidamente, la fuerza generada por su movimiento puede ser suficiente para causar daños significativos. Los robots industriales realizan movimientos precisos y repetitivos con gran exactitud. Sin embargo, esta rigidez puede ser peligrosa si un operario humano interfiere accidentalmente en la trayectoria del robot, ya que el robot no puede desviar su curso sin intervención programada. En entornos peligrosos, como áreas con altas temperaturas, productos químicos tóxicos, o en zonas de soldadura, el riesgo de accidentes si los operarios humanos no están adecuadamente protegidos o si no se siguen los procedimientos de seguridad.

Si se producen fallas en los componentes del robot, pueden resultar en comportamientos erráticos e impredecibles que pueden ser peligrosos. Por ejemplo, una pérdida súbita de energía puede hacer que el robot se detenga bruscamente, lo que podría ser peligroso si está manipulando objetos pesados o si un humano está próximo.

En este apartado revisaremos qué tipo de sensores implementar en el robot para establecer un primer nivel de seguridad para su integración en un entorno colaborativo.

Para una aplicación colaborativa concreta, es importante establecer qué tipo de robot se usará y el trabajo que este realizará, así como la interpretación de los datos de los sensores y establecer los algoritmos de control en función de la información recibida de los sensores. En este TFG sólo nos centramos en un

primer nivel de sensorización genérico del robot (no se ha considerado una aplicación concreta), pero si es importante resaltarlo. En una aplicación concreta se deben estudiar los movimientos que el robot realizará en el puesto de trabajo, ya que es necesario conocer los parámetros de movimiento del robot por si pudieran interrumpir el funcionamiento de los sensores o fuese peligroso para el operario. También habría que estudiar el tipo de material, fuente de energía, tipo de cadena de seguridad y como manipularla adecuadamente y geometría del robot para conocer cuál de los sensores descritos en este trabajo (u otros que se pudiesen encontrarse en el mercado) se adapta mejor al robot que se quiere integrar en el entorno colaborativo.

El problema que nos planteamos es proporcionar al robot antropomórfico una capacidad de percibir el entorno, “sentir” la presencia del operario humano. Para ello es necesario seleccionar que tipos de sensores son “mejores” para este fin, algunos de los requisitos que se deben cumplir son los siguientes:

- Deben otorgar al robot los sentidos necesarios para percibir/detectar seres vivos (principalmente).
- No interferir con el funcionamiento ni las tareas del robot. Es poco útil y práctico si el robot es capaz de detectar un operario humano en su puesto de trabajo, pero no puede ejecutar las tareas para las que fue elegido.
- En la medida de lo posible, no debe bajar la productividad establecida.

Para este TFG hemos establecidos los siguientes rangos:

- Rango de proximidad: sensores que permiten detectar al operario humano a una distancia próxima al robot no segura, pero en la que el trabajador no corre riesgo, dando una advertencia al robot para preparar su parada o bajar su velocidad.
- Rango de contacto: sensores que, dada la situación de contacto entre un robot y el operario humano, mandan la orden de parada.
- Rango interno: sensores que detectan anomalías en la variación de los parámetros del robot, dando orden de parada si las variaciones de estos parámetros son indicios de riesgo.

A partir de los datos de los sensores en cada rango se deberán establecer estrategias de control (figura 23).

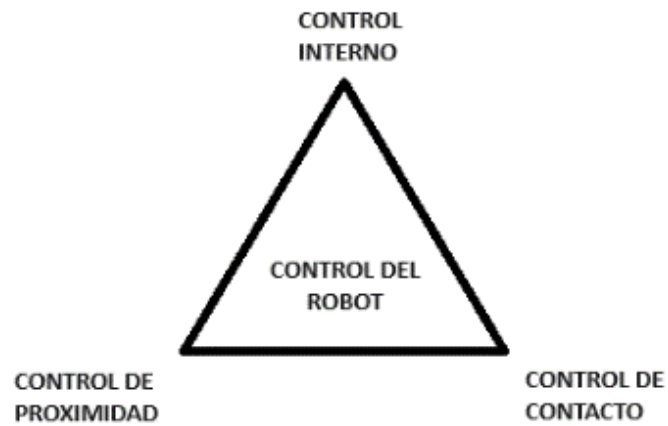


Figura 23. Primera estructura de control para integración del robot en un entorno colaborativo.

En los próximos capítulos revisaremos potenciales sensores que pueden proporcionar datos para esta primera estructura de control.



Universidad de Valladolid





CAPÍTULO 5

CONTROL DE PROXIMIDAD



Universidad de Valladolid



Comenzando por el control de proximidad, es necesario que el robot detecte si el (o los) operario humano que se desea detectar se encuentra en una zona de riesgo. Para conseguir que el robot cumpla con este objetivo, se requiere de la implementación de sensores de proximidad en el robot.

En el mercado, hay muchos sensores de proximidad (tipos, calidades, precios...), cada uno con distintas funcionalidades desarrolladas para satisfacer distintas necesidades industriales. Para encontrar el “sensor más adecuado”, se revisarán algunos sensores de proximidad existentes y se discutirá cuáles son los mejores sensores para colocar en un robot industrial.

5.1 Sensores de ultrasonido

Primero, analizaremos los sensores de ultrasonido, los cuales son bastante usado. Estos sensores, como se explicó en la sección 3.2.2, utilizan un emisor que envía y un receptor que recibe esta señal y sus posibles alteraciones.

Los sensores de ultrasonidos es una tecnología que se ha venido utilizando habitualmente para navegación segura en robótica móvil (AGV...), para crear zonas de seguridad alrededor de los robots, detectando la presencia de humanos y ajustando el comportamiento del robot para evitar colisiones. Estos sensores funcionan emitiendo ondas ultrasónicas y midiendo el tiempo que tarda en regresar el eco después de reflejarse en un objeto, permitiendo así la detección precisa de la distancia y la presencia de objetos o personas en su entorno. Una de las principales ventajas de los sensores de ultrasonidos es su capacidad para operar en una amplia variedad de condiciones ambientales, incluyendo entornos con poca luz o presencia de polvo y humo. Además, los sensores de ultrasonidos pueden detectar objetos de diferentes materiales y tamaños, proporcionando una solución versátil y adaptable para diversas aplicaciones. Además, su capacidad para detectar movimientos rápidos y lentos los hace especialmente útiles para aplicaciones donde se requiere una respuesta rápida ante la presencia humana.

Hay distintos tipos de sensores de ultrasonidos:

- Sensores de Proximidad mediante ultrasonidos, que utilizan ondas ultrasónicas para detectar la presencia y la distancia de objetos y personas. Sensores de rango de ultrasonidos, que miden la distancia exacta hasta un objeto dentro de un rango específico. Son similares a los sensores de proximidad, pero proporcionan información más detallada sobre la distancia.
- Estos sensores vienen siendo útiles para tareas de posicionamiento y navegación de robots.

- Sensores de Matriz de Ultrasonidos (*MIMO* - *Multiple Input Multiple Output*) que utilizan múltiples transductores ultrasónicos para crear una matriz de detección que puede proporcionar información tridimensional sobre el entorno. Se utilizan para aplicaciones avanzadas donde se requiere un mapeo detallado del entorno y detección precisa de objetos y personas. Por ejemplo, los desarrollados por MIT para navegación autónoma y detección de obstáculos. Los sensores de ultrasonido (figura 24) pueden llegar a ser muy complicados de implantar para los objetivos considerados, puesto que un robot industrial está en constante movimiento. Los movimientos generados por los brazos del robot pueden interactuar con el sensor obligando a este a parar por sus propios movimientos, lo cual no tendría sentido.



Figura 24. Sensor de ultrasonido. [22]

El sensor de ultrasonido puede usarse si el robot realiza tareas repetitivas simples. Analizando los movimientos del robot, es posible colocar el sensor de ultrasonido y conseguir que este funcione adecuadamente. Aunque esta forma de colocar el sensor implica que habría zonas que no serían detectadas por el sensor y pondrían en peligro las vidas de los trabajadores, puesto que el robot debe cumplir sus tareas y no interactuar con el sensor al mismo tiempo. Además, los robots industriales suelen ser grandes, por lo que no solo la colocación de los sensores de ultrasonido es complicada, también sería costosa y añadiría restricciones de movimiento al robot por los cables que se deberían usar para recoger la señal de los sensores.

Este sensor es complicado de implantar, por lo que no sería una primera alternativa, pero pueden llegar a ser útil en robots pequeños, colocándolo junto a estos sin tocar al robot y consiguiendo que el operario lo detenga o realice otra operación.

5.2. Sensores ópticos

Los sensores ópticos o sensores fotoeléctricos (figura 25) poseen la misma dinámica que los sensores de ultrasonido, utilizan una señal enviada por un emisor para analizarla en un receptor. Sin embargo, los sensores ópticos son más caros que los sensores de ultrasonido, complicando la implementación de estos.

Los sensores ópticos tienen los mismos problemas que los sensores de ultrasonido: dificultad a la hora de colocarlos, y también sería muy costoso implementar estos sensores.



Figura 25. Sensor óptico. [23]

Estos sensores, aunque sean más caros que los sensores de ultrasonido son más útiles, puesto que permiten analizar una zona mayor, mas no es muy útil en el problema del apartado. Estos sensores no serían una primera alternativa.

5.3. Sensor de movimiento PIR

El sensor de movimiento PIR (figura 26) es un sensor óptico, pero en vez de analizar el movimiento que se encuentra en una recta, analiza el movimiento que se encuentra en una circunferencia, pudiendo ser solo necesario uno para colocarlo en el robot. Este sensor se podría colocar en una parte superior estática del robot, formando un detector en forma cono que rodee al robot y que sea capaz de detectar el movimiento en este cono [24].

Es conveniente comentar que existen muchos sensores que tienen las mismas características que los sensores de movimiento PIR, aunque este sensor es el más indicado para analizar este grupo.



Figura 26. Sensor de movimiento PIR. [25]

Sin embargo, este sensor cuenta con el problema de tener al robot “encerrado”, evitando que un operario pueda interactuar con él. Supóngase el caso en el que el robot coge una pieza y la deja en otro lugar y el operario debe coger esa misma pieza y montarla en un conjunto lo más rápido posible, en esta situación, el operario interactuaría con el sensor.

También está el inconveniente de colocar el sensor: en caso colocarlo en la parte superior del robot industrial y este robot fuera muy alto, detectaría el movimiento proveniente de un trabajador muy alejado del robot. En caso de colocar el sensor en una parte inferior, siempre habría una parte del robot que interactuase con el robot. Recalar también que este tipo de sensores suelen tener un radio de detección muy grande y podría detectar un operario que no estuviese en peligro, obligando a parar al robot en un momento no deseado. Por estos motivos, este tipo de sensores no serían una primera alternativa.

5.4. Sensores inductivos y capacitivos

Otra opción por tantear es el sensor inductivo como el que se muestra en la figura 27. El problema reside en que los sensores inductivos no son muy útiles en la tarea de detectar objetos no metálicos [26] y, por ende, seres vivos.



Figura 27. Sensor inductivo. [27]

Hemos de añadir también que los sensores inductivos generan el mismo problema que los sensores de ultrasonido, se requiere de mucho cableado y muchos sensores de este tipo para cubrir un robot industrial. El problema principal de este sensor es que solo detecta objetos metálicos. Estos sensores no serían una primera alternativa.

Los sensores inductivos no son capaces de detectar seres vivos, sin embargo, los sensores capacitivos (figura 28) si pueden detectar seres vivos y otros muchos materiales [28], dejando la posibilidad de detectar seres vivos. Aunque puedan llegar a ser una solución, los sensores capacitivos tienen los mismos problemas que los sensores de ultrasonido, por lo que estos sensores no serían una primera alternativa para el control de proximidad.



Figura 28. Sensor capacitivo. [29]

5.5. Sensores de temperatura y cámaras térmicas/IR

Una opción interesante que hay que valorar son los sensores de temperatura como el que se muestra en la figura 29. Los sensores de temperatura pueden mostrar la temperatura de un medio. El de sensor de la figura 29 es capaz de

medir la temperatura a una distancia de un metro [30], siendo esta distancia lo suficientemente buena como para mandar una señal de alerta al robot.



Figura 29. Sensor de temperatura [30]

Este sensor se puede usar para detectar seres vivos cercanos al robot, aprovechando la temperatura corporal del ser vivo. No obstante, el sensor detecta la temperatura de cualquier objeto, lo que significa que si el robot, otra máquina, o una pieza está a una temperatura igual a la temperatura corporal de un ser humano, el sensor detectaría por igual a los objetos y a los seres humanos, forzando al robot a detenerse en un tiempo no deseado. Asimismo, no se sabe las condiciones de trabajo de un robot, pudiendo este trabajar en una empresa de fabricación de piezas, donde las temperaturas son bastante elevadas.

Las cámaras térmicas/IR tienen los mismos problemas que los sensores de temperatura, dando indicios de que estos dispositivos no son los más eficaces para ejecutar la tarea propuesta. Igualmente, estos dispositivos (cámaras infrarrojas [31] y sensores de temperatura [30]) son bastante caros, proporcionando otro dilema para su uso.

5.6. Cámaras VIS

Las cámaras, como se explicó en la sección 3.2.6.3, usan sensores para detectar la luz visible y digitalizarla. Se pueden usar cámaras para analizar el entorno de un robot y poder localizar un ser humano en peligro.

Las cámaras pueden proporcionar imágenes de alta resolución que permiten al robot detectar y reconocer objetos con gran precisión. Las cámaras deben utilizarse en combinación con software de visión artificial.

Las cámaras junto con algoritmos permiten vigilar zonas específicas para detectar la presencia de personas y evitar colisiones. También identificar y



clasificar objetos en tiempo real, lo que es crucial para aplicaciones de pick-and-place y clasificación. También pueden llegar a rastrear el movimiento de objetos y personas, lo que ayudaría a los robots a anticipar y responder a cambios en el entorno colaborativo. También las cámaras permiten a los robots interpretar gestos humanos y comandos visuales, facilitando una interacción más intuitiva y natural entre humanos y robots.

Pero las cámaras requieren condiciones de iluminación adecuadas para funcionar correctamente. En entornos con poca luz o con cambios bruscos en la iluminación, la calidad de las imágenes puede verse comprometida, afectando la precisión y la fiabilidad de los sistemas de visión. También, procesar imágenes en tiempo real requiere mucha capacidad de cómputo. Además, el tiempo necesario para capturar, procesar e interpretar las imágenes puede introducir retrasos, lo que puede ser crítico en aplicaciones que requieren respuestas en tiempo real.

En el contexto de este TFG consideramos que las cámaras “son básicas” para la integración de robots industriales en un entorno colaborativo, pero estarían en un segundo nivel de sensorización, dando complementariedad, robustez y fiabilidad a los sensores que estamos buscando. En este sentido, hay que indicar que la integración de múltiples sensores y la fusión de datos permiten compensar las limitaciones individuales de cada sensor, mejorando la precisión y la fiabilidad del sistema de percepción del robot.

5.7. Sensores RADAR

La tecnología RADAR ("*Radio Detection and Ranging*"), emplea ondas de radio para detectar y localizar objetos en su entorno. Funciona emitiendo pulsos de radiofrecuencia que se reflejan en los objetos, y luego analiza el tiempo y la frecuencia de retorno de estos pulsos para determinar la distancia, velocidad y características del objeto. Este principio de detección permite que los radares operen eficientemente en condiciones ambientales adversas como lluvia, niebla, polvo y oscuridad, donde otros sensores ópticos pueden fallar. Además, los radares pueden penetrar ciertos materiales, proporcionando información detallada sobre la estructura y composición de los objetos detectados.

La precisión y fiabilidad del radar lo hacen esencial en una variedad de aplicaciones científicas e industriales, como la navegación aérea y marítima, el control del tráfico, la meteorología, la exploración espacial, y ahora la conducción autónoma y la robótica colaborativa. Las innovaciones recientes han mejorado la resolución y miniaturización de los sensores radar, permitiendo su integración en vehículos autónomos y dispositivos portátiles para aplicaciones avanzadas de monitoreo y seguridad. Los sensores de radar pueden jugar un papel crucial en la creación de entornos colaborativos seguros.

Los sensores de radar convencionales operan en una amplia gama de frecuencias que pueden variar desde los pocos MHz (Megahercios) hasta varios GHz (Gigahercios). Por ejemplo, los radares de banda X y banda S son comunes en aplicaciones como meteorología y control del tráfico aéreo. Se utilizan en aplicaciones como la detección de objetos grandes, el seguimiento de aeronaves, el monitoreo del clima y la detección de velocidad en sistemas de tráfico. Son útiles para detectar objetos a largas distancias, generalmente varios kilómetros. Frente a estos sensores convencionales está los radares mmWave. Los radares convencionales suelen tener una menor resolución espacial y temporal en comparación con los radares de ondas milimétricas (mmWave). Esto significa que no pueden detectar detalles finos o pequeñas variaciones en el entorno con la misma precisión.

Los sensores de radar de ondas milimétricas operan en frecuencias extremadamente altas, típicamente en rangos de 24 GHz, 60 GHz y 77-81 GHz. Se utilizan en aplicaciones que requieren alta precisión y resolución, como en la automoción (detección de peatones, asistencia de estacionamiento, y sistemas avanzados de asistencia al conductor), robótica, monitorización de salud, y seguridad en el hogar. Son ideales para detección de proximidad, contar personas, y monitorización de espacios interiores debido a su alta resolución y capacidad de penetrar ciertos materiales no metálicos. Ofrecen una resolución espacial y temporal muy alta, lo que permite detectar objetos pequeños y realizar mediciones detalladas del entorno. Por ejemplo, pueden distinguir entre diferentes tipos de obstáculos y detectar movimientos muy finos.

Los sensores radar de ondas milimétricas son generalmente pequeños y pueden integrarse fácilmente en dispositivos compactos. Además, suelen tener un consumo de energía optimizado para aplicaciones portátiles y embebidas.

En la figura 30 se puede ver cómo es un sensor de radar, este tipo de sensores son muy caros (alrededor de 700€ [32]).

Los sensores de radar en miniatura varían en precio dependiendo de sus características y aplicaciones específicas. Por ejemplo, los sensores de radar de ondas milimétricas industriales de Texas Instruments, como el IWR6432, pueden costar aproximadamente \$10 a \$15 USD por unidad en cantidades de mil unidades (1ku) (TI). Otro ejemplo es el sensor DesignCore RS-1843AOPU de D3 Engineering, que está diseñado para aplicaciones de automoción y de evaluación en bancos de prueba, y tiene un precio aproximado de \$399 USD por unidad.

Estos sensores de radar en miniatura son utilizados en diversas aplicaciones, incluyendo la detección de presencia y movimientos en entornos industriales y

de automoción, asistencia en el estacionamiento, evitación de colisiones, y sistemas robóticos. La capacidad de estos sensores para operar en condiciones ambientales adversas y su alta precisión los hace ideales para mejorar la seguridad y la eficiencia en entornos colaborativos entre robots y humanos. Estos sensores sí que serían una primera alternativa para el control de proximidad.



Figura 30. (a) Sensor de radar, (b) Sensor de radar de ondas milimétricas para automoción [32]

5.7. Sensores LIDAR

La Tecnología LIDAR (“Light Detection and Ranging”) utiliza pulsos de luz láser para medir distancias. Emplea longitudes de onda en el rango de la luz visible o cercana al infrarrojo, típicamente alrededor de 905 nm o 1550 nm. Mide el tiempo que tarda un pulso láser en viajar hacia un objeto y regresar al sensor. Se vienen usando en aplicaciones de mapeo topográfico, vehículos autónomos, estudios geológicos y arquitectura. Los LIDAR tienen una alta precisión y capacidad para detectar detalles finos porque utilizan una longitud de onda más corta que los RADAR. Tienen una alta resolución espacial, permitiendo la creación de mapas detallados y modelos 3D precisos.

Los LIDAR pueden verse afectados por condiciones ambientales adversas cierta niebla, polvo... lo que puede dispersar los pulsos láser y degradar la calidad de la señal.

Si bien los sensores LIDAR (figura 32) son diferentes de los sensores RADAR, tienen características similares, como que ambos son sensores para “medir” distancias [33]. En los sensores LIDAR, como pasa en los RADAR, es necesario software específico para el tratamiento de los datos. La figura 31 muestra un ejemplo de controlador asociado al sensor donde se procesarían los datos) [33].



Figura 31. Placa base para el control del sensor LIDAR. [34]



Figura 32. Sensor LIDAR. [35]

En este momento, y para aplicaciones similares, un sensor LIDAR es más “barato” [35] que un sensor RADAR.

Consideramos estos sensores una primera alternativa para el control de proximidad [35].

5.7. Sensores de Campos Electromagnéticos Controlados (CEMF)

Los Sensores de Campos Electromagnéticos Controlados (CEMF) son dispositivos avanzados utilizados para detectar y medir campos electromagnéticos con alta precisión y controlabilidad. Estos sensores operan a través de mecanismos que permiten la modulación y ajuste del campo electromagnético, lo que mejora la exactitud y la resolución de las mediciones.

Algunas características destacadas de los CEMF son:

- Alta precisión: Capaces de medir variaciones muy pequeñas en los campos electromagnéticos.
- Controlabilidad: Permiten el ajuste y modulación del campo para obtener datos más detallados.

- Aplicaciones diversas: Utilizados en investigación científica, medicina (como en la detección de tumores), ingeniería (para detectar fallos en materiales), en tecnologías de comunicación...

Los CEMF pueden utilizarse para detectar la presencia de personas cerca de un robot. Por un lado, los seres humanos emiten débiles campos electromagnéticos debido a sus actividades biológicas. Los CEMF pueden detectar estas emisiones para determinar la presencia de una persona. Por otro, la presencia de una persona puede alterar el campo electromagnético preexistente en el entorno del robot, y los CEMF pueden detectar estos cambios (Interferencia con el Campo).

Mediante CEMF se pueden establecer zonas de seguridad alrededor del robot donde cualquier alteración en el campo electromagnético, detectada por los CEMF, active mecanismos de seguridad.

Ventajas del Uso de CEMF en Robótica:

- Alta Sensibilidad, capaces de detectar cambios sutiles en el entorno electromagnético, lo que es crucial para aplicaciones de seguridad.
- No requieren contacto físico directo, permitiendo la detección a distancia.
- Pueden trabajar en conjunto con otros sensores

Por ejemplo, en el artículo "*Controlled Electromagnetic Field Based Safety System for Handheld Circular Saw*" [36] se presenta un sistema de seguridad basado en la tecnología CEMF, con sensores capacitivos especiales, para prevenir accidentes con herramientas eléctricas, especialmente sierras circulares manuales. El sistema crea una burbuja de protección invisible alrededor del borde de corte mediante un campo electromagnético. Puede emitir alertas tempranas o críticas cuando una persona penetra en esta burbuja de seguridad. En el artículo se indica cómo coexiste la tecnología CEMF en un entorno con partes metálicas en movimiento, vibraciones fuertes y diversos materiales procesados. La solución incorpora un circuito de blindaje para proteger la señal CEMF sensible y asegurar que el campo electromagnético se genere de manera efectiva alrededor de la hoja de la sierra.

La empresa Ontech ha desarrollado tecnología basada en CEMF, como la del artículo anterior, destacando su aplicación en sistemas de seguridad perimetral, como el "*Wardiam Perimeter*". Este sistema utiliza la tecnología CEMF para detectar intrusos y activar alarmas solo cuando intentan ingresar al perímetro protegido, eliminando falsas alarmas.



Resumiendo, en el TFG se han revisado sensores de proximidad comerciales de manera genérica, intentado entender cuáles podrían ser útiles para el propósito que buscamos. Algunos tipos analizados se ha considerado que no serían una primera alternativa. Como primera alternativa se han seleccionado RADAR y LIDAR. La tecnología RADAR tiene mejor rendimiento en condiciones ambientales adversas, mayor alcance, robustez, pero tiene menos resolución y precisión espacial, detalles menos finos, que la LIDAR. La tecnología LIDAR tiene más alta precisión y resolución, capacidad para generar modelos 3D detallados, pero tiene un alcance más corto y susceptibilidad a condiciones ambientales adversas. Consideramos la tecnología LIDAR como una primera alternativa para el control de proximidad.



CAPÍTULO 6

CONTROL DE CONTACTO



Universidad de Valladolid



En muchos casos, cuando se llegue al contacto entre el robot y el ser humano, será necesario que el robot se detenga de inmediato.

El objetivo es que el robot se detenga cuando tenga contacto con el operario en cuestión, para lograrlo, se usaran sensores de presiones o de fuerza, se pueden relacionar ambas magnitudes mediante la superficie de contacto donde se aplica la fuerza, aunque generalmente se utilizan los sensores de presión para digitalizar la presión que ejerce un gas en un recipiente, sin embargo, la presión es la fuerza dividida entre la superficie [37] (ecuación 2) donde se aplica dicha fuerza, por lo que no necesariamente tiene que tener relación con la fuerza que ejerce un gas sobre un recipiente. En este capítulo, se usará el término “sensor de presión” a aquellos dispositivos capaces de medir y digitalizar una fuerza por unidad de área, esta fuerza puede ser aplicada por un sólido un líquido o un gas, y se usará el término “sensor de fuerza” para los dispositivos capaces de medir y digitalizar el valor de una fuerza puntual o una presión en un área (superficie del sensor) pequeña.

$$P = F/S$$

Ecuación 2

Existen muchos de sensores de presión y fuerza, sin embargo, colocar un sensor de presión o de fuerza de forma eficaz y económica en un robot antropomórfico no es una tarea fácil.

En los siguientes apartados se analizarán diferentes tipos de sensores comerciales para encontrar un sensor, que se adapte de la mejor manera posible al propósito descrito al inicio de este apartado, y consideraremos aquellos que se puedan considerar como una primera alternativa para el control de contacto.

6.1. Sensores de fuerza puntual

Estos sensores son aquellos que miden la fuerza que se ejerce en un área muy pequeña, la cual se puede llegar a un punto.

El diseño de los sensores de fuerza comerciales depende de la función que debe desempeñar el sensor y dónde ejercerá su función. Descartando a aquellos que no son de interés, se ha seleccionado los sensores de fuerza tradicionales, que son los sensores que se asocian a “sensores de fuerza” y las galgas extensométricas, que son muy usadas y que cumplen con varias funciones.

6.1.1. Sensores de fuerza puntual tradicionales

Supóngase que se desea usar un sensor de fuerza como el que se muestra en la figura 33. Este sensor de fuerza es bastante pequeño en comparación a un robot industrial (el diámetro de sensor tiene 50mm [38]) y es bastante caro (aproximadamente 150€ [38]), en el supuesto de tener que cubrir un brazo robótico con una longitud de un metro y un diámetro de 300mm, se requeriría de aproximadamente uno 200 sensores de este tipo para cubrir todo el brazo.

El uso de este sensor para conseguir el objetivo mencionado requeriría de un gasto económico considerable, ya que es necesario implementar muchos de estos sensores para lograr un buen resultado. Añadiendo también dificultad al robot para su movilidad, puesto que el cable que transmite la información captada por el sensor debe llevarse a un ordenador que será el encargado de mandar la orden de parada y se requeriría un cable por sensor, por lo que se tendrían muchos cables que dejan la posibilidad de enredarse entre sí.

Estos son algunos problemas que implica este tipo de sensores por lo que quedan descartados.



Figura 33. Sensor de fuerza de compresión. [38]

6.1.2. Galgas extensométricas

Las galgas extensométricas (como en la figura 34) son otra opción que considerar para el diseño de un control en caso de contacto. Sin embargo, las galgas extensométricas tienen el mismo problema que los sensores de fuerza, se requieren muchas unidades para cubrir el robot, aunque estas son más baratas (aproximadamente 30€ [39]) y tienen menos grosor.

Las galgas extensométricas al tener un menor espesor, a diferencia de los sensores de fuerza, no dificultarían tanto la movilidad del robot, aunque los cables si afectarían a su movilidad. Las galgas extensométricas también son más baratas que los sensores de fuerza, sin embargo, cuentan con una cola la cual no detecta la fuerza y que supondría un inconveniente a la hora de colocar

muchas de estas galgas en un espacio y querer que analicen todo el espacio donde se encuentran.

Cabe resaltar que las galgas pueden digitalizar fuerzas y deformaciones en todas las direcciones si se colocan de manera adecuada [11] , por lo que usar las galgas extensiométricas para analizar si el robot está tocando un objeto o ser vivo reduce el rendimiento de estas.



Figura 34. Galga extensométrica. [39]

Los sensores de fuerzas puntuales no son una primera alternativa para el control de contacto de un robot industrial, por las dimensiones de estos robots, pero pueden ser utilizados en robots más pequeños y pueden cumplir bastante bien las expectativas en estos robots.

6.2. Sensores de presión

Los sensores de presión son una buena solución al problema de control de contacto, puesto que permiten analizar una fuerza en un área de contacto mayor que los sensores de fuerza.

6.2.1. Sensores de presión absoluta y manométrica

Por lo general, a los sensores de presión manométrica (figura 35) se les asocia con sensores de presión [40] a secas o sensores de presión diferencial. A los sensores de presión absoluta (figura 36) si se les suele agregar el termino de “absoluta” [41].



Figura 35. Sensor de presión manométrico. [40]



Figura 36. Sensor de presión absoluta. [41]

Dejando de lado la distinción de estos dos aparatos, es evidente que los sensores de presión absoluta y manométrica quedan descartados por ser sensores que miden la presión de un fluido, cuando lo que se desea es medir la presión ejercida por un ser vivo u objeto. Hay que añadir que su implementación sería muy compleja, por no decir imposible, por la difícil tarea de encontrar una relación entre un ser vivo y, sobre todo un objeto, con estos sensores.

6.2.2. Sensores de presión en placas

Otro tipo de sensores de presión que puede usarse son placas diseñadas por AIRSKIN [42]. Esta compañía ha diseñado unas placas (figura 37) capaces de detectar cuando un objeto o ser vivo entra en contacto con las mismas, siendo estas placas sensores de presiones.



Figura 37. sensores de presión desarrollados por AIRSKIN. [42]

La compañía AIRSKIN en colaboración con SCARAFLEX [43] ha desarrollado un robot capaz de detectar operarios humanos cuando entran en contacto con el robot. El problema de este proyecto es que las placas diseñadas por AIRSKIN solo se han usado en un robot tipo SCARA, concretamente, en un robot desarrollado por EPSON (figura 38). Estos sensores de presión tienen el inconveniente de que son placas rígidas que no se pueden colocar en cualquier robot, ya que estas placas eliminarían áreas que puede recorrer los brazos del robot, puesto que, al colocarlas en un brazo, las placas podrían chocar con otros brazos del robot, dificultando su movilidad y su trabajo en las tareas. Por esta razón, estos sensores son solo útiles en los robots SCARA, debido a que este tipo de robots tienen un movimiento fijo y sencillo de seguir. En la figura 39 se muestra cómo sería el montaje de estas placas en el robot, desarrollado por SCARAFLEX y AIRSKIN.



Figura 38. Robot EPSON SCARA T602S-1. [44]



Figura 39. Colocación de los sensores. [43]

Este tipo de placas son una solución muy eficaz, que podían solventar el problema de este apartado (CONTROL DE CONTACTO). Sin embargo, como se ha mencionado ante, estas placas son solo útiles en robots que tengas movimientos simples, como es el robot SCARA, mas no son útiles en los robots antropomórficos. Aunque sigue siendo una muy buena solución a este tipo de robots.

6.2.3. Alfombrilla de presión

Una “manta” que cubra los brazos de un robot industrial podría ser la mejor solución al control de contacto, La alfombrilla de presión, mostrada en la figura 40 [24] es el sensor que mejor se adapta a estas características.

Este sensor en forma de rectángulo de 720x390 mm es la mejor forma de cubrir todo un brazo robótico con sensores de presión. En el supuesto caso discutido en la sección 6.1.1. solo se requerirían 2 de estas alfombrillas para conseguir cubrir el brazo robótico de 1m mencionado. Hay de añadir también que, como el número de sensores a utilizar en el robot es muy bajo, los cables no dificultarían la movilidad del robot. Tampoco se tendría el inconveniente de

añadir una superficie con un espesor muy grande, puesto que el espesor de este sensor es de solo 3mm. El coste de este dispositivo no es elevado (aproximadamente 13€), dejando la posibilidad de sensorizar una gran cantidad de robots industriales a un precio no muy elevado. [24]



Figura 40. Alfombrilla de presión. [24]

Las alfombrillas de presión son los mejores sensores que se pueden usar para el control de contacto con un robot, por su economía y su flexibilidad al ser colocados en un robot. Cabe mencionar que el sensor de la figura 40 es solo uno de los muchos desarrollados, todos tienen la misma función, pero pueden tener diferentes dimensiones, dejando la posibilidad de usarlos en cualquier robot con casi cualquier geometría.

6.2.4. Sensor de mapa de presiones

Un caso mejorado de las alfombrillas de presión son los mapas de presiones. Con este objetivo en mente, se ha buscado y encontrado un sensor (figura 41 [45]) que, no solo es capaz de detectar el tacto de un objeto o ser humano con el robot, sino que también es capaz de analizar los puntos de contacto en este. Este sensor permitiría estudiar los puntos de contacto más críticos con un robot industria y podría tomar medidas para evitar accidentes, consiguiendo una mayor seguridad en los trabajadores.



Figura 41. Sensor de mapa de presiones. [45]

Es importante resaltar que este sensor no se usa demasiado y que, por ello, no existen tantas alternativas/modificaciones como las alfombrillas de presión. Además, este sensor es mucho más caro que las alfombrillas de presión, pero proporciona mucha más información [45].

Todos estos inconvenientes no son un problema cuando prima la seguridad de los operarios.

Los sensores de contacto han supuesto menos problemas que los sensores de proximidad, puesto que su implementación es más sencilla que los sensores de proximidad, dejando de lado el “como implementarlos” y centrando el trabajo de este capítulo en el “cuánto cuesta implementarlos”.



CAPÍTULO 7

CONTROL INTERNO



Universidad de Valladolid



A este rango solo se debería llegar si el rango de contacto y de proximidad fallan. En este nivel, se desea ver variación fuera de lo normal en algún parámetro del robot. El parámetro para controlar será la intensidad con la que trabajan los motores del robot. A modo de ejemplo, se puede ver que la intensidad de los motores está relacionada con el par que estos deben ejercer con la ecuación 3 [20] para motores de corriente alterna asíncronos, en esta ecuación se relaciona el par motor M con la intensidad del circuito secundario (rotor) reducido al primario I_s , la velocidad de sincronismo n_1 , el desplazamiento s , la resistencia en el circuito secundario reducida al primario R_s y la relación de transformación del estator m_1 . Gracias a esta ecuación es fácil darse cuenta de que la intensidad está relacionada con el par motor, lo que significa que cualquier variación del par motor implica una variación en el par motor y, a su vez el par motor depende de la fuerza que necesita el robot para ejercer ciertas tareas, en la ecuación 4 [37] se relaciona el par motor M con la fuerza a ejercer F y la distancia d entre la fuerza a ejercer y el motor que proporciona la potencia, esta es una ecuación vectorial, pero cuando la fuerza se aplica de forma perpendicular a la distancia, como es el caso de un impacto de un brazo robótico a un ser vivo, se puede simplificar a una ecuación escalar. Aquí surge un problema, no necesariamente el par motor se modificará con la interacción de un ser vivo con un robot, pero si se da el caso de un cambio contante en la intensidad (que implica un cambio en el par) significará que algo está interactuando con un robot y que este debe detenerse.

$$M = \frac{m_1 * \frac{R'_2}{s} * I'^2_2}{2 * \pi * \frac{n_1}{60}}$$

Ecuación 3

$$M = F * d$$

Ecuación 4

La intensidad que circula por un cable puede tener diferentes formas si se representa con respecto al tiempo, como se explicó en la sección 3.3, por eso, para medir la intensidad del robot, hay que conocer el tipo de intensidad que circula por este. Así como se debe conocer la intensidad de un cable, es necesario conocer el tipo de cable que suministra la alimentación al robot, lo que a veces puede ser una tarea complicada o imposible. Por eso es necesario conocer las características del robot usado, como se especificó en el capítulo 4.

Conocido el robot, se puede pasar al siguiente paso y del cual se encargará este capítulo: la elección del sensor de corriente más adecuado para los motores.

Los sensores de corriente, a diferencia del resto de sensores tratados en los capítulos 5 y 6, son más fáciles de utilizar, ya que solo hay que colocarlos en el cable para que funcionen, pero es necesario conocer el cable que proporciona la corriente al robot y el tipo de corriente que este usa, es muy complicada.

7.1. Sensores de corriente industrial

Un sensor que generalmente se usa en la medición de la corriente en refrigeradores (que usan corriente alterna [46]), servomotores (que usan corriente discontinua [47]), y microcontroladores (que usan corriente continua [48]) es el sensor de corriente industrial, mostrado en la figura 42.



Figura 42. Sensor de corriente industrial. [49]

Este es el sensor más completo y es el sensor que otorga el mejor resultado para la finalidad del capítulo.

7.2. Sensor de corriente RS

Otro sensor que puede ser útil en la tarea del análisis de corriente es el sensor mostrado en la figura 43. Es un sensor más barato que el anterior, y del que solo se recomienda su uso para el análisis de corriente alterna [50]. Si bien es más caro que el anterior, tiene una mayor precisión a la hora de medir la corriente, es por ello por lo que podía ser mejor alternativa que el sensor anterior.



Figura 43. Sensor de corriente de RS. [50]

Si bien no se han tanteado muchos productos de este tipo sensores (sensores de corriente), no es necesario continuar buscando alternativas. Aunque se pueda encontrar alternativas mejores, el uso de estos sensores es el mismo, únicamente consiste en colocarlo en el cable que proporciona la alimentación para conseguir que el sensor otorgue su resultado.



Universidad de Valladolid





CAPÍTULO 8

PROTOTIPO



Universidad de Valladolid



Para una primera valoración de alternativas que se puedan proponer para desarrollar un primer nivel de sensorización para la integración de robots industriales en entornos colaborativo, en este TFG hemos construido una pequeña maqueta-robot (con elementos del ROBOTIS KidsLAB, que es un conjunto de soluciones para desarrollar habilidades y competencias robóticas en el ámbito educativo) y hemos integrado para una primera prueba un sensor de proximidad de infrarrojos (también de ROBOTIS) [51]^[OBJ] para el control de proximidad.

La maqueta es un robot en miniatura. Resulta complicado inicialmente integrar otros sensores. Supóngase, por ejemplo, que se desea colocar una alfombrilla de presiones como las que se vieron en el apartado 6.2.3, el tamaño de este sensor es bastante grande y sería un inconveniente para el robot. Además, en el caso de usar un sensor que no pertenezcan a ROBOTIS, se requeriría del uso de programas especiales y la codificación de los datos del sensor en el mismo lenguaje que los del robot, añadiendo dificultad en el software y, aunque este problema sí que debería de ser resuelto en caso de querer poner la idea en práctica, puesto que esta maqueta es solo una pequeña demostración, con el sensor de infrarrojos se ha considerado que es suficiente.

Comenzando por la morfología del robot, en la figura 44 se muestra la forma de la maqueta quieta, es un robot de tres ejes. También se muestra una enumeración de los motores (1,2 y 3) y del sensor infrarrojos (4) que será útil para identificar a los motores.

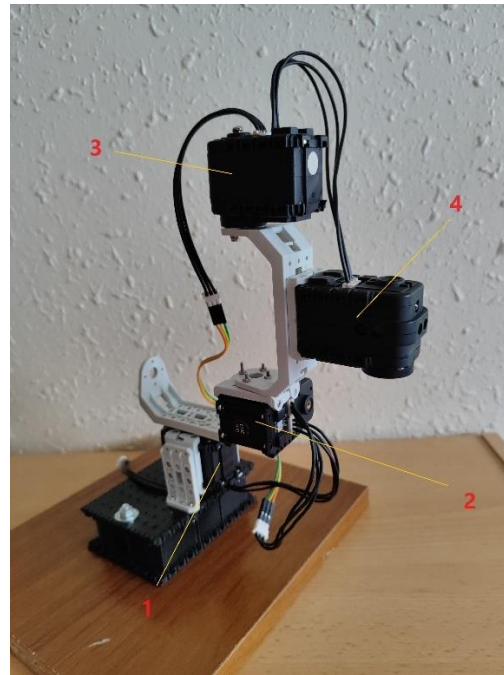


Figura 44. Robot quieto.

El robot se ha programado para que los motores 1 y 2 realicen un giro de unos 90° , mientras que el motor 3 un giro de 150° , todos realizan los giros mencionados a la vez y, al finalizar los motores, el robot vuelve a su posición inicial. El fin de estos movimientos es simular un robot industrial, que suelen realizar un movimiento simple y repetitivo.

El sensor de etiqueta 4 que hemos integrado, se encarga de detectar cualquier objeto que entre en su rango de visión. El sensor 4 tiene 3 sensores de infrarrojos instalados sus lados, a excepción del lateral por donde está unido al robot y los lados superior e inferior desde el punto de vista de un observador del robot. En caso de que algo entre en contacto con la parte trasera del robot, este no se detendrá, pero, como ya se ha mencionado antes, este motor solo es una demostración visual de cómo debería de funcionar un robot industrial.

Se han hecho varias pruebas para comprobar que el robot se detiene cuando algo entra en la zona de contacto del sensor y, cuando un objeto o ser vivo entra en contacto con el sensor 4, el robot se detiene y se queda en la posición de parar. En la figura 45 se muestra un ejemplo de cómo sería la parada del robot.

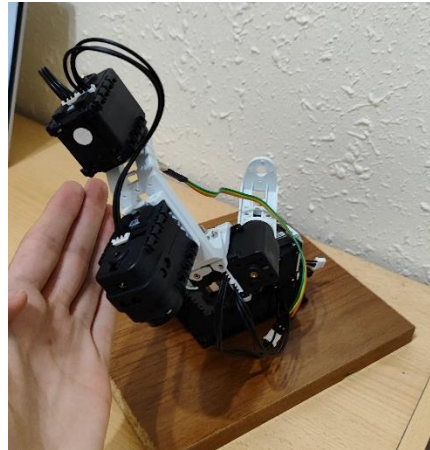


Figura 45. Posición de parada por el sensor.

Para la programación del robot se ha usado MATLAB y drivers adicionales. Se ha comenzado usando un bucle para realizar los movimientos del robot, rescribiendo la posición de los motores y consiguiendo así que se moviesen, sin embargo, cuando se introducía el comando para detener el robot en caso de que el sensor detecte un objeto, el movimiento del robot se volvía menos fluido. Para resolver este problema, se ha desarrollado un comando para que el robot se coloque en una posición (posiciones descritas antes por los motores) a una velocidad determinada, en este caso, al colocar el comando del sensor mencionado, el robot tenía un movimiento fluido, pero cuando se detenía, el robot hacía un “efecto retardo”, volviendo unos pocos grados a la posición anterior. Para corregir este error, se ha aumentado modificado el par de los motores.



Universidad de Valladolid





CAPÍTULO 9

ESTUDIO ECONÓMICO



Universidad de Valladolid



En este capítulo se va a realizar un estudio económico para calcular el coste de realización de este trabajo. Para ellos se dividirá en dos apartados, costes directos y costes indirectos, que se sumaran para obtener el coste total.

9.1. Costes directos

Los costes directos están vinculados con el desarrollo de la idea y estos, en este caso, incluyen los costes personales y costes materiales. La universidad proporcionó el resto de los elementos usados.

9.1.1. Costes personales

La idea ha sido desarrollada por un ingeniero, que se ha encargado del análisis del problema, la búsqueda de información y la puesta a prueba del ejemplo para una comprobación del funcionamiento de la idea en pequeña escala.

Para conocer el coste directo, primero hay que conocer el coste hora de un ingeniero. Se ha supuesto un sueldo de 25000€/año.

Es necesario conocer los días laborales para conocer el coste hora de trabajo de un ingeniero, para ello se elabora la tabla 1.

Los días laborales son los días restantes de los días del año al eliminar los días festivos, las vacaciones y los sábados y domingos.

Tabla 1. Cálculo de días laborales.

CÁLCULO DE LOS DÍAS LABORABLES	
Año (2024)	366
Fines de semana	$52 \times 2 = 104$
Vacaciones	22
Días festivos (Valladolid)	14
Días laborales	$366 - 104 - 22 - 14 = 226$

Para obtener las horas de trabajo, simplemente hay que multiplicar por 8h/día de horas de trabajo por los días laborales, quedando el valor de 1808h/año de trabajo.

Para calcular el coste hora de trabajo de un ingeniero, se divide el sueldo supuesto antes entre las horas anuales de trabajo, quedando un valor de **13,83€/hora**.

Ahora es necesario el cálculo del número de horas dedicadas al trabajo, para ello, se ha preparado la tabla 2.

Tabla 2. Horas dedicadas al trabajo.

HORAS DEDICADAS AL TRABAJO	
Estudio del problema	75 h
Búsqueda de información	75 h
Elaboración del trabajo	150 h
Horas totales	300 h

El coste de trabajo se calcula multiplicando el número de horas dedicadas por el coste hora del trabajador. Al hacer esta multiplicación, se obtiene un coste del trabajador de **4.149€**.

9.1.2. Costes materiales

Para escribir la idea y conseguir una búsqueda de información eficiente y rápida, se ha usado un ordenador con un coste de 400€. Se supone una amortización (a) del producto en 4 años con un interés (i) del 10%.

Ahora se puede recrear la tabla 3 para un mejor entendimiento del coste de materiales.

Tabla 3. Costes materiales.

Horas de funcionamiento(hf)	Coste del producto (C)	Interés de la inversión ($C \cdot i / hf$)	Amortización ($(C/a)/hf$)	Coste de materiales hora
300h	400 €	0,13€/h	0,33€/h	0,46€/h

El interés de inversión es el interés que se hubiera obtenido en caso de usar el capital en otra inversión.

Para conocer el valor del coste material, se multiplica el valor de coste de materiales hora por las horas de funcionamiento del ordenador, obteniendo un valor de **140€**.

Los costes directos finales serán la suma de los costes materiales y los costes personales.

Tabla 4. Costes directos.

Costes personales	Costes materiales	Costes directos
4149€	140€	4289€

9.2. Costes indirectos

Los costes indirectos incluyen los viajes realizados y la energía consumida para realizar la idea.

9.2.1. Costes por viajes

En este caso, se han realizado viajes. Cada viaje tenía un coste de aproximadamente 0,5€/viaje y se recorría 15km. Se han realizado aproximadamente 10 viajes de ida y 10 de vuelta, por lo que el coste de viajes es 0,5€/viaje multiplicado por 20 viajes, dando un resultado de **10€**.

9.2.2. Costes por consumo energético

El consumo energético hace referencia al consumo eléctrico del ordenador. El ordenador empleado requiere una potencia de 85W, que, multiplicado por las horas de funcionamiento (300h), se obtiene el valor de 25,5Kwh. El precio del Kwh actualmente es 0.0606 €/kWh [52]. Al multiplicar los kwh consumidos por el precio del kwh hora (en este momento), se obtiene los costes energéticos, de valor **1,54€**.

Los costes indirectos serán la suma de los costes por viajes y los costes por consumo energético.

Tabla 5. .Costes indirectos.

Costes por viajes	Costes por consumo energético	Costes indirectos
10€	1,54€	11,54€

9.3. Costes totales

Los costes totales son la suma de los costes directos y los costes indirectos, quedando un valor de los valores mencionados en la tabla 6.

Tabla 6. Costes totales.

Costes directos	Costes indirectos	Costes totales
4.289€	11,54€	4.300,54€



Universidad de Valladolid





CAPÍTULO 10

CONCLUSIÓN Y LÍNEAS FUTURAS



Universidad de Valladolid



Como resumen del TFG:

Se han revisado morfologías de diferentes robots industriales tradicionales (cartesianos, articulados...) y se han evaluado brevemente las características morfológicas específicas de estos robots, en alguno de los casos se han identificado limitaciones para la adaptación de estos robots para entornos colaborativos en aspectos con seguridad, flexibilidad e interacción humano-robot (objetivo O1).

Por ejemplo, los robots cartesianos, compuestos por tres ejes lineales perpendiculares entre sí, son valorados por su precisión y facilidad de programación en tareas repetitivas. Sin embargo, su limitación principal radica en su falta de flexibilidad y adaptabilidad a entornos colaborativos dinámicos, debido a su estructura rígida y movimientos limitados.

Por ejemplo, los robots articulados o antropomórficos tienen múltiples grados de libertad gracias a sus articulaciones rotativas, son extremadamente versátiles y pueden realizar movimientos complejos. No obstante, su implementación en entornos colaborativos presenta desafíos en términos de seguridad, dado que sus movimientos rápidos y fuerza considerable pueden representar riesgos para los operarios humanos.

Por ejemplo, los robots SCARA, especialmente diseñados para tareas de ensamblaje y manipulación de materiales, ofrecen alta velocidad y precisión en planos horizontales. Su limitación en entornos colaborativos es su capacidad reducida para interactuar con humanos en planos verticales y su necesidad de zonas de trabajo claramente delimitadas.

Por ejemplo, los robots Delta, utilizados principalmente en aplicaciones de alta velocidad, como el embalaje y la selección de productos, son muy precisos y rápidos. Sin embargo, su estructura compleja y los movimientos a alta velocidad pueden dificultar su integración segura en entornos colaborativos sin la implementación de medidas de seguridad adicionales.

En la revisión de estas morfologías, se han identificado limitaciones significativas en cuanto a la seguridad, flexibilidad e interacción humano-robot, las cuales deben ser abordadas mediante adaptaciones específicas para su uso en entornos colaborativos.

Se ha definido qué es un sensor, tipos de sensores y sus potenciales usos, explicando brevemente los principios fundamentales de su operación. Se han revisado sensores relevantes para la robótica (sensores de corriente, de presión, de proximidad...) indicando posibles aplicaciones y limitaciones para el contexto colaborativo (objetivo O2)

Así, por ejemplo, los sensores de corriente, utilizados para monitorizar el consumo de energía de los actuadores del robot, permiten detectar sobrecargas y ajustar la operación del robot para prevenir daños. Aplicaciones incluyen la protección del motor y la optimización del rendimiento energético.

Por ejemplo, los sensores de presión, empleados para medir la presión ejercida en diferentes puntos del robot, son cruciales para garantizar que las fuerzas aplicadas durante las interacciones no superen los límites seguros establecidos por normas como la ISO/TS 15066.

Por ejemplo, los sensores de proximidad, que utilizan tecnologías como ultrasonido, infrarrojos, RADAR y/o LIDAR para detectar la presencia de objetos o personas cercanas al robot, son fundamentales para la implementación de zonas de seguridad alrededor del robot, deteniendo o ralentizando el movimiento en presencia de humanos.






Se han revisado diferentes tipos de sensores comerciales disponibles con potencialidad para adaptar robots industriales tradicionales a entornos colaborativos (objetivo O3)

Se ha propuesto una primera solución para desarrollar un primer nivel de sensorización que permita la adaptación de robots industriales tradicionales a espacios colaborativos (objetivo O4) considerando rango de proximidad, rango de contacto y rango interno.

Tabla 7. Comparación de algunos sensores comerciales.

Nombre del producto	Utilidad (respecto al TFG, se resalta la ventaja/desventaja más clara)	Imagen
Sensor ultrasónico de distancia HC-SR04 5V versión de Kitronik	No es muy útil por su tamaño.	
Sensor fotoeléctrico - Reflexión directa Datalogic 950811190 - S100-PR-5-C00-PK	Complejidad en la implementación. No es muy práctico.	
Sensor de Movimiento PIR 360° Superficie	Gran rango de detección (interactúa con el robot).	
Sensor inductivo Sick, M18 x 1, alcance 8 mm,	Muy pequeños y complicados de añadir en la sensorización.	

Control de proximidad

<p>salida PNP, 10 → 30 V dc, IP67, 600Hz</p>	
<p>Sensor capacitivo ifm electronic KI5087 - KIA3150NFPKG2T/US</p>	
<p>Sensor de temperatura infrarrojo RS PRO , de 0°C a +1000°C, long. cable 1m, salida Alarm, Analógico, Ø 31 mm (cámaras)</p>	<p>Dependiendo de la fábrica puede ser rentable. En general, es complicado de implementar.</p> 
<p>Banner Engineering T3OR-1515-KDQP</p> <p>Sensor, radar, el 15m, 10-30VDC, 2 NPN/PNP, IO-Acoplamiento, PGTL QD, T3OR</p>	<p>Puede llegar a ser conveniente. En combinación con otros elementos, es una solución práctica (véase el apartado 5.7).</p> 
<p>Sensores de Campos Electromagnéticos Controlados (CEMF)</p>	<p>Buenos si no hay interferencias electromagnéticas en la fábrica.</p>
<p>Sensor de fuerza de compresión WIKA F1821 - 83805438</p>	<p>Difícil de ejecutar, por su tamaño y cableado.</p> 
<p>Galga extensiométrica de perfil bajo I.E.E., >1MΩ</p>	<p>Muy pequeño para la superficie que debería de cubrir.</p> 
<p>Sensor de presión WIKA A-10 - 12797902</p>	<p>No tiene relación con el propósito de este trabajo.</p> 
<p>Sensor de presión absoluta Gefran, Obar → 400bar, G1/4, 15 → 30 Vdc, para Aire, líquido hidráulico, aceite, IP66</p>	
<p>AIRSKIN Pads</p>	<p>Es muy útil en determinados robots.</p> 
<p>Alfombrilla de presión RS PRO, , contacto NA, 25V dc, 250mA</p>	<p>Es el sensor más eficiente en esta sección.</p> 
<p>Foresite SS X4 Pressure Mapping System</p>	<p>Apropiado y con mejor funcionamiento que el anterior si la empresa dispone de presupuesto para implementarlo.</p> 

Control de contacto

80-CT-06-100	Es un sensor muy eficiente.	
Sensor de corriente RS PRO, Núcleo Partido, entrada 50A, Ø int. 10mm	Más caro que el sensor anterior, pero con mayor precisión.	 <div style="text-align: right; vertical-align: middle;"> Control interno </div>

Integrar un robot industrial tradicional en un entorno colaborativo presenta muchos desafíos debido a las diferencias fundamentales en el diseño, la operación y los requisitos de seguridad entre los robots industriales convencionales y los robots colaborativos. Desde el punto de vista de la seguridad, los robots industriales tradicionales están diseñados para operar en áreas aisladas, no suelen tener incorporados sensores avanzados (internos, de contacto y de proximidad), esenciales para detectar operarios humanos y ajustar el comportamiento del robot para evitar colisiones, y sus formas no son las más apropiadas para el contacto. Además, estos robots suelen programarse para realizar tareas específicas y repetitivas con poca flexibilidad para adaptarse a cambios en el entorno o en las tareas asignadas. Esto limita su capacidad para operar en entornos dinámicos y colaborativos donde la adaptabilidad es crucial. Además, habitualmente la falta de capacidad para procesar y reaccionar rápidamente a la información sensorial puede provocar retrasos, lo que es inaceptable en aplicaciones colaborativas donde se requiere una respuesta inmediata para garantizar la seguridad.

A pesar de todos estos inconvenientes, con sensorización y algoritmos de control adecuados se puede lograr el objetivo.

Como trabajos futuros (relacionados con O1) proponer adaptaciones necesarias tanto de hardware como de software para la integración de los sensores seleccionados (u otros), incluyendo mecanismos de seguridad y algoritmos de control, para permitir una colaboración segura y efectiva con los trabajadores humanos. Relacionados con el objetivo O2 establecer directrices sobre la integración y utilización adecuada de los sensores seleccionados para asegurar un rendimiento y seguridad óptimos en entornos colaborativos. Relacionados con el objetivo O3 realizar pruebas experimentales y validación de sensores seleccionados para evaluar su efectividad en aplicaciones robóticas colaborativas “reales”, desarrollando una matriz de decisión para clasificar y seleccionar los sensores más adecuados para las necesidades específicas de la integración de robots tradicionales en entornos colaborativos. Relacionados con el objetivo O4 diseñar e implementar un sistema prototipo



que incorpore los sensores y adaptaciones seleccionados, asegurando el cumplimiento con normas de seguridad como la ISO/TS 15066, realizar un estudio piloto para probar el prototipo en un entorno colaborativo simulado, recopilando datos sobre el rendimiento, la seguridad y la retroalimentación de los usuarios, analizar los resultados del estudio piloto para identificar fortalezas, debilidades y áreas de mejora en la solución propuesta, y proporcionar recomendaciones para futuras investigaciones y desarrollos que mejoren aún más la integración de robots tradicionales en entornos colaborativos.

Además, analizar estudios de caso de robots industriales existentes para resaltar adaptaciones exitosas y desafíos enfrentados; proporcionar un fondo teórico detallado sobre las tecnologías de los sensores, resaltando las mejores prácticas para su mantenimiento y calibración; y establecer una hoja de ruta para escalar el prototipo a aplicaciones industriales a gran escala, incluyendo análisis de costo-beneficio y posible retorno de la inversión (ROI).



Universidad de Valladolid





REFERENCIAS

- [1] «Sick,» [En línea]. Available: <https://www.sick.com/cl/es/sick-sensor-blog/seguridad-en-las-aplicaciones-de-robots-colaborativos/w/blog-safety-collaborative-robot-applications/>. [Último acceso: 6 7 2024].
- [2] «dekalabs,» 2021. [En línea]. Available: <https://dekalabs.com/deka-akademy/evolucion-de-la-industria-tradicional-al-modelo-industria-4>. [Último acceso: 10 Junio 2024].
- [3] «Yaskawa Motoman,» 2024. [En línea]. Available: <https://www.motoman.com/en-us/applications>. [Último acceso: 10 Junio 2024].
- [4] A. Jurkat, R. Klump y F. Schneider, «Tracking the Rise of Robots: The IFR Database,» De Gruyter Oldenbourg, 10/01/2022.
- [5] «korea joongang daily,» 21 Noviembre 2023. [En línea]. Available: <https://koreajoongangdaily.joins.com/news/2023-11-09/national/socialAffairs/Robotic-arm-kills-man-in-industrial-accident-in-South-Gyeongsang/190959>. [Último acceso: 03 Marzo 2024].
- [6] C. S. Puig, «Robótica colaborativa,» Universidad Politécnica de Cataluña, Catalunya.
- [7] «larraioz,» [En línea]. Available: <https://larraioz.com/iai/productos/robots-cartesianos>. [Último acceso: 10 Junio 2024].
- [8] «marine testing solutions,» 2021. [En línea]. Available: <https://marinetestingsolutions.com/product/robot-r19/>. [Último acceso: 10 Junio 2024].
- [9] «Direct Industry,» 2024. [En línea]. Available: <https://www.directindustry.es/fabricante-industrial/robot-delta-145700.html>. [Último acceso: 10 Junio 2024].
- [10] «omron,» [En línea]. Available: <https://industrial.omron.es/es/products/x-series>. [Último acceso: 10 Junio 2024].
- [11] L. G. Corona Ramírez, G. S. Abarca Jiménez y J. Mares Carreño, Sensores y Actuadores, Azcapotzalco: GRUPO EDITORIAL PATRIA, 2014.



- [12] «DigiKey,» [En línea]. Available: <https://www.digikey.es/es/articles/the-fundamentals-of-digital-potentiometers>. [Último acceso: 10 Junio 2024].
- [13] «ANALOG IC TIPS,» [En línea]. Available: <https://www.analogtips.com/rotary-encoders-part-1-optical-encoders/>. [Último acceso: 10 Junio 2024].
- [14] «anaheim automation,» [En línea]. Available: <https://www.anaheimautomation.com/manuals/forms/encoder-guide.php>. [Último acceso: 10 Junio 2024].
- [15] «Wikipedia,» [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Transformador_diferencial_de_variaci%C3%B3n_lineal. [Último acceso: 10 Junio 2024].
- [16] «How To Mechatronics,» [En línea]. Available: https://howtomechatronics.com/tutorials/arduino/ultrasonic-sensor-hc-sr04/?utm_content=cmp-true. [Último acceso: 10 Junio 2024].
- [17] «Smlease Design,» [En línea]. Available: <https://www.smlease.com/entries/automation/hall-effect-sensor/>. [Último acceso: 10 Junio 2024].
- [18] «hyperphysics,» [En línea]. Available: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/magnetic/Hall.html>. [Último acceso: 10 Junio 2024].
- [19] «Sirio red,» 2023. [En línea]. Available: <https://www.sirio red.com/sensor-hall-lazo-abierto-hk-ky01.html>. [Último acceso: 10 Junio 2024].
- [20] B. D. A. Hughes, Electric Motors and Drives Fundamentals, Types and Applications, Joe Hayton, 2019.
- [21] «Vedantu,» [En línea]. Available: <https://www.vedantu.com/question-answer/graph-of-direct-current-and-alternating-current-class-12-physics-cbse-60b05daca2fe95426c8d5033>. [Último acceso: 10 Junio 2024].
- [22] «RS,» [En línea]. Available: <https://es.rs-online.com/web/p/complementos-de-bbc-micro-bit/2153181>. [Último acceso: 10 Junio 2024].
- [23] «Automation24,» [En línea]. Available: https://www.automation24.es/sensor-fotoelectronico-reflexion-directa-datalogic-950811190-s100-pr-5-c00-pk?previewPriceListId=1&gad_source=1&gclid=CjwKCAjwyJqzBhBaEiwAWDRJVGPdb-



- XqB_VuOCdVDFNaDd6BK_ICGQ2YZiFAI7mfEndJpwMbUdkILxoCTGgQAvD_BwE. [Último acceso: 10 Junio 2024].
- [24] «RS,» [En línea]. Available: <https://es.rs-online.com/web/p/detectores-de-apertura-de-puertas-y-ventanas/9184750>. [Último acceso: 10 Junio 2024].
- [25] «EfectoLED,» [En línea]. Available: https://www.automation24.es/sensor-fotoelectronico-reflexion-directa-datalogic-950811190-s100-pr-5-c00-pk?previewPriceListId=1&gad_source=1&gclid=CjwKCAjwyJqzBhBaEiwAWDRJVGPdb-XqB_VuOCdVDFNaDd6BK_ICGQ2YZiFAI7mfEndJpwMbUdkILxoCTGgQAvD_BwE. [Último acceso: 10 Junio 2024].
- [26] S. Fericean, «Inductive sensors for industrial applications,» de *Inductive sensors for industrial applications*, Library of Congress, 2019, pp. 1-3.
- [27] «RS,» [En línea]. Available: https://es.rs-online.com/web/p/sensores-de-proximidad/2669726?cjdata=MXxZfDB8WXww&cm_mmc=ES-CJAFF-_-Kelkoo+Internet+SL-_-RS+Components+ES+Product+Feed&cjevent=8d959cfb283b11ef81d400070a18b8fc. [Último acceso: 10 Junio 2024].
- [28] R. Puers, «Capacitive sensors: when and how to use them».
- [29] «Automation24,» [En línea]. Available: https://www.automation24.es/sensor-capacitivo-ifm-electronic-ki5087-kia3150nfpkg2t-us?previewPriceListId=1&gad_source=1&gclid=CjwKCAjw65-zBhBkEiwAjrRMB0EsByy_3g9VTqdLBbIDpGlltoxrN3Bu2FMNXqDXcPmyhCrcjsUJxoChMOQAvD_BwE. [Último acceso: 10 Junio 2024].
- [30] «RS,» [En línea]. Available: <https://es.rs-online.com/web/p/sensores-de-temperatura-por-infrarrojos/1618103>. [Último acceso: 12 Junio 2024].
- [31] «tiendatec,» [En línea]. Available: https://www.tiendatec.es/raspberry-pi/camaras/1761-camara-termografica-ir-mlx90641-16x12-pixeles-55-fov-8472496021746.html?utm_campaign=gshopping&utm_source=google&utm_medium=gshopping&utm_content=20269549836&gad_source=1&gclid=CjwKCAjw65-zBhBkEiwAjrRMB3. [Último acceso: 12 Junio 2024].

- [32] «RS,» [En línea]. Available: <https://us-es.rs-online.com/product/banner-engineering/t30r-1515-kiq/72237428/>. [Último acceso: 12 Junio 2024].
- [33] C. Stetco, B. Ubezio, S. Muhlbacher-Karrer y H. Zangl, «Radar Sensors in Collaborative Robotics: Fast Simulation and Experimental Validation».
- [34] «RS,» [En línea]. Available: <https://es.rs-online.com/web/p/kits-de-desarrollo-inalambricos-y-de-comunicacion/2326846>. [Último acceso: 10 Junio 2024].
- [35] «RobotShop,» [En línea]. Available: <https://eu.robotshop.com/es/products/telemetro-laser-lidar-lite-3>. [Último acceso: 10 Junio 2024].
- [36] P. Teixidó, J. Antonio Gómez-Galán, F. Muñoz-Chavero, T. Sánchez-Rodríguez y J. Aponte, «Controlled Electromagnetic Field Based Safety System for Handheld Circular Sa,» 2022.
- [37] R. A. Serway y C. Vuille, «College Physics, Ninth Edition, Volume 1,» Cengage Learning Editores, pp. 277-319.
- [38] «Wika,» 2021. [En línea]. Available: <https://shop.wika.com/es-es/f1821.WIKA>. [Último acceso: 10 Junio 2024].
- [39] «RS,» [En línea]. Available: <https://es.rs-online.com/web/p/galgas-extensiométricas/1895562?gb=s>. [Último acceso: 10 Junio 2024].
- [40] «Wika,» 2021. [En línea]. Available: https://www.automation24.es/sensor-de-presion-wika-a-10-12797902?previewPriceListId=1&gad_source=1&gclid=CjwKCAjwyJqzBhBaEiwAWDRJVEZlAdMkI3QZ2iegSehvpCLy3WygG_7vah7hk6VFBXaCEw9BuAMoYhoCZKcQAvD_BwE. [Último acceso: 10 Junio 2024].
- [41] «RS,» [En línea]. Available: https://es.rs-online.com/web/p/sensores-de-presion/0176908?cm_mmc=ES-PLA-DS3A_-google-_-CSS_ES_ES_ePMax_Prio2_-_-176908&matchtype=&&gad_source=1&gclid=CjwKCAjwyJqzBhBaEiAWDRJVPS4FOwLepz7gygRGRD3jNWnknwldhce2hhQi3HOeJgWWNON-FeYlhoCiKcQAvD_BwE&gclid=aw. [Último acceso: 10 Junio 2024].
- [42] «Airskin,» [En línea]. Available: <https://www.airskin.io/product>. [Último acceso: 10 Junio 2024].
- [43] «ScaraFlex,» [En línea]. Available: <https://www.scaraflex.com/?lang=en>. [Último acceso: 10 Junio 2024].



- [44] «Epson,» [En línea]. Available: https://www.epson.es/es_ES/productos/robots/scara-robots/c/scararobots. [Último acceso: 10 Junio 2024].
- [45] «SUMED,» [En línea]. Available: <https://sumedinternational.com/product/foresite-ss-x4-pressure-mapping-system/>. [Último acceso: 10 Julio 2024].
- [46] R. A. O, AbubakarB, M. M. K., L. O. K. y K. S. D, «A Comparative Analysis of a Solar Powered Dc Refrigerator».
- [47] R. Firoozian, Servo Motors and Industrial Control Theory, New York: Springer.
- [48] J. Sanchez y M. P. Canton, Microcontroller Programming, 2007.
- [49] «Mouser Electronics,» [En línea]. Available: https://www.mouser.es/ProductDetail/KEMET/CT-06-100?qs=CXfQ1ZyaeOptqHtRfcjclw%3D%3D&mgh=1&vip=1&utm_id=19098080631&gad_source=1&gclid=CjwKCAjw1K-zBhBIEiwAWeCOF_x-aZGco0wyzi2ngGYpiaVED80Ywurk1lk27bDtfWesm76NvKCO-xoCMScQAvD_BwE. [Último acceso: 14 Junio 2024].
- [50] «RS,» [En línea]. Available: <https://es.rs-online.com/web/p/transformadores-de-corriente/2100640>. [Último acceso: 10 Junio 2024].
- [51] «ROBOTIS,» [En línea]. Available: <https://emmanual.robotis.com/docs/en/edu/bioloid/premium/>. [Último acceso: 25 Junio 2024].
- [52] «Tarifaluzhora,» [En línea]. Available: <https://tarifaluzhora.es/>. [Último acceso: 24 Junio 2024].
- [53] «imanpack,» [En línea]. Available: https://www.imanpack.com/en/machine/palletizer_robot. [Último acceso: 10 Junio 2024].
- [54] «MATLABWorks,» [En línea]. Available: <https://es.mathworks.com/pricing-licensing.html>. [Último acceso: 24 Junio 2024].



Universidad de Valladolid





ANEXOS

Para realizar el prototipo, se han usado varios archivos programados en Matlab.

A continuación, se describe cual es la función de cada uno de estos archivos. Estos archivos se describen en orden de ejecución en Matlab, a excepción del archivo con nombre de "LecturaIR", el cual se trata de una función que se llama en otro ejecutable.

Anexo A. Carga_De_Librerias

Este archivo se encarga de introducir las librerías necesarias para trabajar con el robot en Matlab. Cabe resaltar que la dirección colocada en este archivo es la que corresponde a la dirección donde se encuentran las librerías y no necesariamente debe ser la dirección que hay en el archivo.

Anexo B. Movimiento_Del_Robot

Gracias a este ejecutable es por lo que se consigue el movimiento del robot y donde se aloja la función de parada de este si detecta un objeto en el rango de contacto de los sensores de infrarrojos. Este archivo también llama a la función de "LecturaIR" para obtener información de los sensores y poder trabajar con ellos.

Anexo C. Descarga_De_Librerias

Después de terminar con el uso del robot, es importante (aunque opcional, ya que al cerrar Matlab la librería se descarga sola), descargar las librerías usadas por el programa.

Anexo D. LecturaIR

Esta función se encarga de digitalizar en Matlab los resultados de medida de los sensores infrarrojos y es una función complementaria del código para mover el robot.