

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Máster Universitario en Prevención de Riesgos Laborales

Seguridad en aplicaciones de Robots Colaborativos

Alumno: José Luis Serrano Serrano

Tutor: Martín Perea Álvarez De Eulate

Madrid, 2023

Especialidades Preventivas desarrolladas en el TFM

1. (Seguridad en el trabajo)

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Seguridad en aplicaciones de Robot Colaborativos

Máster Universitario en Prevención de Riesgos Laborales

Alumno: José Luis Serrano Serrano

TUTOR: Martín Perea Álvarez De Eulate

Madrid, 2023

ÍNDICE

| | | |
|------------|--|-----------|
| 1 | DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD Y PERMISO DE DIVULGACIÓN | 9 |
| 2 | RESUMEN / ABSTRACT | 11 |
| 3 | INTRODUCCIÓN..... | 13 |
| 4 | OBJETIVOS | 15 |
| 4.1 | Objetivo general..... | 15 |
| 4.2 | Objetivos específicos..... | 15 |
| 5 | ANTECEDENTES | 17 |
| 5.1 | Robots Colaborativos..... | 17 |
| 5.2 | Modos de trabajo de Colaboratividad | 18 |
| 5.2.1 | Parada supervisada de seguridad | 19 |
| 5.2.2 | Guiado a Mano | 20 |
| 5.2.3 | Velocidad y distancia controlada..... | 21 |
| 5.2.4 | Limitación de fuerza y potencia..... | 22 |
| 5.3 | Aplicaciones típicas en la industria | 23 |
| 5.3.1 | Movimiento de piezas | 24 |
| 5.3.1.1 | Empaquetado | 24 |
| 5.3.1.2 | Paletizado..... | 25 |
| 5.3.1.3 | Recoger y colocar..... | 26 |
| 5.3.1.4 | Carga y descarga en máquinas | 27 |
| 5.3.2 | Operaciones sobre piezas | 28 |
| 5.3.2.1 | Atornillado | 29 |
| 5.3.2.2 | Encolado | 29 |
| 5.3.2.3 | Ensamblado..... | 30 |
| 5.3.2.4 | Acabado | 31 |
| 5.3.3 | Actuaciones de calidad..... | 32 |
| 5.3.3.1 | Test 32 | |
| 5.3.3.2 | Inspección | 33 |
| 5.4 | Ventajas del uso de robots colaborativos | 34 |
| 5.5 | Evolución del mercado de robots colaborativos..... | 35 |
| 5.6 | Marco Legal que deben cumplir las instalaciones robóticas colaborativas | 36 |
| 5.6.1 | Directiva 2006/42/CE..... | 36 |
| 5.6.2 | Directiva 2009/104/CE..... | 37 |
| 5.6.3 | Norma ISO 12100:2010, Seguridad de máquina | 37 |
| 5.6.4 | Norma ISO 13849, Estándares de seguridad para sistemas de control | 38 |

| | | |
|-------------|---|-----------|
| 5.6.4.1 | ISO 13849-1:2015 | 38 |
| 5.6.4.2 | ISO 13849-2:2012 | 39 |
| 5.6.5 | Norma ISO 13855, Posicionamiento de los protectores con respecto a la velocidad de aproximación de partes del cuerpo humano | 39 |
| 5.6.6 | Norma ISO 10218, Requisitos de seguridad para robots industriales | 40 |
| 5.6.6.1 | Norma ISO 10218-1, Robots. | 40 |
| 5.6.6.2 | Norma ISO 10218-2, Sistemas de robot e integración. | 40 |
| 5.6.7 | Especificación técnica ISO/TS 15066, Seguridad de robots colaborativos..... | 41 |
| 5.7 | Evaluación y reducción de riesgos | 45 |
| 5.7.1 | Límites de la máquina..... | 45 |
| 5.7.2 | Identificación de los peligros..... | 46 |
| 5.7.3 | Estimación y valoración de los riesgos | 46 |
| 5.7.4 | Medidas de seguridad para reducción de riesgos..... | 48 |
| 5.8 | Partes de un sistema de mando relativas a la seguridad (SRP/CS)..... | 50 |
| 5.8.1 | Definiciones | 50 |
| 5.8.2 | Proceso de diseño de las partes de un sistema de mando relativas a la seguridad .. | 51 |
| 6 | METODOLOGÍA..... | 55 |
| 6.1 | Fases del trabajo | 55 |
| 7 | DESARROLLO | 57 |
| 7.1 | Documentación..... | 57 |
| 7.2 | Revisión estática | 66 |
| 7.3 | Armario eléctrico y circuito neumático..... | 68 |
| 7.4 | Programa Robot..... | 70 |
| 7.5 | Pruebas en dinámico..... | 71 |
| 7.6 | Explotación y mantenimiento | 72 |
| 8 | RESULTADOS | 74 |
| 8.1 | Guía de comprobación | 74 |
| 9 | CONCLUSIONES..... | 81 |
| 10 | FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN | 83 |
| 11 | BIBLIOGRAFÍA..... | 85 |
| 12 | ANEXOS..... | 91 |
| 12.1 | Lista de peligros | 91 |
| 12.1.1 | Peligros mecánicos (corresponde en la norma ISO 10218-2 al Número 1 de la Tabla A.1)..... | 91 |
| 12.1.2 | Peligros eléctricos (corresponde en la norma ISO 10218-2 al Número 2 de la Tabla A.1)..... | 91 |
| 12.1.3 | Peligros térmicos (corresponde en la norma ISO 10218-2 al Número 3 de la Tabla A.1) | 92 |

| | | |
|-------------|--|-----------|
| 12.1.4 | Peligros provocados por ruido (corresponde en la norma ISO 10218-2 al Número 4 de la Tabla A.1) | 92 |
| 12.1.5 | Peligros por vibraciones (corresponde en la norma ISO 10218-2 al Número 5 de la Tabla A.1)..... | 92 |
| 12.1.6 | Peligros por radiación (corresponde en la norma ISO 10218-2 al Número 6 de la Tabla A.1)..... | 92 |
| 12.1.7 | Peligros debidos a sustancias y materiales (corresponde en la norma ISO 10218-2 al Número 7 de la Tabla A.1)..... | 93 |
| 12.1.8 | Peligros ergonómicos (corresponde en la norma ISO 10218-2 al Número 8 de la Tabla A.1)..... | 93 |
| 12.1.9 | Peligros asociados con el entorno en la cual funciona la máquina (corresponde en la norma ISO 10218-2 al Número 9 de la Tabla A.1) | 93 |
| 12.1.10 | Peligros asociados a combinaciones de peligros (corresponde en la norma ISO 10218-2 al Número 10 de la Tabla A.1) | 93 |
| 12.2 | Lista de peligros mínimos de la ISO/TS 15066 | 94 |
| 12.2.1 | Peligros relacionados con los robots (corresponden a 4.3.2.a en la ISO/TS 15066) . | 94 |
| 12.2.2 | Peligros relacionados con el sistema robótico (corresponden a 4.3.2.b en la ISO/TS 15066)..... | 94 |
| 12.2.3 | Peligros relacionados con la aplicación (corresponden a 4.3.2.c en la ISO/TS 15066) | 94 |
| 12.3 | Medidas preventivas | 95 |

2 RESUMEN / ABSTRACT

Resumen

Este trabajo está relacionado con la seguridad en aplicaciones de robots colaborativos, su objetivo principal es la elaboración de una guía de comprobación de requerimientos de seguridad en sistemas robot tipo colaborativos. Para tal fin, se ha realizado un estudio bibliográfico de los peligros presentes, la metodología utilizada para evaluar los riesgos en aplicaciones colaborativas y las medidas de seguridad preventivas a realizar en instalaciones con robots colaborativos.

Abstract

This work is related to safety in collaborative robot applications, its main objective is the development of a guide for checking safety requirements in collaborative robot systems. To this end, a bibliographic study of the present hazards, the methodology used to evaluate the risks in collaborative applications and the preventive safety measures to be carried out in facilities with collaborative robots has been carried out.

3 INTRODUCCIÓN

El presente trabajo está enfocado en la seguridad de las instalaciones con robots colaborativos (Cobots), las cuales están presentes cada vez más en la industria en general. Los robots colaborativos igualmente que los robots industriales clásicos están sujetos a leyes y normativas de seguridad que deben cumplir los fabricantes, integradores y usuarios finales. En el caso particular de los robots colaborativos, al ser una tecnología más reciente y en desarrollo, las normas no están del todo definidas lo que conlleva al uso de especificaciones técnicas, las cuales son objeto de interpretaciones que puede dificultar su aplicación.

En este trabajo de Fin de Máster se pretende realizar una guía de comprobación que permita tanto a las empresas integradoras como a los técnicos en PRL que trabajan evaluando la seguridad de máquinas en general, determinar cuáles son los requerimientos de seguridad que debe tener una instalación de robots colaborativos.

El uso de robots colaborativos como solución para la automatización y optimización de los procesos productivos está en crecimiento dado que su integración es más económica comparándola con un robot industrial convencional, esto hace que las empresas principalmente los utilicen para ahorrar espacio y no tener que utilizar vallado. La mayor parte de las personas piensan que una instalación robótica es colaborativa tan solo porque el robot que se va a emplear es colaborativo, esto es un error porque como se verá a lo largo de este trabajo deben cumplirse una serie de requerimientos de seguridad para que el sistema robot sea colaborativo.

4 OBJETIVOS

Este trabajo de fin de Máster persigue unos objetivos relacionados con la seguridad de máquina en las aplicaciones con robot colaborativos, los cuales son:

4.1 Objetivo general

Elaborar una guía de comprobación para determinar los requerimientos en seguridad que debe tener una instalación colaborativa en la industria.

4.2 Objetivos específicos

Averiguar las leyes y normativas técnicas que debe cumplir una instalación de robot colaborativos.

Identificar los peligros presentes en los sistemas de robots colaborativos.

Conocer la metodología utilizada para la evaluación de riesgos de seguridad en aplicaciones de robot colaborativos.

Determinar las medidas preventivas de seguridad en aplicaciones con robots colaborativos.

5 ANTECEDENTES

En este apartado se tratará la situación de partida, pero no sin antes conocer algunos fundamentos relacionados con el tema en cuestión como son la definición de robot colaborativo, los modos de colaboratividad, las aplicaciones típicas en la industria, las ventajas de su utilización y la evolución del mercado.

Después se tratarán los temas relacionados con los objetivos de este trabajo como son el marco normativo, la identificación de los peligros presentes, la metodología de evaluación de riesgos y las medidas preventivas utilizadas en este tipo de máquinas.

5.1 Robots Colaborativos

Los robots colaborativos según la definición de la Norma ISO 10218-2, en su artículo 3.2 (ISO, 2011, p. 2), son robots industriales diseñados para interactuar directamente con las personas dentro de un espacio de trabajo colaborativo, sin necesidad de un cerramiento o vallado perimetral, como es el caso de los robots industriales convencionales, tal como se observa en la figura 1.



Figura 1. Robots Colaborativos. Fuente: Universal Robots (Universal Robots, 2020b).

Los cobots se pueden utilizar en una gran variedad de aplicaciones como la carga y descarga de máquinas, control de calidad, encolado, manipulación de cargas, ensamblado y soldadura.

En las páginas web de fabricantes de cobots como Universal Robot (UR), Yaskawa y FANUC, se muestran ejemplos de dichas aplicaciones con sus robots. Además de la industria, el uso de los cobots se extiende a otras áreas como la investigación (Pavón, 2020).

Una de las ventajas de trabajar con cobots es que los operarios no requieren ser especialistas en robótica, pero si formarse en aspectos básicos de la explotación y conducción del robot tanto para los modos de funcionamiento normal como para los fallos que pudieran surgir durante el desarrollo de las tareas.

Otras características de los cobots es que son robots pequeños y ligeros, trabajan a velocidades muy bajas sobre todo en modo colaborativo. También aportan a las empresas ventajas ergonómicas como la reducir las tareas penosas que realizan los operarios como, por ejemplo, la carga y descarga de piezas. En general, los cobots pueden emplearse para reemplazar al humano en tareas pesadas para las cuales estos pueden ser más eficaces y precisos, permitiendo así que cada vez más las personas se dediquen a realizar actividades más ligeras o que requieran creatividad.

Un aspecto fundamental que si debe ser tomado en cuenta y que es lo que aborda este trabajo es que los cobots deben estar diseñados específicamente para trabajar con las personas sin causarle ningún daño dado que comparten un espacio de trabajo colaborativo donde el operario está expuesto a contactos con el robot. Por lo tanto, en las aplicaciones con robots colaborativos, como lo indica la especificación técnica ISO/TS 15066 (ISO, 2016a, p. v), deben ser seguros el robot y todos los elementos que conforman la instalación como el elemento final de trabajo, equipos y medios necesarios en dicha instalación. Otro aspecto a destacar es que el entorno donde se sitúa la instalación colaborativa también debe cumplir con todos los requerimientos de seguridad para trabajar con la aplicación colaborativa ya que este forma parte de este sistema.

5.2 Modos de trabajo de Colaboratividad

Según la ISO/TS 15066, en su artículo 5.5.1, (ISO, 2016a, p. 7), se definen cuatro modos de trabajo o funcionamiento de colaboratividad, es decir, cuatro formas en las que los cobots y los operarios pueden interrelacionarse compartiendo de forma segura el espacio de trabajo. Dichos modos son:

- Parada supervisada de seguridad.
- Guiado a mano.
- Velocidad y distancia controlada.
- Limitación de fuerza y potencia.

5.2.1 Parada supervisada de seguridad

En este modo de funcionamiento el sistema robot trabaja con normalidad siempre y cuando no haya presencia de personas en el espacio de trabajo colaborativo (ISO, 2016a, p. 8). El sistema robot está dotado de escáneres, barreras inmateriales o cámaras que permiten detectar la presencia de personas próximas al espacio de trabajo colaborativo lo cual permite que el robot se detenga antes de que la persona acceda a dicho espacio, en la figura 2 la zona en suelo coloreada de amarillo representa la zona donde el robot detecta la aproximación al espacio de trabajo colaborativo y la roja donde el robot está parado y no se mueve hasta que la persona sale de este espacio. Cabe destacar que el robot no se apaga, sino que se mantiene encendido con los frenos activados. Cuando el operario sale del espacio de trabajo colaborativo el robot reanuda su acción sin intervención externa, es decir reanuda su marcha automáticamente.

Esta forma de trabajo se utiliza normalmente cuando un cobot es autónomo, y ocasionalmente requiere que una persona deba entrar al espacio de trabajo colaborativo para realizar tareas o acciones poco frecuentes como por ejemplo solucionar problemas puntuales relacionados con la pinza o elemento final de trabajo durante la carga o descarga de piezas. Si el proceso requiere que las paradas sean frecuentes, el cobot se detendría continuamente, por lo que se perdería mucho tiempo y este modo no sería el más apropiado a utilizar.

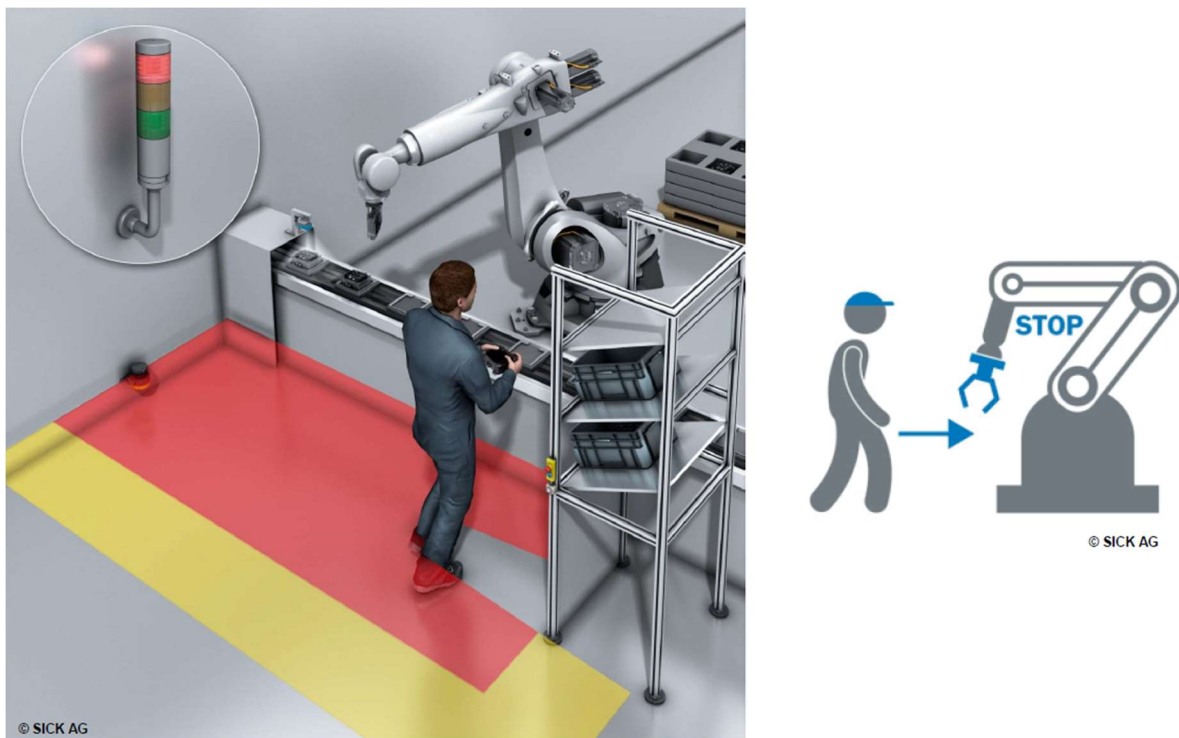


Figura 2. Parada supervisada de seguridad. Fuente: Sick (Görnemann, 2020, p. 21).

5.2.2 Guiado a Mano

En este modo operativo el robot se detiene mediante una parada controlada de seguridad, a continuación, el operario puede fácilmente guiar a mano los movimientos del robot en la trayectoria deseada y dejarlo en una zona para que retome su tarea no colaborativa (ISO, 2016a, p. 9), un ejemplo es el mostrado en la figura 3, en el cual un operario guía a mano un robot que lleva un asiento para que lo deje dentro de la carrocería de un coche.

El operador controla los movimientos del robot mediante un equipo de guiado manual situado cerca del robot o en el elemento final del robot, esto le permite moverlo con facilidad y como su nombre lo indica guiarlo para realizar las tareas necesarias (ISO, 2016a, p. 9). Este equipo de guiado manual debe disponer de una parada de emergencia y un dispositivo de validación (ISO, 2016a, p. 10).

Este modo permite combinar trabajo colaborativo y no colaborativo, la secuencia de un guiado manual según la ISO/TS 15066 (ISO, 2016a, p. 9) sería la siguiente:

1. Cuando el robot está en el espacio de trabajo colaborativo y se genera la parada de seguridad, el robot está preparado para el guiado manual y por lo tanto el operario puede acceder a dicho espacio.
2. El operario coge el equipo de guiado manual y presiona el dispositivo de validación por lo tanto la parada de seguridad se anula, rearmando el sistema robot y permitiendo al operario realizar las tareas de guiado manual en el robot.
3. Una vez el operario termina dichas tareas de guiado y deja de presionar la validación del equipo de guiado manual, nuevamente se genera una parada de seguridad en el robot y lo cual permite al operario salir del espacio de trabajo colaborativo de forma segura.
4. Al salir el operario del espacio de trabajo colaborativo y rearmar la instalación, permite al robot reanudar su funcionamiento automático (no colaborativo) nuevamente.

El no respeto del paso 1 de la secuencia anterior genera una parada de protección, como es el acceso del operario al espacio colaborativo antes que el robot este preparado para su guiado manual.

Las aplicaciones más comunes de guiado manual son las tareas que impliquen la asistencia a la manipulación de cargas y la fabricación de pequeños lotes (Federación Empresarial Metalúrgica Valenciana [FEMEVAL] et al., 2019, p. 37).

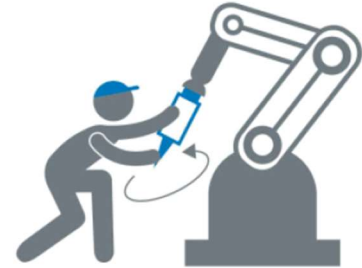
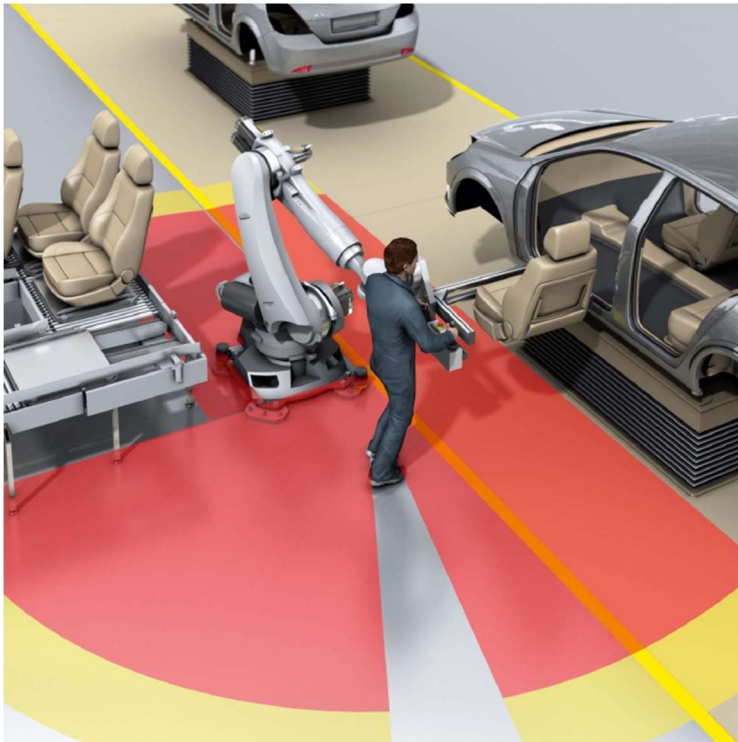


Figura 3. Guiado a Mano. Fuente: Sick (Görnemann, 2020, p. 25).

5.2.3 Velocidad y distancia controlada

Este modo es similar al de parada supervisada de seguridad, pero algo más complejo, ya que el cobot reduce su velocidad en función de la proximidad de la persona (Soler Puig, 2018, p. 21).

Esto implica el uso de sensores con tecnología capaz de detectar distancias o configurables por zonas, ya que es necesario definir zonas de reducción de velocidad en torno al robot, como se puede ver en la figura 4 donde las zonas están coloreadas en tonalidades de rojo. Cuando el operario entra en la zona más alejada de la distancia mínima de seguridad, tonalidad de rojo claro, el robot comenzará a reducir su velocidad, en la siguiente zona más próxima al robot se irá reduciendo más y así sucesivamente hasta que el operario se acerca a la distancia mínima de seguridad (zona de tonalidad más oscura) donde se producirá una parada controlada de seguridad y el robot detiene todos sus movimientos.

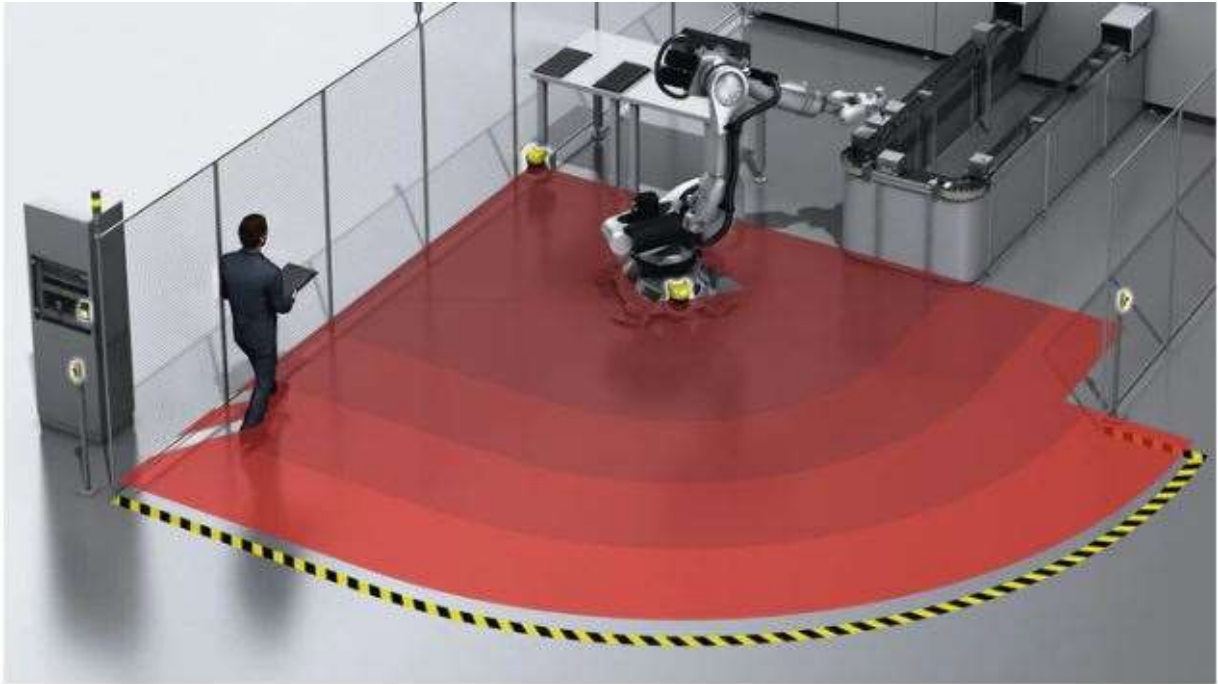


Figura 4. Velocidad y distancia controlada. Fuente: Sick (SICK, 2022).

Este tipo de colaboratividad puede utilizarse para operaciones que necesiten una presencia frecuente de trabajadores en las proximidades del sistema robot (Soler Puig, 2018, p. 22).

El robot puede reiniciar la tarea de forma automática si el operario se aleja más de la distancia mínima de seguridad (ISO, 2016a, p. 11).

5.2.4 Limitación de fuerza y potencia

Este método es adecuado para aquellas tareas donde el operario necesite trabajar frecuentemente al lado o próximo al robot y debe asegurarse que tanto el elemento final de trabajo del sistema robot como el entorno de la aplicación no le pueda producir ningún daño al trabajador, como se observa en la figura 5 donde la pinza atrapa la mano de la persona pero sin aplicar una presión que le pueda hacer daño, luego se retrae para liberar la mano y la persona puede sacarla de la zona de atrapamiento. Este modo requiere que el sistema robot este diseñado específicamente para trabajar con personas junto a estos sin causarles ningún daño por contactos previstos e imprevistos (ISO, 2016a, p. 15).

Para tal fin, según el artículo 5.5.5.4 de la ISO/TS 15066, el robot requiere la implementación de medidas de seguridad pasivas y activas. Entre las medidas de seguridad pasiva se encuentran la utilización de piezas y elementos cuyo diseño no tenga filos cortantes, ni cantos, ni puntos de atrapamiento, en cambio se debe proteger las piezas con cubiertas blandas,

fabricar con materiales ligeros, elementos deformables y limitar las masas en movimiento (ISO, 2016a, p. 17). En cuanto a las medidas de seguridad activas, se integran sensores de fuerza o detectores de colisión en el sistema robot para parar el movimiento del robot inmediatamente ante una colisión con una persona o elemento, por software están la limitación de pares, potencia, velocidades, limitación de movimiento de ejes y espacios de seguridad por software (ISO, 2016a, p. 17).



Figura 5. Limitación de fuerza y potencia. Fuente: Yaskawa (YASKAWA, 2023) y Sick (SICK, 2022).

5.3 Aplicaciones típicas en la industria

Actualmente existen muchas aplicaciones donde los robots colaborativos trabajan con las personas. Las tareas que realiza un robot colaborativo se extienden a diversos campos como la investigación, la medicina y por supuesto la industria. En este último es donde se puede encontrar la mayor cantidad de aplicaciones con cobots.

No está definida una clasificación para las aplicaciones robóticas colaborativas para el sector industrial, pero según algunos expertos en Robótica como Carlos Soler (Soler Puig, 2018. p. 50) se podrían agrupar de la siguiente manera:

- Movimiento de piezas
- Operaciones sobre piezas
- Actuaciones de calidad

5.3.1 Movimiento de piezas

Este tipo de aplicaciones están relacionadas con la manipulación de piezas que se realiza a diario en la industria, ya que las piezas, cajas o palés tienen que ser movidos de un sitio a otro. Estas tareas pueden ser llevadas a cabo perfectamente por los cobots, puesto que son máquinas que son muy flexibles y precisas, lo cual le permite adaptarse a múltiples entornos y procesos. Es importante que el cobot cuente con una herramienta final o pinza que le permita trabajar en seguridad tanto con las cargas a manipular como en la interacción con los humanos.

El experto Carlos Soler (Soler Puig, 2018, p. 50) clasifica las aplicaciones de movimientos de piezas en:

- Empaquetado
- Paletizado
- Recoger y colocar
- Carga y descarga en máquinas

5.3.1.1 Empaquetado

Son tareas de preparación de productos para ser transportado, básicamente se trata de guardar los productos dentro de una caja o de recubrirlos mediante un plástico que los una y proteja. Existen diversidad de embalajes para los cuales el cobot se diseñan y programan para situar las piezas dentro de la caja o embalaje con una orientación determinada, siguiendo una matriz para el posicionamiento de dichas piezas y finalmente dejar todo listo para su transporte.

En la foto 6 se observa un ejemplo de empaquetado de huevos del fabricante UR (Pelegri, 2019a) donde el cobot se encarga de cogerlos por docenas mediante una pinza diseñada específicamente para esta tarea, luego los deja dentro de la caja en una posición determinada. Una de las limitaciones de los cobots es que las piezas a manipular son de inferior peso comparando con las que pueden trabajar los robots clásicos esto se debe a que están diseñados para trabajar con humanos y sin necesidad de vallados en la mayor parte de los casos. La mayoría de las fabricantes de cobots tienen un catálogo de modelos que varía según las especificaciones y peso que estos pueden manipular, por ejemplo, el cobot con mayor capacidad del fabricante UR puede con una carga hasta de 20 kilogramos eso si incluyendo la herramienta y tomando en cuenta la geometría de la misma.

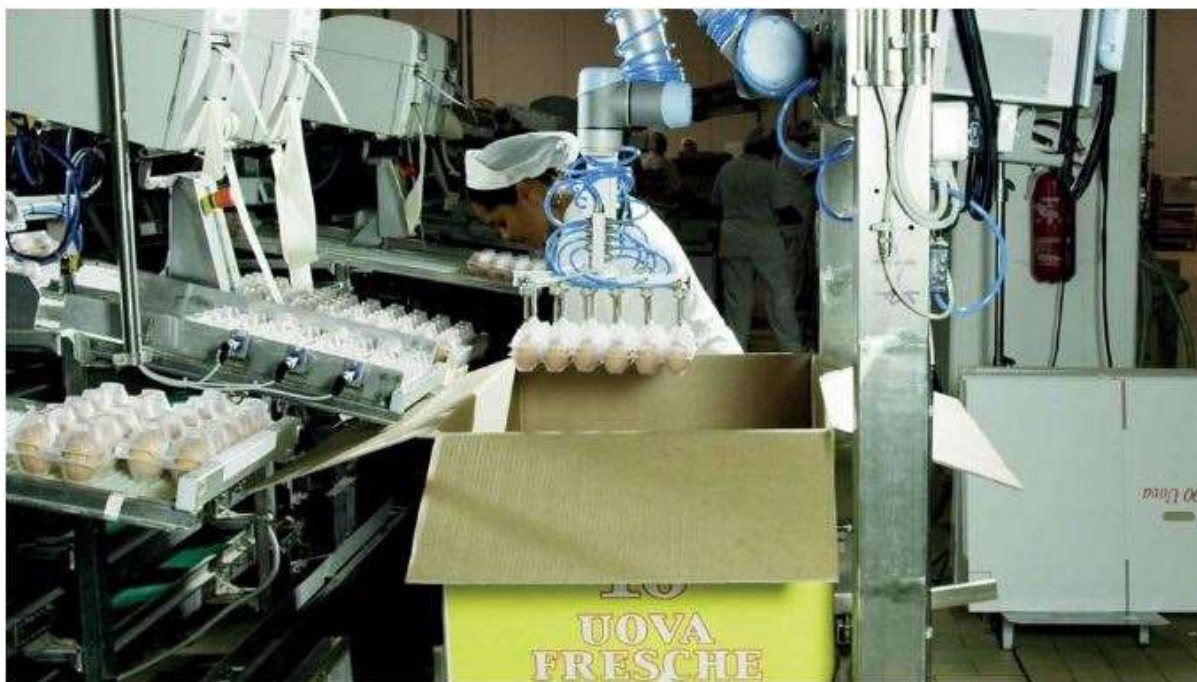


Figura 6. Empaquetado. Fuente: Universal Robots (Pelegrí, 2019a).

5.3.1.2 Paletizado

Las tareas de paletizado consisten en situar cajas de productos o piezas sobre un palé y algunas veces recubrirlo con plástico para que estos no se muevan con el transporte por carretillas u otros medios. Es una forma de embalar productos muy utilizada en la industria dada su simplicidad y versatilidad, sin olvidar las ventajas a la hora del almacenamiento.

Es una aplicación similar al empaquetado con la diferencia que se trata de posicionamiento de cajas o embalaje de productos sobre palés, la disposición es matricial en función del tamaño del palé, el peso que puedan soportar las cajas que están en la fila más baja, las dimensiones que sean requeridas para su almacenamiento y transporte.

En la figura 7 se observa un ejemplo en la industria alimentaria de un cobot modelo UR10, el cual tiene una capacidad máxima de manipulación de peso de 10 kilogramos, cogiendo cajas de la salida de una máquina y colocándolas sobre un palé, uno de los objetivos en esta aplicación era buscar una solución para ahorrar espacio se consiguió utilizando un cobot (Pelegrí, 2019a). En esta foto se puede observar que el robot está completamente libre, sin cerramiento perimetrales o vallados, lo cual le permite al operario trabajar de forma colaborativa con este, y como se trata de un UR10, se deduce que las cajas no deben pesar más de 10 Kilogramos cada una.



Figura 7. Paletizado. Fuente: Universal Robots (Pelegrí, 2019a)

5.3.1.3 Recoger y colocar

En la industria una de las tareas más común es el cambio de un lugar a otro de una pieza en un proceso productivo, son tareas pesadas y repetitivas (Neobotik, 2021). En las líneas de producción las piezas van sufriendo transformaciones o se realizan operaciones sobre estas, esto requiere la necesidad de recogerlas y situarlas en lugar determinado, dejarlas sobre cintas transportadoras, cambiar de orientación la pieza, etc. El robot colaborativo es una máquina adecuada para este tipo de tareas, dada su flexibilidad y precisión como se ha mencionado anteriormente.

Utilizando robots para estas tareas se reducen en gran medida las enfermedades profesionales y accidentes de trabajo causado por los trastornos musculoesqueléticos, ya que como bien se sabe las operaciones de manipulación de carga suelen ser repetitivas y poco ergonómicas. En cambio, se aumenta la productividad al disminuir la tasa de errores y en la mayoría de los casos se aumenta la velocidad en el proceso al quitar los cuellos de botellas causados por dichas tareas cuando se realizan por humanos.

En la figura 8, se observa un cobot recogiendo una bandeja plástica de un alimentador y luego colocándola en la cinta transportadora y a continuación el operario pueda dejar los cortes de carne sobre la bandeja, el objetivo que se perseguía con esta aplicación era la mejora de tiempo de ciclo de producción (Pelegrí, 2019b). Este es un ejemplo de cómo la sinergia hombre robot facilitan las tareas de manipulación, se deja al robot la tarea más simple y el humano realiza la más compleja, así mejorando la productividad de las empresas.



Figura 8. Recoger y colocar. Fuente: Universal Robots (Pelegrí, 2019b).

5.3.1.4 Carga y descarga en máquinas

Las tareas de carga y descarga en máquinas es muy común en los procesos de mecanizado de piezas, ya que las máquinas como centro de mecanizado (CNC), las fresadoras o tornos, requieren que las piezas a mecanizar se introduzcan en su interior y al finalizar su trabajo se saquen, esto se realiza muchas veces durante la jornada de trabajo (Cade Cobots, 2022). Este proceso de carga y descarga de piezas en máquina de mecanizado es una tarea que actualmente la realizan los robots colaborativos en el sector de la industria metalmeccánica. Como se puede observar en la foto de la figura 9, el cobot está cargando y descargando piezas en un centro de mecanizado, se observa como las puertas de la máquina están abiertas mientras el robot carga y descarga, posteriormente se cerrarán y comenzará el ciclo de mecanizado de la pieza, luego se abrirán las puertas y otra vez el robot descargará y cargará otra pieza. Las pinzas utilizadas para estas operaciones son dobles, una para retirar la pieza y la otra tiene la pieza nueva a mecanizar.

Estas tareas además de ser pesadas también son peligrosas, por lo que el uso de robots para dichas tareas evita este riesgo a las personas que se dedicaban a la carga y descarga de máquinas. En su lugar, el operador se dedicará a tareas de conducción del centro de mecanizado y resolver los disfuncionamientos que puedan ocurrir (Soler Puig, 2018, p. 52).

Estas operaciones se realizan también con robots clásicos sobre todo si son piezas de gran tamaño y peso, las cuales los cobots no están capacitados para manipularlas, pero la ventaja de uso de cobots frente a los robots convencionales radica en la facilidad para integrarlos en la máquina a menor coste y la explotación por parte del operario del conjunto máquina de mecanizado y robot suele ser menos compleja y más rápida.



Figura 9. Carga y descarga. Fuente: Cade Cobots (Cade Cobots, 2022).

5.3.2 Operaciones sobre piezas

Según el experto en Robótica Carlos Soler Puig (Soler Puig, 2018, p. 54), son todas aquellas tareas en las que el robot realiza una operación de transformación en la pieza que está siendo fabricada y el mismo experto (Soler Puig, 2018, p. 50) las clasifica en:

- Atornillado
- Encolado
- Ensamblado
- Acabado

5.3.2.1 Atornillado

Las tareas de atornillado son realizadas tanto por atornilladores manuales como automáticos, este tipo de operación también las realizan los cobots, su elemento final es un atornillador en lugar de una pinza como en las aplicaciones anteriores. También se puede utilizar un alimentador automático de tornillos el cual está integrado en el atornillador lo cual facilita y agiliza estas operaciones. Los atornilladores utilizados por los robots colaborativos son retractiles para que en el caso de atrapamiento de la mano de un operario no le cause ningún daño. Esto hace que todas las tareas de atornillado no sean posibles, sobre todo si se trata de tornillos grandes que requieran un alto par de apriete. En la foto de la figura 10 el cobot realiza la operación de atornillado mientras los operarios están realizando otras operaciones de ensamblado sobre la piezas (Universal Robots, 2020b).



Figura 10. Atornillado. Fuente: Universal Robots (Universal Robots, 2020b)

5.3.2.2 Encolado

El encolado se realiza mediante una pistola que dosifica la cola y se aplica en la superficie mediante un movimiento que debe ser a velocidad constante, lo cual lo hace una tarea ideal para realizar por un cobot (Soler Puig, 2018, p. 55). El elemento final del cobot es una pistola automática, la cual se encarga de la dosificación y en algunos casos de la recarga de cola, el cobot realiza la trayectoria de encolado a una velocidad constante prefijada. Con este tipo de automatizaciones se logra un nivel de calidad excelente y como consecuencia el ahorro de

material ya que se reduce el desperdicio de cola. En la figura 11 el cobot aplica cola en una de las piezas que conforma los pomos de las puertas que fabrica esta empresa (Bruch, 2022).



Figura 11. Encolado. Fuente: Robotics-Insider.com (Bruch, 2022).

5.3.2.3 Ensamblado

Ensamblado es una tarea que habitualmente es realizada por humanos dada la complejidad que es requerida para unir las piezas que conformaran el producto final. Con el desarrollo actual de la robótica colaborativa se ha conseguido que sean máquinas más parecidas a los humanos tanto en sensibilidad como en disponer de dos brazos que facilita la realización de dichos trabajos (Soler Puig, 2018, p. 55). En la foto de la figura 12 se puede ver un robot de última generación del fabricante ABB con dos brazos robóticos que recuerda a los brazos de un humano, este realiza una tarea de alta precisión como es el ensamblado de tarjetas electrónicas (ABB, 2021).

También se integran control de visión en los puestos de ensamblado de los cobots para que estos puedan realizar dichas tareas dada su complejidad en la identificación de componentes y posiciones, esto le permite hacer tareas que anteriormente solo podían ser realizadas por humanos.

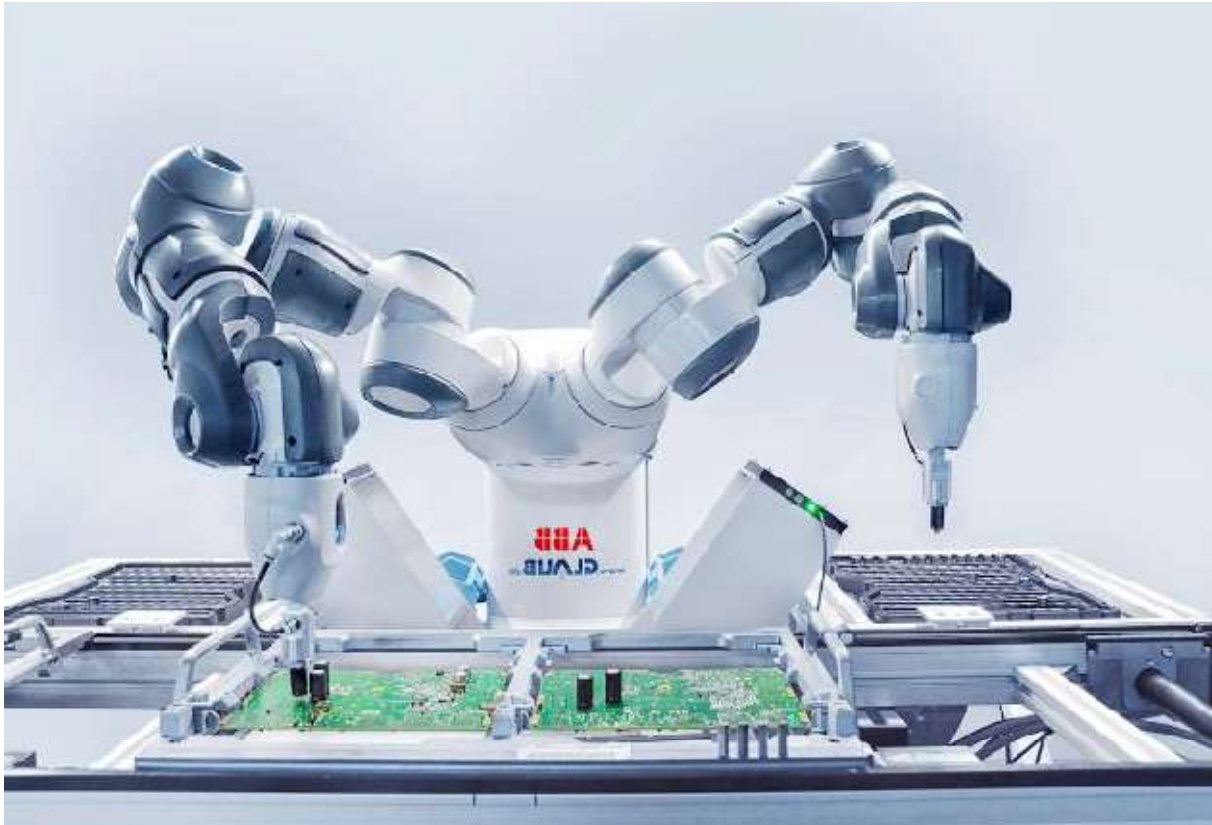


Figura 12. Ensamblado. Fuente: ABB (ABB, 2021).

5.3.2.4 Acabado

Las operaciones de acabado están relacionadas con el aspecto de las piezas sobre todo en la terminación, pueden ser tareas de pulido, desbarbado, cepillado o lijado, sobre la superficie de la pieza. Estas tareas son poco higiénicas para las personas, dado el polvo y ruido que generan, lo cual una vez más a ser realizadas por robots se evitan estos riesgos (Soler Puig, 2018, p. 56). Además, el robot es más preciso en la realización de las mismas y mejorando la calidad en los acabados de las piezas.

En la foto de la figura 13 un cobot y una operaria están realizando tareas de pulido en piezas (Baños, 2019), en este caso se deduce que al robot se le deja la tarea más simple y pesada como es pulir toda la pieza en cambio a la persona la más compleja y ligera como es el repaso de algunas zonas que no han sido suficientemente pulidas por el cobot.



Figura 13. Acabado. Fuente: Universal Robots (Baños, 2019).

5.3.3 Actuaciones de calidad

En la industria existen operaciones de verificación en las piezas o productos que se están fabricando para determinar si cumplen con los requerimientos de calidad establecidos. Estas operaciones según Soler (Soler Puig, 2018, p. 50) las agrupas en dos tipos:

- Test
- Inspección

5.3.3.1 Test

Este tipo de operación consiste en constatar que la pieza o producto cumplen con las especificaciones o características de calidad determinadas por el proceso, para ello se realizan mediciones o ensayos sobre las piezas. El cobot en estas operaciones se encarga de la manipulación de las piezas para realizar dichas mediciones o ensayos, tal como se observa en las fotos de las figuras 14 y 15, donde el cobot coloca una pieza cilíndrica la cual se mide a través de unos palpadores en una cabina de medición automática (YASKAWA, 2021).

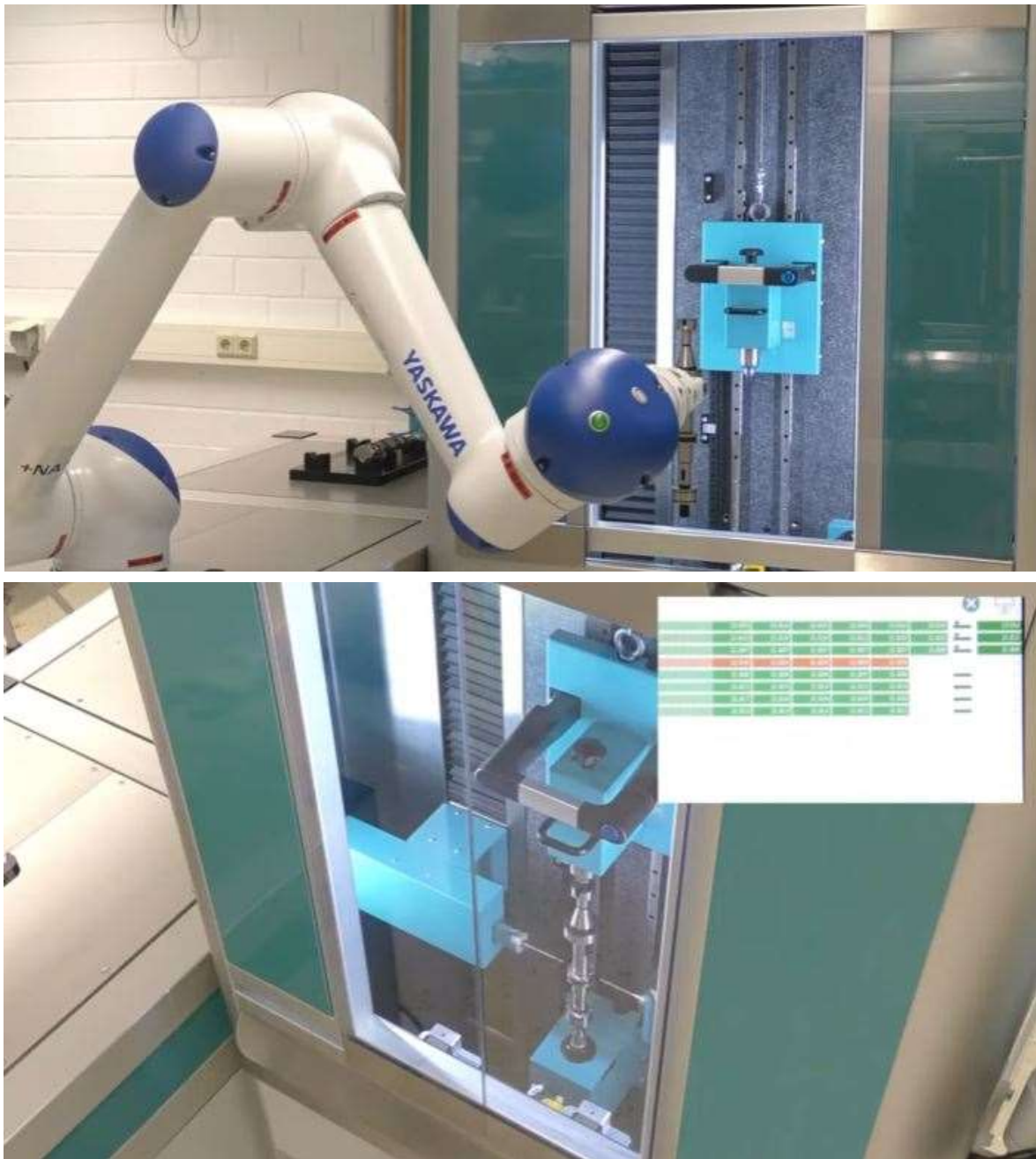


Figura 14 y 15. Test. Fuente: Yaskawa (YASKAWA, 2021).

5.3.3.2 Inspección

La operación de inspección es realizada mediante cámaras que toman imágenes en zona específicas de las piezas o producto, para posteriormente ser comparadas con patrones y controles en una aplicación cuyo resultado es conforme o no conforme. Este tipo de operaciones se pueden hacer con los cobots de dos maneras, una es que el elemento final del cobot es una cámara asociada al control de visión y el cobot mueve y orienta la cámara para tomar las imágenes que serán tratadas por la aplicación del control visión y la otra forma de

realizar estas tareas es mediante cámaras fijas en posiciones determinadas y el cobot es quien se encarga de coger la pieza mediante una pinza y este la mueve y orienta en las posiciones necesarias para que las cámaras tomen las imágenes en las zonas requeridas de la pieza (Soler Puig, 2018, p. 57). En la figura 16, se muestra una aplicación de inspección donde el robot coge la pieza y las cámaras son fijas (Universal Robots, 2019).

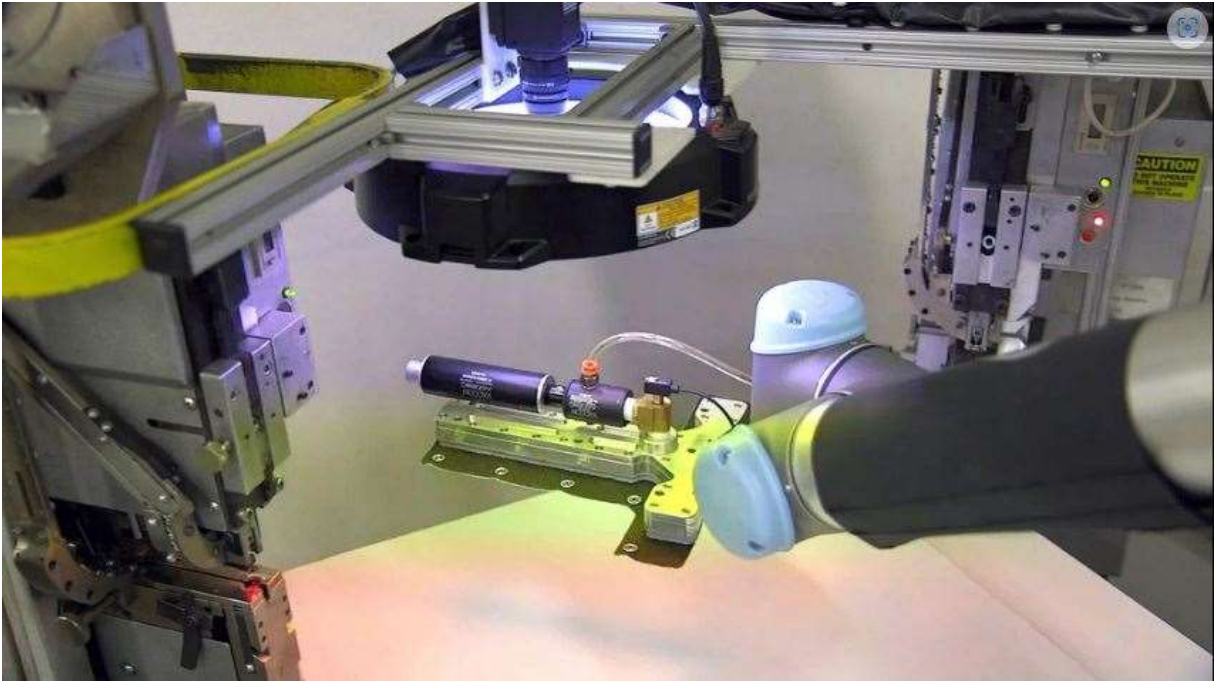


Figura 16. Inspección. Fuente: Universal Robots (Universal Robots, 2019).

5.4 Ventajas del uso de robots colaborativos

La automatización de los procesos industriales requiere de grandes inversiones, ya que la maquinaria a utilizar suele ser específica para las diferentes tareas y operaciones que se realizan. Una excepción son los robots ya que a diferencia de las máquinas especiales suelen ser flexibles y relativamente fáciles de integrar en los procesos. Dentro de la gama de la robótica industrial, los robots colaborativos se han convertido en una de las alternativas de automatización de tareas más rentables ya que tienen un precio similar a los robots clásicos, pero son más fáciles y económicos de integrar, ya que no requieren en la mayoría de los casos de vallado o cierre perimetrales, su programación y explotación es mucho más amigable, es decir, requiere de menos conocimientos de programación y robótica (Soler Puig, 2018, p. 29).

En cuanto a la seguridad y salud en el trabajo, la robótica colaborativa mejora las condiciones de trabajo ya que reemplazan a las personas en las tareas inseguras, repetitivas, penosas, pesada, de esta forma se logran reducir los riesgos físicos, ergonómicos y psicosociales (FEMEVAL et al., 2019, p. 15).

Otra oportunidad que ofrecen los robots colaborativos y quizás la más importante es la posibilidad de interactuar con los seres humanos en un mismo espacio de trabajo al que se denomina colaborativo, para poder hacer esto realidad los cobots deben ser diseñados y fabricados para no causar ningún daño a las personas que estén trabajando próximas a estos. Esto permite aprovechar la sinergia operario-robot para la realización de diversas tareas donde la parte pesada y simple la realiza el robot y la parte ligera y compleja o requiera creatividad la realice el operario (FEMEVAL et al., 2019, p. 16).

5.5 Evolución del mercado de robots colaborativos

Según la consultora Strategic Market Research (Strategic Market Research, 2022), el mercado de robots colaborativos en 2021 fue de 701,56 millones de dólares. Igualmente pronostican un crecimiento de 2.506,90 millones de dólares para el año 2030, ver la figura 17.

Otros datos del estudio realizado por esta consultora indican que la tendencia del mercado de los robots colaborativos es:

Por carga útil de 5 a 10 Kg.

Por aplicación, carga y descarga de máquinas.

Por usuario final la empresa de la automoción y

Por región es Norte América.

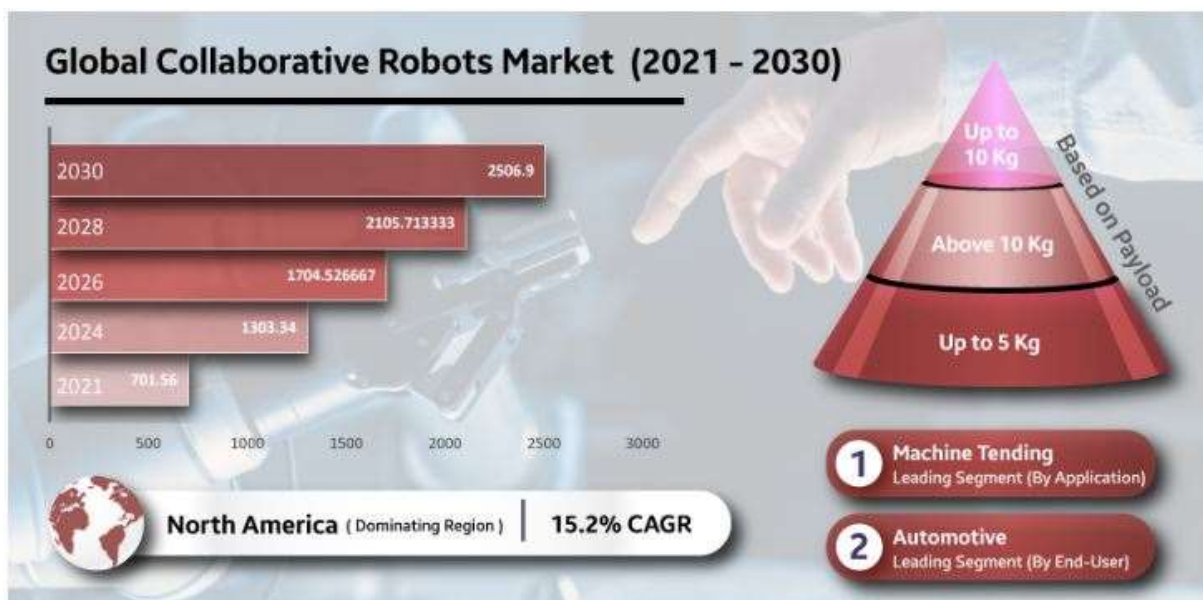


Figura 17. Evolución del mercado. Fuente: Strategic Market Research (Strategic Market Research, 2022)

5.6 Marco Legal que deben cumplir las instalaciones robóticas colaborativas

En la legislación aplicable a la robótica colaborativa, existen leyes europeas y españolas, las cuales regulan todo lo relacionado con fabricación, comercialización y utilización de máquinas. También existen las normas técnicas relacionadas con la seguridad de máquinas que no tienen carácter de ley, pero son recomendaciones que deben seguir los fabricantes, integradores y usuarios de las mismas. Dentro de las normas técnicas están los estándares desarrollados por la organización ISO (Organización Internacional de Normalización), los cuales son los más utilizados en el área de la robótica industrial. La necesidad de utilizar normas técnicas se debe a que los aspectos técnicos avanzan con mayor velocidad que las leyes, esto hace que las normas técnicas sean utilizadas por los legisladores, puesto que estas presumen de conformidad por lo que el cumplimiento de estas normas implica que estas cumpliendo con la ley (Soler Puig, 2018, p. 40).

Según varios expertos como es el caso de Soler (Soler Puig, 2018, p. 41), en la Unión Europea, principalmente hay dos directivas a considerar para las instalaciones robóticas colaborativas, la directiva de máquinas 2006/42/CE y la directiva 2009/104/CE.

En cuanto a la normativa técnica aplicable a las instalaciones robóticas se encuentran las normas ISO 10218-1 y la ISO 10218-2 que proporcionan las recomendaciones de seguridad para las aplicaciones robóticas convencionales y además se encuentra la especificación técnica ISO/TS 15066 de Robots y dispositivos robóticos – Robots Colaborativos, la cual no es una norma armonizada, pero se creó para dar especificaciones de seguridad a las instalaciones con robots colaborativos (ISO, 2016a, p. 1).

Otras normas técnicas relacionadas con la seguridad en máquinas que serán necesarias para las aplicaciones colaborativas son la ISO 12100 para la evaluación de riesgo, la ISO 13855 para el posicionamiento de las protecciones, la ISO 13849-1 y la ISO 13849-2 para la evaluación del nivel de prestaciones de las protecciones de seguridad.

Existen más normas técnicas de seguridad que se pueden utilizar para las aplicaciones de robótica colaborativa, pero estas son suficientes para los objetivos de este TFM.

5.6.1 Directiva 2006/42/CE

Las aplicaciones de robots colaborativos como el resto de máquinas que se comercializan en la Unión Europea se encuentran reguladas por la Directiva 2006/42/CE, la cual se conoce como Directiva de máquinas, en esta se establecen los requerimientos de seguridad que deben cumplir las máquinas dentro del mercado común europeo, esto persigue como objetivo que las máquinas utilizadas en Europa tenga un nivel de seguridad común en todos sus estados miembros (Directiva 2006/42/CE, 2006, p. 26). En el artículo 1 del Anexo I de dicha Directiva se dispone que los fabricantes de máquinas deberán garantizar la realización de una evaluación de riesgos con la finalidad de establecer todos los requerimientos de seguridad y salud que

deben aplicarse a las máquinas, y los resultados de dicha evaluación deben ser tomados en cuenta en las fases de diseño y construcción de las máquinas (Directiva 2006/42/CE, 2006, p. 35). En España la transposición de esta Directiva es el Real Decreto 1644/2008 (Real Decreto 1644/2008, 2008, p. 2).

Esta Directiva afectará a los fabricantes de Robots y a las empresas integradoras de estos en la industria (Soler Puig, 2018, p. 41).

5.6.2 Directiva 2009/104/CE

La finalidad de la Directiva 2009/104/CE es establecer las disposiciones mínimas de seguridad y salud para la utilización de los equipos de trabajo por los trabajadores, en el artículo 3 de dicho Real Decreto se dispone que:

El empresario adoptará las medidas necesarias con el fin de que los equipos de trabajo puestos a disposición de los trabajadores en la empresa o el establecimiento sean adecuados para el trabajo que deba realizarse y convenientemente adaptados a tal efecto, de forma que garanticen la seguridad y la salud de los trabajadores al utilizar dichos equipos de trabajo (Directiva 2009/104/CE, 2009, p. 6).

En España la transposición de esta Directiva es el Real Decreto 1215/1997 y por tanto ambas leyes afectan a los usuarios (Soler Puig, 2018, p. 41).

5.6.3 Norma ISO 12100:2010, Seguridad de máquina

El alcance de la norma se define en su artículo 1 como:

Esta norma internacional especifica la terminología básica, los principios y una metodología para lograr la seguridad en el diseño de las máquinas. Especifica los principios de evaluación del riesgo y reducción del riesgo para ayudar a los diseñadores a alcanzar este objetivo. Estos principios están basados en el conocimiento y la experiencia en el diseño, utilización, incidentes, accidentes y riesgos asociados con las máquinas. Se describen los procedimientos para la identificación de peligros y la estimación y valoración de los riesgos durante las fases relevantes del ciclo de vida de

las máquinas, y para la eliminación de los peligros o la provisión de la reducción del riesgo adecuada. Se proporcionan directrices sobre la documentación y la verificación de la evaluación del riesgo y el proceso de reducción del riesgo (ISO, 2010, p. 1).

Las instalaciones con robots colaborativos deben tener una evaluación riesgo que cumpla con las especificaciones dadas en esta norma, el objetivo de esta evaluación es asegurar que los riesgos presentes en la instalación estén identificados por parte del integrador o fabricante, se evalúen y se apliquen las medidas de reducción de riesgos para conseguir que dichas instalaciones sean lo más segura posible para el usuario final.

5.6.4 Norma ISO 13849, Estándares de seguridad para sistemas de control

Esta norma es de seguridad de máquinas y se refiere a las partes de los sistemas de mando relativas a la seguridad. Tiene dos partes:

- ISO 13849-1:2015, Parte 1: Principios generales para el diseño
- ISO 13849-2:2012, Parte 2: Validación

5.6.4.1 ISO 13849-1:2015

En su artículo 1 se define el objeto y campo de aplicación de la misma como:

Esta parte de la Norma ISO 13849 proporciona requisitos de seguridad y orientaciones sobre los principios para el diseño e integración de las partes de los sistemas de mando relativas a la seguridad (SRP/CS), incluyendo el diseño del soporte lógico (software). Para estas partes especifica las características, incluyendo el nivel de prestaciones requerido, para desempeñar las funciones de seguridad. Se aplica a las SRP/CS para modo de alta sollicitación y modo continuo, independientemente de la tecnología y del tipo de energía utilizadas (eléctrica, hidráulica, neumática, mecánica, etc.) (ISO, 2016b, p. 1).

Esta norma se utiliza para el diseño e integración de las funciones de seguridad que se deben implementar en el sistema robot.

5.6.4.2 ISO 13849-2:2012

En el artículo 1 de la norma se define su alcance como:

Esta parte de la Norma ISO 13849 especifica los procedimientos y condiciones a seguir para la validación por análisis y ensayo de:

- las funciones de seguridad especificadas,
- las categorías obtenidas, y
- el nivel de prestaciones obtenido

por las partes de los sistemas de mando relativas a la seguridad (SRP/CS) diseñadas conforme con la Norma ISO 13849-1 (Asociación Española de Normalización y Certificación, 2013, p. 7).

Los fabricantes de los robots colaborativos deberán indicar las funciones de seguridad con que estos cuentan y su nivel de prestaciones alcanzado. Por su parte los integradores deberán verificar que las funciones de seguridad implementadas en la instalación tienen el nivel de prestaciones alcanzado igual o por encima del requerido.

5.6.5 Norma ISO 13855, Posicionamiento de los protectores con respecto a la velocidad de aproximación de partes del cuerpo humano

En el artículo 1 de la norma se define su objeto y campo de aplicación como:

Esta norma internacional trata el posicionamiento de los protectores con respecto a la velocidad de aproximación del cuerpo humano.

Se especifican parámetros basados en los valores de aproximación del cuerpo humano y proporciona una metodología para determinar las distancias mínimas entre la zona de detección o los órganos de accionamiento de los protectores y la zona peligrosa (Asociación Española de Normalización y Certificación, 2011, p. 9).

En esta norma se contempla como protectores los equipos de protección electrosensibles, es decir las barreras inmateriales, escáneres láser y sistemas de visión de dos dimensiones (2D). Aunque no son los únicos protectores a los que se refiere esta norma, estos son los más

utilizados en la robotica colaborativa, en los modos de parada supervisada de seguridad y en velocidad y distancia controlada.

5.6.6 Norma ISO 10218, Requisitos de seguridad para robots industriales

La norma ISO 10218 consta de dos partes:

- Parte1: Robots.
- Parte 2: Sistemas de robot e integración.

5.6.6.1 Norma ISO 10218-1, Robots.

En el articulo 1 de la norma se define su objeto y campo de aplicación como:

Esta parte de la norma ISO 10218 especifica los requisitos y directrices para un diseño inherentemente seguro, las medidas de protección y la información para el usos de robots industriales. La norma describe los riesgos básicos asociados con los robots y proporciona los requisitos para eliminar o reducir adecuadamente los peligros asociados con estos riesgos (Asociación Española de Normalización y Certificación., 2012, p. 7).

Las recomendaciones de esta norma son utilizadas por los fabricantes de Robot (FEMEVAL et al., 2019, p. 22).

5.6.6.2 Norma ISO 10218-2, Sistemas de robot e integración.

Su alcance está definido en el artículo 1 de la misma:

Esta parte de la norma ISO 10218 especifica los requisitos de seguridad para la integración de robots industriales y sistemas de robot industriales como se define en la ISO 10218-1, y celdas de robot industriales. La integración incluye lo siguiente:

- a) El diseño, fabricación, instalación, operación, mantenimiento y desmantelamiento del sistema de robot industrial o la celda.
- b) La información necesaria para el diseño, fabricación, instalación, operación, mantenimiento y desmantelamiento del sistema de robot industrial o celda.
- c) Los dispositivos del sistema de robot industrial o celda.

Esta parte de la norma ISO 10218 describe los peligros básicos y situaciones peligrosas identificadas con estos sistemas y proporciona los requisitos para eliminar o reducir adecuadamente los riesgos asociados con estos peligros (ISO, 2011, p. 1).

Esta norma afecta a los integradores de instalaciones robóticas (FEMEVAL et al., 2019, p. 22).

5.6.7 Especificación técnica ISO/TS 15066, Seguridad de robots colaborativos

Esta especificación técnica proporciona los requerimientos de seguridad para las aplicaciones de robots colaborativos y se complementa con los requerimientos de seguridad establecidos por las normas ISO 10218- 1 e ISO 10218-2 que se aplican en la robótica industrial (ISO, 2016^a, p. 1).

Se definen términos relacionados con la robótica colaborativa como son:

- El *espacio colaborativo* es la parte del espacio operativo donde el sistema robot, la pieza de trabajo y el humano concurren para ejecutar tareas relacionadas con la producción (ISO, 2016a, p. 2), ver figura 18.
- La *operación colaborativa* es aquella en la cual sistema robot y operario trabajan dentro del espacio de trabajo colaborativo (ISO, 2016a, p. 1).
- *Contacto cuasi-estático* es el atrapamiento de una parte del cuerpo del operario por una parte móvil del sistema robot contra una parte fija o móvil del mismo sistema (ISO, 2016a, p. 2).
- *Contacto transitorio*, es el impacto o colisión que se produce entre una parte del sistema robot y una parte del cuerpo humano, no hay atrapamiento y la persona puede liberarse en cualquier momento de este contacto (ISO, 2016a, p. 2).
- La *distancia de separación segura* es la distancia mínima que se permite de la parte móvil y peligrosa del sistema robot y cualquier parte de una persona que esté dentro del espacio colaborativo (ISO, 2016a, p. 2).
- El *Modelo corporal* es una representación del cuerpo humano, en la cual se enumeran las partes del cuerpo y regiones, para asignarles valores límites de fuerza y presión de contacto en función de sus propiedades biomecánicas (ISO, 2016a, p. 2).

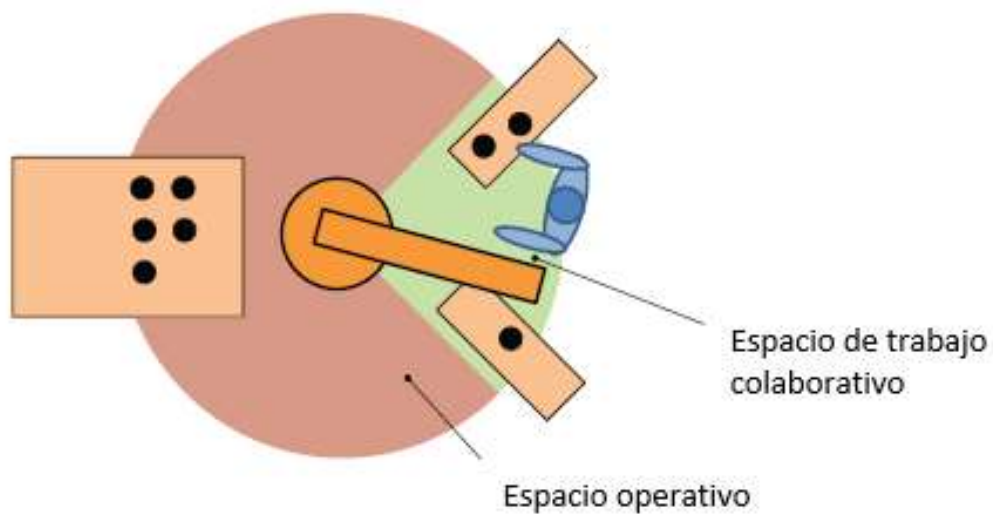


Figura 18. Ejemplo de espacio de trabajo colaborativo. Fuente: ISO (ISO, 2016a, p. 3), traducción libre.

En el modo colaborativo de limitación fuerza y potencia, esta especificación técnica aporta una forma para evaluar los contactos entre el sistema robot y el humano. Por una parte, se define un modelo corporal, mediante una representación gráfica del cuerpo humano en la cual se enumera 29 partes del cuerpo (ver figura 19) y estas las engloba a su vez en 12 regiones.

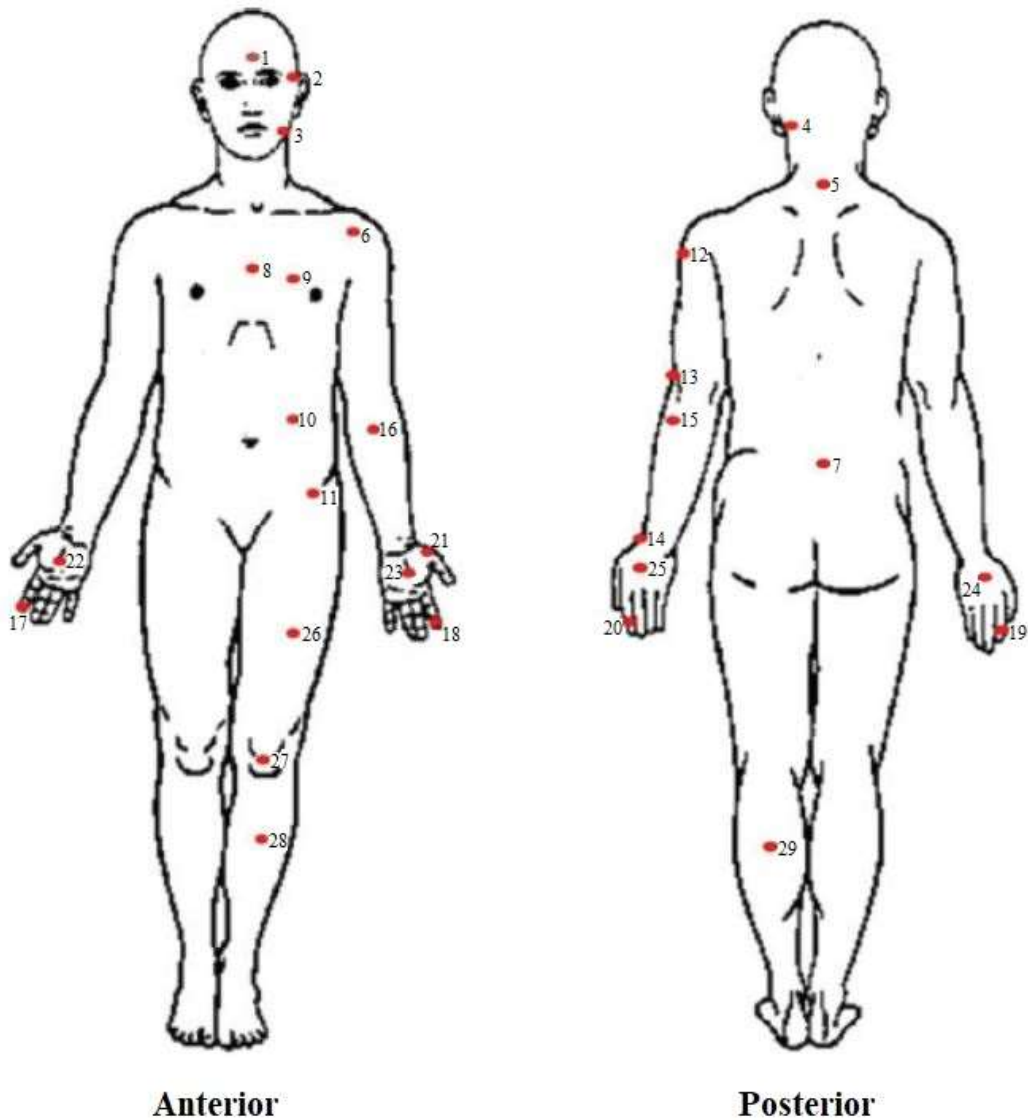


Figura 19. Modelo corporal. Fuente: ISO (ISO, 2016a, p. 22), traducción libre.

Por otra parte, en una tabla se establece los límites máximos de presión y fuerza para los contactos cuasi-estáticos y transitorios en cada una de las partes del modelo corporal. Esta tabla se puede ver en la figura 20.

| Zona del cuerpo | Area especifica del cuerpo | | Contacto cuasi-estático | | Contacto transitorio | |
|--|----------------------------|------------------------------------|--|---------------------------|--|---|
| | | | Presión máxima permitida P_s N/cm ² | Fuerza máxima permitida N | Factor de presión máxima permitida P_T | Factor de fuerza máxima permitida F_T |
| Cráneo y frente | 1 | En mitad de la frente | 130 | 130 | No aplicable | No aplicable |
| | 2 | Sien | 110 | | | |
| Cara | 3 | Mandíbula | 110 | 65 | No aplicable | No aplicable |
| Cuello | 4 | Músculo del cuello | 140 | 150 | 2 | 2 |
| | 5 | Séptimo músculo del cuello | 210 | | 2 | |
| Espalda y hombros | 6 | Articulación del hombro | 160 | 210 | 2 | 2 |
| | 7 | Quinta vértebra lumbar | 210 | | 2 | |
| Pecho | 8 | Esternón | 120 | 140 | 2 | 2 |
| | 9 | Músculo pectoral | 170 | | 2 | |
| Abdomen | 10 | Músculo Abdominal | 140 | 110 | 2 | 2 |
| Pelvis | 11 | Hueso pélvico | 210 | 180 | 2 | 2 |
| Parte superior de los brazos y articulaciones del codo | 12 | Músculo deltoides | 190 | 150 | 2 | 2 |
| | 13 | Húmero | 220 | | 2 | |
| Articulaciones de los antebrazos y las muñecas | 14 | Hueso radial | 190 | 160 | 2 | 2 |
| | 15 | Músculo del antebrazo | 180 | | 2 | |
| | 16 | Nervio del brazo | 180 | | 2 | |
| Manos y dedos | 17 | Yema de los dedos D | 300 | 140 | 2 | 2 |
| | 18 | Yema de los dedos ND | 270 | | 2 | |
| | 19 | Articulación final del dedo indice | 280 | | 2 | |
| | 20 | Articulación final del dedo indice | 220 | | 2 | |
| | 21 | Eminencia tenar | 200 | | 2 | |
| | 22 | Palma D | 260 | | 2 | |
| | 23 | Palma ND | 260 | | 2 | |
| | 24 | Dorso de la mano D | 200 | | 2 | |
| | 25 | Dorso de la mano ND | 190 | | 2 | |
| Muslos y rodillas | 26 | Músculo del muslo | 250 | 220 | 2 | 2 |
| | 27 | Rótula | 220 | | 2 | |
| Parte inferior de las piernas | 28 | Mitad de la espinilla | 220 | 130 | 2 | 2 |
| | 29 | Músculo de la pantorrilla | 210 | | 2 | |

D = lado dominante del cuerpo ND = lado no dominante del cuerpo

Figura 20. Tabla del modelo corporal. Fuente: ISO (ISO, 2016a, p. 24 y 25), traducción libre.

Este desarrollo está basado en un estudio realizado por la Universidad de Maguncia, en el cual estableció los umbrales de dolor causados por golpes dados a un grupo de personas en diferentes partes de su cuerpo y de este se obtuvieron los valores de presión y fuerza para dichos umbrales de dolor de los contactos cuasi-estáticos (ISO, 2016a, p. 24).

El factor utilizado para la presión y fuerza máxima del contacto transitorio está basado en estudios que demuestran que los niveles máximos para fuerza y presión de los contactos transitorios superan al menos dos veces el valor de los cuasi-estáticos (ISO, 2016a, p. 24). En la gráfica de la figura 21 se observa los niveles aceptables y no aceptables para la fuerza y presión de dichos contactos.

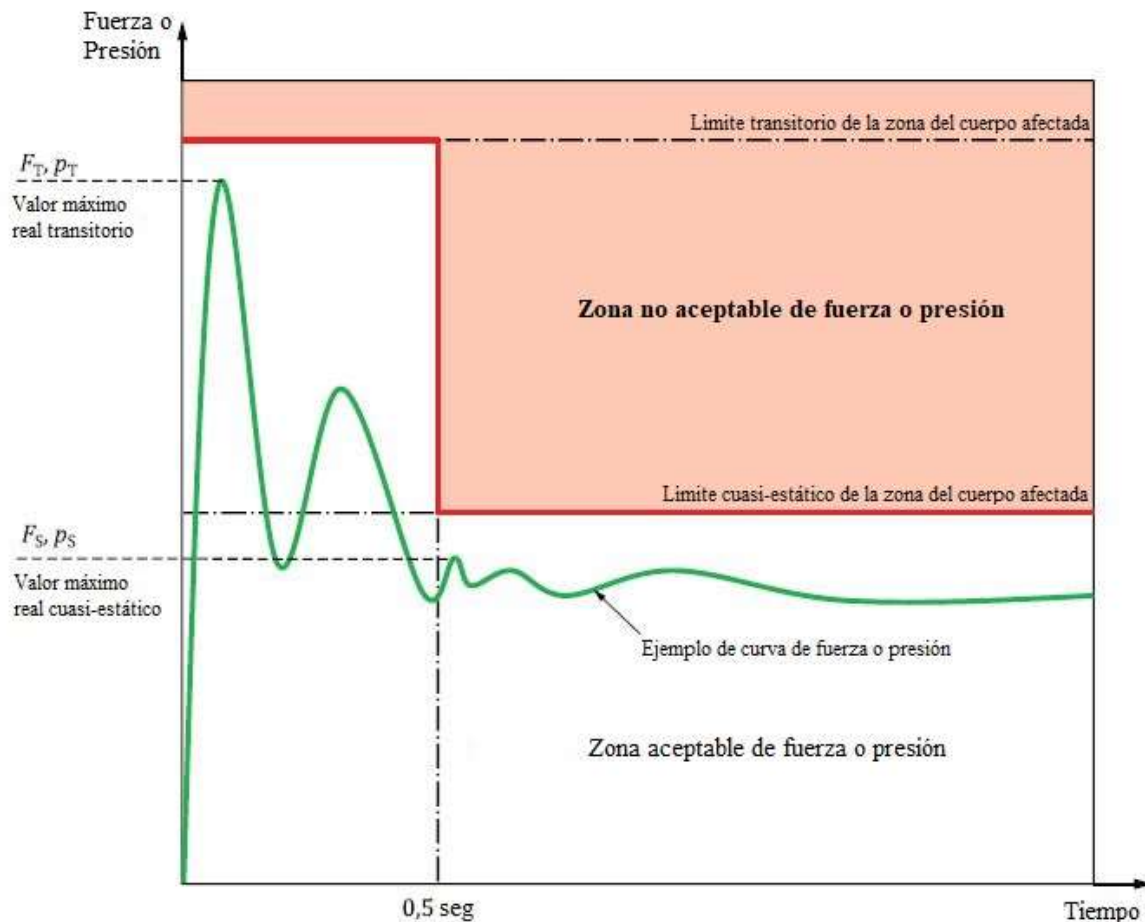


Figura 21. Gráfica de valores aceptables y no aceptables de fuerza y presión. Fuente: ISO (ISO, 2016a, p. 18), traducción libre.

5.7 Evaluación y reducción de riesgos

Se debe realizar la evaluación y reducción de riesgos del sistema robot, independientemente de la metodología que utilice, debe ser conforme a lo especificado en el artículo 4 de la norma ISO-12100, el cual establece que debe contar con las siguientes partes:

- Límites de la máquina (sistema robot)
- Identificación de los peligros
- Estimación y valoración de los riesgos
- Medidas de seguridad para la reducción de riesgos

5.7.1 Límites de la máquina

Esta es la primera parte de la evaluación de riesgos, la norma ISO 12100 en su artículo 5.3 define los límites de uso, enfatizando que son tanto los relacionados con el uso previsto como

aquellos que puedan realizarse por el mal uso razonablemente previsible. En el uso previsto estarán los diferentes modos operatorios como procedimientos de usuario e intervenciones de reglaje o mantenimiento. En el mal uso razonablemente previsible para el caso de un robot colaborativo puede ser el mal uso de la pinza, el no respeto del modo operatorio, activar manualmente (pinchar) una electroválvula en el distribuidor neumático de la instalación, etc.

También deben definirse los límites en el espacio de la máquina, consiste en un plano en 2D o esquema en 3D que detalle todas sus partes. Para una aplicación robótica se deben detallar elementos como el robot y el espacio requerido para sus movimientos, las zonas donde el operario interactúa con la máquina, el sitio de la consola de explotación del robot, el armario eléctrico, la interfaz usuario-máquina, equipos anexos y mobiliario o medios de la instalación.

5.7.2 Identificación de los peligros

En el artículo 5.4 de la ISO 12100, se establece que una vez se han definido los límites de la máquina se puede comenzar con la identificación de los peligros presentes en la máquina, esta parte es esencial para una buena evaluación de riesgos de la misma. La identificación de los peligros consiste en determinar todos los peligros previsible tanto los que están permanentemente como los que pueden surgir de forma inesperada, se deben incluir las situaciones y sucesos peligrosos durante todas las fases de vida de la instalación sin olvidarse de los relacionados con el mal uso previsible (ISO, 12100, p. 14).

Para la determinar los riesgos de una aplicación colaborativa se puede hacer uso del listado peligros del Anexo 12.1, el cual expone los peligros asociados tanto al robot como al sistema robótico, estos se han recopilado del Anexo 2 de la norma ISO 10218-2.

Además, la especificación técnica ISO/TS 15066 en el artículo 4.3.2 aporta un listado más específico de los peligros mínimos que deben identificarse en las instalaciones con robots colaborativos como son los contactos cuasi-estáticos provocados por el sistema robot, los contactos transitorios que pueda causarle el sistema robot a los operarios y los relacionados con el elemento final de trabajo como su diseño y geometría. La lista completa de peligros mínimos de la ISO/TS 15066 se incluye en el anexo 12.2.

5.7.3 Estimación y valoración de los riesgos

Para estimar y valorar los riesgos existen varias metodologías, pero una de las más utilizadas para evaluar riesgos en máquinas es el método Hazard Rating Number (HRN), el cual fue creado por Chris Steel y publicado en la revista SHP (Safety & Health Practitioner) en 1990 (SHP, 2015a). Este consiste en el producto de cuatro factores, cuyo resultado es el Hazard Rating Number (HRN) que representa el nivel de riesgo.

Los factores y formula de este método son:

- **LO** – Probabilidad del suceso peligroso
- **FE** – Frecuencia de la exposición
- **DPH** - Grado del posible daño
- **NP** – Número de personas en riesgo

$$\text{HRN} = \text{LO} \times \text{FE} \times \text{DPH} \times \text{NP}$$

Los valores que pueden tomar estos factores se detallan en la siguiente tabla:

| LO – PROBABILIDAD DEL SUCESO PELIGROSO | | | | FE – FRECUENCIA DE LA EXPOSICIÓN | | | | |
|--|--|-------------------------------------|------|-----------------------------------|--------|----------|----------|-------------|
| 0,05 | <i>Casi Imposible</i> | Possible en circunstancias extremas | 0,1 | Infrecuente | | | | |
| 0,5 | <i>Altamente Improbable</i> | Aunque concebible | 0,2 | Anualmente | | | | |
| 1 | <i>Improbable</i> | Pero puede suceder | 1 | Mensualmente | | | | |
| 2 | Posible | Pero inusual | 1,5 | Semanalmente | | | | |
| 5 | Probabilidad equilibrada (50%) | Puede suceder | 2,5 | Diariamente | | | | |
| 8 | Probable | No sorprendente | 4 | Cada hora | | | | |
| 10 | Probable (+) | Se podía esperar | 5 | Constantemente | | | | |
| 15 | Cierto Sin duda | | | | | | | |
| DPH - GRADO DEL POSIBLE DAÑO | | | | NP – NÚMERO DE PERSONAS EN RIESGO | | | | |
| 0,1 | Rasguño o hematoma | | 1 | 1-2 personas | | | | |
| 0,5 | Laceración o efectos leves sobre la salud | | 2 | 3-7 personas | | | | |
| 1 | Rotura de un hueso menor o enfermedad leve (temporal) | | 4 | 8-15 personas | | | | |
| 2 | Rotura de un hueso mayor o enfermedad leve (permanente) | | 8 | 16-50 personas | | | | |
| 4 | Pérdida de una extremidad, un ojo, enfermedad grave de carácter temporal | | 12 | > 50 personas | | | | |
| 8 | Pérdida de extremidades, ojos, enfermedad grave de carácter permanente | | | | | | | |
| 15 | Muerte | | | | | | | |
| RIESGO | Despreciable | Muy bajo | Bajo | Significativo | Alto | Muy Alto | Extremo | Inaceptable |
| HRN | 0-1 | 1-5 | 5-10 | 10-50 | 50-100 | 100-500 | 500-1000 | >1000 |

Figura 22. Tabla 1 del Método HRN. Fuente: SHP (SHP, 2015b), traducción libre .

En función del resultado, el nivel de riesgo, deben realizarse medidas o no, como se puede observar en este cuadro:

| RIESGO | HRN | PLANIFICACIÓN DE MEDIDAS |
|---------------|----------|------------------------------------|
| Despreciable | 0-1 | No es necesaria |
| Muy bajo | 1-5 | En un plazo no mayor de un año |
| Bajo | 5-10 | En un plazo no mayor de tres meses |
| Significativo | 10-50 | En un plazo no mayor de un mes |
| Alto | 50-100 | En un plazo no mayor de una semana |
| Muy Alto | 100-500 | En un plazo no mayor de un día |
| Extremo | 500-1000 | Inmediata |
| Inaceptable | >1000 | Paro de la actividad |

Figura 23. Tabla 2 del Método HRN. Fuente: SHP (SHP, 2015b), traducción libre.

El autor de este método recomienda que cada organización modifique tanto los valores como las frases a sus necesidades (SHP, 2015b).

5.7.4 Medidas de seguridad para reducción de riesgos

La evaluación y reducción de riesgos de una máquina es un proceso cíclico, ya que al realizar una evaluación de riesgos inicial, los riesgos aceptables no necesitan acciones a realizar pero los que no son aceptables requieren la aplicación de medidas de seguridad para eliminarlos o reducirlos, esta interacción debe repetirse para comprobar que las medidas aplicadas son suficientes para que los riesgos sean aceptables y porque la aplicación de estas medidas pueden generar nuevos riesgos que deben ser evaluados (ISO, 2010, p. 21).

Las medidas de seguridad según la guía NTP 235 las divide en medidas de seguridad integradas y no integradas en la máquina (INSHT, 1989, p. 2).

Las medidas de seguridad integradas se clasifican a su vez en:

- Medidas de prevención intrínseca, evitan o reducen al máximo el peligro y están relacionadas con el diseño de la máquina. Consisten en evitar salientes, aristas que puedan ser punzantes o cortantes, uso de equipos de baja tensión, fluidos no tóxicos o inflamables, equipos fiables, ubicación de los sitios de explotación, reglaje o mantenimiento en zonas que no sean peligrosas (INSHT, 1989, p. 4).
- Medidas de protección, como su nombre lo indica protegen a las personas de los peligros que no se pueden eliminar o reducir. Estas consisten en el uso de resguardos

o envolventes, resguardos o protecciones móviles con enclavamiento, barreras inmateriales y escáneres (INSHT, 1989, p. 4).

- Advertencias, estas advierten e informan a las personas cuando no se pueden aplicar las anteriores medidas o pueden ser complementarias a la aplicación de las anteriores. Las advertencias son las instrucciones técnicas, manual de usuario, marcas y signos de indicación y señales visuales y auditivas (INSHT, 1989, p. 5).
- Disposiciones suplementarias, estas son las medidas de emergencia utilizadas fuera de las condiciones y uso normal de la máquina. Son utilizadas como caso extremo o cuando el resto de las medidas no son aplicables. Entre estas se encuentran las paradas de emergencia y la consignación de energías de la máquina (INSHT, 1989, p. 5).

En la norma técnica ISO 10218-2, se exponen las medidas de seguridad para sistemas robóticos y en la especificación técnica ISO/TS 15066 se exponen las medidas de seguridad pasivas y activas para sistemas que incluyen robots colaborativos. Estas medidas se encuentran en el artículo 5.5.5.4 de dicha especificación técnica.

Entre las medidas de reducción de riesgo pasivas (ISO, 2016a, p. 17) se encuentran las siguientes:

- Incrementar la superficie de contacto, para tal fin se pueden redondear los bordes y esquinas.
- Evitar en las zonas de contacto presencia de superficies rugosas, bordes afilados y aristas que puedan provocar cortes y daños a las personas.
- Utilizar materiales acolchados, deformables y uniones flexibles que puedan absorber golpes.
- Evitar obstáculos en la zona de trabajo del robot y las personas tengan libertad de movimiento. La distancia mínima alrededor del robot debe ser por lo menos de 500 mm y así evitar que los contactos transitorios se conviertan en cuasi-estáticos que son más restrictivos y dañinos.
- Se debería delimitar y señalizar el espacio donde la personas y el robot colaborativo pueden interactuar.

Otras medidas a aplicar son las activas (ISO, 2016a, p. 17) que están relacionadas con el sistema de control de robot, las cuales son:

- Limitación de la fuerza.
- Limitación de momentos.
- Limitación de velocidades.
- Limitación de potencia.
- Limitación de movimientos de ejes por software.
- Limitación de espacios de seguridad por software.

Otras medidas activas usadas por robóticos e integradores son:

- Orientación del elemento final o herramienta de trabajo (TCP).
- Uso de pinzas especialmente diseñadas para aplicaciones colaborativas, como cierre por muelle.
- Las trayectorias deben programarse para que no impacten ni atrapen a los operarios y personas que trabajen en la instalación.

Además, en el anexo 12.3 se adjuntan un conjunto de tablas de riesgos con sus medidas de seguridad o preventivas, relacionadas con aplicaciones robóticas industriales y colaborativas, las cuales pueden servir de ayuda para establecer riesgos y medidas comunes de dichas aplicaciones. Estas tablas se tomaron de la guía de Robots Industriales y cobots en Prevención de Riesgos Laborales de FEMEVAL, otras empresas de la Comunidad Valenciana y la Generalitat Valenciana.

5.8 Partes de un sistema de mando relativas a la seguridad (SRP/CS)

En el proceso de reducción de riesgos se aplican medidas de seguridad para aquellos que no son aceptables, bien para eliminarlos y si no es posible entonces para reducirlos. Entre las medidas a aplicar se encuentran la integración en la máquina de funciones de mando que ayuden a reducir el riesgo en situaciones determinadas de peligro, estas se conocen como funciones de seguridad, una de las más conocida es la parada de emergencia, pero existen otras como son la parada de la máquina por la detección de una persona en una zona peligrosa o el paro de un movimiento si sobrepasa un límite de seguridad. Las funciones de seguridad deben diseñarse conforme a las normas ISO 13849, la cual como anteriormente se mencionó proporciona los requerimientos de seguridad y orientaciones para su diseño e integración en los sistemas de mando relativos a la seguridad de la máquina (ISO, 2016b, p. 1).

5.8.1 Definiciones

Para entender el proceso de diseño de las SRP/CS es necesario comenzar por las definiciones de los términos que se emplean.

- SRP/CS: son las siglas en ingles de *Safety Related Parts of a Control System*, en castellano Partes de un sistema de mando relativas a la seguridad. Es la parte de un sistema mando que responde a señales de entrada y genera señales de salida relativas a la seguridad (ISO, 2016b, p. 2).
- PL: son las siglas en ingles de *Perfomance Level*, en castellano Nivel de prestaciones. Nivel discreto utilizado para especificar la aptitud de las partes de un sistema de mando relativo a la seguridad para desempeñar una función de seguridad en condiciones previsibles (ISO, 2016b, p. 5).
- PLr: son las siglas en ingles de *Required Perfomance Level*, en castellano Nivel de prestaciones requerido. Nivel de prestaciones (PL) aplicado para conseguir la reducción de riesgo requerida para cada función de seguridad (ISO, 2016b, p. 6).

- MTTFd: son las siglas en ingles de *Mean Time To dangerous Failure*, en castellano Tiempo medio hasta fallo peligroso (ISO, 2016b, p. 6).
- DC: son las siglas en ingles de *Diagnostic Coverage*, en castellano Cobertura del diagnóstico. Medida de la efectividad del diagnóstico, que se puede determinar como la relación entre el número de fallos peligrosos detectados y el número total de fallos peligrosos (ISO, 2016b, p. 6).
- CCF: son las siglas en ingles de *Common Cause Failure*, en castellano Fallo de causa común. Fallo de varios elementos, que resultan de un solo suceso y que no son consecuencia unos de otros (ISO, 2016b, p. 3).
- Categoría: es la clasificación de un SRP/CS en función de su resistencia a defectos y de su comportamiento subsecuente en caso de defecto, y que se obtiene mediante la arquitectura de dichas partes, la detección de defectos y/o su fiabilidad (ISO, 2016b, p. 2).

5.8.2 Proceso de diseño de las partes de un sistema de mando relativas a la seguridad

Tanto el PL como el PLr se clasifican en cinco niveles que van de la a hasta la e, estos niveles están definidos en términos de probabilidad de fallo por hora, como se puede ver en la tabla de la figura 24.

| PL | Probabilidad media de un fallo peligroso por hora 1/h |
|----|---|
| a | $\geq 10^{-5}$ a $< 10^{-4}$ |
| b | $\geq 3 \times 10^{-6}$ a $< 10^{-5}$ |
| c | $\geq 10^{-6}$ a $< 3 \times 10^{-6}$ |
| d | $\geq 10^{-7}$ a $< 10^{-6}$ |
| e | $\geq 10^{-8}$ a $< 10^{-7}$ |

NOTA: Además de la probabilidad media de fallo peligroso por hora, son necesarias otras medidas para obtener el PL.

Figura 24. Tabla Niveles de Prestación (PL). Fuente: ISO (ISO, 2016b, p. 12), traducción libre.

Para determinar el nivel de prestaciones requerido la norma ISO 13849 en su Anexo A, ofrece un gráfico de riesgo, ver figura 25, este relaciona los parámetros riesgo como la gravedad de lesión (S), frecuencia y duración de exposición al peligro (F) y posibilidad de evitar el peligro o limitar el daño (P) con los niveles de prestación requerido (ISO, 2016b, p. 49).

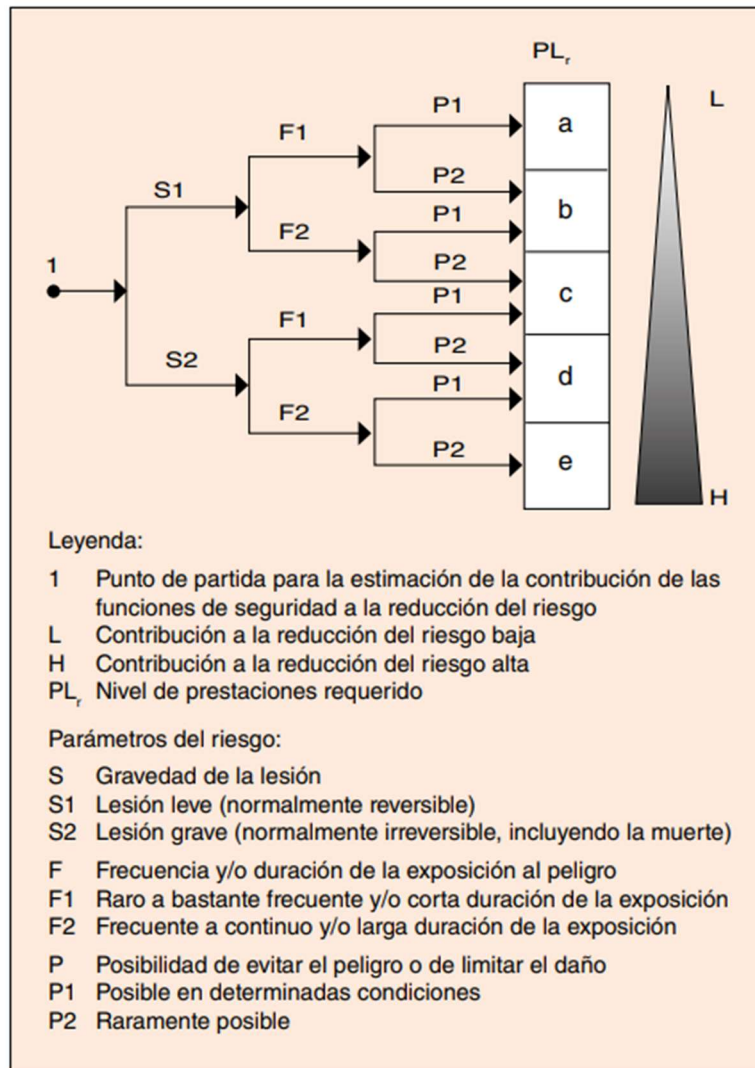


Figura 25. Gráfico de riesgo para determinar el nivel de prestaciones requerido (PL_r) para cada función de seguridad. Fuente: INSHT (INSHT, 2012, p. 4).

Para cada función de seguridad se debe seguir un proceso iterativo, este se resume en el diagrama de flujo de la figura 26. Como se observa en este diagrama de flujo, lo primero es identificar las funciones de seguridad del sistema mando y por lo general es una tarea compleja (INSHT, 2012, p. 3).

El siguiente paso es el diseño de las funciones de seguridad, en la etapa 1 se definen las especificaciones de los requisitos de seguridad como son la descripción de la función, el comportamiento de la máquina cuando esta se dispara o que debe cumplirse para su restablecimiento, y el otro punto a definir es el nivel de prestaciones requerido (PL_r) para cada función (INSHT, 2012, p. 3).

En la etapa 2, se diseña la función de seguridad es decir los bloques funcionales como son la entrada, el lógico y la salida. En esta parte se especifica la categoría de los bloques, los cuales

pueden ser categoría B, 1, 2, 3 o 4. Las categorías van asociadas al tipo de arquitectura (un canal o doble canal), fiabilidad del conjunto, calidad de las pruebas y comprobaciones realizadas (INSHT, 2012, p. 4).

En la etapa 3, se estima el nivel de prestaciones (PL) de la función de seguridad para ello se toma en cuenta las especificaciones cuantitativas como son la categoría, la fiabilidad dada por el MTTFd, la cobertura de diagnóstico DC y la resistencia a los fallos de causa común CCF. También se utilizan las especificaciones cualitativas de la función como las medidas contra los fallos sistemáticos y el software relativo a la seguridad de las SRP/CS programables (INSHT, 2012, p. 5).

En la etapa 4, se evalúa si la PL obtenida en la etapa 3 es mayor o igual que la PLr especificada para la función de seguridad en la etapa 1, en el caso de que la PL sea menor debe rediseñarse la SRP/CS y evaluarse nuevamente (INSHT, 2012, p. 10).

En la etapa 5, es la última etapa del proceso, en esta se procede a la validación de la función de la función de seguridad, para ello debe revisarse el diseño y aplicar las pruebas necesarias para constatar que cumplen con todas las especificaciones de seguridad realizadas en la etapa 1 (INSHT, 2012, p. 10).

En las normas ISO 10218, se especifica los PLr para los SRP/CS de los robot y sistemas robóticos, esto incluyen a los colaborativos. Tanto los fabricantes de robot como los integradores deben cumplir conforme a esta norma con los niveles de prestaciones requeridos para las funciones de seguridad implementadas.

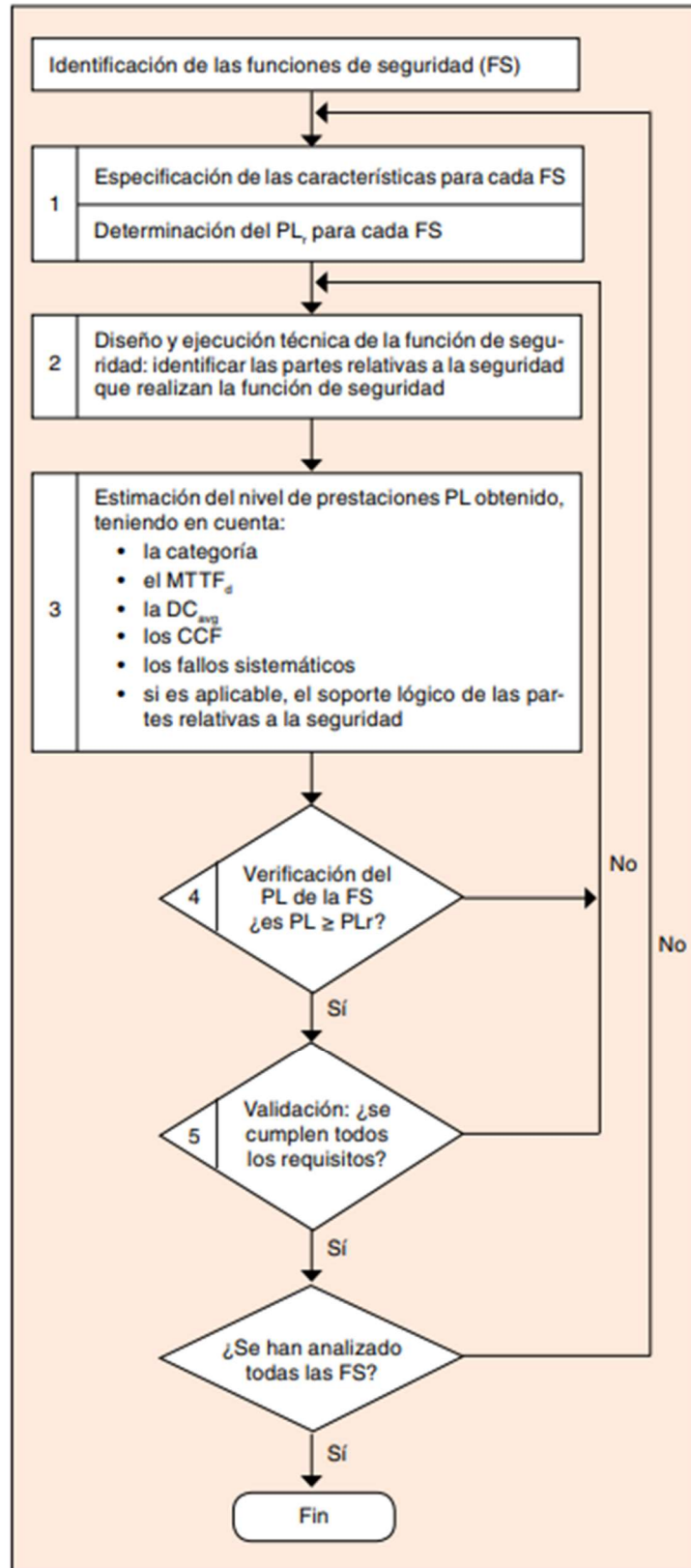


Figura 26. Diagrama de flujo del proceso iterativo para el diseño de las SRP/CS. Fuente: INSHT (INSHT, 2012, p. 4).

6 METODOLOGÍA

Para dar respuesta a los objetivos planteados en este trabajo de fin de máster sobre la seguridad en aplicaciones con robots colaborativos se realizará una investigación bibliográfica sobre las leyes, normas técnicas de seguridad de máquinas y robots, artículos y trabajos sobre robots colaborativos. También se complementará con entrevistas a profesionales del sector de la robótica y a técnicos de prevención de riesgos laborales especializados en seguridad de máquinas.

6.1 Fases del trabajo

Este trabajo se hará en tres fases:

- Fase 1: Investigación bibliográfica.
- Fase 2: Entrevistas a profesionales y técnicos de prevención.
- Fase 3: Elaboración de la guía.

La primera fase es el estudio bibliográfico del marco legal que regula la seguridad de máquinas y las normas técnicas que realizan recomendaciones a los fabricantes, integradores y usuario final en lo que respecta a seguridad de máquinas, robots industriales y colaborativos que es uno de los objetivos del presente TFM.

En esta misma fase, se realizará la búsqueda de los peligros que están presentes en las aplicaciones con robots colaborativos, teniendo en cuenta los peligros comunes que comparten con las máquinas e instalaciones con robots industriales. También se investigarán las metodologías utilizadas para la evaluación de riesgos y las medidas preventivas que se aplican en instalaciones robóticas colaborativas.

Dicho estudio se complementará con la segunda fase que son las entrevistas, por una parte, se entrevistarán a profesionales que se dedican a la robótica industrial y automatización de máquinas especiales, esto enriquecerá esta investigación, ya que existe información en esta área que no es fácil de conseguir y que es fruto de la experiencia. Por otra parte, se entrevistarán a técnicos de prevención de riesgos laborales especializados en seguridad de máquinas, esto permitirá conocer cómo se realiza la revisión de la documentación aportada por los integradores de aplicaciones de robótica colaborativas, así como las pruebas y revisiones que se realizan a los equipos e instalaciones que conforman el sistema robot antes de entregar a la empresa.

Finalmente, la tercera fase y última que es la elaboración de la guía, basándome en el trabajo previo de investigación y entrevistas se realizará un análisis de toda la información recopilada para luego desarrollar la guía de comprobación de los requerimientos en seguridad que debe tener una instalación colaborativa en la industria.

7 DESARROLLO

La guía se organizará en cinco apartados que contienen los requerimientos en seguridad para una instalación con robots colaborativos, estos son:

- Documentación
- Revisión estática
- Armario eléctrico y circuito neumático
- Programa robot
- Pruebas en dinámico
- Explotación y mantenimiento

En cada apartado están los documentos, revisiones y pruebas que se deben verificar por parte del técnico de la empresa que está a cargo de la máquina y el servicio de prevención. Estos a su vez deben apoyarse en expertos y personal de otros departamentos como producción, mantenimiento y técnicos en automatismos y robótica.

7.1 Documentación

La directiva de máquinas, Directiva 2006/42/CE, establece en su artículo 1.7.3 que las máquinas deben tener su Marcado CE, esta es una placa que se instala en la máquina en lugar visible, al tratarse de un robot colaborativo esta placa normalmente suele colocarse en el armario eléctrico de la instalación. Además también deberá llevar de forma visible, ver figura 27, en una placa, la razón social y dirección del fabricante, la designación de la máquina, modelo y número de serie y el año en que fue fabricada. Como se trata de una máquina que está alimentada eléctricamente y algunas con aire, la directiva también establece que se indique todo lo necesario para su empleo seguro, por lo tanto en la placa debe indicarse la potencia en kilovatios (kW), la tensión de alimentación en voltios (V) especificando si es monofásica o trifásica, la presión en bar (si procede) y la masa en kilogramos (Kg) para su transporte. Este último si el robot consta de varios módulos, cada uno debería tener una placa con el peso.



Figura 27. Placa de Marcado máquina. Fuente Covadel (Covadel Rotulación, s. f.).

La máquina en este caso el sistema robot debe proporcionarse con su manual de instrucciones, este debe estar en castellano, ya que es la lengua oficial de España, así se establece en el artículo 1.7.4 de la Directiva de Máquinas. El manual debe redactarse según los principios establecidos en dicha Directiva en el artículos 1.7.4.1 y su contenido debe contar con toda la información detallada en el artículo 1.7.4.2. Al tratarse de un sistema robot este manual debe contener toda la información especificada en el artículo 7.2 de la norma ISO 10218-2, relacionada con las fases de vida del sistema como son transporte, montaje e instalación, puesta en marcha, instrucciones de uso de todas las operaciones como ajuste, configuración, programación, apagado y encendido, mantenimiento y todo lo demás que se considere necesarios, incluyendo su desinstalación y chatarreo (ISO, 2011, p. 39). Dado que el sistema robot es colaborativo debe incluirse una declaración que el robot es adecuado para trabajar en modo colaborativo según lo especificado en el artículo 5.11 de la norma ISO 10218-2 (ISO, 2011, p. 43).

Además del Marcado CE, debe contar con la Declaración CE de Conformidad, esta debe cumplir todo lo dispuesto en el Anexo II, 1.A de la Directiva de Maquinas y se debe revisar en dicha declaración las normas armonizadas, otras normas y especificaciones técnicas que se han utilizado. Como la máquina en cuestión es un sistema robot, incluye cuasí-máquinas como es el caso del robot colaborativo por lo tanto, deberá contar con su Declaración de Incorporación, la cual a su vez debe cumplir con lo dispuesto en el Anexo II, 1.B de la Directiva de Máquinas. Si hubiese otra cuasí-máquina que formara parte de este sistema como sería un equipo de atornillado con alimentador de tornillos, este también deberá contar con su respectiva Declaración de Incorporación.

Debe proporcionarse el manual del robot del fabricante según lo especificado en la norma ISO 10218-1, artículo 7, este es esencial para consulta durante la revisión. Además será necesario

cuando haya la necesidad de realizar modificaciones para optimizar parámetros, trayectorias o en caso de averías.

Se deben incluir los cálculos de distancia y posición de los protectores como equipos electro-sensibles para verificar que estos deben ser conforme a las recomendaciones dadas en la norma ISO 13855. En esta norma se proporciona la metodología a seguir para su diseño, de definen conceptos y parámetros como la velocidad para el cálculo de las distancias mínimas y para el posicionamiento de las protecciones, así como las fórmulas y ejemplos de casos prácticos. Fabricantes como SICK tienen guías de aplicación y fichas de especificación de datos de sus equipos como son las barreras inmateriales y escáneres láser, las cuales son de utilidad para los fabricantes e integradores para la elección y diseño de los protectores, es útil que estos aporten estas fichas y documentación técnica asociada a los equipos utilizados en la instalación para su posterior revisión. También se debe aportar los estados de referencia y la suma de verificación o en inglés *checksum* de configuración del escáner, esta sirve para determinar si la configuración del equipo se ha modificado posteriormente de ser entregada la instalación por el fabricante.

Otro documento de suma importancia es la Evaluación de Riesgos del sistema robot realizada por el integrador, esta deben incluir:

- Los límites de uso de la máquina tanto el uso normal como el mal uso razonablemente previsible, este último está asociado a comportamientos como la falta de concentración o negligencia, tratar de mantener la máquina produciendo sin importar las consecuencias o aumentar el ritmo de la producción.
- La identificación de todos los peligros presentes en el sistema robot.
- La estimación de riesgos, utilizando una metodología como HRN.
- Las medidas preventivas aplicadas para la reducción de riesgos.
- Dispositivos de protección utilizados, con su Nivel de Prestaciones (PL).
- Información y procedimientos como uso de EPI e información de riesgos residuales para los riesgos que no se han podido reducir con los dispositivos de protección.

Una buena práctica de evaluación de riesgos, es primero estimar los riesgos sin aplicar las medidas de protección, luego evaluarlos con las medidas preventivas aplicadas para su reducción y luego indicar los riesgos residuales con las medidas, EPI, señalización, formación y procedimientos que deben aplicarse.

Como la máquina que estamos evaluando se trata de un robot colaborativo, debe realizarse una evaluación de riesgos de contacto para el modo de limitación de fuerza y potencia, esta se puede incluir dentro de la evaluación de riesgos del sistema robot pero es mejor realizarla por separado, sobre todo para incluir fotos y datos más específicos relacionados con los riesgos de contacto evaluados por el integrador, ver figura 28.


| Hazard Identification | | Hazard No. | 1 |
|---|---|---|-----------------|
| Title | Part detection |  | |
| Target | Hand | | |
| Activity | Normal operation | | |
| Task | Part seeking Part grasping | | |
| Hazard Type | Crushing and impact (Quasi-static) | | |
| Description | <p>The UR5 'seeks' for a part with both fingers closed and stops when reaching a force threshold at a given height. The robot only starts its program if a part is detected. The force is monitored by a Robotiq FT 300 Force Torque Sensor. There is a possibility that a worker could place his/her hand between the Gripper and the part. The robot is running at a reduced speed of 20 mm/s and has a 10 N threshold to detect parts. Since the fingers are closed together, they have an area of (13.5 x 23 mm) 310.5 mm² or 3,105 cm². In case of an impact at 10 N, the pressure spread over this surface and applied by the Gripper fingers is (10 N/3,105 cm²) 3,22 N/cm². This is equivalent to energy of 0.0001 J. With a maximum allowable pressure of 197 N/cm² and 0.49 J of energy, this force and energy are slightly lower than levels permissible by ISO/TS 15066.</p> | | |
| References: | | ISO/TS 15066, ISO 10218 | |
| Risk Estimation and Evaluation | | | |
| Degree of Possible Harm: | 0,5 | Possibility of Avoidance: | 0,75 |
| Probability of Occurrence of a Hazardous Event: | 1,25 | Frequency And/or Duration of Exposure: | 4 |
| Pilz Hazard Rating (PHR): | 1,875 | Summary Level: | Negligible Risk |
| Risk Reduction | | | |
| Not necessary | | | |
| Risk Estimation and Evaluation | | | |
| Degree of Possible Harm: | n/a | Possibility of Avoidance: | n/a |
| Probability of Occurrence of a Hazardous Event: | n/a | Frequency And/or Duration of Exposure: | n/a |
| Pilz Hazard Rating (PHR): | #¡VALOR! | Summary Level: | Negligible Risk |

Figura 28. Evaluación de riesgos de contacto. Fuente Robotiq (ROBOTIQ, 2016).

Para la medición de estos contactos se utilizan equipos como el Cobo Safe CBSF-Basic del fabricante GTE Industrieelektronik, este incluye el software, un transductor de fuerza y un escáner para la medida de la presión, ver figuras 29 y 30.



Figura 29. Transductor de esfuerzo y PC con el software. Fuente GTE Industrieelektronik (GTE Industrieelektronik GmbH, 2021, p. 3).



Figura 30. Escáner, hoja de calibración y película para medir presión. Fuente GTE Industrieelektronik (GTE Industrieelektronik GmbH, 2021, p. 4).

Adjunto a esta evaluación se debe adjuntar el informe de medición de los contactos, si se utiliza un equipo como el CBSF-Basic, su software genera un reporte de todas las mediciones de contacto realizadas, el cual sirve como informe. En la figura 31, se muestra una parte del informe de medidas realizados con un equipo CoboSafe CBSF-75 Basic, en este caso una medición fuerza de un contacto por atrapamiento (cuasí-estático) de mano y dedo.

6.4 2020_04_21 Force measurement

| | |
|-------------------------|---|
| Label: | 2020_04_21 Force measurement |
| Note: | 8 |
| Testing specification: | DIN ISO/TS 15066:2017-04 (State: April 2017) DGUV FB HM 080 (State: August 2017) |
| Testing instruments: | CBSF-75-Basic |
| Serial number: | 5493291 |
| Spring: | 75 N/mm |
| compression element | 70 °ShoreA (red) |
| microfiber cloth: | microfiber cloth |
| Collisional type: | Static (clamping) |
| Grenzwerte | Hand and finger |
| Saving address: | 8 |
| Relative humidity: | 40 % |
| Temperature: | 23 °C |
| Date: | 09:28 21.04.2020 |
| Measurement inaccuracy: | ±15 N |
| Filter: | Without filter |

Measurement

Maximum load

Force: 219 N

Static load

Force: 219 N

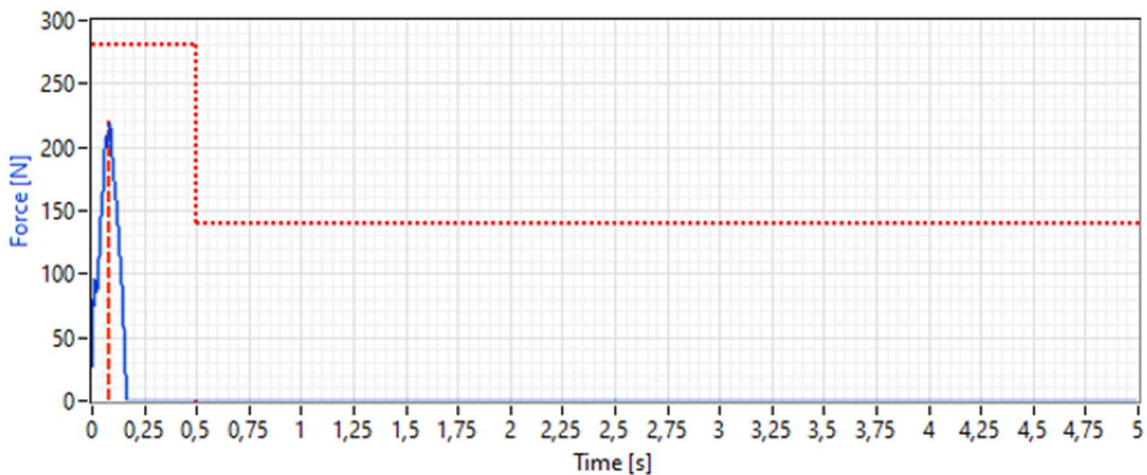


Figura 31. Parte del informe de medición de contactos. Fuente GTE Industrieelektronik, captura pantalla software.

Para determinar si las funciones de seguridad que tiene el sistema robot son conformes a la norma ISO 13849, deberá entregarse por una parte un documento de Nivel Prestaciones (PL) de las funciones de seguridad intrínsecas del robot colaborativo, estas deben revisarse que estén también en el manual del fabricante del robot.

Por otra parte, para el caso del resto de funciones de seguridad implementadas en el sistema robot como paradas de emergencia o equipos como escáneres y barreras inmateriales se deberá entregar un informe con la evaluación del Nivel de prestaciones de dichas funciones.

Para la validación de las funciones de seguridad, es decir si el nivel de Performance alcanzado (PL) es igual o mayor que el nivel de Performance requerido (PLr), existen aplicaciones como SISTEMA la cual se puede descargar desde la página web de la IFA (Instituto Alemán de Salud y Seguridad ocupacional), ver figura 32, su enlace es [IFA - Practical aids: Software-Assistent SISTEMA: Safety Integrity - Software Tool for the Evaluation of Machine Applications \(dguv.de\)](https://www.dguv.de/ifa/practical-aids-software-assistent-sistema-safety-integrity-software-tool-for-the-evaluation-of-machine-applications)

The screenshot shows the IFA website interface. At the top, there is a logo for IFA (Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung) and a search bar. A navigation menu includes categories like News, Research, Technical information, GESTIS, Practical solutions, Testing/Certification, Publications, Events, Networks, and About us. The main content area is titled 'Software-Assistent SISTEMA: Safety Integrity Software Tool for the Evaluation of Machine Applications'. It includes a sub-header 'A Tool for the Easy Application of the Control Standard EN ISO 13849-1' and a 'Zoom Image' button. A 'Download Version 2.0.8 Build 4' button is prominently displayed. A 'Notice' section on the right states that the software is not affected by the Log4Shell vulnerability. The sidebar on the left lists various practical solutions categories, with 'Machine safety' selected.

Figura 32. Foto del sitio web de la IFA donde se puede descargar la aplicación SISTEMA.


Fuente IFA (IFA, 2023).

Esta aplicación además de la evaluación del nivel de performance de las funciones de seguridad también genera un informe en PDF, ver figura 33, sobre dicha evaluación al cual se le denomina Informe SISTEMA, el cual deberá entregarse como parte de la documentación de seguridad de la máquina. Con este informe se entrega un fichero .ssm que se puede abrir en cualquier ordenador que tenga la aplicación SISTEMA instalada y así poder revisar más sobre dicha evaluación.

SISTEMA - Seguridad para mandos de Maquinaria

Nombre del proyecto: Electrical Interlocking of a movable guard - Category 3 - PL d

Nombre del archivo: 12/04/2023 00:13:36 Fecha del reporte: 13/05/2023 Checksum: 0fa6906f9f96ad22aaa364e7eec6c3ea



PR Nombre del proyecto: Electrical interlocking of a movable guard - Category 3 - PL d

| | |
|---|---|
| Nombre del fichero de proyecto: | C:\Users\serral\OneDrive\Documentos\SISTEMA\Projects\en\pid_cat3_int\erlocking_of_movable_guard\PLd_Cat3_Interlocking_of_Movable_Guard.ssm |
| Fecha de creación: | - |
| Estado del Proyecto: | |
| Numero de Proyecto: | |
| Versión del Proyecto: | |
| Autores: | IFA |
| Managers del Proyecto: | |
| Inspectores: | |
| Area peligrosa / máquina: | - |
| Documentación: | This example of a control circuit is based on example B from Annex I of EN ISO 13849-1: Safety of machinery - Safety-related parts of control systems. Part 1: General principles for design (11.06) with updates e.g. for the estimation of MTTFd and CCF. |
| Documento: | |
| Versión del programa: | 2.0.8 build 4 |
| Versión de la Norma: | ISO 13849-1:2015, ISO 13849-2:2012 |
| Checksum: | 0fa6906f9f96ad22aaa364e7eec6c3ea |
| Opciones: | <input checked="" type="checkbox"/> Usar valores intermedios de DC para calcular el PFHD con mayor precisión. <input type="checkbox"/> Rogamos disminuya la cobertura del MTTFD para categoria 4 de 2500 a 100 años. |
| Estado: | verde |
| Nota: | No existen mensajes registrados en este proyecto (o sus elementos básicos subordinados). |
| Opciones de impresión | |
| <input checked="" type="checkbox"/> Mostrar Funciones de Seguridad | <input type="checkbox"/> También mostrar Subsistemas |
| <input type="checkbox"/> También mostrar Bloques | <input type="checkbox"/> También mostrar Elementos |
| Funciones de seguridad contenidas | |
| <div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="margin-right: 10px;"> <p>SF Nombre: Safety-related stop function initiated by safeguard</p> <p>Requerido: PL: d Encontrado: PL: d PFHD [1h]: 1,9E-7 Estado: verde</p> </div> </div> | |

SISTEMA a free of charge tool from IFA

Página 1 / 2

Figura 33. Página 1 de un Informe SISTEMA simplificado en PDF. Fuente IFA, captura de pantalla de informe ejemplo de software SISTEMA.

También la nomenclatura utilizada para las funciones de seguridad debe ser la misma en toda la documentación como son la Evaluación de Riesgos, Informe Sistema y Manuales. Se puede utilizar como nomenclatura SF1 para la función de seguridad 1, la cual es generalmente es la parada de emergencia del armario, SF2 para la función 2 que puede ser la parada de emergencia en la consola de mando del robot, y SF3 puede estar relacionada con un escáner o barrera inmaterial, y así sucesivamente.

Para los robots incluyendo los colaborativos el nivel de prestación de las funciones de seguridad se indican en la norma ISO 10218-1, en el artículo 5.4, en la cual se establece que se deben diseñar los SRP/CS para que alcance el PL=d con categoría de estructura 3 según la ISO 13849-1, a menos que la evaluación de riesgo determine otro criterio (Asociación Española de Normalización y Certificación, 2012, p. 14).

De la misma forma para los sistemas robot incluyendo a los colaborativos el nivel de prestación para las funciones de seguridad, se establece en la norma ISO 10218-2, artículo 5.2 en el cual se indica que se deben diseñar los SRP/CS para que alcance el PL=d con categoría de estructura 3 según la ISO 13849-1, a menos que la evaluación de riesgo determine otro criterio (ISO, 2011, p. 9).

Finalmente es importante tener el Checksum o suma de verificación de la aplicación del Robot Colaborativo, esta se puede obtener de la pantalla del programa de la consola o PC, como el ejemplo del Checksum de un Robot UR, en la pantalla de configuración de seguridad en la esquina superior derecha, el valor es 1D1B, ver figura 34.

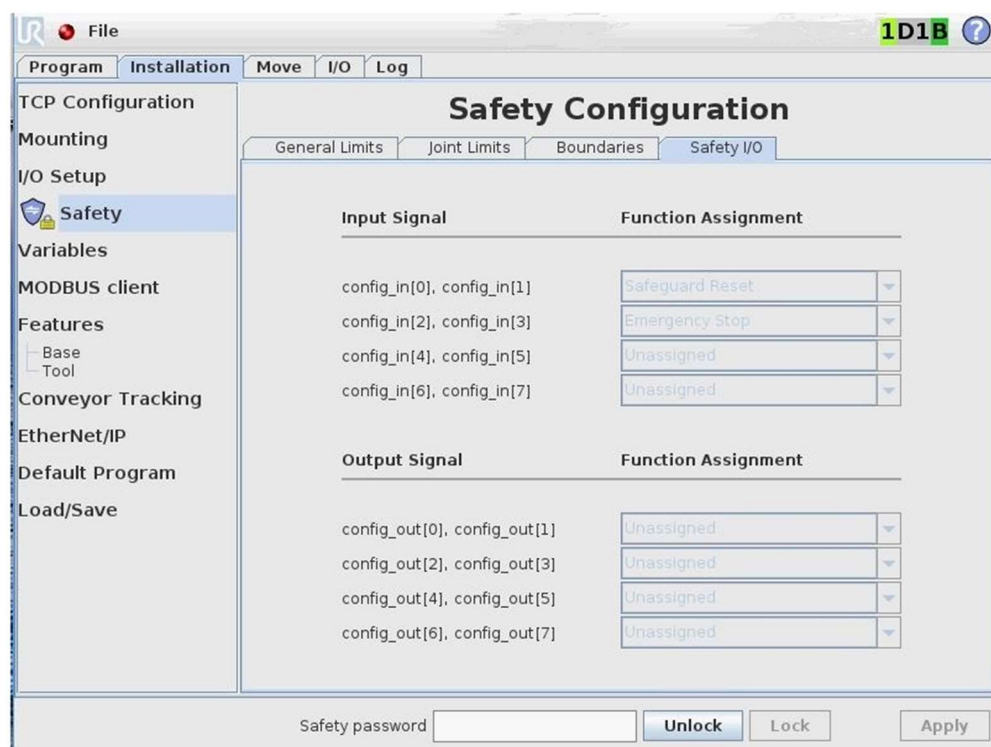


Figura 34. Captura de pantalla de software de Robot UR. Fuente Zacobria (ZACOBRIA, s. f.).

7.2 Revisión estática

Una vez recibida y revisada la documentación del sistema robot, el siguiente paso es iniciar la inspección de la máquina sin realizar ningún movimiento, por este motivo se le denomina revisión estática.

En esta parte, se constata que el sistema robot se ha construido y entregado conforme a las medidas indicadas en la evaluación de riesgo, si cuenta con los dispositivos de protección indicados como paradas de emergencia, barreras inmateriales o escáner.

Se revisa desde el punto de vista de seguridad el robot, los medios o cuasí-máquinas que tenga el sistema, así como las zonas de enlace con mantenimientos u otras máquinas, con el objetivo de confirmar que todos los peligros presentes se han incluido en la evaluación de riesgos.

En relación al robot colaborativo se hace énfasis en los contactos, por esto se revisa todas las medidas especificadas por la ISO/TS 15066 en especial cuidado con las relacionadas con las zonas de contacto como que no haya aristas, bordes afilados, superficies rugosas, elementos con formas puntiagudas, es recomendable que las superficies de contacto tengan la mayor superficie posible y que sean superiores a un centímetro cuadrado en la medida de lo posible. Se revisa sobre todo el elemento final del sistema robot, como es la pinza o garra, y que esta cumpla con lo anteriormente mencionado, si es posible recomendar al integrador en la fase de diseño el uso de pinzas colaborativas como la fabricada por Zimmer Group, ver figura 35, ya que estas son diseñadas y probadas por el fabricante para causar el menor daño posible y adicional este proporciona una certificación.



Figura 35. Pinza colaborativa. Fuente Zimmer Group (Zimmer Group, s. f.).

Tanto si se usa pinza colaborativa o una pinza diseñada por el integrador, esta debe ser normalmente cerradas por muelle, esto asegura que ante la pérdida de energía neumática o eléctrica la pinza sujete la pieza y no se caiga provocando daños a las personas e instalación. Además, los muelles utilizados y el diseño de la pinza se calculan para que la fuerza de cierre de la pinza y la presión ejercida sobre los dedos o mano no supere los valores límites de contacto cuasi-estáticos del modelo cuerpo de la norma ISO/TS 15066.

Otra medida que debe revisarse en caso de aplicación es la protección de las superficies de contacto con material deformable o que absorba los impactos. En el sistema robot la pieza de trabajo también puede causar daños sobre todo si tiene filos y aristas, una forma de proteger es utilizar envoltorios específicas que recubran la pieza de trabajo e inclusive la pinza, este tipo de medidas son efectivas para reducir los riesgos de corte y contusiones por impacto que pueda causar la pieza de trabajo.

Para que el operario pueda salir libremente de la zona de trabajo con el robot no debería existir obstáculos que se lo impidan y alrededor del robot tomando en cuenta su elemento final debe existir un espacio libre mayor de 500 mm (ISO, 2011, p. 34), si esto no fuese posible se debe restringir los valores límites de contacto, ya que se pasaría de contactos transitorios a cuasi-estáticos. También se debería aplicar la norma EN 349 para determinar las distancias mínimas de seguridad para evitar el aplastamiento de partes del cuerpo humano.

La zona de trabajo colaborativa debe estar señalizada, mediante carteles de información de trabajo con el robot y en el suelo pintar de franjas amarillo y negro para indicar la zona donde se puede interactuar con el robot. Y las zonas de peligro no deben ser accesibles a las personas.

Por último, revisar que todas las fuentes de energía del sistema robot se pueden consignar, es decir para el caso de la energía eléctrica el interruptor principal del armario debe tener la posibilidad de ser bloqueado mediante un candado, ver figura 36, y con sus voltímetros que indiquen la ausencia de tensión. Igualmente, para otras fuentes de energía como la neumática debe haber una válvula de tres vías con escape libre y que se pueda bloquear mediante candado y un indicador presión o manómetro para confirmar que el valor de presión es cero. En el caso de que una vez consignada la máquina hubiese energías residuales el integrador además de indicarlo en la Evaluación de Riesgo, Manual de Instrucciones y procedimientos de intervención, debe también señalizarlas en la máquina mediante carteles de información.



Figura 36. Interruptor principal con bloqueo por candado. Fuente Brady (Brady, 2022, p. 89).

7.3 Armario eléctrico y circuito neumático

Además de revisar que el armario eléctrico, ver figura 37, cumple con todo lo dispuesto por las normas CEI 60204, se debe constatar en el mismo que las funciones de seguridad implementadas por el integrador son conforme al nivel de prestaciones indicando en la Evaluación de Riesgos. Para ello se debe revisar con un automatista o eléctrico competente tanto los esquemas de cableado de la máquina para comprobar que efectivamente son conformes a lo requerido y si lo existente en el armario es fiel a lo indicado en dichos esquemas. También es necesario comprobar que los equipos que conformar los bloques de entrada, lógico y salida de seguridad son conformes a la evaluación de Nivel de Prestaciones entregada en la parte de documentación, para esto se deben aportar las fichas técnicas y manuales de los equipos utilizados como barreras inmateriales, escáner, relé de seguridad, y contactores. En el caso de utilizar PLC de seguridad como es el caso de los equipos SIEMENS, controladores de seguridad Flexi Soft de SICK o equipos similares con lógica de seguridad programable, el integrador del sistema debe aportar el Checksum respectivo.

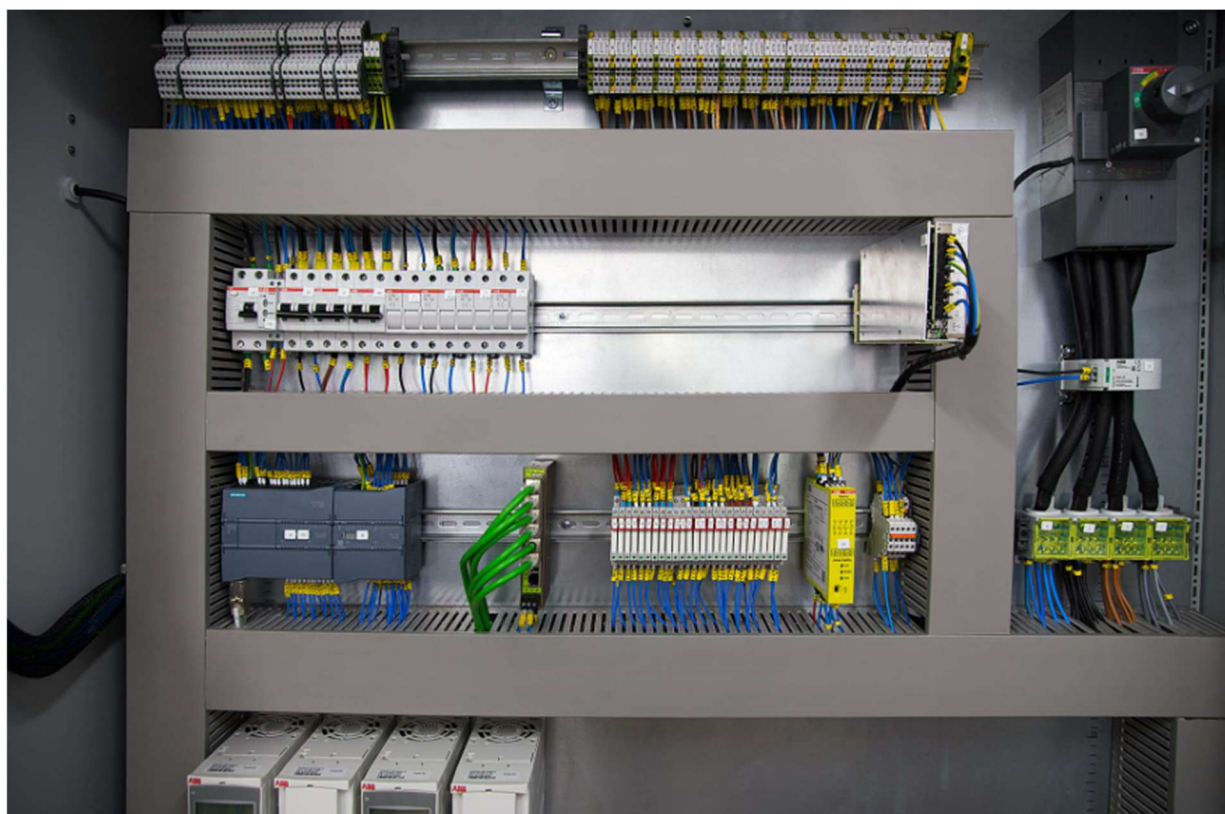


Figura 37. Interior de armario de control eléctrico con relé de seguridad. Fuente MG Electricidad (MG Electricidad, 2022).

Igualmente, en el caso de utilización de circuitos de neumática, se debe verificar que estos son conformes a las medidas preventivas de la Evaluación de Riesgo, normalmente los equipos de control de circuitos neumáticos están instalados en un panel o placa próxima al armario eléctrico y robot. En esta placa están los elementos como la válvula de tres vías de accionamiento manual, unidad de tratamiento de aire, válvula de escape para descarga de presión, regulador de presión y algunos inclusive con una válvula de arranque progresivo para evitar los movimientos intempestivos. También existen equipos que cumplen con la norma ISO 13849 como la doble válvula de descarga a presión con función de arranque progresivo del fabricante SMC, ver figura 38, que facilitan al integrador la implementación de las funciones de seguridad en las máquinas.

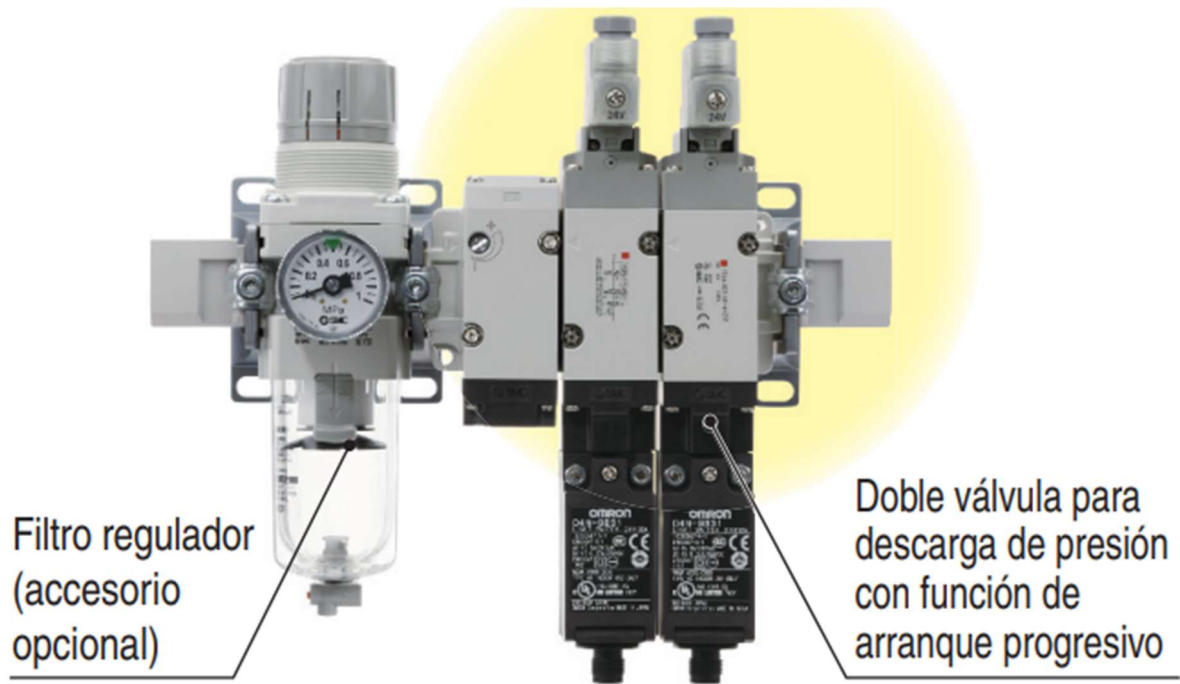


Figura 38. Unidad neumática con filtro regulador y doble válvula para descarga de presión.
Fuente SMC (SMC, s. f., p. 2).

7.4 Programa Robot

Se debe verificar en el programa del robot colaborativo que se han tomado en cuenta las medidas de seguridad activas recomendadas por la especificación técnica ISO/TS 15066 con algunas recomendaciones adicionales aportadas por expertos en robótica colaborativa que se han entrevistado, estos sin salirse ni desmejorar la especificación técnica limitan algunos parámetros. Los parámetros que revisar en el software de la aplicación del robot colaborativo son:

- Limitación de la fuerza, se recomienda igual o inferior a 100 N.
- Limitación de momentos.
- Limitación de velocidades, se recomienda igual o inferior a 400 mm/s.
- Limitación de potencia.
- Limitación de ángulos de cierre entre ejes para evitar riesgos de atrapamiento.
- Utilizar los planos de seguridad.
- Orientación del elemento final o herramienta de trabajo (TCP).
- Limitar la altura de la herramienta o elemento final del sistema robot al mínimo posible, recomendable inferior a 1400 mm con respecto al suelo o base donde se para el operario.
- Las trayectorias deben programarse para que no impacten ni atrapen a los operarios y personas que trabajen en la instalación. En caso de contacto debe reducirse lo menos que sea posible.

- Las trayectorias donde haya contacto debe hacerse con la superficie más grande y evitando aproximaciones en diagonal.

Estas verificaciones deben ser realizadas con la ayuda de un robótico que conozca por supuesto el robot y su software de programación, ver en figura 39 un ejemplo de software de programación de un Robot colaborativo de Universal Robot, específicamente la parte donde se configura los parámetros de seguridad.

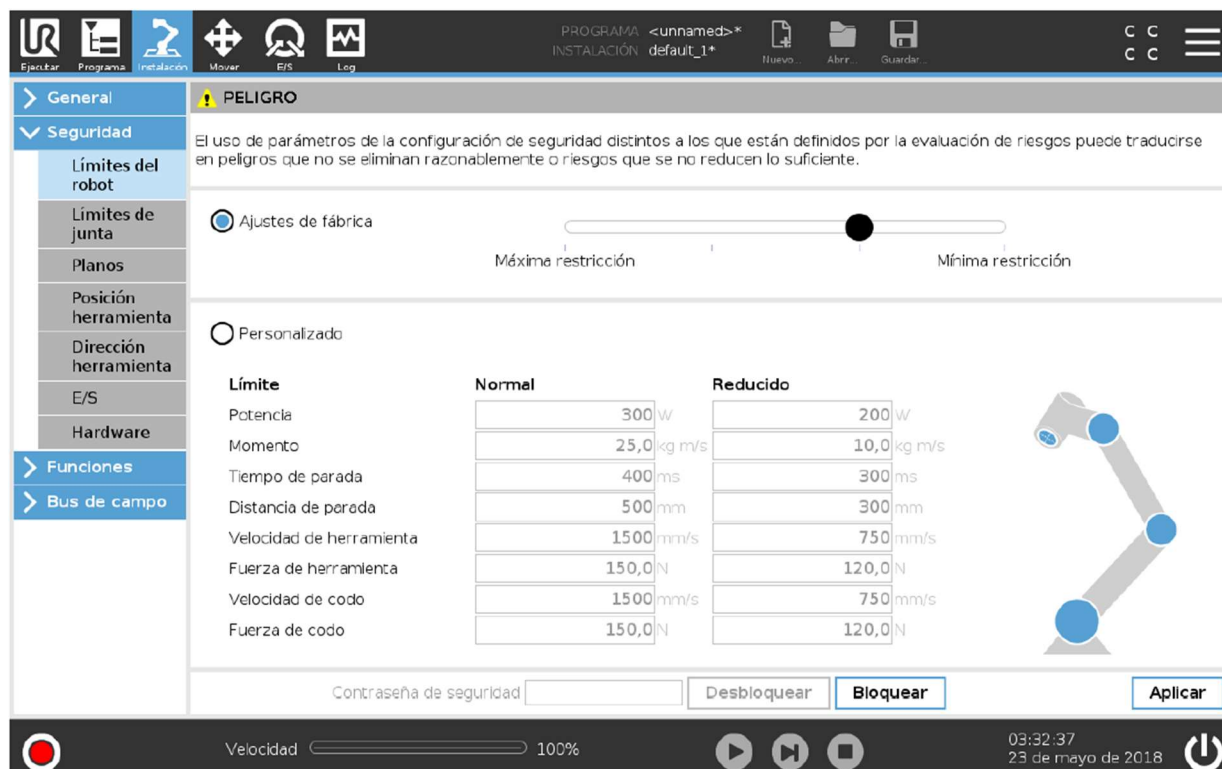


Figura 39. Captura de pantalla de software de configuración UR. Fuente Universal Robots (Universal Robots, 2020a, p. 108).

7.5 Pruebas en dinámico

En esta parte se realizan las pruebas con movimiento del sistema robot para comprobar los modos de funcionamiento de la máquina y las funciones de seguridad de la máquina. En algunas empresas se utilizan un protocolo de pruebas, que incluyen hasta la desconexión de cables relacionados con la función de seguridad y el puenteo de señales para intentar burlar las funciones de seguridad. Independientemente de los protocolos que se estime aplicar, se deben comprobar el buen funcionamiento de las paradas de emergencia instaladas en la máquina. También pruebas de buen funcionamiento de los equipos de protección como barreras inmateriales o escáner y verificar que las distancias de seguridad son correctas.

Otras pruebas que se deben realizar es que sucede si durante el funcionamiento en automáticos o manual de la instalación, se corta el suministro eléctrico o el aire simulando un corte de energía, esto debe realizarse en situaciones de riesgo como cuando la pinza está cerrada sujetando la pieza de trabajo y confirmar que después del corte no se cae.

También se deben comprobar que efectivamente los límites de recorrido de los ejes y espacios de trabajo configurados en el robot se cumplen según lo esperado, es decir si los parámetros de seguridad revisados en la parte del programa son realmente efectivos como medidas de protección.

Como la maquina en cuestión es un robot colaborativo, si este trabajo en modo de limitación de fuerza y presión, se deben medir las fuerzas de los contactos por impacto (transitorios) y por atrapamientos (cuasi-estáticos) indicados en la evaluación y todos aquellos que se consideren relevantes por riesgo de atrapamiento o impacto. Para esto se requiere tener equipos para medir tanto las fuerzas como las presiones causadas por dichos contactos como es el CoboSafe CBSF-Basic visto anteriormente y previamente debe asegurarse que estan bien calibrados para que esto no pueda inducir a errores de medida.

7.6 Explotación y mantenimiento

En esta última parte de la guía comprobación se incluyen las revisiones y pruebas que se realizan conjuntamente con el personal de producción y mantenimiento.

Se debe verificar que todas las tareas de producción, explotación, mantenimiento, ajustes y limpieza son posibles sin necesidad de acceder a una zona peligrosa o en condiciones inseguras como es el caso una intervención de mantenimiento con energía. En caso de que haya un trabajo en una zona peligrosa se ha considerado por parte del integrador realizarlo con un dispositivo a distancia o si fuese el caso sin energía. Si nada de lo anterior es posible, existen procedimientos de intervención por parte del fabricante de la máquina, como son procedimientos de trabajo en modo seguro con energía para evitar o mitigar los riesgos lo máximo posible.

La máquina debe ser entregada con todos los carteles de información y señalización de riesgos presentes en la máquina, así como pictogramas de riesgo eléctrico, atrapamiento o caída de objetos. También debe estar señalizados el uso de EPI necesarios en el puesto de trabajo.

Se debe verificar que la iluminación prevista en la maquina y en el puesto de trabajo es la adecuada y suficiente, no se crean reflejos ni sombras y es conforme según el RD 486/1997.

El puesto de trabajo y la maquina están bien diseñados siguiendo los principios de ergonomía. Los órganos de mando son claramente visibles, identificables y fuera de las zonas peligrosas.

Se deben revisar el correcto funcionamiento de los órganos de mando como son la parada normal de la máquina, la puesta en marcha, selección de modos de funcionamiento como automático y manual, y que cumplen con lo dispuesto en la directiva de máquinas.

Finalmente se debe constatar con los técnicos de mantenimiento que en los planes de mantenimiento de preventivo se han contemplado acciones relacionadas con los dispositivos de seguridad y que el frecuencial es correcto. Como también la existencia de un check previo al uso o acciones de revisión diaria por parte de los operarios de producción de los dispositivos de seguridad presentes en la instalación.

8 RESULTADOS

Para comprobar todos los requerimientos comentados en la sección de Desarrollo de este TFM, se elabora esta guía de comprobación, la cual presenta los requerimientos como una lista que debe cumplimentarse las columnas de estado y observaciones para cada ítem. En la columna de estado se debe indicar si es conforme con un OK, no conforme con un NOK, no es procedente o no aplica con un NA. En el caso de no conforme en la columna de Observaciones debe indicarse la información que detalle y explique la no conformidad para que el integrador la resuelva. Igualmente, en la columna de observaciones se pueden detallar alguna información relevante con el ítem verificado.

8.1 Guía de comprobación

A continuación, se expone la guía con su encabezado y listado de ítems a comprobar:

| Guía comprobación de requerimientos de seguridad Sistema Robot colaborativo |
|--|
| Datos del Sistema Robot |
| Nombre de la empresa: |
| Denominación del Sistema Robot: |
| Ubicación de la máquina en la empresa: |
| Integrador: |
| Fecha fabricación: |
| Equipo de revisión |
| Proyecto: |
| Robótico: |
| Mantenimiento: |
| Producción: |
| Técnico de Prevención: |
| Fecha de realización de la revisión: |

| Item | Descripción | Estado | Observaciones |
|----------|--|--------|---------------|
| 1 | Documentación | | |
| 1.1 | Declaración CE de la máquina (Sistema Robot). | | |
| 1.2 | Placa de Marcado CE de la máquina (Sistema Robot). | | |
| 1.2.1 | Placa de marcado fabricante (2006/42/CE) | | |
| 1.3 | Declaración de incorporación del robot colaborativo. | | |
| 1.4 | Manual de instrucciones del robot colaborativo (Fabricante). | | |
| 1.5 | Manual de instrucciones de la máquina. | | |
| 1.5.1 | El manual de instrucciones cumple con los artículos 1.7.4.1 y 1.7.4.2 de la directiva de máquinas. | | |
| 1.6 | Manual específico de la aplicación robótica. | | |
| 1.6.1 | Declaración que el robot es adecuado para trabajar en modo colaborativo. | | |
| 1.6.2 | Se detallan los volúmenes de trabajo y límites de recorrido. | | |
| 1.7 | Se detallan los cálculos de distancia de posición y campos de barrido de equipos electrosensibles (ISO 13855). Aportar toda la documentación técnica de los equipos utilizados como protectores. | | |
| 1.7.1 | Checksum de equipos electrosensibles como escáneres. | | |
| 1.7.2 | Estados de referencia de equipos electrosensibles como escáneres. | | |
| 1.8 | Evaluación de riesgos (ER) de la máquina (sistema robot) | | |
| 1.8.1 | La ER contiene los límites de la máquina en uso normal y el mal uso razonablemente previsible. | | |
| 1.8.2 | La ER contiene la identificación de todos los peligros que presenta la máquina. | | |
| 1.8.3 | La ER contiene la estimación de riesgos. | | |

| Item | Descripción | Estado | Observaciones |
|----------|---|--------|---------------|
| 1 | Documentación | | |
| 1.8.5 | La ER contiene información y/o procedimientos como uso de EPI, señalización, información de riesgos residual, para los riesgos que no se han podido reducir lo suficiente por dispositivos de protección. | | |
| 1.8.6 | La ER debe contener las medidas de prevención utilizadas para la reducción de riesgos. | | |
| 1.9 | Evaluación de riesgos específica de contactos (Modo limitación de fuerza y potencia) | | |
| 1.9.1 | Informe de medición de contactos. | | |
| 1.10 | Informe sistema en pdf y el fichero (.ssm). | | |
| 1.11 | Se acredita mediante un documento el Nivel de Prestaciones (PL) de las funciones de seguridad intrínsecas del robot colaborativo. | | |
| 1.12 | Fotos de Checksum de la aplicación robótica. | | |
| 2 | Revisión estática | | |
| 2.1 | La máquina está construida y se entrega de acuerdo con las medidas indicadas en la Evaluación de Riesgo. | | |
| 2.1.1 | Paradas de emergencia en cada puesto de trabajo, zona de la maquina y equipo que sea necesario. | | |
| 2.2 | Superficies de contacto, preferiblemente superiores a 1 cm ² , no presencia de aristas, bordes afilados, superficies rugosas, sobre todo en elemento final como pinza/garra. | | |
| 2.2.1 | Superficies de contacto protegidas con material deformable y/o que absorba los impactos. | | |
| 2.2 | Alrededor de robot debe haber un espacio libre mayor de 500 mm, sino debe impedirse el acceso. | | |
| 2.3 | Zona de trabajo colaborativo señalizada. | | |

| Item | Descripción | Estado | Observaciones |
|----------|---|--------|---------------|
| 2 | Revisión estática | | |
| 2.4 | Las zonas de riesgo no deben ser accesibles a las personas. | | |
| 2.5 | Pinzas neumáticas normalmente cerradas por muelle. | | |
| 2.6 | Consignación de energías para intervenir de forma segura. | | |
| 2.7 | Señalización de energía residuales. | | |
| 3 | Armario eléctrico y circuito neumático | | |
| 3.1 | En caso de autómatas de seguridad o relé programable, se incluye Checksum. | | |
| 3.2 | Las funciones de seguridad de la máquina son conformes a la Evaluación de Riesgos, están claramente identificadas y corresponden con su nivel de prestación (PL). | | |
| 4 | Programa robot | | |
| 4.1 | Limitación de fuerzas, preferiblemente 100 N. | | |
| 4.2 | Limitación de Momentos. | | |
| 4.3 | Limitación de potencia. | | |
| 4.4 | Limitación de velocidades, preferiblemente inferiores o iguales 400 mm/s. | | |
| 4.5 | Utilización de ángulos de orientación de la herramienta. | | |
| 4.6 | Uso de los planos de seguridad. | | |
| 4.7 | Las trayectorias programadas preferiblemente no deben impactar con el operario. Y en caso de que haya contacto deben ser lo menos posible. | | |
| 4.8 | Las trayectorias programadas donde haya contacto debe hacerse con las superficies más grandes y evitar aproximaciones en diagonal. | | |

| Item | Descripción | Estado | Observaciones |
|------|---|--------|---------------|
| 4 | Programa robot | | |
| 4.9 | Limitar los ángulos de cierre entre ejes para evitar los riesgos de atrapamiento. | | |
| 4.10 | Limitar la altura del elemento final del sistema robot al mínimo posible, preferiblemente inferior a 1400 mm con respecto al suelo. | | |
| 5 | Pruebas en dinámico | | |
| 5.1 | Medición de las fuerzas de los posibles contactos por impacto (transitorios) y por atrapamiento (cuasi-estáticos). En caso de superficies inferior a 1 cm ² se deben medir las presiones en esos puntos. | | |
| 5.2 | Pruebas de funcionamiento de paradas de emergencias. | | |
| 5.3 | Pruebas de funcionamiento de equipos de protección como barreras inmateriales y escáneres. | | |
| 5.4 | Pruebas de funcionamiento cortando suministro de aire y comprobar que la pieza de trabajo no cae. | | |
| 5.5 | Pruebas de funcionamiento para revisar los límites de recorrido de los ejes y espacio de trabajos. | | |
| 6 | Explotación y mantenimiento | | |
| 6.1 | Todas las tareas de producción, explotación, mantenimiento, ajustes y limpieza, son posibles realizarlas sin necesidad de acceder a una zona peligrosa o con energía (incluyendo residual). | | |
| 6.2 | En caso de hacer un trabajo en una zona peligrosa se ha considerado el uso de dispositivos a distancia o sin energía. | | |
| 6.3 | En caso de hacer un trabajo con energía se ha previsto un procedimiento de trabajo seguro. | | |
| 6.4 | están señalizados (carteles) el uso de EPI necesarios en el puesto de trabajo. Ídem para los carteles de riesgos y pictogramas. | | |

| Item | Descripción | Estado | Observaciones |
|-------------|---|---------------|----------------------|
| 6 | Explotación y mantenimiento | | |
| 6.5 | La iluminación incorporada en la máquina y en el puesto de trabajo es adecuada y suficiente, y no crea reflejos o sombras. | | |
| 6.6 | El puesto de trabajo y la máquina está bien diseñados siguiendo los principios de ergonomía. | | |
| 6.7 | Se indica en el plan de mantenimiento preventivo los dispositivos de seguridad a revisar y el frecuencial de la revisión. | | |
| 6.8 | Los órganos de mando son claramente visible, identificables y fuera de la zona peligrosa. | | |
| 6.9 | Los órganos de mando funcionan correctamente como la parada de máquina, la puesta en marcha, selector de modos automático y manual. | | |

Para seguimiento de las no conformidades de esta lista es conveniente realizar un plan de acción que indique por ítem las acciones a realizar, plazo y responsable de cada una de estas acciones. Por último, dicho plan debería ser revisado y validado por todas las partes implicadas.

9 CONCLUSIONES

La guía de comprobación elaborada da respuesta al objetivo general planteado, en esta se indican las comprobaciones a realizar en una instalación robótica colaborativa a nivel industrial. Dicha guía está estructurada en seis secciones: documentación, revisión estática, armario eléctrico y neumática, programa robot, pruebas dinámicas y explotación y mantenimiento. La parte de documentación se indican los documentos relacionados con la seguridad de la instalación que debe entregar el integrador, como son los manuales de instrucción, el marcado CE, la declaración CE, la evaluación de riesgo del sistema robot, la evaluación de riesgos de contactos para el modo de limitación de fuerza y potencia, además se debe aportar el informe sistema. Una vez realizada esta parte de la guía, se procede a realizar la parte de revisión estática, en esta se constatan todos los aspectos del sistema robot como es su integración según lo indicado en la Evaluación de Riesgo, si las medidas preventivas y funciones de seguridad están implantadas correctamente, esta incluye la revisión de la señalización de la instalación. A continuación, se hace la parte de la revisión del armario eléctrico y neumática, en esta además de verificar que el armario y la neumática cumplen con la normativa, debe comprobarse los equipos instalados relacionados con las funciones de seguridad de la máquina, estos deben cumplir con el Nivel de Prestaciones indicado en el informe sistema y la evaluación de riesgos. La parte de programa de robot está relacionada con todas las medidas de seguridad activas especificadas principalmente por la ISO/TS 15066, debe comprobarse que se han configurado y programado adecuadamente según lo indicado en la documentación y manuales de instrucciones del sistema robot. Las pruebas dinámicas son para verificar que el funcionamiento a nivel de seguridad de la máquina, se comprueban con la máquina en funcionamiento si las funciones de seguridad y medidas aplicadas protegen correctamente a las personas que trabajan en la instalación, para tal fin deben realizarse todas las pruebas pertinentes. Si el modo colaborativo es limitación fuerza y potencia se realizará la medición de los contactos indicados en la evaluación de riesgo de contactos, así como otros que se consideren necesarios. La última parte está relacionada con la explotación y mantenimiento de la máquina, en esta se verifican que todos los trabajos a realizar en la maquina son seguros, y en caso de que alguno no lo sea de confirmarse que esto no sea posible y en tal caso se debe realizar los procedimientos de trabajo o intervención en modo seguro para evitar o reducir los riesgos lo máximo posible. También se revisan lo relacionado con la iluminación del sistema robot y puesto de trabajos, la ergonomía, la señalización y cartelería de los riesgos presentes

Se cumplen con los objetivos específicos planteados, ya que en la sección de antecedentes se exponen las leyes y normativas técnicas relacionadas con un sistema robot colaborativo. Las leyes son la Directiva de Maquinas 2006/42/CE, la cual establece todos los requerimientos a nivel de seguridad que deben cumplir las maquinas en general y otra es la Directiva 2009/104/CE, esta establece las disposiciones mínimas de seguridad y salud para el uso de las máquinas en general por parte de los trabajadores. También se presentan las normas técnicas como son: Seguridad de máquina (ISO 12100), Estándares de seguridad para sistemas de

control (ISO 13849), Posicionamiento de los protectores con respecto a la velocidad de aproximación de partes del cuerpo humano (ISO 13855), Requisitos de seguridad para robots industriales (ISO 10218) y la especificación técnica ISO/TS 15066, Seguridad de robots colaborativos.

Otro objetivo específico que se cumple es la identificación de los peligros presentes en los sistemas robóticos colaborativos, una parte que son los relacionados con los sistemas robóticos se encuentran listados en el Anexo 2 de la norma técnica ISO 10218-2 y los peligros más específicos de los robots colaborativos en el artículo 4.3.2 de la ISO/TS 15066, todos estos se detallan en los Anexo 12.1 y 12.2 de este trabajo.

En relación al objetivo de conocer la metodología utilizada para la evaluación de riesgos de seguridad en aplicaciones de robot colaborativos, se encontró que el método HRN es uno de los más utilizados, el cual consiste en el producto de cuatro factores y cuyo resultado es precisamente el HRN y dependiendo de su valor se realizan la planificación de las medidas, mientras este número sea más alto el plazo de las medidas es más corto.

Finalmente, el objetivo de determinar las medidas preventivas de seguridad en aplicaciones de robots colaborativos se encontró que la especificación técnica ISO/TS 15066 aporta un listado de medidas pasivas y activas para este tipo de instalaciones.

10 FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Este trabajo podría servir de punto de partida o aportar ideas para futuras líneas de investigación sobre todo relacionadas con la seguridad de máquinas, por lo tanto, se proponen las siguientes:

- Realizar otras guías de comprobación de requerimientos de seguridad para otras máquinas especiales como centros de mecanizado, robots industriales convencionales, manutenciones, almacenes inteligentes y prensas.
- Realizar la guía de comprobación de aplicaciones colaborativas cuando se publique la nueva normativa relacionada con la seguridad de robots colaborativos.
- Realizar la guía completa de comprobación de requerimientos de seguridad para máquinas especiales en general.
- Realizar un método de evaluación de riesgos de contacto para aplicaciones colaborativas.

11 BIBLIOGRAFÍA

- ABB. (2021). *YuMi takes over THT assembly* | ABB. <https://new.abb.com/news/detail/73577/cstmr-yumi-takes-over-tht-assembly>
- Asociación Española de Normalización y Certificación. (2011). *Seguridad de las máquinas. Posicionamiento de los protectores con respecto a la velocidad de partes del cuerpo humano (ISO 13855)*. <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0048658>
- Asociación Española de Normalización y Certificación. (2012). *Robots y dispositivos robóticos. Requisitos de seguridad para robots industriales. Parte 1: Robots. (ISO 10218-1)*. <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0049289>
- Asociación Española de Normalización y Certificación. (2013). *Seguridad de las máquinas. Partes de los sistemas de mando relativas a la seguridad. Parte 2: Validación (ISO 13849-2)*. <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0051390>
- Baños, G. (2019). *La revolución del robot en el proceso de pulido y abrillantado*. <https://www.universal-robots.comrobot-pulido-y-abrillantado>
- Brady. (2022). *Solutions for hazardous energy control. Lockout / Tagout*. https://d37iyw84027v1q.cloudfront.net/Common/LockoutTagout_Catalogue_Europe_English.pdf
- Bruch, G. (2022). *Case study: Gluing (dispensing) with cobots incl. small batch production*. Robotics-Insider.Com. <https://mrk-blog.de/en/fallstudie-kleben-dispensing-mit-cobots-incl-kleinserie/>
- Cade Cobots. (2022). *Carga y descarga de piezas con robots colaborativos*. <https://cadecobots.com/carga-y-descarga-de-piezas-con-robots-colaborativos/>

Covadel Rotulación. (s. f.). *Tu Tienda de Placas Industriales y Placas de Características*. Todo en Placas Grabadas - Covadel Rotulación. Recuperado 14 de mayo de 2023, de https://placasgrabadas.es/placas_industriales.html

Directiva 2006/42/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 17 de mayo de 2006, relativa a las máquinas y por la que se modifica la Directiva 95/16/CE (refundición), 24 a 86 (63 págs) (2006). <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=DOUE-L-2006-81063>

Directiva 2009/104/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 16 de septiembre de 2009, relativa a las disposiciones mínimas de seguridad y de salud para la utilización por los trabajadores en el trabajo de los equipos de trabajo (segunda Directiva específica con arreglo al artículo 16, apartado 1, de la Directiva 89/391/CEE), 5 a 19 (15 págs) (2009). <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=DOUE-L-2009-81911>

Federación Empresarial Metalúrgica Valenciana [FEMEVAL], FEVAMA, AIDIMME, UNIMAT PREVENCIÓN, UNION DE MUTUAS, VALMETAL, & GENERALITAT DE VALENCIA. (2019). *ROBOTS INDUSTRIALES y COBOTS en PREVENCIÓN DE RIESGOS LABORALES*. https://www.femeval.es/detalle_noticia/dynacontent/guia-de-robots-industriales-y-cobots-en-prevencion-de-riesgos-laborales.html

Görnemann, O. (2020). *SEGURIDAD DE LOS ROBOTS COLABORATIVOS*. https://www.osalan.euskadi.eus/contenidos/informacion/ponencias_jt170720_cursoverano/es_def/adjuntos/ponencia_jt170720_otto_goernemann.pdf

GTE Industrieelektronik GmbH. (2021). *CBSF-Basic. Measurement device for a simplified measuring method for the testing of transient and quasi-static forces on collaborative robots*. https://www.gte.de/media/2022/02/325-2811-001_en32_flyer_cbsf-basic.pdf

IFA. (2023). *IFA - Practical aids: Software-Assistent SISTEMA: Safety Integrity - Software Tool for the Evaluation of Machine Applications*. <https://www.dguv.de/ifa/praxishilfen/practical-solutions-machine-safety/software-sistema/index.jsp>

- INSHT. (1989). *NTP 235: Medidas de seguridad en máquinas: Criterios de selección*.
https://www.insst.es/documents/94886/326853/ntp_235.pdf/871c5f1b-d6e2-45d4-be90-eb713d477092?version=1.1&t=1683189750595
- INSHT. (2012). *NTP 946 Máquinas: Diseño de las partes de los sistemas de mando relativas a la seguridad*. <https://www.insst.es/documents/94886/326879/ntp-946+w.pdf/7f82c724-083b-4ccb-8330-015824c374dd>
- International Organization for Standardization. (2010). *Safety of machinery—General principles for design—Risk assessment and risk reduction (ISO 12100)*.
<https://www.iso.org/standard/51528.html>
- International Organization for Standardization. (2011). *Robots and robotic devices—Safety requirements for industrial robots—Part 2: Robot systems and integration (ISO 10218-2)*. <https://www.iso.org/standard/41571.html>
- International Organization for Standardization. (2016a). *Robots and robotic devices—Collaborative robots (ISO/TS 15066)*. <https://www.iso.org/standard/62996.html>
- International Organization for Standardization. (2016b). *Sécurité des machines—Parties des systèmes de commande relatives à la sécurité—Partie 1: Principes généraux de conception (ISO 13849-1)*. <https://www.boutique.afnor.org/en-gb/standard/nf-en-iso-138491/safety-of-machinery-safetyrelated-parts-of-control-systems-part-1-general-p/fa175874/46913>
- MG Electricidad. (2022). *Cuadro eléctrico industrial: Funciones, componentes, precio...* MG Electricidad. <https://www.mgelectricidad.es/cuadro-electrico-industrial/>
- Real Decreto 1644/2008, de 10 de octubre, por el que se establecen las normas para la comercialización y puesta en servicio de las máquinas., Pub. L. No. Real Decreto 1644/2008, 62 (2008). <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2008-16387>
- Neobotik. (2021). *Pick and Place → Qué es y Cómo funciona*. Neobotik.
<https://www.neobotik.com/pick-and-place/>

- Pavón, V. (2020, mayo 18). *Robótica colaborativa destinada a proyectos de investigación científica*. <https://blog.universal-robots.com/es/robotica-colaborativa-destinada-a-proyectos-de-investigacion-cientifica>
- Pelegrí, J. (2019a). *Robots Colaborativos en el Sector Alimentario | Universal Robots*. <https://www.universal-robots.com/es/blog/robots-colaborativos-sector-alimentario/>
- Pelegrí, J. (2019b). *Universal Robots - Cobots en la industria alimentaria: Mayor productividad e higiene en los procesos*. <https://www.universal-robots.com/es/blog/cobots-en-la-industria-alimentaria/>
- ROBOTIQ. (2016). *Risk assessment Excel Template*. <https://blog.robotiq.com/risk-assessment-excel-template>
- SHP. (2015a, junio 25). *Throwback Thursday: Risk Estimation*. SHP - Health and Safety News, Legislation, PPE, CPD and Resources. <https://www.shponline.co.uk/blog/throwback-thursday-risk-estimation/>
- SHP, S. & H. (2015b, junio 26). *Risk Estimation: 25 years on*. SHP - Health and Safety News, Legislation, PPE, CPD and Resources. <https://www.shponline.co.uk/blog/risk-estimation-25-years/>
- SICK. (2022). *Seguridad en las aplicaciones de robots colaborativos*. <https://www.sick.com/mx/es/sick-sensor-blog/seguridad-en-las-aplicaciones-de-robots-colaborativos/w/blog-safety-collaborative-robot-applications/>
- SMC. (s. f.). *Electroválvula de 3 vías / Válvula para descarga de presión con detección de posición de la válvula principal*. https://static.smc.eu/pdf/VP-VG-B_ES.pdf
- Soler Puig, C. (2018). *Diseño y fabricación inteligente_Módulo3.7_Robótica colaborativa*. https://openaccess.uoc.edu/bitstream/10609/144051/17/Diseno_y_fabricacion_inteligente_Modulo3.7_Robotica_colaborativa.pdf
- Strategic Market Research. (2022). *Collaborative Robots Market Global Industry Trends, 2030*. <https://www.strategicmarketresearch.com/market-report/collaborative-robots-market>

- Universal Robots. (2020a). *Universal Robots e-Series User Manual*. https://s3-eu-west-1.amazonaws.com/ur-support-site/77195/99405_UR10e_User_Manual_en_Global.pdf
- Universal Robots. (2019). *When Inspection is Mission-Critical, Get a UR Cobot*. <https://www.universal-robots.com/blog/when-inspection-is-mission-critical-get-a-cobot/>
- Universal Robots. (2020b). *ATORNILLADO COLABORATIVO*. <https://www.universal-robots.com/mx/blog/atornillado-colaborativo/>
- YASKAWA. (2021). *Aplicaciones Colaborativas*. https://www.yaskawa.es/Casos%2520de%2520%25C3%2589xito/applications/application/aplicaciones-colaborativas_a11167
- YASKAWA. (2023). *Cobots*. <https://www.yaskawa.es/productos/robots/cobots>
- ZACOBRIA. (s. f.). *Safety checksum CCCC – UR Forum-Help-Q&A*. Recuperado 14 de mayo de 2023, de <https://www.zacobria.com/universal-robots-knowledge-base-tech-support-forum-hints-tips-cb2-cb3/index.php/safety-checksum-cccc/>
- Zimmer Group. (s. f.). *HRC-03*. Recuperado 14 de mayo de 2023, de <https://www.zimmer-group.com/es/tecnologias-y-componentes/componentes/tecnologia-de-manipulacion/pinzas/hrc/colaborativa/pinzas-paralelas/hrc-03>

12 ANEXOS

En esta sección se incluyen partes de documentos que son copia fiel del autor u organización, en el caso de documentos en inglés son traducción libre, los cuales sirven para complementar información de utilidad a los objetivos del presente trabajo.

12.1 Lista de peligros

A continuación, se exponen la lista de peligros que se encuentran en el Anexo A la norma ISO 10218-2 (ISO, 2011, p. 44), estos peligros están asociados tanto al robot como al sistema robótico.

12.1.1 Peligros mecánicos (corresponde en la norma ISO 10218-2 al Número 1 de la Tabla A.1)

- Movimientos (normales o imprevistos) de cualquier parte del brazo robótico, elemento terminal, ejes externos y partes móviles del robot.
- Movimiento o rotación de una herramienta cortante en el elemento terminal o en ejes externos, pieza que se está manipulando y equipo asociado.
- Movimiento de rotación de cualquier eje de robot.
- Materiales y productos que se caen o expulsan.
- Fallo del elemento terminal (separación).
- Ropa suelta, cabello largo.
- Entre el brazo robótico y cualquier objeto fijo.
- Entre el elemento terminal y cualquier objeto fijo.
- Entre accesorios de sujeción, de transporte y utilitarios.
- Imposibilidad de salir de la celda del robot (a través de la puerta de la celda) para un operador atrapado en modo automático.
- Movimiento involuntario de plantillas o pinzas.
- Liberación no intencionada de la herramienta.
- Movimiento involuntario de máquinas o partes de la instalación robótica durante las operaciones de manipulación.
- Movimiento involuntario o activación del elemento final o equipo asociado (incluidos ejes externos controlados por el robot.)
- Liberación imprevista de energía potencial acumulada.

12.1.2 Peligros eléctricos (corresponde en la norma ISO 10218-2 al Número 2 de la Tabla A.1)

- Contacto con partes activas o conexiones (armario eléctrico, cajas de terminales, paneles de control en la máquina).
- Confusión de varios voltajes dentro de un sistema, armario eléctrico y terminales, es decir, potencia de accionamiento, potencia de control (24 V frente a 220 V).

- Contacto con componentes discretos en los circuitos eléctricos (electrónicos), es decir, condensadores.
- Exposición al arco eléctrico.
- Procesos en los que se utilice alto voltaje o alta frecuencia, es decir, pintura electrostática, calentamiento por inducción.
- Aplicaciones de soldadura con alto voltaje.

12.1.3 Peligros térmicos (corresponde en la norma ISO 10218-2 al Número 3 de la Tabla A.1)

- Superficies calientes asociadas con el elemento terminal de trabajo, su equipamiento asociado o pieza de trabajo (por ejemplo, antorchas de soldadura, materiales calientes en prensas de forja, moldeo por inyección, rectificado y desbarbado)
- Superficies u objetos fríos (procesos criogénicos).
- Atmósfera explosiva causada por el proceso, es decir, pintura (partículas atomizadas, pintura en polvo), disolventes inflamables, polvo de molienda y trituración.
- Temperaturas extremas necesarias en el proceso (materiales fundidos, hornos para cocinar o calentar (autoclaves), congelador o enfriadores, etc.)
- Materiales inflamables (dentro de sistemas colectores de polvo, tanques de limpieza, aplicadores de selladores).

12.1.4 Peligros provocados por ruido (corresponde en la norma ISO 10218-2 al Número 4 de la Tabla A.1)

- Aplicaciones específicas que son fuentes de alto ruido (por ejemplo, un cortador de chorro de agua, prensas de estampación, bombas y válvulas, operaciones de eliminación de metales)
- Nivel de ruido que impide escuchar o comprender las señales de advertencia de peligro audibles, incluida la incapacidad de las personas para coordinar sus acciones a través de una conversación normal

12.1.5 Peligros por vibraciones (corresponde en la norma ISO 10218-2 al Número 5 de la Tabla A.1)

- Contacto directo con la fuente.
- Aflojamiento de conexiones, sujetadores.
- Desalineación de componentes o piezas.

12.1.6 Peligros por radiación (corresponde en la norma ISO 10218-2 al Número 6 de la Tabla A.1)

- Interferencia EMF con el funcionamiento correcto del sistema robótico
- Expuesto a radiación relacionada con el proceso, es decir, soldadura por arco, láser.

12.1.7 Peligros debidos a sustancias y materiales (corresponde en la norma ISO 10218-2 al Número 7 de la Tabla A.1)

- Contacto con componentes cubiertos de fluidos nocivos
- Fallos de componentes mecánicos y eléctricos
- Humos corrosivos y polvo

12.1.8 Peligros ergonómicos (corresponde en la norma ISO 10218-2 al Número 8 de la Tabla A.1)

- Consola de guiado mal diseñada, pantalla táctil HMI o panel de operador demasiado lejos o alto.
- Puesto de carga/descarga mal diseñado (por ejemplo, mucha distancia entre la ubicación de la caja de componentes y el área de carga/descarga)
- Dispositivos validación mal diseñados
- Ubicación inadecuada o mala identificación de los controles (por ejemplo, difícil de alcanzar)
- Ubicación inadecuada de los componentes que requieren acceso (solución de problemas, reparación, ajuste)
- Disminución de posibilidades de reconocer peligros y situaciones de peligro debido a una iluminación de la zona inadecuada o bloqueada.

12.1.9 Peligros asociados con el entorno en la cual funciona la máquina (corresponde en la norma ISO 10218-2 al Número 9 de la Tabla A.1)

- Instalaciones en zonas sísmicas
- Interferencia electromagnética o sobretensiones en la fuente de energía
- Humedad
- Temperatura

12.1.10 Peligros asociados a combinaciones de peligros (corresponde en la norma ISO 10218-2 al Número 10 de la Tabla A.1)

- Sistema robótico dirigido a iniciar por una persona, pero esta acción no es esperada por otra persona.
- Peligros encontrados debido a múltiples fallos.
- Mala interpretación de problemas que pueden generar acciones incorrectas o innecesarias.
- La acción aumenta la gravedad del daño, es decir, al evitar un borde afilado, el contacto se realiza con una superficie caliente en su lugar.
- Liberación involuntaria de dispositivos de retención que permiten el movimiento bajo fuerzas residuales (inercia, gravedad, resorte / medios de almacenamiento de energía)
- Fallo de un dispositivo de protección para funcionar como se espera

12.2 Lista de peligros mínimos de la ISO/TS 15066

A continuación, se exponen una lista de peligros mínimos de la especificación técnica ISO/TS 15066 de robots colaborativos que se encuentran en su artículo 4.3.2 (ISO, 2016a, p. 4).

12.2.1 Peligros relacionados con los robots (corresponden a 4.3.2.a en la ISO/TS 15066)

- Características del robot (por ejemplo, carga, velocidad, fuerza, impulso, par, potencia, geometría, superficie, forma y material).
- Contactos cuasi-estáticos con el robot.
- Ubicación del operador con respecto a la proximidad del robot (por ejemplo, trabajando debajo del robot).

12.2.2 Peligros relacionados con el sistema robótico (corresponden a 4.3.2.b en la ISO/TS 15066)

- Peligros del elemento terminal y de la pieza de trabajo, incluida la falta de diseño ergonómico, bordes afilados, pérdida de la pieza de trabajo, protuberancias, trabajo con cambiador de herramientas.
- Movimiento y ubicación del operador con respecto al posicionamiento de las piezas, la proximidad a objetos fijos como estructuras de la instalación y a los peligros asociados a dichos elementos.
- Diseño de accesorios, colocación y operación de pinzas y otros peligros relacionados con estos.
- Los contactos transitorios o cuasi-estáticos con las partes del cuerpo del operador que podría verse afectado.
- El diseño y la ubicación de cualquier dispositivo de guía de robot controlado manualmente (por ejemplo, accesibilidad, ergonómico, posible uso indebido, posible confusión de los indicadores de control y estado, etc.).
- La influencia y los efectos del entorno (por ejemplo, cuando se ha retirado una cubierta protectora desde una máquina adyacente, proximidad de una cortadora láser).

12.2.3 Peligros relacionados con la aplicación (corresponden a 4.3.2.c en la ISO/TS 15066)

- Peligros específicos del proceso (por ejemplo, temperatura, piezas expulsadas, salpicaduras de soldadura);
- Limitaciones causadas por el uso requerido de equipos de protección personal;
- Deficiencia en el diseño ergonómico (por ejemplo, lo que resulta en pérdida de atención, funcionamiento incorrecto).

12.3 Medidas preventivas

El contenido de las siguientes tablas se copió de la guía de Robots Industriales y Cobots en Prevención de Riesgos Laborales de FEMEVAL, otras empresas de la Comunidad Valenciana y la Generalitat Valenciana (FEMEVAL et al., 2019, p. 24), en estas se exponen los riesgos y medidas preventivas a adoptar.

| Seguridad | |
|---|--|
| Riesgos | Medidas preventivas |
| <p>Contactos mecánicos por acceso a partes peligrosas durante funcionamiento automático.</p> | <p>Impedir el acceso a zona peligrosa de la celda robótica en movimiento (robot, brazo, transmisiones, terminal, ejes, etc.) mediante:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Protección por resguardos de dimensiones y distancia adecuados. • Puertas de acceso con enclavamiento y bloqueo que detengan movimientos a la apertura o retirada. • Dispositivos electrosensibles en mesas giratorias o accesos abiertos de materiales que detengan el equipo al interceptarse. • Parada de emergencia |
| <p>Contactos mecánicos durante el ajuste y/o programación o pruebas del robot (protecciones pueden estar abiertas o inefectivas).</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Restringir los trabajos a personal formado y especializado. • Facilitar las instrucciones de seguridad. • Utilizar el modo manual de velocidad reducida en ajuste y programación. • Realizar pruebas en modo manual de alta velocidad con tránsito. • Utilizar interruptor habilitador bloqueable o consola con código. • Garantizar posición segura para cada persona (y puesto de mando). • Controlar trayectorias de robots para evitar colisiones. • Uso de EPI (gafas, calzado de protección). |

| Seguridad | |
|---|--|
| Riesgos | Medidas preventivas |
| <p>Contactos mecánicos durante tareas de limpieza o mantenimiento, por arranque intempestivo.</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Restringir los trabajos a personal formado y capacitado. • Implantar procedimiento de consignación: bloqueo de energías (eléctrica, hidráulica, aire comprimido, etc.), y señalización. • Garantizar visibilidad desde zonas de puesta en marcha. • Utilizar órganos de puesta en marcha y rearme contra accionamiento involuntario y que no sean accesibles desde el interior del recinto. • Disponer sistemas que eviten rearmes intempestivos al cerrar puertas. • Disponer de parada de emergencia. |
| <p>Contactos mecánicos por robot que excede el área restringida: impactos con resguardos, alcance encima de vallado, pudiendo alcanzar zonas del exterior ocupadas.</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Limitar el alcance (extensión y giro de ejes) del robot por dispositivos electromecánicos, finales de carrera, etc. • Garantizar resguardos resistentes a impactos. • Programar mediante software una zona de seguridad, espacio límite del movimiento del robot, en espacio restringido. |
| <p>Contactos mecánicos durante el funcionamiento colaborativo.</p> | <p>Según la evaluación de riesgos, el integrador podrá seleccionar, para cada aplicación robótica, una o varias funciones de seguridad que garanticen que no habrá contacto o que éste no causará daño:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Parada segura • Limitación de fuerza y potencia • Guiado manual • Control de velocidad y separación <p>En caso necesario, combinar estas funciones con sistemas de seguridad adicionales (resguardos, enclavamiento y bloqueo).</p> |

| Seguridad | |
|--|---|
| Riesgos | Medidas preventivas |
| Proyecciones de materiales del proceso (partículas, polvo, chispas, salpicaduras, materiales o piezas, etc.). | <ul style="list-style-type: none"> • Disponer resguardos de protección resistentes. • Utilizar EPI (gafas de seguridad, ropa, calzado de seguridad, etc.). • Disponer sistemas de extracción o ventilación general o localizada. |
| Riesgos térmicos (quemaduras por contacto, atmósfera inflamable o explosiva por disolventes, polvo metálico, etc.). | <p>Impedir acceso a zonas con superficies calientes:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Resguardos fijos o móviles con dispositivos de protección. • Proteger partes calientes de superficies al alcance. • Sistemas de control de llama en zonas proceso. |
| Riesgos eléctricos (contacto con partes activas, quemaduras por arco eléctrico, electrocución) durante el mantenimiento (elementos activos mal aislados, circuitería, derivaciones eléctricas, condensadores, confusión voltajes, soldadura altos voltajes, etc.). | <ul style="list-style-type: none"> • Utilizar equipos y componentes bajo normas de seguridad eléctrica. • Dotar de sistemas de protección de partes activas y derivaciones. • Realización de inspección y mantenimiento, resistencia del sistema, resistencia de aislamiento. <p>En trabajos sin tensión:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Restringir trabajos a personal formado y capacitado. • Implantar procedimiento de trabajo sin tensión: desconexión eléctrica, bloqueos interruptores, verificación y señalización de trabajos. • Formación personal de mantenimiento. <p>En trabajos con tensión:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Restringir trabajos a personal cualificado en riesgo eléctrico. • Facilitar instrucciones específicas de trabajo. • Utilizar EPI aislante (guantes, pantallas, calzado aislante, etc.). • Utilizar equipos aislantes (protectores, alfombras, banquetas, etc.). |

| Higiene | |
|--|---|
| Riesgos | Medidas preventivas |
| Exposición a vibraciones (conexiones, cierres, paradas no deseadas o expulsiones de componentes) o durante el guiado manual. | <ul style="list-style-type: none"> • Realizar mediciones de vibraciones estableciendo medidas técnicas y organizativas, según los resultados. • Disponer de sistema de absorción de vibraciones en empuñaduras para guiado manual. |
| Exposición a radiaciones (ionizantes y no ionizantes). | <ul style="list-style-type: none"> • Realizar mediciones de radiaciones estableciendo medidas técnicas y organizativas, según los resultados. • Disponer pantallas de protección perimetral. • Uso de EPI adecuados en proximidad: gafas/ pantalla, ropa. |
| Presencia de productos del procesos peligrosos para la salud (pintura, soldadura, trituración, polvo, etc.). | <ul style="list-style-type: none"> • Atender las instrucciones de las fichas de datos de seguridad. • Establecer protocolos de manipulación de estos productos, restringidos a personal capacitado y autorizado. • Disponer sistemas de extracción general o localizada. • Mantener envases etiquetados y almacenados según compatibilidades. • Realizar mediciones higiénicas, estableciendo medidas técnicas y organizativas, según los resultados. • Uso de EPI adecuados según se indique en la ficha de seguridad (mascarilla, gafas, guantes...). • Disponer de adecuadas instalaciones sanitarias (lavabos, duchas, vestuarios, taquillas). |
| Exposición al ruido propio del proceso. | <ul style="list-style-type: none"> • Realizar mediciones de ruido estableciendo medidas técnicas y organizativas, según los resultados. • Uso de EPI adecuados: protección auditiva. |
| Exposición a campos electromagnéticos. | <ul style="list-style-type: none"> • Recabar datos de emisión de equipos (soldadura, alto voltaje). • Realizar mediciones de campos electromagnéticos y establecer medidas técnicas y organizativas, según los resultados. |

| Ergonomía / psicología | |
|---|---|
| Riesgos | Medidas preventivas |
| Movimientos repetitivos del sistema mano-brazo, manipulación de piezas, accionamientos, etc. | <ul style="list-style-type: none"> • Realizar estudios ergonómicos específicos. • Realizar un diseño ergonómico de la aplicación y tareas del puesto: ciclos, velocidad, pesos, dimensiones y posicionamiento de materiales, etc. • Establecer medidas organizativas (rotación entre tareas, pausas, etc.). • Realizar ejercicios de calentamiento previo a la actividad. |
| Sobreesfuerzos, en la manipulación manual de cargas, durante la carga y descarga de piezas, etc. | <ul style="list-style-type: none"> • Realizar estudios ergonómicos específicos. • Establecer pausas en el trabajo para facilitar la recuperación muscular. • Respetar los límites de carga estipulados. • Emplear, siempre que sea posible, medios mecánicos para el manejo de cargas. |
| Posturas forzadas durante el mantenimiento, posición de reposo en fases de espera, etc. en el accionamiento de mandos y controles. Cambios por reducción de libertad de movimiento, limitaciones del espacio de trabajo, no poder adoptar las posturas y posiciones habituales. | <ul style="list-style-type: none"> • Realizar estudios ergonómicos específicos. • Diseñar áreas y tareas del puesto con criterios ergonómicos: altura de trabajo en zona de los codos, algo superior para tareas ligeras o precisión e inferior para tareas pesadas. Limitar distancias y alcances. • Dotar de asientos o apoyos a la persona usuaria para tareas continuadas. • Diseñar mandos y dispositivos con criterios ergonómicos. |

| Ergonomía / psicología | |
|--|--|
| Riesgos | Medidas preventivas |
| <p>Riesgos psicosociales relacionados con la interacción humano robot:</p> <ul style="list-style-type: none"> · Rechazo de la tecnología robótica. · Sentimiento de dependencia, pérdida de autonomía e identidad. · Cambios de organización del trabajo, aumento del ritmo, reducción de los descansos, etc. · Carga mental por el aumento de las exigencias de producción (plazos, cantidad, calidad). | <ul style="list-style-type: none"> • Realizar estudios de puestos, anticipando los cambios en el trabajo de las personas, especialmente en la organización del trabajo. • Gestionar el cambio de manera global y participativa, desde el principio y analizando los riesgos asociados. • Prestar atención a factores que inciden en la carga mental y riesgos psicosociales (ritmo de trabajo, tiempos de parada, autonomía). • Vigilar posibles repercusiones sobre la experiencia del personal (cambios, pérdida de conocimientos, etc.). • Realizar formación continua del personal. |