



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH
Escola d'Enginyeria de Barcelona Est

TRABAJO FINAL DEL GRADO

Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática

**ESTUDIO DE NORMATIVAS DE SEGURIDAD EN ROBÓTICA
INDUSTRIAL Y SU APLICACIÓN A UNA ESTACIÓN
ROBOTIZADA DE UN LABORATORIO DOCENTE.**



Memoria y Anexos

Autor: Bryan Arturo Pinzón Hernández
Director: Sebastián Tornil Sin
Convocatoria: Junio 2022

*“La educación es el gran motor del desarrollo personal.
Es el arma más poderosa para cambiar el mundo.”*

Nelson Mandela

Resumen

El presente proyecto tiene la finalidad de abarcar el tema de la seguridad en la robótica industrial. Principalmente, se tratará la síntesis de la normativa necesaria para el diseño del sistema de seguridad del robot SCARA "RH-3FH5515-D1-S15", que se encuentra en el laboratorio de robótica A5.4 de la EEBE. Asimismo, se planteará un diseño de seguridad empleando la mayor cantidad de dispositivos posibles para que el sistema cumpla con dos objetivos: El primero de ellos consiste en velar por la seguridad de las personas y el segundo es ser de utilidad como material didáctico para que los estudiantes entiendan mejor los conceptos de seguridad industrial. También se explicará el proceso de programación y montaje del sistema de seguridad utilizando los recursos disponibles en el laboratorio de robótica. Por último, este trabajo de final de grado se enfocará como guía para realizar futuros trabajos relacionados con la seguridad en la robótica industrial.

Resum

Aquest projecte té la finalitat de tractar el tema de la seguretat en la robòtica industrial. Principalment, es farà la síntesi de la normativa necessària per al disseny del sistema de seguretat del robot SCARA "RH-3FH5515-D1-S15", que es troba al laboratori de robòtica A5.4 de l'EEBE. Així mateix, es plantejarà un disseny de seguretat fent servir la quantitat més gran de dispositius possibles perquè el sistema compleixi amb dos objectius: El primer objectiu és vetllar per la seguretat de les persones i el segon és servir com a material didàctic perquè els estudiants entenguin millor els conceptes de seguretat industrial. També s'explicarà el procés de programació i muntatge del sistema de seguretat utilitzant els recursos disponibles del laboratori de robòtica. Finalment, aquest treball de fi de grau d'enginyeria electrònica industrial i automàtica s'enfocarà com a guia per a fer futurs treballs referents a la seguretat en la robòtica industrial.

Abstract

The purpose of this project is to cover the topic of safety in industrial robotics. Primarily, it will address the necessary regulations for the design of the safety system of the SCARA robot “RH-3FH5515-D1-S15”, located in the robotics laboratory A5.4 of the EEBE. Also, a safety design will be proposed using as many devices as possible so that the system meets two objectives: The first is to ensure the safety of people and the second is to be useful as teaching material for students to better understand the concepts of industrial safety. It will also explain the process of programming and assembling using the resources available in the robotics laboratory. Finally, this final degree project will be a guide for future work related to safety in industrial robotics.

Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer a mis padres y familia porque a pesar de la distancia siempre han estado ahí para apoyarme en todo. También, a mis amigos por haber estado ahí estos últimos años en las buenas y en las malas. Sin su apoyo hubiera sido difícil haber superado los malos tiempos que se han presentado.

Por otro lado, me gustaría agradecer a mi profesor y director del trabajo, Sebastián Tornil, que me ha dado la motivación para aventurarme a aprender cosas nuevas y poner en práctica conceptos que pensaba no tenía. Adicionalmente, le quiero agradecer la confianza que ha depositado en mí y la ayuda a la hora de solucionar los problemas que se han ido presentando durante el desarrollo de este trabajo.

Finalmente, me hace de corazón agradecer a todos los profesores que he tenido en mi transcurso como estudiante, incluyendo aquellos fuera de la universidad. Gracias a ellos me he podido formar no solo como profesional, sino como persona. Me llevaré los mejores recuerdos de muchos de ellos y espero algún día llegar a tener sus habilidades y conocimientos.

Glosario

SCARA	Selective Compliant Articulated Robot Arm
PLC	Programmable Logic Controller
RIVC	Asignatura de Robótica Industrial y Visión por Computador
ISA	Asignatura de Integración de Sistemas Automáticos
SICIEIA	Asignatura de Sistema de Información y Comunicación Industrial
EEBE	Escola d'Enginyeria de Barcelona Est
UE	Unión Europea
ISO	Organización Internacional de Normalización
AENOR	Asociación Española de Normalización y Certificación
PDI	Personal Docente e Investigador
PAS	Personal de administración y servicios
UPC	Universitat politècnica de Catalunya
EN	del alemán "Europäische Norm" (Norma Europea)
UNE	Asociación Española de Normalización
IEC	International Electrotechnical Commission
Watchdog timer	En electrónica es temporizador interno de la unidad de control, encargado de mantener la seguridad en el sistema para evitar fallos o estados descontrolados.
Interruptor diferencial	Dispositivo electromagnético empleado para proteger a las personas de posibles fugas de corriente
AC	Corriente Alterna
DC	Corriente Continua
Biestable	Circuito que tiene dos estados y es capaz de almacenar información. Se controla con entradas de control.
BOOL	Tipo de dato con dos posibles estados, normalmente verdadero o falso.
Relé	Dispositivo electromagnético que por medio de una bobina es capaz de cerrar y abrir contactos de un circuito aislado.
Layout	Hace referencia a la manera en la que están distribuidos los elementos de algún sistema.

Tabla de figuras

FIGURA 1 DESGLOSE DEL SIGNIFICADO DE LAS NORMAS UNE-EN ISO (FUENTE PROPIA)	5
FIGURA 2 PROCESO DE EVALUACIÓN DE RIESGOS ISO 12100:2010 (FUENTE WEB [8])	9
FIGURA 3 APLICACIÓN DE LA ISO 12100 (FUENTE OMRON [9])	12
FIGURA 4 EJEMPLO DE ESPACIOS DE SEGURIDAD(SALVAGUARDIA), RESTRINGIDO Y MÁXIMO (FUENTE MITSUBISHI [11])	14
FIGURA 5 DETERMINACIÓN DEL NIVEL PLR NECESARIO SEGÚN UNE-EN ISO 13849-1:2016 (FUENTE OMRON [15])	21
FIGURA 6 ARQUITECTURA DE CATEGORÍA 1 DE SRP/CS (FUENTE NORMA [14])	21
FIGURA 7 EVALUACIÓN DEL PL PARA SRP/CS (FUENTE OMRON [15])	23
FIGURA 8 ALCANCE POR ENCIMA DE LA ZONA DE DETECCIÓN VERTICAL DE UN EQUIPO DE PROTECCIÓN ELECTROSENSIBLE (FUENTE [13])	27
FIGURA 9 COMPONENTES DEL SISTEMA ROBÓTICO CON EL SCARA EN EL LABORATORIO A5.4 (FUENTE RIVC P1 [16])	30
FIGURA 10 ESPACIO DE TRABAJO Y DIMENSIONES DEL ROBOT. (FUENTE MITSUBISHI [17])	32
FIGURA 11 ELEMENTO TERMINAL (DERECHA) Y GRADOS DE LIBERTAD DE ESTE J3 Y J4 (IZQUIERDA). (FUENTE PROPIA)	32
FIGURA 12 ARTICULACIÓN J1 Y J2 DEL SCARA. (FUENTE PROPIA)	33
FIGURA 13 LIMITACIÓN POR DEFECTO DEL MOVIMIENTO DE LAS ARTICULACIONES DEL SCARA. (FUENTE PROPIA)	33
FIGURA 14 POSIBLE COLISIÓN ENTRE EL SCARA Y EL ORDENADOR SI SOLO SE LIMITA J1 HASTA -90º. (FUENTE PROPIA)	34
FIGURA 15 USO DEL SCARA EN UNA SECCIÓN DE PRÁCTICAS (FUENTE PROPIA)	35
FIGURA 16 NUEVA UBICACIÓN DEL CONTROLADOR DEL SCARA (FUENTE PROPIA)	36
FIGURA 17 SISTEMA ROBÓTICO CON ALGUNOS ELEMENTOS PARA LA PRÁCTICA 3 DE RIVC (FUENTE RIVC P3 [18])	37
FIGURA 18 DEMOSTRACIÓN DE UN SISTEMA ROBÓTICO. INCLUYE RESGUARDO(AMARILLO), CORTINAS FOTOELÉCTRICAS(LILA), UNIDAD DE CONTROL(VERDE) Y BOTÓN DE PARO DE EMERGENCIA, REARME E INICIO(ROJO). (FUENTE PROPIA DURANTE EL ADVANCED FACTORIES 2022, EXPOSICIÓN DE OMRON)	38
FIGURA 19 ESTIMACIÓN DEL PLR UTILIZANDO LA FIGURA 5 (FUENTE PROPIA)	39
FIGURA 20 DISEÑO DE SEGURIDAD PROPUESTO. INCLUYE ALFOMBRA DE PROTECCIÓN SENSIBLE (NEGRO Y AMARILLO), RESGUARDO (ROJO) Y CORTINAS FOTOELÉCTRICAS (GRIS Y NARANJA). (FUENTE PROPIA)	40
FIGURA 21 CONECTORES CNUSR11 Y CNUSR12 DEL CONTROLADOR CR750-D, CON LOS CORTOCIRCUITOS NECESARIOS PARA EL FUNCIONAMIENTO DEL CONTROLADOR SIN ELEMENTOS DE SEGURIDAD EXTERNOS. (FUENTE PROPIA)	40
FIGURA 22 BOTÓN DE PARO DE EMERGENCIA (IZQUIERDA SUPERIOR), DISPOSITIVO DE ACTIVACIÓN (DERECHA SUPERIOR) E INTERRUPTORES DE PUERTA DE SEGURIDAD (INFERIOR). (FUENTE OMRON [9])	41
FIGURA 23 CONEXIONES DE LAS SEÑALES DE PARO DE EMERGENCIA EXTERNAS DEL CONTROLADOR PARA EL CNUSR11 Y EL CNUR12 (SON SEÑALES REDUNDANTES, POR LO QUE EL CONEXIONADO ES IDÉNTICO. (FUENTE PROPIA)	41
FIGURA 24 MANDO DE GUIADO MITSUBISHI R32TB (FUENTE MITSUBISHI [19, PP. 2-16])	42
FIGURA 25 PLC SL3300 (IZQUIERDA) Y RELÉS G9SE (DERECHA) DE SEGURIDAD (FUENTE OMRON [9])	43
FIGURA 26 ACOPLADOR, CPU, UNIDADES DE SEGURIDAD Y UNIDADES CONVENCIONALES (FUENTE PROPIA)	44
FIGURA 27 ETAPAS PARA CALCULAR EL TIEMPO DE REACCIÓN DE LA SEGURIDAD. (FUENTE OMRON [20])	46
FIGURA 28 TEMPORIZADOR DE GUARDIA FSOE (WDT) DE LAS ENTRADAS Y SALIDAS DE SEGURIDAD, VISTA DESDE EL SYSMAC STUDIO. (FUENTE PROPIA)	46
FIGURA 29 PARÁMETROS INTERNOS DEL CONTROLADOR DEL SCARA. (FUENTE PROPIA)	49
FIGURA 30 LIMITAR EL GRADO DE MOVIMIENTO DE J1 ENTRE -90º Y 90º. (FUENTE PROPIA)	49
FIGURA 31 CREAR UN PLANO LIMITADOR Y ACTIVARLO (RECUADRO NEGRO). (FUENTE PROPIA)	50

FIGURA 32 LIMITAR LA ACELERACIÓN UTILIZANDO EL PARÁMETRO "MOVEMENT" A 30%. (FUENTE PROPIA)	50
FIGURA 33 PLANO DE RESTRICCIÓN DEL MOVIMIENTO DEL SCARA Y EJES CARTESIANOS DE MOVIMIENTO. (FUENTE PROPIA)	51
FIGURA 34 ESPACIO MÁXIMO (ESFERA AZUL), ESPACIO RESTRINGIDO (VERDE) Y ESPACIO DE SEGURIDAD (AMARILLO). (FUENTE PROPIA)	52
FIGURA 35 DISTRIBUCIÓN DE LOS ELEMENTOS DEL SISTEMA DE SEGURIDAD A PARTIR DE LA FIGURA 34. (FUENTE PROPIA)	53
FIGURA 36 DISTRIBUCIÓN DE LOS ELEMENTOS DE SEGURIDAD. INCLUYENDO EL ARMARIO ELÉCTRICO Y EL RESGUARDO. (FUENTE PROPIA)	53
FIGURA 37 PLC DE SEGURIDAD JUNTO A LAS UNIDADES E/S Y EL ACOPLADOR. SE HA ENUMERADO LAS UNIDADES CON N. (FUENTE PROPIA).	54
FIGURA 38 ACOPLADOR NX-EIC202 CON SU RESPECTIVA CONEXIÓN DE ALIMENTACIÓN, INCLUYENDO LA TIERRA. (FUENTE PROPIA)	56
FIGURA 39 FUENTE DE ALIMENTACIÓN(S8VK-S12024) 120W/24V/5ª CARRIL DIN PUSH-IN+. (FUENTE OMRON [25])	57
FIGURA 40 INTERRUPTOR DIFERENCIAL 5SV3314-6KL DE SIEMENS. (FUENTE SIEMENS [27])	57
FIGURA 41 DESCONECTOR POR CONMUTACIÓN SIN FUSIBLE ALLEN BRADLEY 194E-A100-1753-6N. (FUENTE RS-ONLINE [28])	58
FIGURA 42 CABLE PARA CONECTAR LAS CORTINAS CON EL PLC Y LOS PINES ASOCIADOS (VER ANEXO D). (FUENTE OMRON [22])	58
FIGURA 43 SALIDAS DE LOS CONECTORES CNUSR11 Y CNUSR12. (FUENTE MITSUBISHI [17])	61
FIGURA 44 CREAR VARIABLE MAT PARA USAR LA ALFOMBRA. (FUENTE PROPIA)	66
FIGURA 45 ARMARIO ELÉCTRICO CON EL PLC NX-SL3300. INCLUYE TODO EL CABLEADO QUE HABÍA PREVIAMENTE. (FUENTE PROPIA)	67
FIGURA 46 NUEVA POSICIÓN DEL CONTROLADOR Y MANDO DE GUIADO. TAMBIÉN SE VE EL RESGUARDO QUE SE HA INSTALADO. (FUENTE PROPIA)	68
FIGURA 47 ALIMENTACIÓN DEL PLC. (FUENTE PROPIA)	68
FIGURA 48 INTERIOR DEL BOTÓN DE PARO DE EMERGENCIA. (FUENTE PROPIA)	69
FIGURA 49 DISEÑO INICIAL DEL SOPORTE (IZQUIERDA) Y DISTRIBUCIÓN DE LOS 4 SOPORTES EN EL LABORATORIO (DERECHA). (FUENTE PROPIA)	69
FIGURA 50 SOPORTES EMPLEADOS PARA POSICIONAR LAS CORTINAS FOTOELÉCTRICAS DE FORMA VERTICAL. (FUENTE PROPIA)	70
FIGURA 51 INDICADOR DE POSICIÓN DE LAS CORTINAS FOTOELÉCTRICAS. (FUENTE PROPIA)	70
FIGURA 52 ASIGNACIÓN DE COLORES A LAS CORTINAS PARA FACILITAR SU IDENTIFICACIÓN. (FUENTE PROPIA)	71
FIGURA 53 ARMARIO ELÉCTRICO DEL PLC NX-SL3300. INCLUYE TODO EL CABLEADO ACTUAL. (FUENTE PROPIA)	71
FIGURA 54 UBICACIÓN DEL BOTÓN DE REARME (IZQUIERDA) Y BOTÓN DE PARO DE EMERGENCIA (DERECHA). (FUENTE PROPIA)	72
FIGURA 55 INTERRUPTOR DIFERENCIAL(ENCENDIDO) QUE HARÁ LA FUNCIÓN DE "MUTING". (FUENTE PROPIA)	73
FIGURA 56 MONTAJE DEL SISTEMA DE SEGURIDAD. (FUENTE PROPIA)	73
FIGURA 57 VISTA FRONTAL DEL ARMARIO ELÉCTRICO (IZQUIERDA) Y LA LLAVE NECESARIA PARA ABRIRLO (DERECHA). (FUENTE PROPIA)	74
FIGURA 58 DESCONECTOR CON BLOQUEADO(IZQUIERDA) Y EN POSICIÓN DE ENCENDIDO DEL PLC (DERECHA). (FUENTE PROPIA)	74

Contenidos

1. PREFACIO	1
1.1. Origen del trabajo	1
1.2. Motivación	1
1.3. Requisitos previos	1
2. INTRODUCCIÓN	2
2.1. Objetivo del trabajo	2
2.2. Alcance del trabajo	2
3. NORMATIVA	4
3.1. Clasificación de las Normas ISO	5
3.2. Evaluación y reducción del riesgo.....	6
3.2.1. Evaluación de riesgos	6
3.2.2. Reducción y/o eliminación de riesgos.....	9
3.3. Requisitos de seguridad para un sistema robótico industrial.....	13
3.3.1. Espacio de seguridad y espacio restringido	14
3.3.2. Limitación de movimiento.....	15
3.3.3. Parada de seguridad y parada de emergencia.....	15
3.3.4. Modo de funcionamiento	17
3.3.5. Elemento terminal.....	18
3.3.6. Controlador y consola de guiado	19
3.3.7. Señalización e iluminación	20
3.4. Sistemas de mando	20
3.5. Elementos de seguridad	25
3.5.1. Resguardos	25
3.5.2. Cortinas fotoeléctricas.....	26
3.5.3. Alfombra de seguridad.....	28
4. DISEÑO DEL SISTEMA SEGURIDAD	30
4.1. Límites del SCARA	31
4.1.1. Límite de uso	31
4.1.2. Límite de espacio.....	31
4.2. Peligros y riesgos del uso del SCARA	34
4.3. Eliminación de riesgos.....	36
4.4. Sistema de seguridad	38

4.5.	PLC de seguridad.....	42
4.6.	Cortinas fotoeléctricas.....	44
4.7.	Alfombra de seguridad.....	45
4.8.	Tiempo de respuesta del sistema.....	45
4.9.	Rearme del sistema de seguridad.....	47
4.10.	Botón de paro de emergencia.....	47
4.11.	Funcionamiento del sistema.....	48
4.12.	Limitación por software (movimiento y aceleración).....	48
4.13.	Validación del PL.....	51
4.14.	Layout.....	52
5.	INTEGRACIÓN DEL SISTEMA DE SEGURIDAD	54
5.1.	Conexiones con el PLC.....	54
5.2.	Alimentación.....	56
5.3.	Otras conexiones.....	58
5.4.	Programa de seguridad PLC.....	59
5.4.1.	Salidas del controlador.....	60
5.4.2.	Botón paro de emergencia.....	62
5.4.3.	Cortinas fotoeléctricas.....	62
5.4.4.	Funcionalidad Muting.....	63
5.4.5.	Rearme del sistema de seguridad.....	63
5.4.6.	Procesamiento de la señal PE_ROBOT_AUX.....	64
5.4.7.	Solicitud de parada de emergencia.....	65
5.4.8.	Led del botón de rearme.....	65
5.4.9.	Alfombra de seguridad.....	66
6.	MONTAJE EN EL LABORATORIO	67
7.	CONCLUSIONES	75
8.	PRESUPUESTO	76
9.	REFERENCIAS	78
	ANEXO A: MANUAL DE USUARIO DEL SISTEMA DE SEGURIDAD	A
	ANEXO B: TUTORIAL DE CONFIGURACIÓN SYSMAC STUDIO	E
	ANEXO C: ESQUEMA CONEXIONES PLC	O

ANEXO D: CONEXIÓN ELÉCTRICA DE LAS CORTINAS FOTOELÉCTRICAS	_____ P
ANEXO E: CONEXIÓN FUENTE DE ALIMENTACIÓN	_____ Q
ANEXO F: PROGRAMA DEL PLC	_____ R
ANEXO G: TABLA PARA CALCULAR C_{RO}	_____ U
ANEXO H: DIAGRAMA PARA ELEGIR MODELO CORTINA FOTOELÉCTRICA OMRON	V
ANEXO I: RESUMEN CATEGORÍAS EN LA SRP/CS	_____ W
ANEXO J: ARQUITECTURA DE LAS CATEGORÍAS EN LA SRP/CS	_____ X
ANEXO K: PUNTUACIÓN DE LAS MEDIDAS CONTRA LOS CCF	_____ Z
ANEXO L: CONEXIONES EXTERNAS DE PARO DE EMERGENCIA DEL CONTROLADOR CR750-D	_____ AA

1. Prefacio

1.1. Origen del trabajo

El laboratorio de Automatización y Robótica Industrial (A5.4) de la EEBE cuenta con varios elementos de seguridad de la marca OMRON que no estaban en uso. Se planteó inicialmente la idea de aprovechar dichos elementos para diseñar el sistema de seguridad, de forma que los alumnos tuvieran material didáctico para entender los conceptos de seguridad en la robótica industrial.

1.2. Motivación

La oportunidad propuesta por el director del trabajo de poder trabajar con el PLC de seguridad SL3300 resultó bastante interesante para aplicar diferentes conocimientos adquiridos durante los últimos cuatrimestres. También, la idea de poder dejar material docente y didáctico para los alumnos resulta motivadora.

Hay que tener en cuenta que la seguridad en entornos industrial es necesaria en la actualidad, ya que muchas de las líneas de producción y otras tareas están automatizadas. Es decir, necesitamos tener las herramientas para diseñar e implementar diferentes mecánicos de protección para los operarios que trabajan con máquinas en entornos industriales.

1.3. Requisitos previos

Para llevar a cabo el proyecto se necesitan los conceptos de robótica y seguridad vistos en la asignatura de Robótica industrial y visión por ordenador. Adicionalmente, es necesario tener nociones de programación de PLC.

Además, se necesita de otras habilidades básicas para la realización de este proyecto, así como la redacción de esta memoria, que servirá para transmitir todo lo aprendido durante la realización del proyecto a futuras generaciones de estudiantes y/o profesionales.

2. Introducción

Para facilitar la lectura de esta memoria, la palabra “SCARA” hace referencia al robot Mitsubishi RH-3FH5515-D1-S15 de tipo SCARA. También, la palabra “laboratorio” hace referencia al laboratorio de Automática y Robótica industrial ubicada en la sala A5.4 de la EEBE.

2.1. Objetivo del trabajo

El trabajo tiene un doble objetivo. Primero, se busca recopilar y sintetizar los aspectos más importantes de las normativas relativas a la seguridad de las instalaciones industriales basadas en robots. Segundo, utilizar la información recopilada para diseñar e implementar un sistema de seguridad de una estación robotizada existente en el laboratorio A5.4 de la EEBE.

Más específicamente, se pueden descomponer los objetivos anteriores en los siguientes objetivos:

- Estudiar las diferentes Normas UNE-EN ISO referentes a la seguridad en la integración de la robótica industrial.
- Sintetizar la normativa, orientándola a su aplicación con el SCARA en el laboratorio.
- Diseñar todo el sistema de seguridad necesario para el anterior robot. Se tendrá en cuenta su uso para la docencia de las diferentes asignaturas como SICIEIA, RIVC e ISA.
- Realizar toda la programación necesaria del PLC, así como las conexiones necesarias para comunicar los elementos de seguridad propuestos y el controlador del SCARA.
- Realizar el montaje del sistema de seguridad utilizando el material disponible en el laboratorio.

2.2. Alcance del trabajo

Se pretende realizar toda la síntesis necesaria de la normativa para diseñar el sistema de seguridad óptimo si se tienen en cuenta el uso real que se le da al robot Mitsubishi en el laboratorio docente, ver Figura 9. La finalidad es realizar el diseño completo del sistema de seguridad necesario para el robot, teniendo como objetivo principal integrar el mayor número de elementos de seguridad para realizar un conjunto ilustrativo de cara a los estudiantes. Por lo tanto, el sistema de seguridad propuesto no será el más simple que se pueda diseñar, sino el más ilustrativo sin dejar de lado la normativa.

Se realizará el montaje siguiendo el diseño propuesto, pero teniendo en cuenta el material con el que se cuenta en el laboratorio. Asimismo, se dejarán explicadas todas las medidas necesarias para implementar el diseño completo en un futuro.

Por otro lado, teniendo en cuenta la situación actual que se está viviendo con el desabastecimiento de componentes electrónicos, algunos elementos de seguridad que se han comprado tienen una fecha prevista de entrega superior a 20 semanas. Estos elementos se tendrán en cuenta para el diseño del sistema de seguridad, pero no a la hora de realizar el montaje. De igual forma, se dejarán indicaciones de cómo hay que implementarlas en el montaje.

Finalmente, al finalizar el trabajo se habrá realizado un manual de usuario para que cualquiera persona, con nociones técnicas, puedan poner en marcha el sistema de seguridad, así como solucionar posibles fallos previsibles. De igual forma, se hará una guía para poder realizar la comunicación entre el PC y el PLC de seguridad, así como su configuración básica.

3. Normativa

Para entender mejor toda la normativa que se explicara a lo largo de este trabajo, hay que aclarar la diferencia fundamental entra una normativa y una directiva a nivel europeo:

- Según la definición del portal de la UE [1]: “Las directivas son actos legislativos en los cuales se establecen objetivos que todos los países de la UE deben cumplir. Sin embargo, corresponde a cada país elaborar sus propias leyes sobre cómo alcanzar esos objetivos”;
- mientras que una norma es una directriz voluntaria por las que se establecen especificaciones técnicas que son aplicables a productos, servicios y procesos de lo más variado [2].

Existen tres organismos europeos, ver [2], que son los encargados de adoptar las normas europeas. Estos son:

- Comité Europeo de Normalización (CEN).
- Comité Europeo de Normalización Electrotécnica (CENELEC).
- Instituto Europeo de Normas de Telecomunicación (ETSI).

En cuanto a lo referente con la robótica, la directiva que se aplica es la Directiva de Máquinas 2006/42/CE; está orientada a cualquier empresa que diseñe, fabrique y distribuya máquinas. Por lo tanto, toda la normativa a la que se hará referencia tiene como finalidad el cumplimiento de dicha directiva europea.

Respecto a las normativas, hay que hacer inciso en que han sido elaboradas por algún comité técnico del ISO (ISO/TC) en colaboración con algún comité técnico del CEN (CEN/TC). Estas a su vez han recibido el rango de norma nacional mediante la publicación de un texto idéntico a ellas en el idioma castellano (las normas europeas existen en tres versiones oficiales, alemán, francés e inglés [3, p. 4]).

El organismo encargado de adecuar los objetivos de las directivas europeas al territorio español y traducir las normas internacionales es la Asociación Española de Normalización (UNE) que antes de 2017 era llamado AENOR, ver [4], por esto algunas normas anteriores a 2017 seguirán teniendo la marca de AENOR en vez de UNE.

En resumen, existen diferentes tipos de normativas, pero las más relevantes para la elaboración de este documento son las normas UNE-EN ISO (normas europeas traducidas y adaptadas al territorio español por la UNE) y las ISO (Norma internacional). Por esto es importante, a la hora de referenciar alguna normativa, saber si se trata de una norma UNE-EN ISO o ISO, porque el año de publicación difiere y esto da margen a malentendidos. También existen normas que no son creadas por la ISO, como la Norma IEC para aparatos y equipos electrónicos o las EN.

UNE-EN ISO 12100:2012

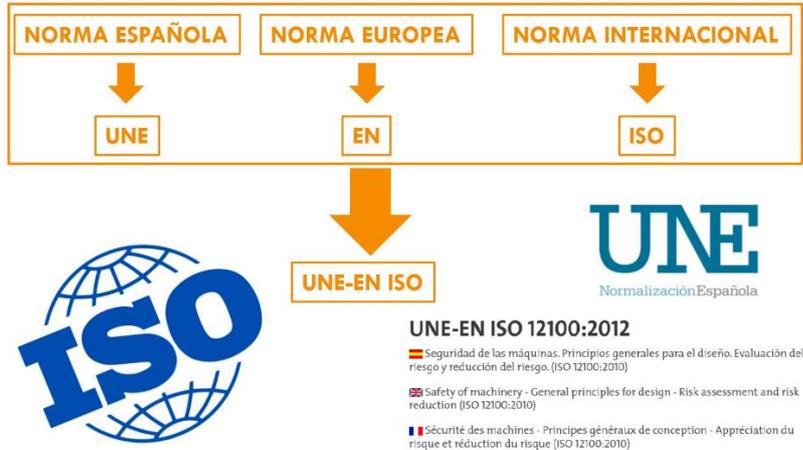


Figura 1 Desglose del significado de las Normas UNE-EN ISO (Fuente propia)

Para consultar la Norma UNE, al ser una entidad privada sin ánimo de lucro, hace falta tener una suscripción con algún proveedor. En el caso de la UPC, cuenta con una suscripción a [AENOR - Normas UNE on-line \(upc.edu\)](#), en el que cualquier estudiante PDI y PAS de la UPC puede consultar toda la Norma UNE.

3.1. Clasificación de las Normas ISO

Las normas de seguridad, en el campo de las máquinas, están divididas de forma jerárquica en tres tipos, tal como se ve en la introducción de [3, p. 7]. Estas son:

- **Normas de tipo A:** Contienen todos los requisitos, principios para el diseño y aspectos generales de seguridad que pueden aplicarse a las máquinas. Es decir, son normas de seguridad fundamentales. En nuestro caso se utiliza una única norma tipo A (actualmente solo existe una) que es la UNE-EN ISO 12100:2010, ver [5]. Esta norma es el estándar de todos los principales conceptos de seguridad que pueden aplicarse a todas las máquinas.

Se recomienda que las normas de tipo A se referencien en cursos de formación o en manuales destinados a transmitir a los diseñadores la terminología básica y los métodos generales de diseño [5].

- **Normas de tipo B:** Tratan un aspecto específico de seguridad o de uno o más tipos de protecciones que se pueden utilizar para el diseño de un sistema de seguridad. Se puede distinguir entre dos tipos de normas B:
 - Las normas de tipo B1, que tratan aspectos particulares de seguridad. Por ejemplo, las distancias de seguridad (UNE-EN ISO 13857:2020, ver [3]).

- Las normas de tipo B2, que tratan sobre equipos de seguridad. Por ejemplo, los resguardos de los que se habla en la norma UNE-EN ISO 14120:2016, ver [6].
- **Normas de tipo C:** Especifican los requisitos de seguridad detallados para una máquina en particular. En nuestro caso, que vamos a trabajar con el SCARA, la norma que debemos estudiar es la UNE-EN ISO 10218-2:2011, ver [7].

Como se ha explicado, las normas ISO (y su equivalencia en territorio español) siguen una jerarquía. Por lo tanto, nos podemos encontrar el caso en la que una norma difiera de otra en algún detalle en concreto, como lo sería la distancia de seguridad mínima de un elemento. En estos casos el criterio a aplicar es el de la norma más específica, que para cualquier caso será una norma de tipo C, seguida del tipo B y por último la de tipo A. En el caso en los que haya más de una norma tipo C, porque hay varias máquinas diferentes en el mismo sistema, se tendrá en consideración las normas más restrictivas.

De igual forma, siguiendo la jerarquía, la norma tipo A es la que más prioridad tiene, seguida del tipo B y la C (sucesivamente). Es decir, si la norma tipo C usada no contempla algún peligro posible, no es excusa para no buscar solucionarlo siguiendo las normas tipo A y B.

3.2. Evaluación y reducción del riesgo.

Antes de diseñar cualquier sistema de seguridad es necesario conocer los posibles riesgos y los peligros derivados. Los riesgos que se tendrán en cuenta a la hora de diseñarlo son principalmente de índole mecánica, es decir, peligros de colisión, aplastamiento, enganche, impacto, cortes o perforación. Los peligros mecánicos asociados al SCARA serán explicados en el apartado 4.2.

En la Norma UNE-EN ISO 12100:2012 [5] se explican todos los principios generales y la metodología a seguir para lograr la seguridad en el diseño de las máquinas. En otras palabras, esta Norma tipo A detalla cómo realizar la evaluación de riesgos y como reducir y/o eliminar los peligros y riesgos.

3.2.1. Evaluación de riesgos

Para la evaluación de riesgos, se proponen los siguientes pasos:

1. Determinar los límites de las máquinas. Este debe prever cualquier uso y el mal uso razonablemente previsible. Para lograr el objetivo, se puede subdividir los límites en:
 - a. Límite de uso. Para determinar que uso se le da a la máquina se recomienda determinar lo siguiente:

- i. Los diferentes modos de funcionamiento de la máquina y los diferentes procedimientos de intervención de los usuarios (por ejemplo, la reposición manual de material).
 - ii. El tipo de persona que dará uso a la máquina. Así como el nivel de formación del operador.
 - b. Límite de espacio. Se establece la amplitud del espacio de movimiento de la máquina y la interacción “operador-máquina”.
 - c. Límite de tiempo. Hay que tener en cuenta la vida útil de la máquina y sus componentes. También, se debe establecer la frecuencia de revisión recomendada del sistema.
 - d. Otros límites, como las propiedades de los materiales procesados, la limpieza requerida y las condiciones ambientales necesarias.
2. Identificar los peligros y todas las situaciones peligrosas asociados a ellos. Se deben determinar, sistemáticamente, todos los peligros (permanentes e imprevistos), situaciones y sucesos peligrosos razonablemente previsibles. Para facilitar su identificación, se propone utilizar los siguientes apartados:
 - a. Pensar en las acciones de las personas durante todo el ciclo de trabajo de la máquina. Se pueden clasificar, algunas acciones, en:
 - i. La programación y aprendizaje.
 - ii. Cambio de proceso o de herramienta.
 - iii. Puesta en marcha y paro de la máquina.
 - iv. Cambio de funcionamiento de la máquina.
 - v. Restablecimiento del funcionamiento después de un paro (se incluyen las paradas de emergencia), atasco o bloqueo.
 - b. Los posibles estados de funcionamiento de la máquina. Esto incluye los estados previstos, imprevistos, algún fallo de cualquier componente y un error de programa.
 - c. Cualquier comportamiento involuntario del operador, incluyendo el mal uso razonablemente previsible. Esto incluye aquellas situaciones derivadas de la fatiga, estrés y propias aptitudes del operador.
3. Estimar el riesgo asociado a cada peligro y/o situación peligrosa identificados en el apartado anterior. Los posibles elementos de riesgo son:

- a. La gravedad del daño. Se debe considerar si el daño es leve, serio o puede derivar a la muerte. También, si el posible daño puede extenderse a más de una persona a la vez.
- b. La posibilidad del daño. Para determinarlo se debe tener en cuenta:
 - i. La frecuencia de exposición del operador al peligro. Hay situaciones en la que será necesario que el operador acceda a la zona de peligro y permanecer allí durante un determinado periodo. Hay que considerar la frecuencia y modo de acceso a dicha zona. También, la cantidad de personas que necesiten entrar juntas a la zona de peligro puede aumentar la posibilidad de daño.
 - ii. La experiencia, aptitudes técnicas y las aptitudes humanas de la persona que entra a la zona, determinara si la posibilidad de daño incrementa. No es lo mismo que una persona sin experiencia necesita hacer uso de la máquina. Es muy probable que ocurra alguna situación peligrosa que se derive en daño si no hay implementado un sistema de seguridad.

Aparte de los elementos de riesgo anteriores, hay que tener en cuenta algunos aspectos como:

- a. La seguridad se debe aplicar para cualquier persona que pueda tener acceso a la máquina. Esto incluye los operarios, persona de limpieza y personal técnico de reparación y mantenimiento.
 - b. El factor humano es la principal causa de riesgo. Se debe proveer cualquier situación derivada de un uso previsiblemente inadecuado, como un descuido de un operador por estar conversando con otra persona.
 - c. Las medidas preventivas de riesgo deben ser documentadas.
 - d. Realizar un análisis de si se pueden anular o burlar las medidas preventivas. Esto también incluye la necesidad de facilitar el uso de la máquina con las medidas preventivas, para no dar lugar a la violación de estas.
4. Valorar el riesgo y tomar la decisión sobre la necesidad de reducir el riesgo. Si es necesario reducir el riesgo, entonces se deben seleccionar y aplicar las medidas apropiadas.

Como parte de este proceso iterativo, el integrado debe también verificar si adicionalmente se introducen peligros u si también aumentan otros riesgos cuando se aplican nuevas medidas preventivas. Si se generan nuevos peligros, estos se deben añadir a la lista de peligros identificados y se requerirán medidas preventivas apropiadas dirigidas a ellos.

En la figura 2 se puede ver un diagrama de todo el proceso explicado anteriormente.

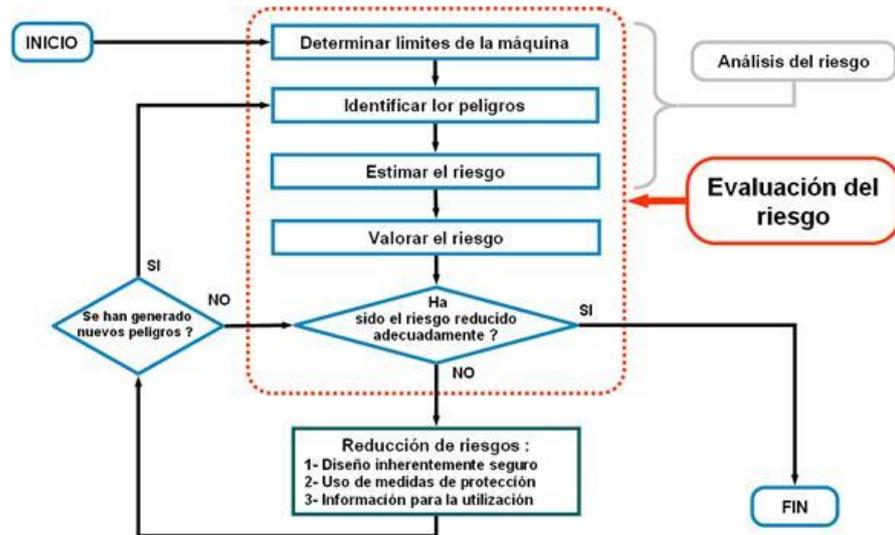


Figura 2 Proceso de evaluación de riesgos ISO 12100:2010 (Fuente web [8])

3.2.2. Reducción y/o eliminación de riesgos

Una vez determinado todos los posibles riesgos que necesiten ser reducidos o eliminados, se debe realizar un método llamado “Método de los tres pasos”, ver [5, p. 29]. El objetivo de dicho método es la eliminación de los peligros o la reducción de la probabilidad de que ocurra y/o la gravedad del daño. Los pasos por seguir, ver Figura 3, para la eliminación o la reducción de riesgos, son:

1. Medidas de diseño inherentemente seguro

Se busca, sin ningún mecanismo de protección externo, garantizar la seguridad. La elección conveniente de las características de diseño de la máquina y/o la interacción entre las personas expuestas y la máquina pueden reducir y/o eliminar las situaciones de peligro.

Las estadísticas demuestran que incluso las protecciones bien diseñadas pueden fallar o ser violadas, y la información para la utilización puede no ser puesta en práctica. Por este motivo, este paso es el único que puede eliminar los peligros y esto lo convierte en el paso más importante para tener en cuenta. En otras palabras, antes de seguir con los siguientes pasos se debe buscar reducir o eliminar el riesgo de forma inherente.

Algunas medidas inherentes para tener en cuenta son:

- Reducir todos los puntos o ángulos muertos desde la zona de trabajo y el puesto de mando.
- Reducir los peligros de aplastamiento y cizallamiento incrementando la separación entre dos partes móviles.
- Evitar aristas o bordes cortantes o salientes. Se debe evitar la posibilidad de “engancharse” partes del cuerpo o ropa.

- Limitar la fuerza de accionamiento y la velocidad de los elementos móviles.
- Asegurar la estabilidad de la máquina para reducir vibraciones, oscilaciones e incluso volcamiento.
- Facilitar el acceso para realizar mantenimiento. Así mismo, hay reducir el número de herramientas o equipos especiales necesarios para realizar dicha tarea.
- Se debe tener en cuenta los principios de ergonomía para reducir el estrés mental o físico y los esfuerzos del operador.
- Los movimientos de la máquina deben efectuarse con tensión alta. Es decir, si se anula la tensión el sistema se debe parar.
- La selección del modo se debe hacer mediante un interruptor con la capacidad de bloquearse en cada modo.
- Todas las señales de seguridad deben ser redundantes o duplicadas, así se evitan posibles fallos de causa común como una perturbación electromagnética.
- Asegurar la fiabilidad de los componentes y equipos. Los fabricantes como OMRON certifican que sus productos cumplen con estándares de calidad. Si la fiabilidad es insuficiente, se incita a anular los sistemas de seguridad.
- Limitar la exposición a los peligros mediante mecanización o automatización de las operaciones de carga y descarga (alimentación y extracción).

2. Medidas de protección y/o medidas preventivas suplementarias

Se deben usar siempre que el paso anterior no permita, de forma razonable, eliminar los peligros o reducir suficientemente los riesgos.

Se pueden agrupar los sistemas de protección en dos grupos, los cuales son:

- Los resguardos, que evitan o dificultan el acceso a una zona determinada.
- Los equipos sensibles, que emiten una señal ante la detección y presencia de una persona. Existen varios tipos, que según su forma de detección se pueden categorizar en:
 - Cortinas fotoeléctricas.
 - Escáneres láser.
 - Alfombras sensibles a la presión.
 - Barras, cables o bordes sensibles al contacto.

Los equipos de seguridad sensible serán detallados, incluyendo las normas aplicadas para su integración, en el apartado 3.5.

Un resguardo fijo es sencillo y se debe utilizar cuando no se requiere el acceso del operador a la zona peligrosa durante el funcionamiento. De otra forma, se debe plantear un resguardo móvil con dispositivo de enclavamiento o equipo de protección sensible.

A la hora de realizar el diseño de un sistema de seguridad utilizando dispositivos sensibles, se debe tener en cuenta:

- El tamaño, las características y la situación de la zona de detección.
- El tiempo de reacción del dispositivo en condiciones de fallo.
- La posibilidad de burlado.
- La capacidad de detección y su variación a lo largo del tiempo.

También, es importante aclarar que los equipos sensibles emiten una señal discreta, normalmente en forma de voltaje. Esto deriva la necesidad de utilizar un sistema de mando de la máquina, ver apartado 3.4. Se ha de considerar que:

- Tan pronto como se detecte una persona o algún miembro de esta, se ha de dar una orden, por ejemplo, un paro de seguridad.
- La retirada de la persona (o miembro) no dé lugar, por sí misma, a la puesta en marcha de nuevo de las funciones peligrosas.
- La nueva puesta en marcha debe ser el resultado de la actuación voluntaria del operador sobre un órgano de accionamiento situado fuera de la zona peligrosa.
- Mientras la función de detección del equipo de protección sensible esté interrumpida, la máquina no puede funcionar (excepto en casos puntuales como el Muting o inhibición)
- La posición y la forma del campo de detección evita, posiblemente junto con resguardos fijos, que una persona o una parte de una persona entre en la zona peligrosa o esté presente en ella sin que sea detectado.
- Los equipos de protección sensible pueden ser usados para iniciar un proceso (solamente aplica a dispositivos de protección optoelectrónicos activos)

Finalmente, como medida preventiva para la estabilidad, se permite el uso de pernos de anclaje o limitadores de carga, movimiento y aceleración. Así mismo, el uso de alarmas que adviertan del acercamiento a límites de estabilidad o de volcamiento son recomendados.

3. Información para la utilización

Se debe dejar documentado cualquier riesgo que se mantenga (riesgos residuales). Este paso no exime la necesidad de realizar los dos pasos anteriores. Es decir, no se debe usar esta información como sustitución de implementar una medida de seguridad.

También, se debe preparar la documentación correspondiente aconsejando métodos de trabajo seguro, advertencias sobre los riesgos residuales, la descripción de cualquier equipo de protección y el procedimiento operativo para la utilización de la máquina.

Se recomienda la creación de un manual de instrucciones contemplando todas las medidas de los 2 pasos anteriores para facilitar el uso de la máquina.

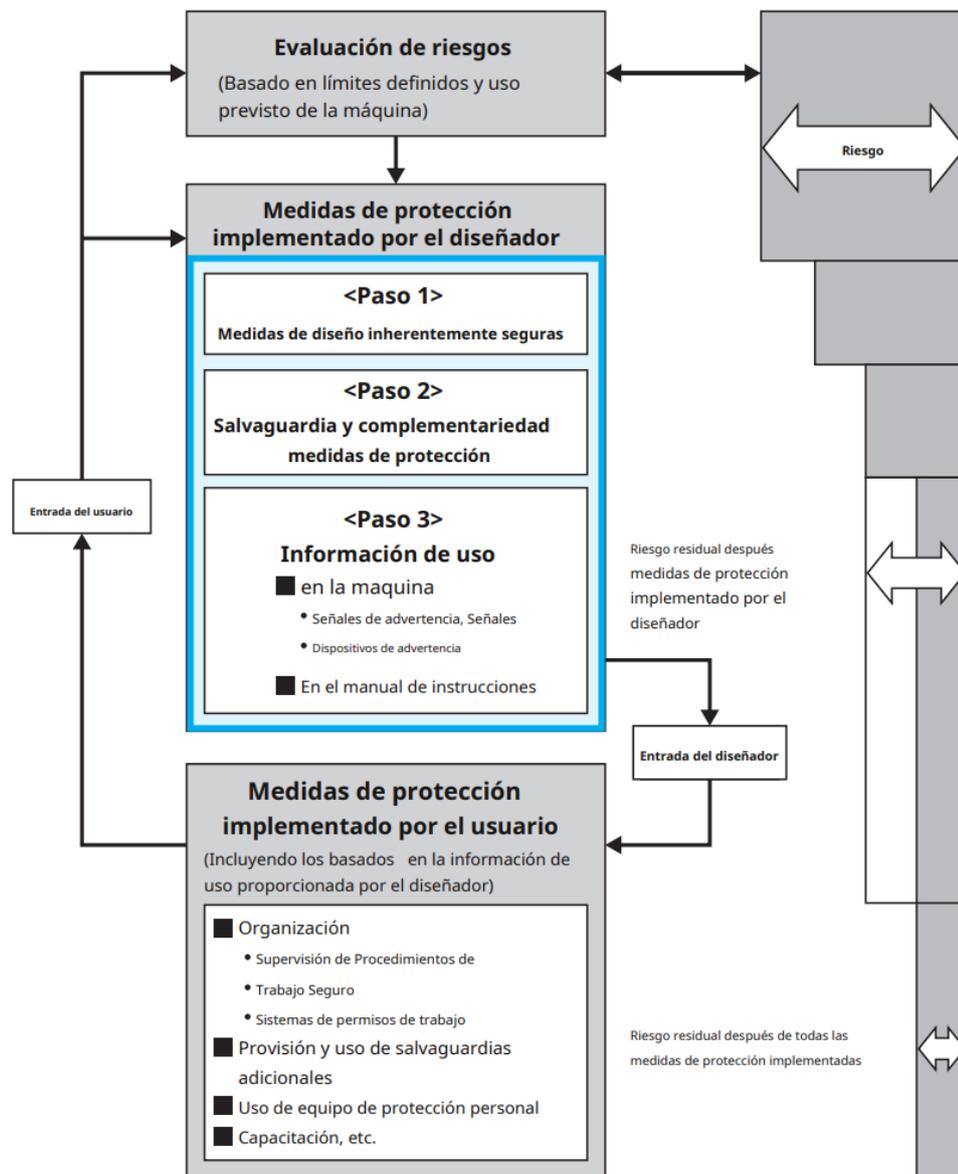


Figura 3 Aplicación de la ISO 12100 (Fuente OMRON [9])

Como conclusión de la evaluación y reducción de los riesgos asociados a una máquina, se espera la documentación de todo el proceso anteriormente explicado. Se debe incluir en el documento:

- La máquina para la que se ha llevado a cabo la evaluación.
- Cualquier hipótesis pertinente que se haya hecho.
- Los peligros y situaciones peligrosas identificados y los sucesos peligrosos considerados en la evaluación del riesgo.
- La información en la que se ha basado la evaluación de riesgos.
- Los objetivos de reducción de riesgos a obtener mediante las medidas preventivas.
- Las medidas preventivas aplicadas para eliminar los peligros identificados o para reducir los riesgos.
- Los riesgos residuales asociados a la máquina.
- El resultado de la evaluación final de riesgos.

3.3. Requisitos de seguridad para un sistema robótico industrial.

Según la Norma ISO 10218-1:2012 [10] se define un robot industrial como *“Manipulador controlado automáticamente, reprogramable y multifuncional, programable en tres o más ejes, que puede ser fijo o móvil y que se utiliza en aplicaciones industriales automatizadas”*. El robot industrial incluye el manipulador y actuadores, y el sistema de control, que incluye la consola de guiado y cualquier interfaz de comunicación (hardware y software).

La definición de un sistema robótico industrial, ver [10], es aquel compuesto por un robot industrial, elementos terminales y cualquier maquinaria, equipamiento, dispositivo o sensores que ayudan al robot a realizar su tarea.

Para facilitar la lectura de este apartado, centrado en la Norma UNE-EN ISO 10218-2:2011 [7], las palabras “robot” y “sistema robótico” se refieren a “robot industrial” y “sistema robótico industrial” tal como está definido en la Norma UNE-EN ISO 10218-1, ver [10].

Los robots son capaces de movimientos altamente energéticos dentro de un espacio operacional grande. La iniciación de estos movimientos y el camino del brazo del robot son difíciles de prever y pueden variar, por ejemplo, por cambios en los requisitos operaciones.

El problema principal problema de seguridad que presenta un sistema robótico es el que se deriva de la necesidad de que los operadores trabajen cerca del sistema mientras la potencia en los actuadores

está habilitada. Por lo tanto, es necesario identificar los peligros y evaluar los riesgos asociados con el robot y sus aplicaciones antes de seleccionar y diseñar las correspondientes medidas de seguridad para reducir adecuadamente los riesgos, ver apartado 3.2.

3.3.1. Espacio de seguridad y espacio restringido

Se define espacio como el volumen en 3 dimensiones, ver [10]. El espacio máximo de un sistema robótico es aquel en el cual el robot, incluyendo su elemento terminal, pueden tener proyección. Se debe definir un espacio restringido, dentro del espacio máximo, que establece límites que no serán sobrepasados por el robot y su elemento terminal. También, se puede establecer un espacio operacional donde el robot, en su funcionamiento habitual, se desplazará dentro del espacio restringido.

Por otro lado, el espacio de seguridad se debe determinar por la evaluación de riesgos. Su tamaño depende exclusivamente del sistema de seguridad diseñado y debe rodear el espacio restringido. El objetivo principal de establecer un espacio de seguridad es la de dar tiempo al sistema robótico de parar su inercia en caso de que una persona se aproximara al espacio restringido.

Hay que hacer énfasis a que el espacio restringido siempre será inferior al espacio máximo del sistema robótico. Aparte, el espacio restringido puede ser determinado utilizando limitadores mecánicos (muros, barreras o columnas), limitadores no mecánicos (sensores) o limitadores integrales del propio robot (por ejemplo, ejes programados de seguridad u otros parámetros programables). En la Figura 4 se puede ver de manera ilustrativa los espacios descritos anteriormente.

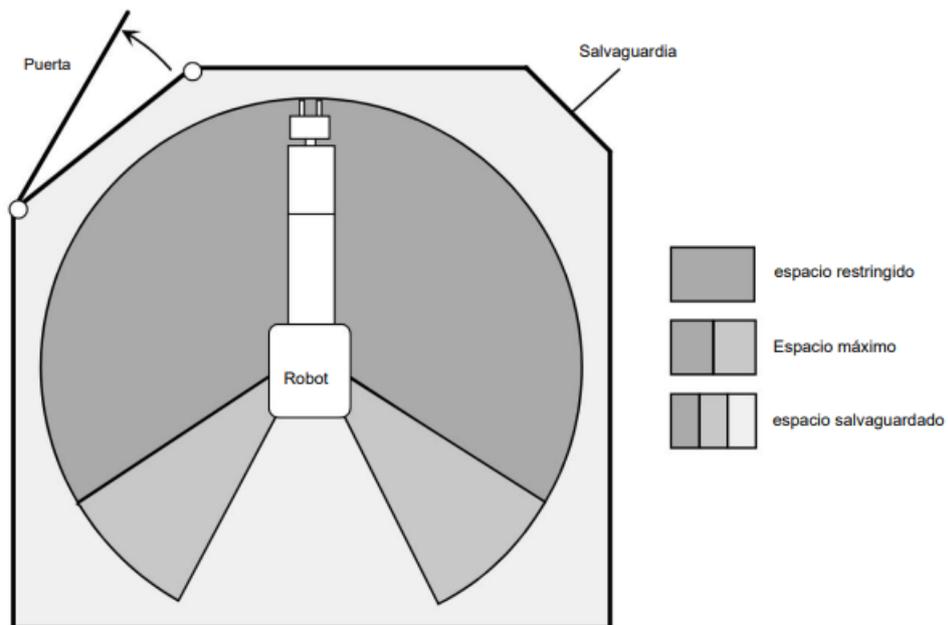


Figura 4 Ejemplo de espacios de seguridad (salvaguardia), restringido y máximo (Fuente MITSUBISHI [11])

3.3.2. Limitación de movimiento

El objetivo principal de limitar el movimiento es reducir el espacio restringido. Se debe diseñar e integrar las limitaciones para reducir la exposición potencial de las personas a situaciones de peligro. Como se explica en el apartado 3.3.1, existen 3 mecanismos para limitar el movimiento:

- Limitador mecánico: Restringen físicamente el movimiento del robot a partir de un determinado límite. Se pueden usar elementos como muros, resguardos o las propias columnas de la habitación donde esté ubicado el sistema robótico.
- Limitador no mecánico: Inician una parada a través del sistema de control del robot. Hay que tener en cuenta la distancia de parada del robot. Un ejemplo sería el uso de sensores para definir el espacio restringido.
- Limitador integral: Parámetros propios del controlador de cada robot que puede limitar algunas funciones como el espacio de trabajo y la velocidad. Si se utilizan ejes programados de seguridad y características de limitación de espacio construidas en el robot de acuerdo con las instrucciones del fabricante del robot, la información sobre los límites programados establecidos por estos medios debe estar incluida en la información de uso.

Las protecciones perimetrales, comentadas en el apartado 3.2.2, pueden ser utilizadas para limitar el movimiento, pero se debe tener en cuenta que:

- El robot no debe tener la capacidad de provocar deformaciones peligrosas en las protecciones
- Los sensores de sobreintensidad y sensores de colisión no son apropiados como limitadores de movimiento, a no ser, que el fabricante especifique lo contrario siguiendo la Norma UNE-EN ISO 10218-1. Estos sensores están diseñados para proteger la máquina y no al usuario.

Para finalizar, se ha de comentar que existe la posibilidad de realizar una limitación dinámica del movimiento, es decir, realizar un cambio controlado del espacio restringido durante el ciclo de trabajo del sistema robótico. Esto es ideal para sistemas móviles. Los elementos de seguridad que se pueden utilizar para realizar este cambio sin crear una situación de riesgo son cámaras, cortinas de luz, paros mecánicos retráctiles y escáneres láser.

3.3.3. Parada de seguridad y parada de emergencia

Como se explica en la asignatura ISA [12], existe un consenso internacional sobre la clasificación de la función de parada en 3 diferentes tipos que son:

- Categoría 0: Desconexión eléctrica de los actuadores. Se entiende como parada descontrolada. Un posible ejemplo es la situación que se produce al dar la señal al PLC de desactivar una electroválvula.

- Categoría 1: Desconexión eléctrica más exigente con el objetivo de evitar que se mantenga la inercia. Se entiende como parada controlada. Un ejemplo es la parada que se produce cuando se pulsa el paro de emergencia del controlador de un robot.
- Categoría 2: Parada controlada en la que se mantiene la alimentación disponible. Este tipo de parada se da, usualmente, cuando se pulsa un botón de paro de una máquina.

En cuanto a seguridad de sistemas robóticos, las paradas se clasifican en:

- La parada de seguridad que se puede iniciar de forma manual, automática o por alguna función del sistema de seguridad. Su frecuencia de uso depende de cada operación y su objetivo principal es la reducción del riesgo mediante una parada de categoría 0 o 1 según conveniencia del estudio de riesgos. La reanudación se puede realizar de forma manual o automática. Debe causar un paro de todos los movimientos del sistema robótico, y provocar el cese de cualquier función peligrosa controlada por el sistema robótico.
- La parada de emergencia únicamente se puede iniciar de forma manual. El propósito principal es el de quitar la energía a todos los peligros. Se requiere un paro de categoría 0 o 1 según conveniencia del estudio de riesgos. Por otra parte, la reanudación se debe producir de forma manual. Las siguientes características se deben resaltar:
 - Debe ser capaz de parar todos los movimientos del robot y otras funciones peligrosas dentro del sistema robótico, o en la frontera de este y otras áreas de trabajo.
 - Los sistemas robóticos deben tener una única función de parada de emergencia que afecte a las partes relevantes del sistema
 - Las paradas de emergencia de los sistemas robóticos deben permanecer en funcionamiento incluso si la unidad de control no está activa.
 - Hay algunos circuitos (entradas del controlador) que son ignorados en el modo manual y no serían apropiadas para conectar dispositivos de paro de emergencia.
 - La señal (al activar el paro de emergencia) debe continuar activa cuando se deje de suministrar potencial al sistema robótico. De lo contrario se debe generar una señal de paro de emergencia.
 - Hay que aclarar que en algunas situaciones la parada de seguridad puede ser de la categoría 2 si el sistema de potencia externo cumple con la Norma IEC 61800-5-2. En nuestro caso, como se explicará más adelante, no se pueden aplicar paradas de categoría 2 porque el controlador del SCARA no permite dichas paradas.

Por otra parte, los medios de iniciación de la parada de emergencia deben ser de fácil acceso para los operadores y otras personas. Por lo mismo, es requisito indispensable según la UNE-EN ISO 10218-

1:2012 que cada controlador y mando de guiado dispongan de un pulsador de paro de emergencia. Por otro lado, la ubicación de los elementos, que inician la parada de seguridad, se determina mediante criterios descritos en la Norma UNE-EN ISO 13855 [13], los cuales serán descritos más adelante.

3.3.4. Modo de funcionamiento

Los robots están diseñados para trabajar en diferentes modos según la necesidad del momento. Por ejemplo, el SCARA tiene la posibilidad, mediante un interruptor por llave, de cambiar entre el modo automático y el modo manual (para programación).

Según la Norma UNE-EN ISO 10218-2:2011 [7], el cambio de modo de funcionamiento no debe dar lugar a situaciones de peligro. Por lo tanto, se debe evitar el cambio no autorizado e inadvertido. Un cambio inadvertido del modo de funcionamiento dará lugar a una parada de seguridad del sistema robótico.

Adicional, el cambio de modo nunca puede iniciar por su cuenta las operaciones del sistema robótico u otras operaciones de peligro asociadas a su maquinaria. Se necesita una acción separada para iniciar las operaciones del sistema robótico.

- Modo automático

En este modo, el robot ejecutará su programación y realizará su ciclo. Esto da lugar a que sea el modo más peligroso porque, como ya se ha explicado, los movimientos no son previsible. Por lo tanto, se debe tener en cuenta una serie de características a cumplir para asegurar la reducción y/o eliminación de situaciones peligrosas. Estas son:

- La entrada en el espacio de seguridad debe conducir a un paro de seguridad de todo el equipamiento que pueda presentar algún tipo de peligro.
- No debe anular o reiniciar ningún paro de seguridad o condición de paro de emergencia, es decir, no puede actuar como un rearme del sistema.
- Después de un cambio de modo manual a automática es necesario un reinicio y un inicio manuales. Debe ser una operación simple.
- El cambio de modo debe realizarse desde el exterior de la zona de seguridad y siempre que todas las protecciones estén activas, es decir, no puede haber alguna petición de paro de seguridad o emergencia en curso.

- Modo manual

Se utiliza este modo para realizar la programación, diagnóstico, verificación u otras varias tareas con el robot mediante una consola de programación o estación de control similar. La

velocidad TCP máxima no debe superar los 250 mm/s. Se deberá realizar una evaluación de riesgos para determinar si la velocidad máxima debería ser inferior a 250 mm/s.

Un sistema robótico puede estar integrado en una red (por ejemplo, en una red LAN, un modem e internet) que permita el acceso remoto para su diagnóstico, para realizar consultas técnicas y ensayos u otras tareas de mantenimiento o programación. En estos casos de trabajo remoto se debe tener en cuenta que:

- Únicamente se podrá controlar el robot si este se encuentra en modo manual, todos los sistemas de seguridad están activos y no hay nadie en la zona de seguridad. Hay ocasiones en las que se permite el trabajo conjunto entre el control remoto y una persona en el espacio de seguridad, siempre que se valide las acciones pulsando algún dispositivo de validación.
- En todo momento debe haber una única fuente de control, ya sea remota o local.
- Por ningún motivo, el trabajo remoto debe dar lugar a situaciones peligrosas.
- No se pueden cambiar los parámetros de limitación de movimiento sin una acción local de confirmación.
- Debe haber un indicador en la ubicación del sistema robótico que indique que está siendo controlado de forma remota.
- Cualquier dispositivo que pueda provocar algún peligro y no sea necesario durante la acción remota, debe permanecer en un estado seguro.

3.3.5. Elemento terminal

Según la Norma UNE-EN ISO 10218-1:2012 [10], un elemento terminal es un dispositivo, concebido específicamente para fijarse al final del brazo del robot y realizar determinadas tareas. Un ejemplo sería las pistolas de soldadura o una pinza.

Se debe tener en cuenta que un elemento terminal es un elemento añadido y voluntario colocado por el integrador del sistema robótico para cumplir con una determinada tarea. Por lo tanto, en su diseño y utilización se debe tener en cuenta que:

- La pérdida o cambio en el suministro de energía no debe provocar la liberación de la carga porque podría resultar en una situación de peligro.
- Las fuerzas estáticas y dinámicas creadas entre la carga y el propio elemento terminal se encuentran dentro de la capacidad del robot (dato proporcionado por el fabricante)
- El acoplamiento entre el robot y el elemento terminal es correcto y no da posibilidad a la liberación del elemento terminal de forma espontánea.

- Cuando sea posible, para solucionar problemas, se puede suministrar energía al elemento terminal sin aplicar potencia a los actuadores del robot.
- El cambio del elemento terminal debe derivar a un nuevo estudio de evaluación de riesgos.

3.3.6. Controlador y consola de guiado

Todos los controles y el equipamiento que requieran posible acceso durante las operaciones automáticas deben estar fuera del espacio de seguridad; posicionados de tal forma que haya una visión clara del espacio restringido del robot. También, deben contar con un paro de emergencia independiente al sistema de seguridad diseñado.

El controlador, como su nombre lo indica, es la unidad que controla el estado de todos los actuadores del robot en función del ciclo programado, parámetros internos y los sensores externos.

La consola de guiado se utiliza para tareas de mantenimiento, pruebas o programación. Su utilización implica que el robot debe estar funcionando en modo manual. La consola debe contar con un cable suficientemente largo que permita que el programador desarrolle las tareas de forma segura, ver [10]. No pueden existir varias consolas conectadas al mismo controlador, de esta manera se evitan peligros en tareas de programación. Se debe almacenar de forma adecuada para minimizar la posibilidad de daños que puedan resultar en un peligro. También, debe minimizar la posibilidad de ignorar por error la activación de un dispositivo de paro de emergencia. Finalmente, en caso de pérdida de comunicación entre la consola de guiado activa y el controlador, debe resultar en un paro de seguridad o emergencia.

Por otro lado, es necesario utilizar controles de inicio, paro y rearme del sistema para controlar el estado del robot. Se recomienda que estos controles estén ubicados en una zona próxima a la entrada de la zona de seguridad.

Desde cada posición de control, el operador debe ser capaz de asegurar que nadie se encuentre dentro del espacio de seguridad. La ubicación de los controles de inicio y de reinicio deberían permitir una visión clara y sin obstáculos del espacio de seguridad. Si esto no es posible, se deben proporcionar sensores de presencia para detectar operadores dentro del espacio de seguridad.

- En caso de no ser posible proporcionar sensores de presencia, se deben utilizar otros mecánicos para evitar el rearme del sistema de seguridad. Así se previene una situación peligrosa.
- Si lo anterior no es posible, se debe programar un aviso visual y auditivo para que el operador salga de la zona de seguridad. Se debe retardar el inicio para dar tiempo suficiente al operador de abandonar la zona.

3.3.7. Señalización e iluminación

La señalización es una parte importante de la seguridad, porque ayuda a los operadores prever posibles peligros. Los fabricantes deben integrar en sus máquinas señales que indiquen ciertos peligros como el de una superficie que se pueda calentar por el propio funcionamiento de la máquina. En caso de que, por la propia naturaleza del sistema robótico, las señales de aviso visibles quedaran ocultas, se requeriría colocar señales extras en zonas visibles próximas al peligro.

Se deben señalar todos los posibles peligros de las aplicaciones, como por ejemplo la soldadura, corte con láser, gases, elementos proyectados, entre otros. Para esto hace falta hacer un estudio de riesgos e intentar eliminarlos o reducirlos, en caso de que no se puedan reducir, la señalización es necesaria.

En cuanto a la iluminación, según la norma UNE-EN ISO 10218-2:2011 [7] la iluminación inapropiada puede provocar situaciones de peligro. Por lo tanto, es necesario diseñar el sistema robótico de forma que se reduzcan las sombras susceptibles a provocar molestias, brillos molestos e incluso efectos estroboscópicos. Adicional, la iluminación debe ser al menos de 500 lx en la zona en la que se requiera una inspección o ajuste frecuentes.

3.4. Sistemas de mando

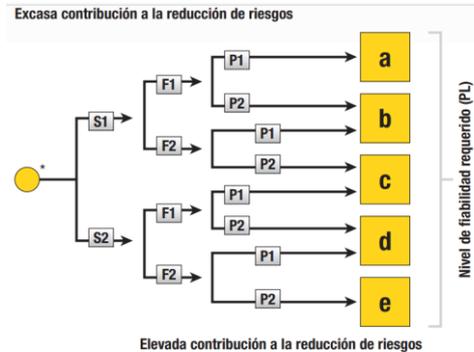
El hecho de utilizar equipos de seguridad sensible (como los enumerados en el apartado 3.2.2) supone la necesidad de utilizar un sistema de mando relativo a la seguridad (SRP/CS), como indica la Norma UNE-EN 12100:2010 [5]. Para conocer más sobre los requisitos de los sistemas de mando, se utilizará lo descrito en la Norma UNE-EN 13849-2016 [14].

El objetivo del SRP/CS es garantizar que la función de seguridad siempre se active, es decir, el fallo de cualquier elemento de seguridad sensible no puede dar lugar a la pérdida de la función de seguridad que se ha diseñado. Para lograr lo anterior, se debe determinar el nivel de prestación requerido (PLr) durante la evaluación de riesgos, es decir, se busca determinar la posibilidad de que ocurra un fallo del sistema de seguridad (Fiabilidad del sistema). Si se busca reducir el riesgo en gran proporción (por ejemplo, un riesgo que pueda provocar la muerte), el PLr debe ser lo más alto posible. La escala que se utiliza es a, b, c, d, e, siendo e el nivel más alto.

Para calcular el PLr se puede utilizar el diagrama de la Figura 5, hay que tener en cuenta que:

- Gravedad de la lesión (S)
 - S1 = lesión leve (normalmente reversible)
 - S2 = lesión grave (normalmente irreversible) incluyendo la muerte
- Frecuencia y/o tiempo de exposición al peligro (F)
 - F1 = raro a bastante frecuente y/o tiempo de exposición corto

- F2 = frecuente a continuo y/o tiempo de exposición largo
- Posibilidades de evitar el peligro (P)
 - P1 = posible bajo determinadas circunstancias
 - P2 = apenas posible



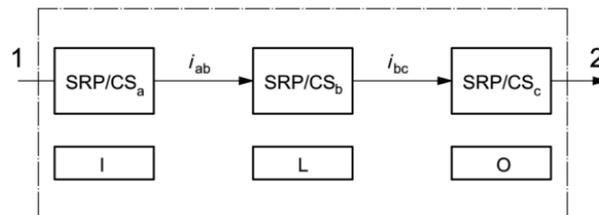
* Punto de partida para la evaluación de la contribución de las funciones de seguridad a la reducción de riesgos.

Figura 5 Determinación del nivel PLr necesario según UNE-EN ISO 13849-1:2016 (Fuente OMRON [15])

Una vez determinado el PLr requerido, será necesario determinar la fiabilidad final de la máquina (PL) del sistema de seguridad propuesto. Si PL es mayor o igual a PLr, el diseño es válido. De lo contrario, haría falta realizar nuevamente la evaluación de riesgos, ver 3.2, y rediseñar el sistema con otros elementos de seguridad.

En la Figura 6, se ve como es el diseño básico (no redundante) de un SRP/CS, incluyendo todas sus partes que son:

- La entrada (SRP/CSa), por ejemplo, un elemento de seguridad sensible.
- La lógica/el tratamiento (SRP/CSb) por ejemplo, un PLC de seguridad.
- La salida o los elementos de mando de los accionadores (SRP/CSc).
- Los medios de interconexión (i_{ab} , i_{bc}), por ejemplo, eléctricos, ópticos).



Leyenda

I Entrada (por ejemplo, interruptor de seguridad, detector, AOPD)

L Lógica

O Salida (por ejemplo, válvula, contactor, convertidor de corriente)

1 Suceso iniciador (por ejemplo, accionamiento manual de un pulsador, apertura de un resguardo, interrupción de un haz de un AOPD)

2 Accionador de la máquina (por ejemplo, motor, cilindro)

Figura 6 Arquitectura de categoría 1 de SRP/CS (Fuente Norma [14])

Se deben tener en cuenta los siguientes aspectos a la hora de determinar el PL:

- La categoría del elemento de seguridad. Se categoriza en B, 1, 2, 3 y 4, ver Anexo I para conocer más detalles. Es el propio fabricante el que determina con que categoría cuenta su producto. Para un PLr elevado se requiere utilizar elementos de categoría 3 o 4, según convenga. Otra cosa para tener en cuenta es la redundancia de la señal es que en la categoría 3 y 4, como se ve detalle en el Anexo I, son las únicas que cuentan con esta funcionalidad. Es importante resaltar que se necesita utilizar siempre que sea posible la redundancia de las señales de seguridad en los sistemas robóticos, como lo determina la Norma UNE-EN ISO 12100:2010.
- Tiempo medio hasta un fallo peligroso (MTTF_D). Hace referencia a la fiabilidad de los componentes y dispositivos de seguridad. Los fabricantes no proporcionan directamente este indicador. En su contrario, dan el B10d que es el número de ciclos hasta que un 10% fallan, estadísticamente, peligrosamente. Ver la Tabla 1 para relacionar el tiempo que tarda en ocurrir el fallo con la clasificación del MTTF_D. Los fabricantes de buen renombre, como OMRON, proporcionan directamente la categoría de sus elementos de seguridad. En la Figura 7 se puede ver el MTTFd requerido para cada categoría, en el caso de la categoría 4 es un MTTFd alto.

Tabla 1 Indexado del tiempo medio hasta un fallo peligroso (Fuente Norma [14])

MTTF _D	
índice	Tiempo (años)
Bajo	$3 < \text{MTTF}_D < 10$
Medio	$10 < \text{MTTF}_D < 30$
Alto	$10 < \text{MTTF}_D < 100$

- Cobertura de diagnóstico (DC). Es la capacidad de diagnosticar o detectar los fallos peligrosos. En otras palabras, se puede definir DC como la fiabilidad del diagnóstico de verificación de fallos. En la Tabla 2 se puede ver la relación entre la categoría de DC y el porcentaje de detección de fallos.

Tabla 2 Indexado de la cobertura de diagnóstico (Fuente Norma [13])

DC _{avg}	
Índice	Valor (%)
Nula	DC < 60
Baja	60 < DC < 90
Media	90 < DC < 99
Alta	DC > 99

- Causas comunes de fallo (CCF). Es un sistema de puntuación para evaluar la buena práctica al realizar la instalación. Se entiende un fallo común como aquel suceso que produce varios fallos que no son consecuentes entre sí. En el Anexo K se puede ver el proceso de puntuación de las

medidas contra los CCF. La mínima puntuación para evitar las CCF es de 65 puntos, en caso de obtener una puntuación menor, se debe reconsiderar aplicar medidas adicionales.

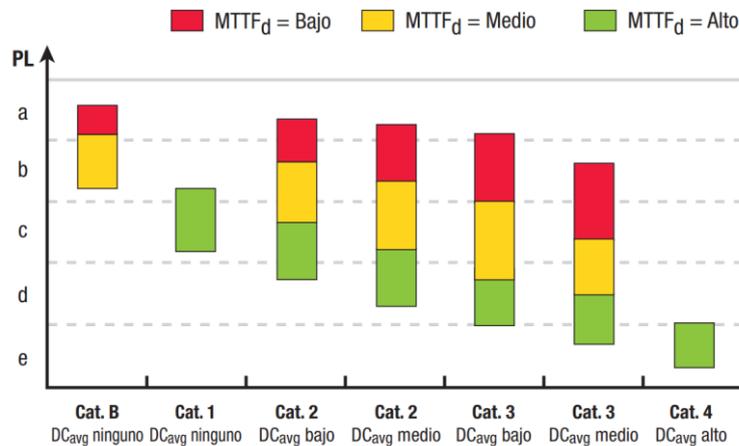


Figura 7 Evaluación del PL para SRP/CS (Fuente OMRON [15])

Para obtener un PL, de un nivel determinado, no es suficiente con solo utilizar equipos de seguridad con dicha categoría. Se requiere realizar todo el estudio para determinar que la combinación de los equipos en un único sistema cumple con su cometido de seguridad. El procedimiento para calcular el PL es:

1. Definir las partes del SRP/CS, es decir, las entradas, las unidades lógicas y las salidas.
2. Determinar la arquitectura y la categoría de cada componente del sistema; de esta manera, utilizando la figura, podremos obviar algunos valores como el DC de cada elemento.
3. Calcular el MTTF_D del sistema

Los fabricantes no suelen proporcionar este valor. Es importante en elementos mecánicos en los que el tiempo de uso se convierten en un factor de riesgo. Para calcularlo, el fabricante debería dar el valor del número de ciclos hasta que el 10% de los componentes falla peligrosamente (B_{10D}). En caso de no poder obtener este número, se puede estimar utilizando la tabla C.1 de la Norma UNE-EN ISO 13849-1:2016 [14, p. 63]. La fórmula para calcular el MTTF_D a partir del B_{10D} es la siguiente:

$$MTTF_D = \frac{B_{10D}}{0,1 \cdot n_a} \text{ [años]}$$

Donde:

$$n_a = \frac{d_{op} \cdot h_{op} \cdot 3600 \frac{s}{h}}{t_{ciclo}} \left[\frac{\text{ciclos}}{\text{año}} \right]$$

d_{op} es el número medio de días de operación por año [días/año]

h_{op} es el número medio de horas de operación por día [h/días]

t_{ciclo} es el tiempo medio de la operación en segundos por ciclo [s/ciclo]

El cálculo del $MTTF_D$ total del sistema se realiza mediante la siguiente ecuación:

$$MTTF_D = \frac{1}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{MTTF_{D^i}}}$$

Donde:

N es el número de elementos de seguridad del SRP/CS.

$MTTF_{D^i}$ corresponde a los diferentes MTTF de cada elemento de seguridad.

4. Calcular el DC medio (DC_{avg})

Hace falta saber el DC de cada subsistema de SRP/CS (entrada con unidad lógica o unidad lógica con salida). El fabricante debería dar el valor. En caso de no poder obtener este número, se puede estimar utilizando la tabla E.1 de la Norma UNE-EN ISO 13849-1:2016 [14, p. 72]. La fórmula para calcular el DC_{avg} es la siguiente:

$$DC_{avg} = \frac{\sum_{j=1}^K \frac{DC_j}{MTTF_j}}{\sum_{i=1}^K \frac{1}{MTTF_{D^i}}}$$

Donde:

K es el número de elementos de seguridad del SRP/CS sin incluir el SRP/CS_b

DC_j y $MTTF_j$ corresponde al valor para cada elemento de seguridad.

Hay que considerar que puede existir la posibilidad que el DC de algún elemento de seguridad fuese nulo. En este caso se debe seguir teniendo en cuenta para calcular el DC medio, entendiendo que únicamente afectara el denominador de la ecuación.

5. Verificar la integridad del diseño (puntuación de las medidas contra los CCF). Se puede utilizar para ello el Anexo K. Hay que recordar que en ninguna situación se puede aceptar menos de 65 puntos. En caso de ser necesaria se deberá usar medidas de protección adicionales para cumplir con la puntuación mínima.

6. Calcular el nivel de fiabilidad del sistema (PL) utilizando la Figura 7 y los valores calculados anteriormente.
7. Comprobar que PL sea mayor o igual que el PL_r calculado previamente. En caso de no superar la evaluación, se deberá volver a realizar el diseño del SRP/CS. Habrá que iterar las veces que sean necesarias.

3.5. Elementos de seguridad

3.5.1. Resguardos

Un Resguardo es una estructura de protección, que restringe el movimiento del cuerpo y/o de una parte de este con el fin de impedir que se alcancen zonas peligrosas. Hay que distinguir entre los resguardos fijos que no se pueden mover, por ejemplo, el vallado lateral de un sistema robótico, y los resguardos móviles como la puerta de acceso a un vallado perimetral. La ventaja que presenta utilizar un resguardo fijo es que no es necesario ningún sistema de mando para controlar la seguridad. El inconveniente es que muchas operaciones industriales requieren constantemente entrada y salida de material, así como entrada de personal para el mantenimiento y/o programación. Aquí es cuando se plantea el uso de otro tipo de protecciones.

En la norma UNE-EN ISO 14120:2016, ver [6], se establecen los requisitos generales para el diseño y construcción de resguardos fijos y móviles. Algunos requisitos para destacar son:

- Las partes desmontables de los resguardos fijos únicamente se deben desmontar mediante la utilización de una herramienta. No se deben usar fijaciones de desmontaje rápido, como fijaciones autoremachadas, para asegurar resguardos fijos desde fuera del área resguardada.
- Se debe tener en cuenta el mal uso razonable, así como todas las situaciones de acceso previsibles.
- Deben evitarse los puntos de aplastamiento o de atrapamiento.
- No deben generar peligros derivados de la limpieza de este.
- Deben resistir golpes del operador, de la máquina o de los elementos proyectados.
- Los soportes verticales deben constituir una estructura estable y rígida, resistentes a la deformación.
- Debe facilitar la visibilidad de la máquina. Si se emplea material perforado o malla de alambre, deberá tener la superficie abierta adecuada. Por otro lado, no se puede usar resguardos perforados de colores vivos, como amarillo, porque interfieren con la visión del proceso. Adicional, es necesario que puedan conservar su transparencia con el tiempo y uso.

- Los resguardos deben dificultar que se escale a través de ellos.

En la norma UNE-EN ISO 13857:2020, ver [3], se establece la distancia de seguridad necesaria entre el resguardo y el espacio restringido.

Se debe tener en cuenta la altura de la barrera respecto a la altura del espacio restringido. En la tabla 2 de la norma se puede ver que, para una zona de peligro de 1600 mm de altura, la distancia entre el borde exterior respecto al suelo de la barrera debe ser superior a 2200 mm para omitir la distancia de seguridad horizontal con los miembros superiores. De lo contrario se deberá considerar la distancia de seguridad horizontal S_h siguiendo la tabla 2 de la norma, ver [3, p. 13].

Si se quisiera un vallado con aberturas, como una malla electrosoldada, la normativa nos indica que el diámetro no puede ser superior a 120 mm o si no se tendría que aplicar la tabla 2, ver [3, p. 13], para calcular la distancia de seguridad horizontal.

En la tabla 4 de la norma, ver [3, p. 16], se indica que distancia se debe tener en consideración según la forma y el diámetro de la abertura. Para un diámetro de entre 10 y 12 mm, la distancia para aberturas cuadradas respecto a la zona de peligro es de mínimo 80 mm.

Para aberturas con diámetro inferior a 120 mm, se entiende que se puede meter todo el brazo a través de la barrera, pero con limitación de movimiento. La tabla 3, ver [3, p. 15] da las distancias de seguridad para tener en cuenta en estos casos de limitación de movimiento.

En el apartado 4.4, ver [3, p. 22], se indica que las aberturas en formas de ranuras mayores a 180 mm o en forma cuadrada o redonda mayor a 240 mm deben ser evitadas. Para usar barreras con aberturas de diámetro mayor a 180 o 240 (respectivamente), se debe usar medidas preventivas de seguridad, ya que permiten el acceso de cuerpo entero.

Finalmente, las estructuras de protección con altura inferior a 1400 mm no deben ser usadas sin medidas preventivas adicionales. Las barreras con altura inferior a 1000 mm no se incluyen porque no restringen suficientemente los movimientos del cuerpo.

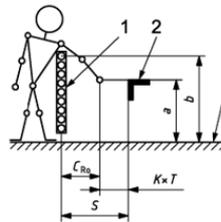
3.5.2. Cortinas fotoeléctricas

Se entiende por cortina fotoeléctrica aquellos sensores que emiten haces de luz y son capaces de detectar cuando hay una obstrucción en el camino. En otras palabras, las cortinas fotoeléctricas, de normal, se componen de un emisor y un receptor, cuando un objeto o persona pasa por en medio del emisor y receptor, corta la emisión de haces de luz provocando que se genere una señal de paro de seguridad en forma de voltaje.

En la norma UNE-EN ISO 13855:2011 [13] se explica detalladamente los factores para tener en cuenta para calcular la distancia de posicionamiento de las cortinas fotoeléctricas. En el diseño del sistema de seguridad se utilizará cortinas fotoeléctricas posicionadas verticalmente.

En el apartado 6.2.2 de la norma se establece que la altura del haz más bajo debe ser inferior o igual a 300 mm para impedir el acceso sin detección. También, se indica que para aplicaciones no industriales donde pueda haber niños, la altura de este deberá ser inferior o igual a 200 mm. En cuanto a la altura del haz más alto, esta debe ser mayor o igual a 900 mm para impedir el acceso sin detección.

La norma contempla aquellas situaciones en las que se pueda burlar el equipo de protección electrosensible; concretamente, las situaciones en las que se pueda realizar una aproximación a la zona peligrosa con alguna extremidad del cuerpo por encima de la protección electrosensible, ver Figura 8.



- Leyenda
- 1 Equipo de protección electrosensible
 - 2 Zona peligrosa
 - 3 Plano de referencia
 - a Altura de la zona peligrosa
 - b Altura del borde superior de la zona de detección del equipo de protección electrosensible
 - C_{R0} Distancia suplementaria que una parte del cuerpo puede recorrer hacia la zona peligrosa antes de que se active el protector (véanse los valores en la tabla 1)
 - S Distancia mínima para el alcance por encima

Figura 8 Alcance por encima de la zona de detección vertical de un equipo de protección electrosensible (Fuente [13])

Lo ideal sería utilizar barreras fotoeléctricas que detectaran el cuerpo (no dedos o manos), por lo tanto, se esperan que se instalen un modelo con una capacidad de detección de 55 mm (distancia más grande de detección ofrecida por OMRON). Un ejemplo es la F3SJ-A1020P55.

El fabricante OMRON tiene dos modelos de cortinas de seguridad, las cuales son la serie F3SJ y la F3SG. Cada una con diferentes subdivisiones. En su catálogo tienen un esquema para facilitar la elección entre las diferentes opciones, ver Anexo H. La ventaja del modelo F3SJ-A es su tiempo de reacción.

La distancia de seguridad mínima entre la zona de detección de las cortinas y el espacio restringido de robot debe calcularse con la siguiente expresión:

$$S = (K \times T) + C_{R0}$$

Donde

K = Velocidad de aproximación a la zona de peligro (en milímetros/segundos)

T = Tiempo de respuesta del sistema de seguridad desde la detección hasta la actuación (en segundos)

C_{RO} = Distancia de seguridad suplementaria hacia la zona peligrosa (en milímetros)

En la tabla 1 de la norma UNE-EN ISO 13855:2011, ver Anexo G, se puede obtener el valor de C_{RO} según la altura de detección y la altura del espacio restringido. Adicionalmente, el valor de K es 2000 mm/s (valor promedio de aproximación de una extremidad según la normativa). Por otro lado, si cuando se realice el cálculo de S se obtiene un valor mayor a 500 mm, la norma indica que se puede recalcular el valor de S utilizando que $K = 1600$ mm/s siempre que el resultado siga siendo mayor a $S_n \geq 500$ mm.

Por otro lado, algunas cortinas fotoeléctricas cuentan con la función de *Muting* y *Blanking*, que en algunos sistemas robóticos son requeridos.

- Muting

Esta funcionalidad consiste en deshabilitar temporalmente la capacidad de las cortinas de generar una señal de paro de seguridad, es decir, se silencian las cortinas. Se utiliza principalmente en procesos en los que la entrada y salida de materiales es constante, por lo que conjuntamente a otros sensores, se deshabilita temporalmente las cortinas para que entre o salga el material. Por normativa es necesario que esta función no genere posibles situaciones de peligro, esto se logra utilizando sensores, por ejemplo, ópticos, para saber en qué momento realizar el Muting y cuánto tiempo debe durar.

Algunas cortinas incluyen una configuración, mediante algún software, para activar esta funcionalidad. Otras simplemente utilizan un interruptor para indicar si se deben silenciar las cortinas. La señal necesaria para realizar el *Muting* debe ser de seguridad y redundante.

- Blanking

Consiste en deshabilitar, de manera controlada, ciertos haces de luz. Se utiliza en situaciones en las que algún objeto, como la mesa o una columna, corta alguno de los haces de luz y no se pueden mover las cortinas o cambiarlas por otras de un tamaño más adecuado. También, hay ocasiones en las que el proceso requiere constantemente interceptar algunos haces de luz de manera sincronizada, por lo que realizar una función de Muting no es lo adecuado, sino, la cortina nunca estaría en funcionamiento. Se requiere configurar, mediante software, las cortinas que dispongan de esta funcionalidad en caso de ser necesario.

3.5.3. Alfombra de seguridad

También conocidas como alfombras sensibles a la presión, son elementos de seguridad que están normalmente sobre una superficie y que son capaces de detectar la presencia de una persona cuando la pisan. Pueden ser utilizadas tanto para generar una señal de paro de seguridad como para detectar

si hay operarios presentes en alguna zona en concreto. Esto último es muy útil en las situaciones en las que debido a la poca visibilidad es necesario impedir que se pueda iniciar el robot con alguna persona en el interior del espacio de seguridad.

A diferencia de las cortinas fotoeléctricas, la alfombra de seguridad no genera ninguna señal en forma de tensión, sino, que al ejercerse una presión sobre ella crea un cortocircuito que será detectado y procesado por la unidad lógica, como lo es el controlador del SCARA o el PLC de seguridad.

La distancia de seguridad mínima entre el extremo más alejado del espacio restringida y el espacio restringido de robot debe calcularse, según la Norma UNE-EN ISO 13855:2011 [13], con la siguiente expresión:

$$S = (1600 \times T) + 1200$$

Donde

T= Tiempo de respuesta del sistema de seguridad desde la detección hasta la actuación (en segundos)

Por último, el principal problema que tienen las alfombras es que al ser un elemento mecánico presentan un rápido desgaste con el uso si lo comparamos con otros elementos de seguridad sensible como las cortinas fotoeléctricas. Esta es la motivación por la que en muchos sistemas de seguridad se invierte más dinero en elementos que tendrán una vida útil más larga.

4. Diseño del sistema seguridad

Como se explica en la introducción, se realizará el diseño completo de seguridad basado en el uso que se le da al SCARA, ver Figura 9. Actualmente, el robot se utiliza principalmente en la asignatura de RIVC, aunque también se le da uso en otras asignaturas como ISA. Entonces, se puede entender que el uso principal del SCARA será la docencia, salvo ocasiones puntuales que se ha utilizado para exhibiciones de puertas abiertas.

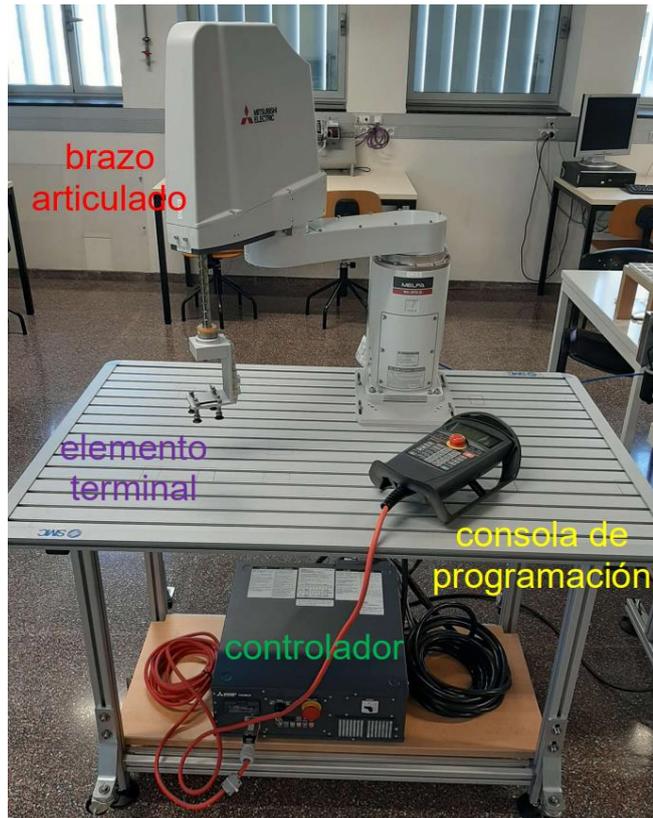


Figura 9 Componentes del sistema robótico con el SCARA en el Laboratorio A5.4 (Fuente RIVC P1 [16])

De lo anterior, se puede afirmar que el uso real que se le da al SCARA no es continuo, es decir, se utiliza puntualmente durante las clases en el laboratorio (prácticas) bajo la supervisión de un profesor. Adicional, los estudiantes, antes de utilizar el robot, reciben información de cómo usarlo y algunas precauciones sobre la peligrosidad de este.

Igualmente, a pesar de todas las advertencias y preparación que hay, esto únicamente reduce, de cierta forma, las posibles situaciones de riesgo que existe al utilizar el SCARA para la docencia. El principal problema, al igual que todos los robots industriales, es que es muy difícil predecir la ruta de movimiento y esto puede causar una colisión o cualquier otra situación peligrosa. Asimismo, si

sumamos el hecho de que se está constantemente cambiando el programa del robot, no se puede estimar cuál será el comportamiento real del robot.

Para reducir la posibilidad de riesgo, en el primer guion de prácticas de RIVC [16] se establecen las siguientes pautas de seguridad:

- Antes de poner un programa en ejecución en el robot, debe haberse simulado su comportamiento.
- Durante la ejecución del programa, los estudiantes deben mantenerse fuera del alcance del robot y con el pulsador de emergencia de la consola de programación a mano (ver siguiente apartado) por si hay algún imprevisto y es necesario detener la ejecución del programa y el movimiento del robot.
- El robot SCARA RH-3FH es muy rápido y esto puede suponer un peligro; debido a ello deben ejecutarse siempre todos los programas, estando el valor del Override del controlador a un valor máximo del 30%.
- Siempre que sea posible, la ejecución del programa en el robot siempre debe ser supervisada por el profesor (requerid su atención cuando esto sea necesario).

A pesar de lo anterior, y como se ha explicado anteriormente, se debe realizar una evaluación de riesgos para intentar eliminarlos o al menos reducirlos implementando un sistema de seguridad. Si tomamos como referencia la Figura 2, vemos que lo primero que hay que hacer es determinar los límites del SCARA.

4.1. Límites del SCARA

4.1.1. Límite de uso

Como se ha explicado, los principales operadores del SCARA será los estudiantes que para muchos será su primer contacto con la robótica industrial, por lo que hay que prever el mal uso razonable que le puedan dar por su inexperiencia. También, se hará un uso indiscriminado entre el modo manual y automático del robot, por lo que se necesitará constante acceso al controlador del robot. Asimismo, se necesitará acceso constante al espacio de trabajo del robot para realizar cambios en la posición de algunos elementos y/o materiales para realizar las prácticas.

4.1.2. Límite de espacio

Como se ve en la Figura 10, el espacio máximo del SCARA sin elemento terminal es de 500 mm de radio. Con el elemento terminal el radio no aumenta debido a que no sobresale del brazo robótico como se ve en la Figura 11. Es necesario aclarar que el espacio de movimiento está definido por un

espacio tridimensional, ver Figura 33, de la cual no se tendrá en cuenta el eje Z en los cálculos y restricciones que se explicará más adelante. El motivo de dicha omisión es debido a que se considerara el espacio entre la mesa y la altura máxima del robot como espacio restringido. Por lo tanto, se trabajará utilizando un espacio de 2 dimensiones (X Y).

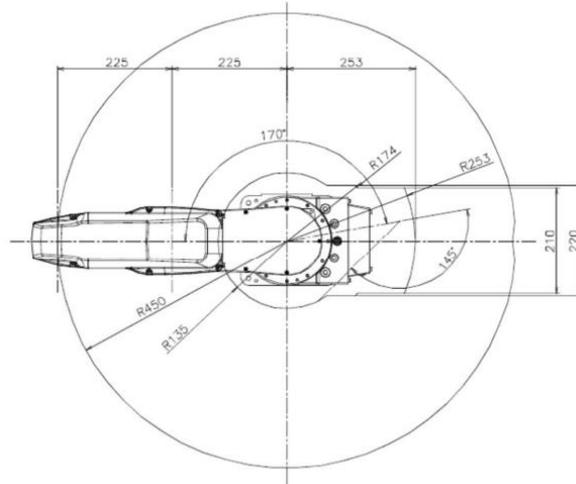


Figura 10 Espacio de trabajo y dimensiones del robot. (Fuente Mitsubishi [17])

En cuanto a la característica del robot SCARA, este tiene 4 grados de libertad de movimiento, estos vienen dados por J1, J2, J3 y J4, ver figura. No se limitará el movimiento de J3(movimiento vertical) y J4(Giro) al tratarse de grados de movimiento del elemento terminal, ver Figura 11. Únicamente se considerarán los grados de libertad J1 y J2, ver Figura 12.



Figura 11 Elemento terminal (derecha) y grados de libertad de este J3 y J4 (izquierda). (Fuente propia)



Figura 12 Articulación J1 y J2 del SCARA. (Fuente propia)

Es importante resaltar que el fabricante del SCARA limita por defecto los grados de libertad del robot, como se ve en la Figura 13. Esto es lo que define el espacio máximo de trabajo del SCARA que se indica en la Figura 10.

Motion limit parameter 1:BLP2 20220615

Robot1

Joint limit (MEJAR) Us

- [mm,deg] +

J1 :	-170.00	170.00
J2 :	-145.00	145.00
J3 :	219.90	390.00
J4 :	-360.00	360.00

Figura 13 Limitación por defecto del movimiento de las articulaciones del SCARA. (Fuente propia)

Para evitar la colisión entre el robot y el ordenador, como se ha comentado, se propone limitar el grado de movimiento de la articulación J1 a un rango de -90° a 90° , ver apartado 4.12. Esta limitación no es suficiente para evitar que la articulación J2 no entre en contacto con el robot, como se ve en la Figura 14, por lo que es necesario crear un plano en coordenadas cartesianas (X Y Z) para evitar que las articulaciones del SCARA sobrepasen dicho plano. Esto será lo que limitará el espacio restringido del robot, ver apartado 4.12.



Figura 14 Posible colisión entre el SCARA y el ordenador si solo se limita J1 hasta -90° . (Fuente propia)

4.2. Peligros y riesgos del uso del SCARA

Con lo explicado anteriormente se puede determinar la existencia de los siguientes peligros que pueden derivar a una situación de peligro para el estudiantado, profesorado y otro personal de la EEBE:

1. Ubicación del controlador: Como se ha explicado, la normativa nos prohíbe ubicar el controlador dentro de la zona de seguridad del robot. Aunque aún no se ha determinado ningún espacio de seguridad, se puede asegurar que la ubicación actual del controlador no cumplirá con la normativa porque está justo en el espacio restringido del SCARA. Aparte, puede provocar en el operario fatiga, estrés o trastorno músculo esquelético asociado a la posición no saludable que se debe adquirir para acceder a este. Asimismo, da lugar a posibilidad de iniciar el robot con una persona en el espacio restringido.
2. Pulsador de paro de emergencia no accesible. El sistema robótico del SCARA únicamente cuenta con los pulsadores de emergencia del controlador y el mando de guiado porque es lo que exige la Norma UNE-EN ISO 10218-1:2012 [10] a los fabricantes. Pero como se ha comentado, el controlador está mal ubicado y el mando de guiado muchas veces está en una posición de difícil acceso, esto provoca que se incremente el tiempo de respuesta ante un accidente, aumentando la gravedad del peligro.

3. Colisión con el ordenador: Aunque se ha establecido una limitación integrada en el SCARA como se explica en el apartado 4.12, se debería reducir aún más la posibilidad de peligro.
4. Los periféricos no paran ante un paro de emergencia. Como se ha comentado, durante una solicitud de paro de emergencia se deben parar todos los actuadores del robot, así mismo sus elementos terminales, actuadores y otros elementos del sistema robótico que sean peligrosos.
5. Movimiento de la mesa al usar el SCARA a su máxima velocidad. Aunque se ha comentado que es necesario usar el robot a un 30% de su velocidad, muchos estudiantes no acatan esta norma, dando lugar a situaciones peligrosas con posibilidad de colisión. Adicional, la mesa en la que está situado el robot no está fijada al suelo, por lo que la mesa se llega a desplazar según la cinemática alcanzada por el SCARA. Esto aumenta las probabilidades de accidente.
6. Impacto o aplastamiento del operario: Se puede producir una situación peligrosa si algún estudiante iniciara el programa del robot mientras haya alguien cerca al espacio restringido del robot. Igualmente, una persona que no sea consciente del programa que se está ejecutando puede aproximarse confiadamente al espacio restringido y provocar una situación peligrosa.

En la Figura 15 se puede ver la ubicación del ordenador y el controlador a los que se hace referencia previamente.



Figura 15 Uso del SCARA en una sección de prácticas (Fuente propia)

Es necesario intentar eliminar todos los anteriores peligros, aunque algunos como la probabilidad de impacto entre el operario y el SCARA no se pueda eliminar. En caso de no poder eliminar el peligro, será necesario el diseño de un sistema de seguridad con elementos de seguridad.

4.3. Eliminación de riesgos

Antes de decidir que peligros se pueden eliminar, hay que resaltar que el uso de pulsadores de paro de emergencia no es una medida de protección, sino una función de seguridad del sistema robótico. En otras palabras, no se puede suponer que el uso de estos pulsadores protegerá a los estudiantes de los riesgos del sistema robótico.

Se busca aplicar medidas inherentes, siguiendo el método de los 3 pasos explicado en el apartado 3.2.2, para la eliminación del mayor número de los riesgos comentados.

Como se ve en la Figura 9, el controlador está posicionado en la parte inferior de la mesa donde está ubicado el SCARA. Esto provoca algunos de los peligros comentados anteriormente, por lo tanto, la solución más efectiva es reubicar el controlador. Además, con esta acción se cumplirá lo especificado en la Norma [7] respecto a que el controlador debe ser ubicado fuera de la zona de seguridad.

Se propone ubicar el controlador en la mesa junto al ordenador con el que se programa el controlador, como se ve en la Figura 16. Con esta acción se elimina el peligro asociado a la ubicación del controlador.



Figura 16 Nueva ubicación del controlador del SCARA (Fuente propia)

En cuanto a la poca accesibilidad a los botones de paro de emergencia, reubicando el controlador se facilita pulsar el botón en caso de emergencia. Para mejorar la seguridad se plantea la posibilidad de incorporar un botón de paro de emergencia adicional al sistema robótico. Se propone que este esté ubicado en la zona de seguridad del sistema, de la cual se habla en el apartado 4.10.

En la figura 9 también se puede observar un resguardo ubicado entre el ordenador y el SCARA. Este se ha instalado para evitar la posibilidad de colisión, entre el SCARA y el ordenador, en caso de que la limitación del espacio utilizando los parámetros internos del controlador se vieran comprometidos (hay la posibilidad que algún estudiante modifique los parámetros). Con esto no se logra eliminar la

posibilidad de colisión, pero si reducirla. Hay que tener en cuenta que el SCARA, como indica su fabricante, ver [17], incluye sensores que detectarán cuando choque contra algo el resguardo y producirán un paro de emergencia. Estos sensores solo sirven para asegurar la integridad del robot y en ningún momento se puede suponer que velan por la seguridad de las personas, como indica la Norma UNE-EN ISO 10218-1:2012 [10].

Sobre el paro de seguridad y paro emergencia del SCARA, estos derivan en un paro de todos los actuadores del robot. El problema está con los elementos del sistema que varían durante las prácticas, como la cinta transportadora de la figura 11; se requeriría hacer una evaluación de riesgos cada vez que se cambiaran los elementos del sistema robótico. La hipótesis que se plantea es que estos elementos no suponen un peligro mecánico añadido, por lo que se pueden despreciar al hacer la evaluación. De igual forma, se propone usar un relé de seguridad para controlar la alimentación de cualquier máquina “peligrosa” que se coloque en el sistema robótico. La finalidad sería cumplir lo que indica la normativa respecto a que un paro de seguridad o de emergencia debe detener, además del movimiento del robot, cualquier elemento del sistema robótico que represente un peligro para los operarios.

Hay que tener en cuenta que el SCARA cuenta con un elemento terminal, como se ven en la Figura 9 y Figura 17, el cual tiene un sistema neumático y 4 ventosas de vacío que realizan la sujeción de los materiales utilizados durante las prácticas. Durante los paros convencionales, de seguridad y de emergencia, si el robot tenía sujeto algún elemento, este no será soltado excepto que fallase el sistema de aire comprimido. El problema está con los periféricos que se pueden llegar a conectar al controlador del SCARA.

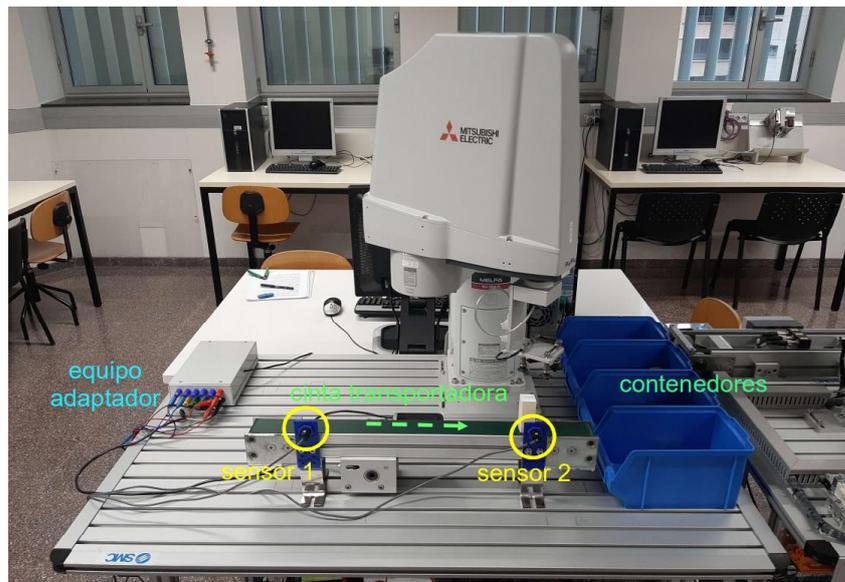


Figura 17 Sistema robótico con algunos elementos para la práctica 3 de RIVC (Fuente RIVC P3 [18])

Si se utiliza la velocidad máxima del SCARA, como se ha comentado, el robot gana tanta inercia que es capaz de mover la mesa con cada movimiento. Esto se podría solucionar fijando la mesa al suelo con alguna escuadra. El problema es que no es una solución válida porque el robot se utiliza algunas veces en jornadas de puertas abiertas y se necesita que el desplazamiento de la mesa sea cómodo. La solución planteada es reducir, mediante la configuración de los parámetros internos del propio controlador, la aceleración máxima de las articulaciones. Esto provocará que el robot no gane la inercia suficiente como para mover la mesa. Sin embargo, esto no elimina la posibilidad del desplazamiento, pero sí reducirlo. Si a esta configuración le sumamos la recomendación de no usar el robot a más del 30% de la velocidad, es muy difícil que la mesa se desplace por la propia inercia del SCARA.

Finalmente, el peligro de que el robot colisione contra alguna persona no puede ser eliminado a pesar de haber reducido la capacidad de adquirir inercia del robot. Por lo tanto, será necesario utilizar medidas de protección para reducir la posibilidad de peligro.

4.4. Sistema de seguridad

La mejor opción para reducir el riesgo de colisión es delimitar el espacio de seguridad del robot con un resguardo móvil con enclavamiento, por ejemplo, el sistema de la Figura 18. Esto ayudaría a reducir el espacio de seguridad, quedando solamente el espacio restringido. El problema es que para el uso que se le da al SCARA se necesita tener acceso constante al espacio restringido del robot. Como se explica en el apartado 3.2.2, se puede utilizar elementos de seguridad sensibles para realizar el diseño de seguridad.



Figura 18 Demostración de un sistema robótico. Incluye resguardo(amarillo), cortinas fotoeléctricas(lila), unidad de control(verde) y botón de paro de emergencia, rearme e inicio(rojo). (Fuente propia durante el Advanced Factories 2022, exposición de OMRON)

Antes de comenzar a realizar el diseño, se debe evaluar el PLr requerido, ver apartado 3.4. De este modo poder seleccionar los elementos de seguridad adecuados. Siguiendo el diagrama de la Figura 5, podemos determinar el PLr. Se puede estimar que la gravedad de la lesión derivada de la colisión entre el SCARA y alguna persona es leve(S1), si tenemos en cuenta la reducción de la capacidad de adquirir inercia implementada. En cuanto a la frecuencia, se puede considerar que la solicitud de paro de seguridad que haría el sistema será frecuente (F2), por el espacio, el número de estudiantes y la tarea de aprendizaje que se le da. Finalmente, la posibilidad de evitar el peligro ante una situación peligrosa es apenas posible, P2, porque el movimiento del brazo robótico es impredecible y muy difícil de esquivar. Se concluye, ver Figura 19, que se necesita un PLr de nivel c.

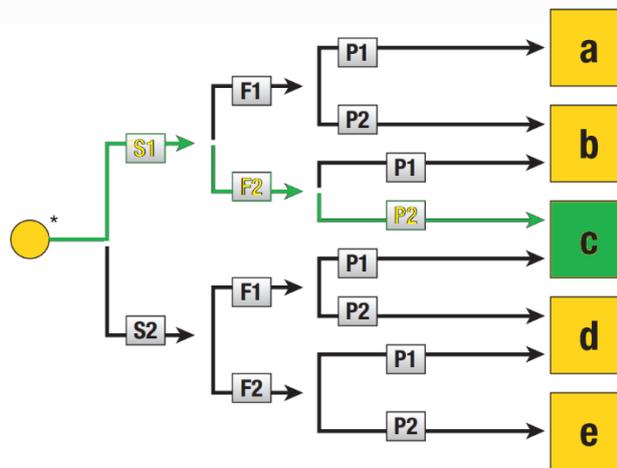


Figura 19 Estimación del PLr utilizando la Figura 5 (Fuente propia)

Con lo anterior se propone utilizar cortinas fotoeléctricas junto a una alfombra sensible a la presión para delimitar un espacio de seguridad. Esto con el fin de que el SCARA se detenga cuando alguna persona entre en el espacio de seguridad. Así mismo, se propone usar la mesa del ordenador como elemento disuasivo, es decir, no impide totalmente el acceso al espacio restringido como un resguardo, pero disminuye la probabilidad de acceso involuntario. En la Figura 20 se puede contemplar la propuesta planteada para el diseño de seguridad, incluyendo los elementos comentados, así como el resguardo que ya se ha colocado para reducir la probabilidad de colisión entre el robot y el ordenador.

Para la definición de la zona de seguridad es necesario tener en cuenta los modelos de cortinas fotoeléctricas, la alfombra de seguridad, el modelo del controlador, la unidad de control que se utilizara para crear el sistema de seguridad. Adicional, se deberán aplicar los cálculos de la distancia de seguridad explicados en los apartados 4.6 y 4.7.

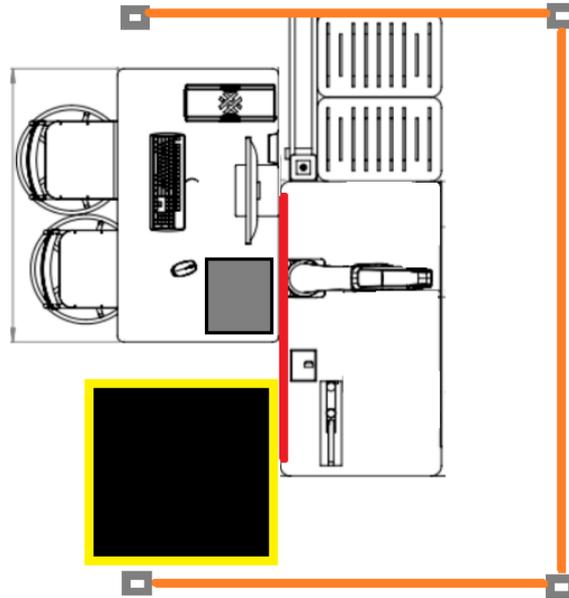


Figura 20 Diseño de seguridad propuesto. Incluye alfombra de protección sensible (Negro y amarillo), resguardo (rojo) y cortinas fotoeléctricas (Gris y naranja). (Fuente propia)

El controlador que utiliza el SCARA es el Mitsubishi CR750-D. Este tiene 2 conectores redundantes (CNUSR11 y CNUSR12 como se ve en la Figura 21) para conectar elementos de paro de emergencia, ver [17]. Estos conectores permiten conectar directamente, sin necesidad de una unidad de control, 1 dispositivo de paro de emergencia, un interruptor de puerta de seguridad y un dispositivo de activación, ver Figura 22. Consultar el Anexo L para ver el circuito interno del controlador y la propuesta de conexión según el fabricante.



Figura 21 Conectores CNUSR11 y CNUSR12 del controlador CR750-D, con los cortocircuitos necesarios para el funcionamiento del controlador sin elementos de seguridad externos. (Fuente propia)



Figura 22 Botón de paro de emergencia (izquierda superior), dispositivo de activación (derecha superior) e interruptores de puerta de seguridad (inferior). (Fuente OMRON [9])

Adicionalmente, el fabricante del controlador CR750-D nos indica que el relé controlado por el interruptor de puerta de seguridad, ver Anexo L, es una entrada de emergencia que no se tiene en cuenta en el modo manual del SCARA, es decir, no se iniciara un paro de emergencia en el modo manual, solo en el modo automático. Mientras que la entrada del paro de emergencia derivara siempre en un paro de emergencia sin importar el modo de funcionamiento.

Si queremos tener un control de estas funciones de paro incorporadas en el controlador, se propone usar un PLC de seguridad. Se sabe que las salidas de un PLC funcionan como una fuente de tensión, por lo tanto, es necesario modificar el conexionado propuesto en el Anexo L para poder utilizar los dos anteriores paros de emergencia. En la Figura 23 se puede ver las 2 conexiones necesarias para iniciar el paro de emergencia con una señal externa de 24 V, para el CNUSR12 deben ser las mismas conexiones al ser un sistema redundante de seguridad.

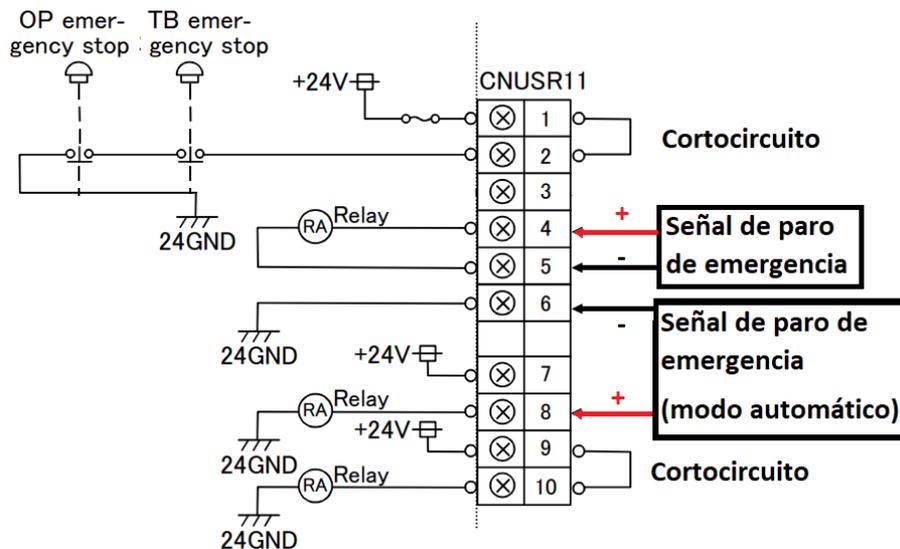


Figura 23 Conexiones de las señales de paro de emergencia externas del controlador para el CNUSR11 y el CNUR12 (Son señales redundantes, por lo que el conexionado es idéntico). (Fuente propia)

Sabemos que en el modo manual el robot, por normativa, está limitado a una velocidad máxima horizontal de 250 mm/s, que, si lo comparamos con los 8300 mm/s, ver [17, pp. 2-9], que podría alcanzar en modo automático, se entiende que el modo manual no supone el mismo riesgo que el modo automático. Adicional, el mando de guiado (modelo R32TB) utilizado cuenta con un pulsador de emergencia y un dispositivo de activación que requiere que el operario mantenga una posición correcta del mismo, ver el número 1 y 3 correspondientemente de la Figura 24. En caso de que el operario suelte el dispositivo de activación, los actuadores del SCARA se pararan como si de un paro convencional se tratase. Con esto se puede suponer que no es necesario que las cortinas y las alfombras inicien un paro de emergencia cuando el SCARA esté funcionando en modo manual. Aunque sí que será necesario que cada vez que el SCARA cambien de modo de funcionamiento, se requiera rearmar el sistema de seguridad.



Figura 24 Mando de guiado Mitsubishi R32TB (Fuente Mitsubishi [19, pp. 2-16])

Finalmente, al diseño de la Figura 20 se le debe añadir un botón de paro de emergencia, como se ha comentado previamente. Con esto se tiene la propuesta de diseño de seguridad. Se procederá a seleccionar los dispositivos y a realizar los cálculos correspondientes.

4.5. PLC de seguridad

Por normativa, se requiere que la unidad lógica (control) de un SRP/CS, ver apartado 3.4, cuente con las funciones de seguridad como la probabilidad de fallo y la capacidad de detección de fallo en los demás elementos de seguridad del sistema. Una opción podría ser un relé de seguridad como el modelo G9SE de OMRON, ver Figura 25. El problema está en que, para realizar un sistema complejo de seguridad, según el número de elementos, se requiere un elevado número de relés de seguridad. En nuestro caso, para cada cortina se necesitaría un relé de seguridad, sin incluir los otros elementos de seguridad. Adicional, estos relés deberían ir conectados a un PLC porque el controlador no tiene suficientes entradas de seguridad para cada cortina.



Figura 25 PLC SL3300 (izquierda) y relés G9SE (derecha) de seguridad (Fuente OMRON [9])

La solución es usar un PLC de seguridad. Es más costoso que un relé de seguridad, pero dispone de la opción de añadir unidades, que son mucho más baratas que los relés, para añadir más dispositivos de seguridad según la conveniencia del diseño de seguridad. En conclusión, un relé de seguridad está limitado en cuanto crecimiento del sistema de seguridad, en cambio, el PLC de seguridad permite tener un crecimiento elevado de dispositivos de seguridad en el sistema.

La principal diferencia entre un relé de seguridad y un PLC de seguridad es el número de señales que puede supervisar simultáneamente, mientras que el Relé podrá supervisar limitadas señales, normalmente puede supervisar 1 señal redundante, es decir, 2 conexiones. Hay algunas aplicaciones donde se pueden conectar los dispositivos de seguridad en serie, como varios botones de paro de emergencia. En estos casos, el uso de un relé de seguridad es viable porque únicamente se necesitaría uno. El problema radica que, si la conexión de algunos de los pulsadores llega a fallar o el mismo pulsador falla, será una tarea bastante complicada encontrar el fallo. Mientras que, si se utiliza el PLC de seguridad con el número necesario de unidades de entradas de seguridad para conectar todos los pulsadores de emergencia, el propio PLC indicará cuál de todas las conexiones es la que está fallando.

En el Laboratorio se cuenta con un PLC de seguridad que es uno de los motivos de la realización de este trabajo. Este es el modelo NX-SL3300 de OMRON junto al acoplador NX-EIC202. Adicional, cuenta con las siguientes unidades NX:

- 4 unidades SIH400 (Entrada digital de seguridad). Dispone de 2 entradas redundantes o 4 entradas independientes, todas de seguridad a 24 V. Su tiempo de respuesta es 9 ms.
- 3 unidades SOD400 (Salida digital de seguridad). Dispone de 2 salidas redundantes o 4 salidas independientes, todas de seguridad a 24 V. Su tiempo de respuesta es de 1 ms.
- 2 unidades ID4442 (Entrada digital). Dispone de 8 entradas a 24 V.
- 2 unidades OD4256 (Salida digital). Dispone de 8 salidas a 24 V.

Para este caso, utilizándola tabla del Anexo G, C_{RO} no se puede calcular directamente porque no está el valor para la altura de 1395 mm. En estos casos, la norma UNE-EN ISO 13855:2011, ver [13], indica que no se debe interpolar el valor de C_{RO} . En su lugar se debe coger el valor más restrictivo próximo.

Sabemos que la altura de la zona peligrosa (espacio restringido) es de 1600 mm, con lo que cogiendo el valor más restrictivo obtenemos que C_{RO} es 900 mm. Tomando el valor de $T=0,126$ s, ver apartado 4.8, y sustituyendo los valores en la ecuación anterior, obtenemos que:

$$S = (2000 \times 0.126) + 900 = 1152 \text{ mm}$$

En la norma nos indican que si $S \geq 500$ mm, podemos recalcular el valor de S utilizando que $K= 1600$ mm/s siempre que el resultado siga siendo mayor a $S_n \geq 500$ mm.

$$S_n = (1600 \times 0.126) + 900 = 1101,6 \text{ mm}$$

Se obtiene que $S_n=1102$ mm, por lo que se debe posicionar la cortina a una distancia desde el borde de la zona de peligro de 1102 mm para cumplir con la norma UNE-EN ISO 13855:2011.

4.7. Alfombra de seguridad

El fabricante OMRON cuenta con la serie UMA de alfombras sensibles a la presión. Dicha serie se divide, por un lado, en las alfombras con un cable y las alfombras con 2 cables. El número de cables determinan si la alfombra se podrá conectar en serie con otras alfombras para aumentar la superficie de detección. En el caso del diseño propuesto solo se requiere una alfombra, por lo que el modelo elegido debe ser de un cable.

Se calcula la distancia de seguridad a partir de la ecuación del apartado 3.5.3, donde $T=0,163$ s.

$$S = (1600 \times 0,163) + 1200 = 1460,8 \text{ mm}$$

Una alfombra de 1000 x 1000 mm sería ideal para colocarla en el espacio destinado a la alfombra según la Figura 20. Por lo tanto, la distancia de seguridad entre la alfombra y el espacio restringido debe ser de 461 mm. El modelo propuesto es el UMMA-1000-1000-1.

4.8. Tiempo de respuesta del sistema

Según el fabricante del PLC, ver [20, pp. 8-2], para calcular el tiempo de respuesta de un subsistema de seguridad (entrada, control, salida) se deben tener en cuenta diferentes etapas de este. Desde el sensor de seguridad hasta el actuador. En la Figura 27 se puede apreciar las diferentes etapas que hay que considerar para calcular el tiempo de respuesta.

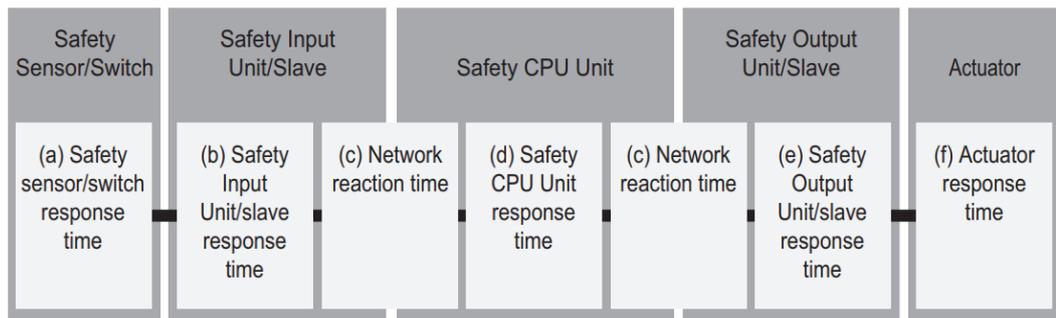


Figura 27 Etapas para calcular el tiempo de reacción de la seguridad. (Fuente OMRON [20])

A. El sensor de seguridad:

En el caso de las cortinas fotoeléctricas(F3SJ-A1095P30), se obtiene del Datasheet, ver [22, p. 78], que el tiempo de respuesta máximo es de **13 ms**.

El tiempo de respuesta máximo de la alfombra de seguridad (UMMA-1000-1000-1) es de **50 ms**, ver [23, p. 6].

B. Unidad de entrada segura NX-SIH400 tiene un tiempo de respuesta de **9 ms**.

C. Tiempo de respuesta de la red:

Como la conexión usada para conectar las entradas y salidas con el PLC es directa, es decir, protocolo FSoE (*Fail Safe over EtherCAT*), el tiempo de respuesta de la red viene dado por temporizador de guardia FSoE (*Watchdog timer* o WDT). Para las unidades de entrada es de 48 ms y para las unidades de salida es de 45 ms. En total, el tiempo de respuesta de la red es de **93 ms**. Dichos tiempos se pueden obtener utilizando Sysmac Studio, en el apartado de configuraciones y ajustes, comunicaciones, seguridad, E/S de seguridad, ver Figura 28.

Información de producto	Dirección esclava FSoE	Temporizador de guardia FSoE (WDT)
NX-SIH400; 1.1	1	48
NX-SIH400; 1.1	2	48
NX-SIH400; 1.1	3	48
NX-SIH400; 1.1	4	48
NX-SIH400; 1.1	5	48
NX-SOD400; 1.0	6	45
NX-SOD400; 1.0	7	45
NX-SOD400; 1.0	8	45

Figura 28 Temporizador de guardia FSoE (WDT) de las entradas y salidas de seguridad, vista desde el Sysmac studio. (Fuente propia)

D. Unidad CPU de seguridad

El tiempo de respuesta del NX-SL330 depende protocolo de comunicación utilizado para conectar las entradas y salidas. Como se utiliza el protocolo propio de OMRON, FSoE el tiempo de respuesta se puede considerar nulo porque ya está incluido en el tiempo de respuesta de la red, ver [20, pp. 8-3].

E. Unidad de salida segura NX-SOD400 tiene un tiempo de respuesta de **1 ms**.

F. Tiempo de respuesta del controlador CR750-D, ante una señal de paro de emergencia para el robot RH-3FH-D es de **10 ms**, ver [17].

En la Tabla 3 se resumen los tiempos de respuestas de las etapas anteriores.

Tabla 3 Tiempo de respuesta del sistema para la cortina fotoeléctrica y la alfombra de seguridad. (Fuente propia)

Etapa	F3SJ-A1095P30 [ms]	UMMA-1000-1000-1 [ms]
A	13	50
B	9	9
C	93	93
D	0	0
E	1	1
F	10	10
Tiempo total	126	163

4.9. Rearme del sistema de seguridad

Como se ha comentado, es necesario que la acción de restablecer el funcionamiento del robot después de una parada de emergencia sea algo voluntario por parte del operador, es decir, debe ser una acción manual. Por lo tanto, no se puede programar el sistema de seguridad para que se restablezca de forma automática cuando la situación que generó la señal de emergencia ha sido neutralizada. Para solucionar el problema del rearme del sistema de seguridad de forma manual, se contempla utilizar un pulsador de color azul y que tengan un indicador led. No es necesario que sea de señal redundante al no considerarse un elemento de seguridad. Se propone el uso del botón A22NL-BPM-TAA-G100-AC de OMRON.

Se espera entonces que el indicador led se active únicamente cuando sea necesario rearmar el sistema de seguridad. Asimismo, como el rearme debe ser una acción voluntaria para evitar rearmes involuntarios, es necesario mantener pulsado el botón por más de 1 segundo. La ubicación de este botón deberá ser junto al controlador del SCARA porque para restablecer el funcionamiento del robot es necesario rearmar el sistema de seguridad y después pulsar el botón de “reset” del controlador.

4.10. Botón de paro de emergencia

En la evaluación de riesgos se detectó la necesidad de incluir un botón de paro de emergencia externo al controlador del robot. Este se deberá ubicar en un lugar estratégico de fácil acceso, por lo que se propone ubicarlo en el espacio de seguridad sobre la mesa del robot.

Es necesario que el botón sea de doble canal para tener la señal redundante al tratarse de un elemento de seguridad. También se recomienda utilizar un botón con iluminación por si en algún momento falla la iluminación del Laboratorio, sea fácil ubicar el botón de paro de emergencia para parar el robot. Se propone usar el botón A22EL-M-24A-02 de OMRON.

4.11. Funcionamiento del sistema

Se definen dos situaciones de parada de emergencia. La primera se presentará únicamente cuando el robot esté en funcionamiento automático y los dispositivos de seguridad que intervendrán son las cortinas fotoeléctricas, la alfombra de seguridad y el botón de paro de emergencia. Por otro lado, se tendrá la situación en la que el robot esté funcionado en modo manual, en esta situación las cortinas y la alfombra no generaran una parada de emergencia al considerarse innecesario debido a la limitación de velocidad y el interruptor de activación de la consola de guiado. Únicamente se tendrá en cuenta el botón de parada de emergencia.

Por otro lado, como se ha comentado, es necesario mantener pulsado el botón de rearme por más de 1 segundo para restablecer el sistema de seguridad. Asimismo, el indicador led del botón de rearme se encenderá para indicar que se debe realizar el rearme.

Finalmente, se establece la posibilidad de activar, mediante simulación, la funcionalidad de Muting de las cortinas fotoeléctricas, utilizando para ello una señal redundante que funcione como circuito abierto (Muting deshabilitado) o circuito cerrado (Muting habilitado). Esto con el fin de facilitar en un futuro la integración del sistema de seguridad en proyectos más ambicioso, utilizando la integración del sistema robótico con otras máquinas, como el Robotino o el FAS200.

4.12. Limitación por software (movimiento y aceleración)

Con la ayuda del RT ToolBox2, se pueden programar algunos parámetros internos del controlador del SCARA, ver Figura 29. Entre ellos se resaltan los siguientes parámetros que son los que se configuraran para realizar las limitaciones del diseño de seguridad:

- Motion limit: Limita ángulo de movimiento de las articulaciones es J1, J2, J3 y J4.
- Free plane limit: Permite crear planos, con 3 puntos, en el que las articulaciones del SCARA no podrán cruzarlos sin que salte un error en el controlador (error H2113).
- Movement: Permite limitar la aceleración de las articulaciones.

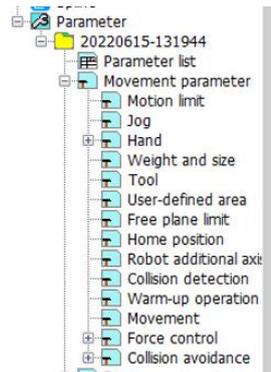


Figura 29 Parámetros internos del controlador del SCARA. (Fuente propia)

Como se comentó en el apartado 4.1.2, se ha propuesto limitar el grado de movimiento de la articulación J1 en un ángulo de -90° a 90° , ver Figura 30. También se propone crear un plano en el punto $x=-100$ mm, es decir, limitar que el robot sobrepase la coordenada -100 mm según el eje x. Para ello se utiliza el parámetro “Free plane limit” y se escriben 3 puntos, en los que la coordenada x será común para los 3, de esta manera se crea el plano limitador que se ven en la Figura 33. Las 3 coordenadas utilizadas son las que se ven en la Figura 31. Es importante señalar que el controlador puede tener varios planos límite guardados, por lo tanto, es necesario activarlos cuando se necesiten. Para ello hay que marcar la función *ON(Inside)* como se ve en la Figura 31.

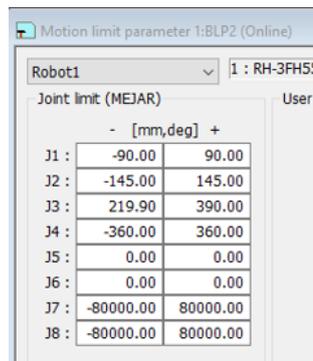


Figura 30 Limitar el grado de movimiento de J1 entre -90° y 90° . (Fuente propia)

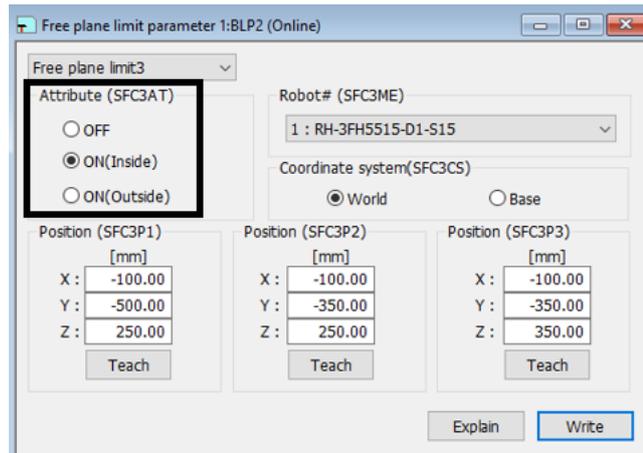


Figura 31 Crear un plano limitador y activarlo (recuadro negro). (Fuente propia)

Aplicando las limitaciones anteriores se puede obtener el espacio restringido, ver la Figura 34, del SCARA, que será el mismo que el espacio de trabajo al no haber un programa por defecto.

Finalmente, para reducir la inercia de los movimientos del SCARA se propone reducir la aceleración de las articulaciones al 30% utilizando el parámetro "Movement" como se indica en la Figura 32. Con esta configuración, se ha logrado evitar movimientos peligrosos, aunque el robot esté funcionando con un OVRD (velocidad) de 100%.

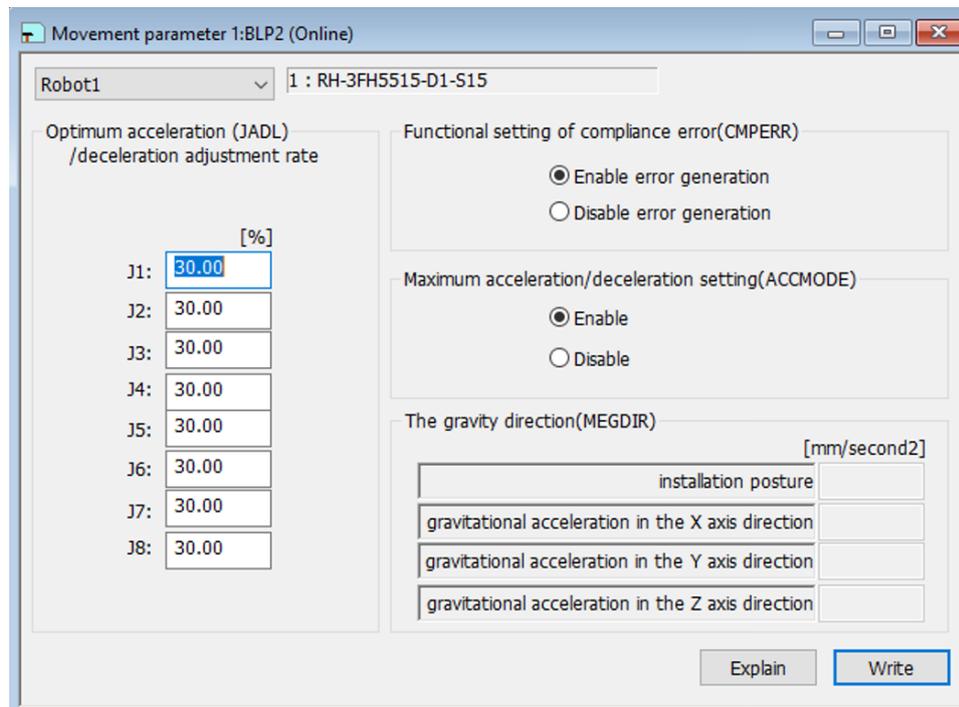


Figura 32 Limitar la aceleración utilizando el parámetro "Movement" a 30%. (Fuente propia)

Para simular el plano de restricción, se utilizó los 3 puntos de la Figura 31 y el modo simulación del programa RT ToolBox2, ver Figura 33

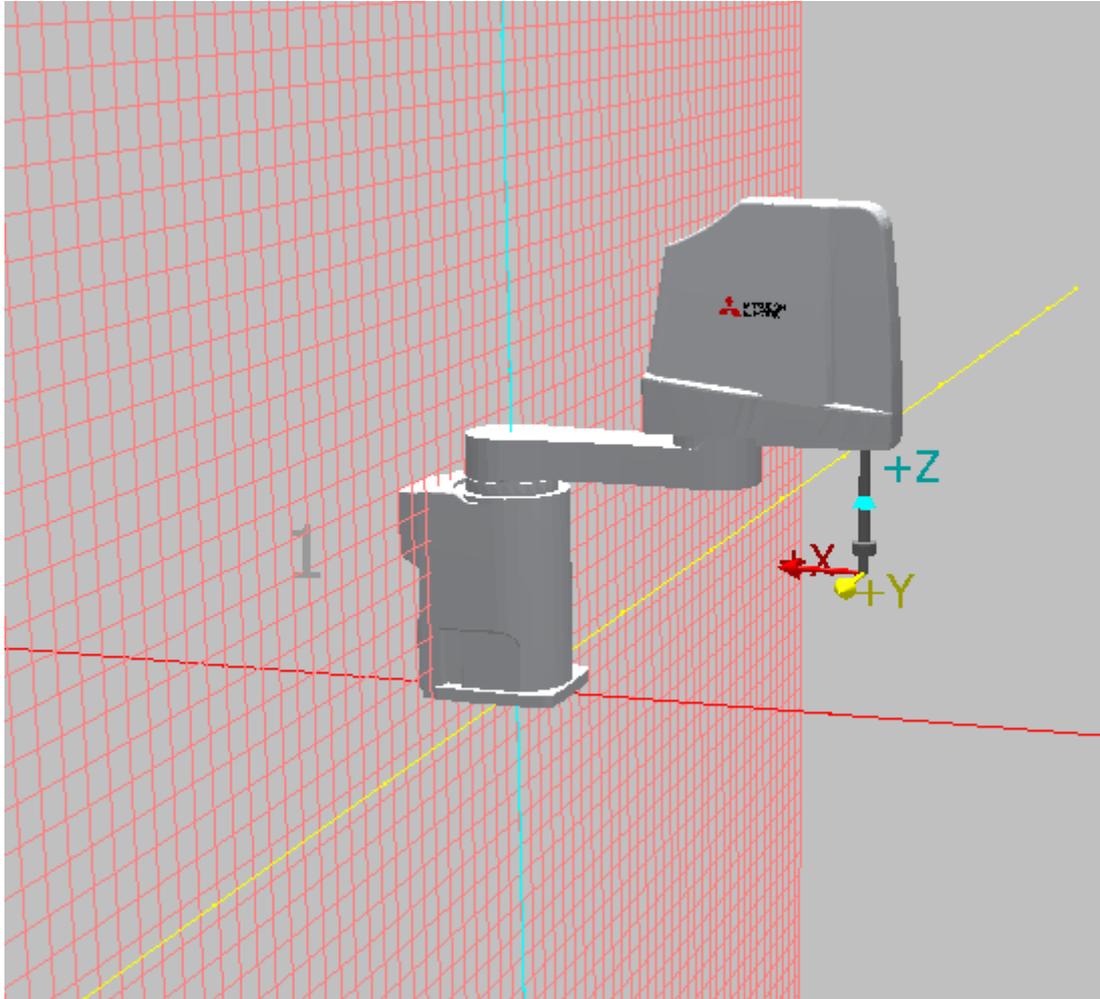


Figura 33 Plano de restricción del movimiento del SCARA y ejes cartesianos de movimiento. (Fuente propia)

4.13. Validación del PL

Como los elementos de seguridad sensible utilizados tienen PL de tipo e, adicional a que se utilizó todos los requisitos de normativa para sistema con PLr tipo d, se puede asumir que el sistema cuenta con PL d, por lo que es mayor al PLr tipo c calculador anteriormente. Es necesario que, para cualquier modificación, como introducción de nuevos elementos al sistema robótico, hacer todo el estudio de seguridad.

4.14. Layout

En la Figura 34 se ve el espacio de seguridad, el espacio restringido y el espacio máximo del SCARA. Asimismo, el espacio de seguridad se ha calculado a partir de que se sabe que el radio del espacio de trabajo es de 500 mm, y la distancia de seguridad con las cortinas fotoeléctricas es de 1102 mm, por lo tanto, la distancia mínima entre el centro de la base del SCARA y la zona de detección de las cortinas debe ser de 1602 mm

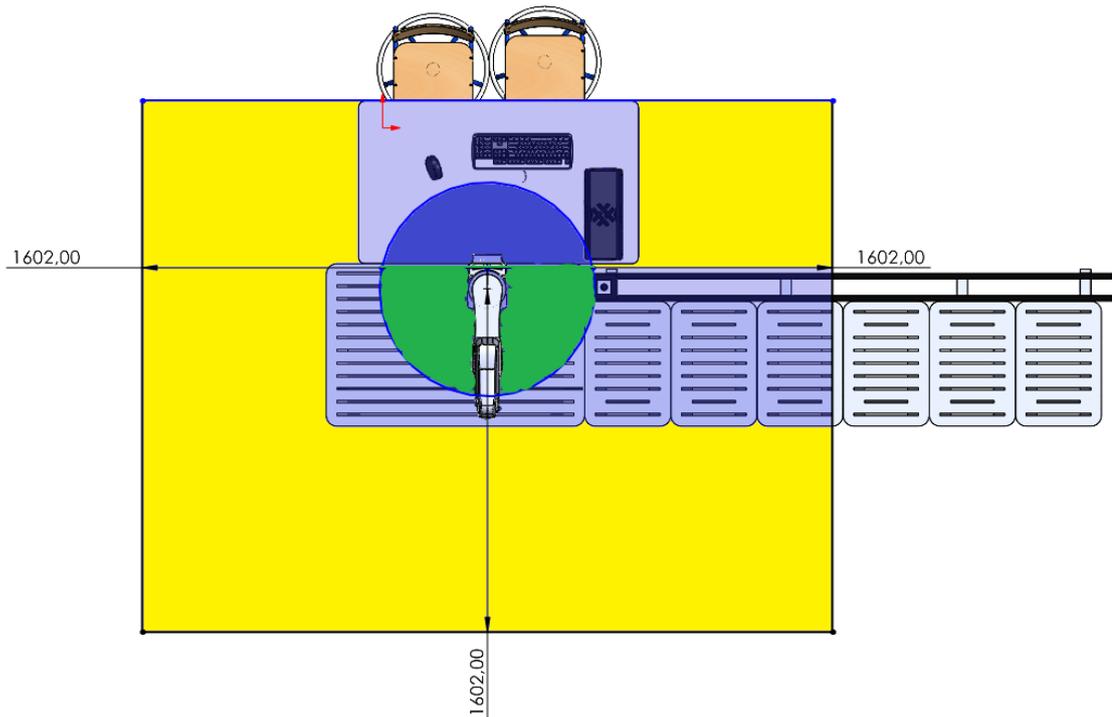


Figura 34 Espacio máximo (Esfera azul), espacio restringido (verde) y espacio de seguridad (amarillo). (Fuente propia)

Utilizando dichos espacios y con el diseño propuesto de seguridad se obtiene la distribución de los elementos de seguridad que se ve en la Figura 35.

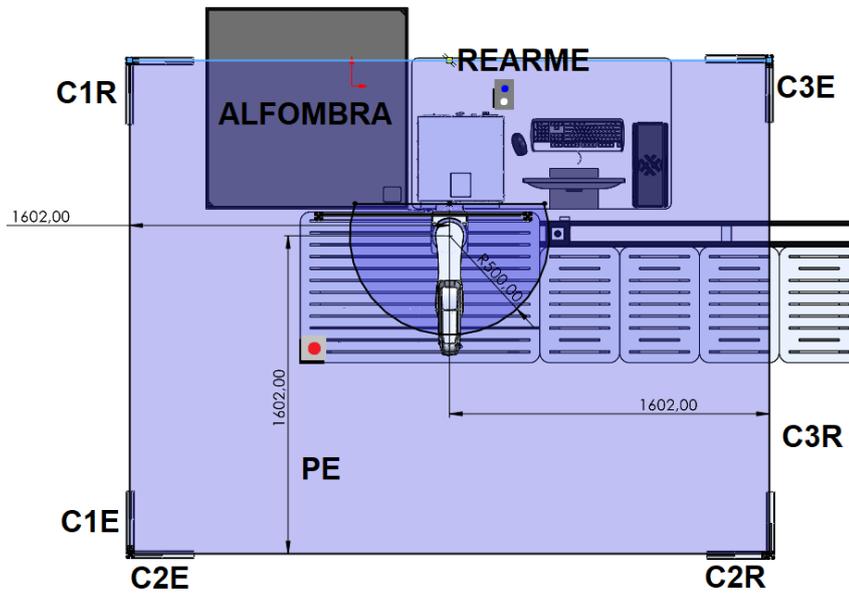


Figura 35 Distribución de los elementos del sistema de seguridad a partir de la Figura 34. (Fuente propia)

Para terminar, en la Figura 36 se puede ver la ubicación del armario eléctrico donde estará el PLC de seguridad. También se puede intuir que las líneas grises indican el espacio de detección de las cortinas fotoeléctricas. Es necesario comentar que las tres cortinas han sido numeradas del 1 al 3 para facilitar toda la parte del conexionado y la programación. Así que es necesario distinguir en que posición se encuentra cada cortina. Asimismo, se sabe que una cortina fotoeléctrica está conformada por emisor y receptor. Por ejemplo, para el emisor de la cortina 2 se utiliza C2E, mientras que para el receptor de la cortina 3 se utiliza C3R.

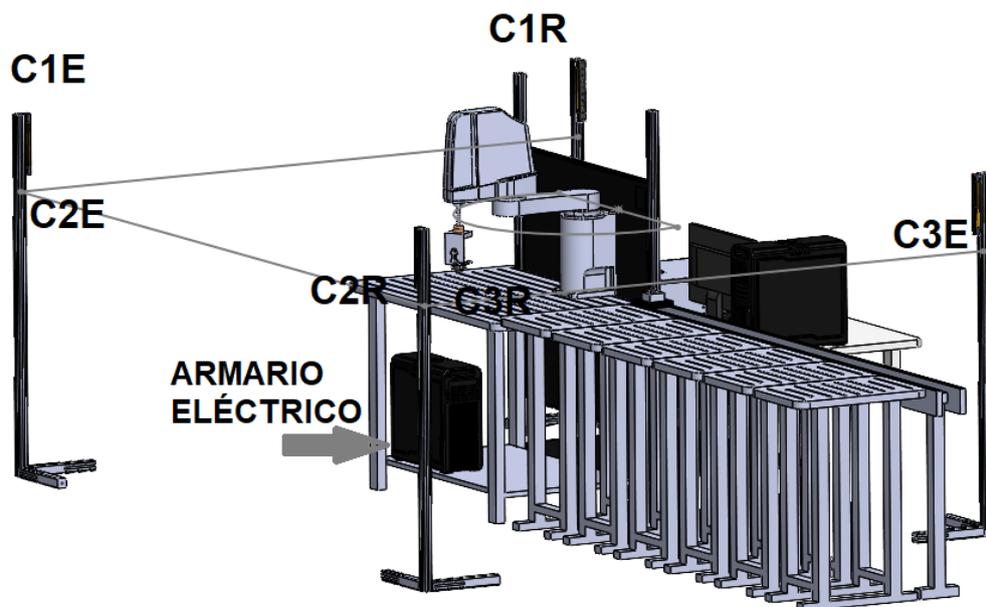


Figura 36 Distribución de los elementos de seguridad. Incluyendo el armario eléctrico y el resguardo. (Fuente propia)

5. Integración del sistema de seguridad

5.1. Conexiones con el PLC

Como se ha explicado, al utilizar elementos de seguridad sensibles es necesario utilizar una unidad de control para procesar las señales y actuar en correspondencia. Se utilizará el PLC de seguridad NX-SL3300 junto al acoplado NX-EIC202. En la Figura 37 se puede apreciar cómo está conectado las unidades de entrada y salida (E/S), junto al acoplar. Adicional, se ve mediante puntos de colores las conexiones que se realizaran, donde el azul y el amarillo son entradas de seguridad y verde y naranja son salidas de seguridad.

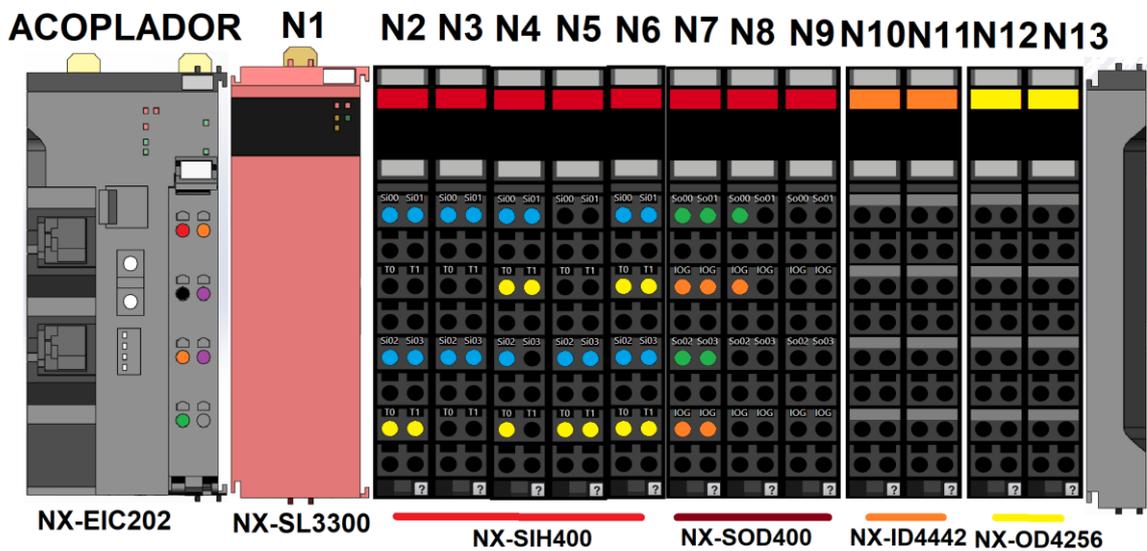


Figura 37 PLC de seguridad junto a las unidades E/S y el acoplador. Se ha enumerado las unidades con N. (Fuente propia).

Partiendo de lo anterior, se han agrupado todos los elementos de seguridad en la Tabla 4. Se incluyó el conector del elemento de seguridad, la unidad del PLC a la que está conectada, el pin de conexión con el PLC y la variable asociada al elemento de seguridad para realizar el programa.

Tabla 4 Conexiones de seguridad al PLC

CONECTOR	UNIDAD PLC	E/S PLC	VARIABLE PLC
CORTINA 1			
OSSD1_1	N2	Si00	CORTINA
OSSD2_1	N2	Si01	
CORTINA 2			
OSSD1_2	N3	Si00	CORTINA2
OSSD2_2	N3	Si01	
CORTINA 3			
OSSD1_3	N2	Si02	CORTINA3
OSSD2_3	N2	Si03	
BOTÓN PARO DE EMERGENCIA			
CABLE 1	N2	Si02	BOTON_EMERGENCIA
CABLE 2	N2	T0	
CABLE 6	N2	Si03	
CABLE 5	N2	T1	
SEÑAL MUTING CORTINAS			
SEÑAL 1	N4	Si00	MUTING
	N4	T0	
SEÑAL 2	N4	Si01	
	N4	T1	
BOTÓN DE REARME			
CABLE 5	N4	Si02	REARME
CABLE 6	N4	T0	
CABLE 7	N8	So00	
CABLE 8	N8	IOG	
ALFOMBRA DE SEGURIDAD			
CABLE BLANCO	N5	Si02	ALFOMBRA
CABLE AZUL	N5	T0	
CABLE MARRÓN	N5	Si03	
CABLE NEGRO	N5	T1	
CNUSR11 (CONTROLADOR)			
CONECTOR 4	N7	So00	PARAR
CONECTOR 5	N7	IOG	
CONECTOR 8	N7	So02	PARAR_AUTO
CONECTOR 6	N7	IOG	
CONECTOR 11	N6	Si02	MODO_ROBOT
CONECTOR 12	N6	T0	
CONECTOR 13	N6	Si00	PE_ROBOT
CONECTOR 14	N6	T0	

CNUSR12(CONTROLADOR)			
CONECTOR 4	N7	So01	PARAR*
CONECTOR 5	N7	IOG	
CONECTOR 8	N7	So03	PARAR_AUTO*
CONECTOR 6	N7	IOG	
CONECTOR 11	N6	Si03	MODO_ROBOT*
CONECTOR 12	N6	T1	
CONECTOR 13	N6	Si01	PE_ROBOT*
CONECTOR 14	N6	T1	

En el Anexo C se puede ver, a modo ilustrativo, el conexionado de todos los elementos de seguridad con el PLC.

5.2. Alimentación

Es importante resaltar que, según el fabricante, ver [24, p. 7], se necesita alimentar el acoplador con 24 V y las E/S con 5 a 24 V. Se propone realizar la conexión que se ve en la Figura 38.

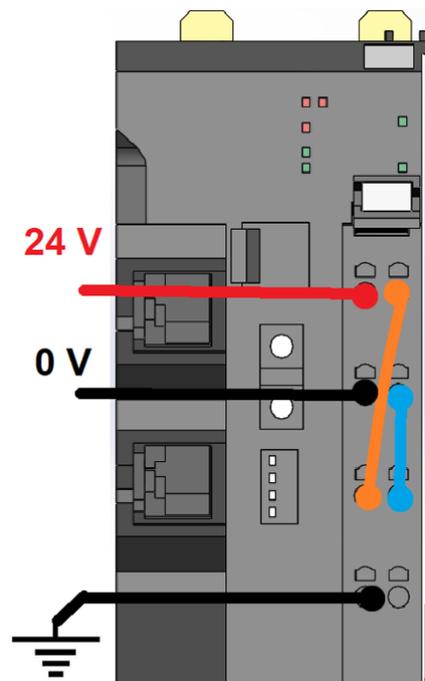


Figura 38 Acoplador NX-EIC202 con su respectiva conexión de alimentación, incluyendo la tierra. (Fuente propia)

Todos los elementos de seguridad también necesitan una alimentación de 24 V en corriente continua, por lo que es necesario utilizar una fuente de alimentación que transforme la tensión alterna (230 V a 50 Hz) de la red eléctrica a una tensión continua de 24 V. Para ello se propone utilizar la fuente de

alimentación S8VK-S12024 de OMRON, que es capaz de proporcionar una potencia de 120 W. Ver Figura 39.



Figura 39 Fuente de alimentación(S8VK-S12024) 120W/24V/5ª carril DIN Push-in+. (Fuente OMRON [25])

Al tratarse de un sistema de seguridad, hace falta asegurar una protección adecuada para las personas, por ello se propone utilizar un interruptor diferencias AC que tenga una corriente de fuga menor o igual a 30 mA, ver [26], que se pueda colocar en el carril DIN y que tenga 2 polos. La propuesta es usar el diferencial 5SV3314-6KL de Siemens.



Figura 40 Interruptor diferencial 5SV3314-6KL de Siemens. (Fuente Siemens [27])

Finalmente, como uno de los objetivos del trabajo es incluir varios elementos de seguridad, se propone utilizar un desconector por conmutación sin fusible que evite activar la alimentación del todo el sistema si se utiliza un candado para impedirlo. Se propone utilizar el 194E-A100-1753-6N de Allen Bradley.



Figura 41 Desconector por conmutación sin fusible Allen Bradley 194E-A100-1753-6N. (Fuente RS-ONLINE [28])

En el anexo E se puede ver como se realizan las conexiones desde la red eléctrica hasta la fuente de alimentación propuesta.

5.3. Otras conexiones

La alimentación necesaria para iluminar los ledes del botón de paro de emergencia y el botón de rearme es de 24 V. Las conexiones se pueden ver en el anexo C.

Por otro lado, las cortinas también requieren de una alimentación externa para su funcionamiento. Aparte, se requiere una conexión entre ellas. El fabricante ofrece un dispositivo para facilitar la conexión de las cortinas llamado F39-CN5 (Conector de cableado simple). De igual forma, en el Datasheet de las cortinas indica cómo funciona las conexiones F39-CN5, ver [22, p. 49] , de lo cual se puede extraer la idea para realizar el cableado sin necesidad del F39-CN5.

En el anexo D se puede observar cómo se deben conectar las cortinas para que funcione de manera correcta según la necesidad del sistema de seguridad propuesto. Es necesario resaltar que el cable que utiliza las cortinas es el F39-JD0303BA de OMRON, este viene con el conector necesario para conectar a la cortina y en el otro extremo trae los cables sueltos numerados del 1 al 8 que corresponden a los pines de las cortinas. Ver la Figura 42.



Figura 42 Cable para conectar las cortinas con el PLC y los pines asociados (ver anexo D). (Fuente OMRON [22])

Finalmente, los elementos de seguridad tienen conectado un cable similar al de la Figura 42, por lo que resulta más fácil conectarlos al PLC siguiendo las conexiones indicadas en la Tabla 4. También, se puede ver el Anexo C donde se indica numéricamente el cable asociado a dicha conexión. La excepción es la alfombra de seguridad que su indicador no es numérico sino por colores, los cuales también están indicados en la Tabla 4.

5.4. Programa de seguridad PLC

Para programar el PLC SL-3300 se necesita conectar el acoplador a un ordenador con el programa Sysmac Studio. La conexión se realiza utilizando un cable USB tipo B. En el anexo B se puede ver una guía de como se ha realizado la configuración inicial del PLC en Sysmac Studio.

A diferencia de otros PLC donde se utiliza las instrucciones básicas de LADDER para la programación, con el SL-3300 es necesario usar instrucciones establecidas para las unidades de control seguro según los criterios de OMRON. Se puede clasificar las instrucciones en 3 tipos:

- Funciones estándares

Estas funciones no requieren usar datos seguros, es decir, señales de seguridad. Se puede subdividir en:

- Operadores booleanos tipo AND, NOT, OR y XOR
- Operadores matemáticos
- Operadores de selección
- Operadores de conversión de datos
- Otras funciones estándares básicas

- Bloques de funciones estándares de seguridad

Es necesario usar datos de seguridad para utilizar estos bloques. Incluye contadores, biestables (RS y SR) y temporizadores.

- Bloques de función de seguridad

Están basados en estándares de seguridad definidos por PLCopen. Incluye todas las funciones necesarias para procesar la señal de seguridad de un elemento de seguridad externo.

Por otro lado, es necesario distinguir entre el tipo de dato de seguridad (SAFEBOOL) y otros datos no seguros (por ejemplo, BOOL). Todas las variables definidas en la Tabla 4 y la Tabla 5 son de tipo SAFEBOOL.

Tabla 5 Variables utilizadas para programar en Sysmac Studio. (Fuente propia)

Variable	Uso
Variables externas (Tabla 4)	
CORTINA	Detección de la cortina 1
CORTINA2	Detección de la cortina 2
CORTINA3	Detección de la cortina 3
MUTING	Habilitar funcionalidad de Muting
REARME	Señal para rearmar el sistema de seguridad
BOTON_EMERGENCIA	Señal de solicitud de un paro de emergencia
PARAR_AUTO	Petición de paro de emergencia solo en modo automático
PARAR	Petición de paro de emergencia en todos los modos
LED	Señal que activa el led del botón de rearme
MODO_ROBOT	Señal que indica el modo de funcionamiento del robot
PE_ROBOT	Señal que indica si el robot presenta una parada de emergencia
Variables internas del programa	
CORTINAS	Si alguna cortina detecta, su valor es 0.
MUTING_AUX	Guarda el valor del MUTING
RESET	Valor para hacer el reinicio a todos los bloques de seguridad
MODO_AUX	Guarda el valor del MODO_ROBOT
PE_ROBOT_AUX	Guarda el valor de PE_ROBOT
PE_AUX	Guarda el valor de PE_ROBOT
PE_ROBOT_AUX_2	Valor que evita, mediante programación, que el sistema se quede en bucle

Para explicar mejor el programa realizado para el sistema de seguridad, se dividirá por subapartados. Con esto se busca facilitar la comprensión de los bloques de función utilizados. Para agilizar la lectura se utilizará el término FB para referirse a bloque de función. Igualmente, se dirá valor 1 haciendo referencia a "TRUE" y valor 0 para valor "FALSE" (Valores posibles de las variables SAFEBOOL). Es necesario entender que, en los sistemas de seguridad, por normativa, el valor de 1 significa que no hay ninguna situación de peligro detectada por el sistema, mientras que el valor 0 es el activador de las funciones de seguridad programadas.

5.4.1. Salidas del controlador

El controlador de SCARA no solo tiene entradas de seguridad en los conectores CNUSR11 y CNUSR12, también tiene salidas de seguridad que indican el estado del robot, como se ve en la Figura 43. La señal del modo de funcionamiento (pin 11 y 12) servirá para decirle al PLC que el robot se encuentra en modo manual y, por lo tanto, la detección de las cortinas no debe requerir el rearme del sistema de seguridad.

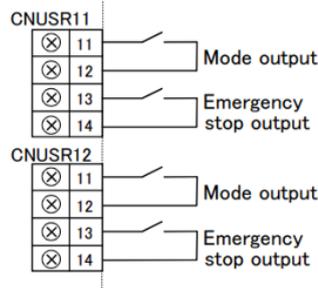
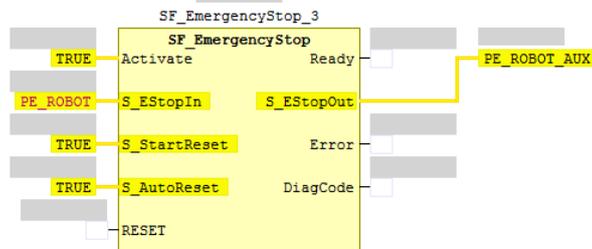


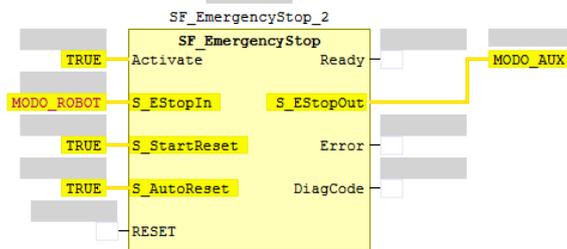
Figura 43 Salidas de los conectores CNUSR11 y CNUSR12. (Fuente Mitsubishi [17])

La señal que indica un paro de emergencia en el SCARA se utilizará para decirle al PLC que necesita un rearme del sistema antes del siguiente ciclo de trabajo del robot. Hay que aclarar que, si no se rearma el sistema de seguridad, el PLC indicará al controlador que debe realizar un paro de emergencia, es decir, el robot no se iniciará.

DEL CONTROLADOR SE OBTIENE SI SE HA SOLICITADO ALGUN PARO DE EMERGENCIA (EMERGENCIA 0 V)



DEL CONTROLADOR SE OBTIENE EL MODO DE FUNCIONAMIENTO DEL ROBOT (AUTOMATICO 24 V)

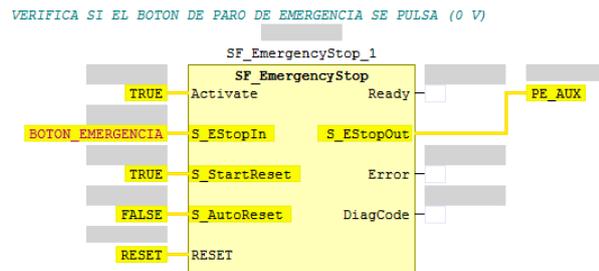


Las señales de salida del controlador se leerán como si de un botón de paro emergencia se tratara. Como se ve en la Figura 43, las señales no son de tensión, sino un circuito que se abre o cierra según el estado del robot. Tiene la misma funcionalidad que un botón de paro de emergencia. En estos casos se utilizará el FB de seguridad “SF_EmergencyStop”.

No se necesita un reinicio del bloque externo para cambiar de estado, se hará automáticamente al no tratarse de una señal de emergencias real del sistema de seguridad.

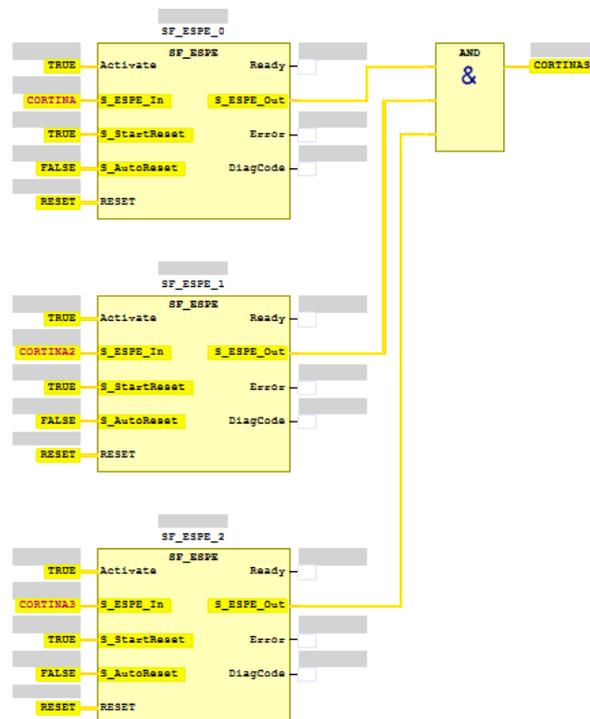
5.4.2. Botón paro de emergencia

El botón externo de parada de emergencia requiere el mismo FB utilizado en la lectura de las salidas del controlador. Pero a diferencia de las señales de estado del SCARA, se requiere un reinicio manual del bloque de función de la parada de emergencia, esto para cumplir con la normativa que obliga a que después de un paro de emergencia no se pueda iniciar el robot sin un rearme voluntario del sistema de seguridad.



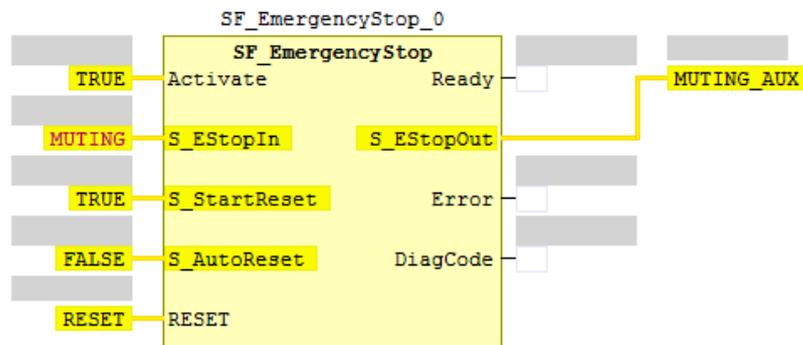
5.4.3. Cortinas fotoeléctricas

Para la supervisión del estado de las cortinas fotoeléctricas se debe usar el FB de seguridad “SF_ESPE”. En la descripción dice que sirve para la supervisión de equipos de seguridad electrosensible. Se utiliza el operador booleano “AND” para que el valor 1 de la salida PE_AUX dependa únicamente si las 3 cortinas tienen un valor 1. En el caso de que uno de los haces de cualquiera de las cortinas se vea interrumpido (detección de persona), el valor de “CORTINAS” será 0. Se requiere un reinicio manual de los FB (se usa la variable "RESET").



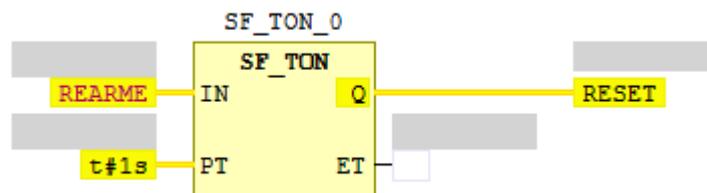
5.4.4. Funcionalidad Muting

Como se ha explicado, se dejará la posibilidad de silenciar las cortinas mediante la funcionalidad de Muting. Para hacerlo se plantea una señal externa que funcione a modo contacto, similar a la funcionalidad de un botón de paro de emergencia. Cuando los contactos estén cerrados (cortocircuito), se activará la función de Muting. Para supervisar el estado del "Muting", se utilizará la función "SF_EmergencyStop" y se le asignará el valor 1 a la variable interna "MUTING_AUX" cuando el PLC verifique el cortocircuito (MUTING con valor 1). Se requiere un reinicio manual del FB (se usa la variable "RESET").



5.4.5. Rearme del sistema de seguridad

Como la normativa exige que el rearme sea una acción voluntaria del operador del robot, para evitar que se pulse por error el botón de reinicio del sistema, se requerirá que se mantenga pulsado por más de 1 segundo para que se reinicie todo el sistema. Para realizar esta operación se utilizará el FB estándar de seguridad "SF_TON" que actúa como un temporizador de retardo que al transcurrir el tiempo (PT) se entrega un valor 1 siempre que la entrada se mantenga el valor en 1.



El botón de rearme al no ser un elemento de seguridad no requiere que su señal sea redundante, por lo tanto, tampoco requiere un FB para la supervisión de su estado. Esto permite que se pueda utilizar directamente la variable "REARME" en el FB "SF_TON".

5.4.6. Procesamiento de la señal PE_ROBOT_AUX

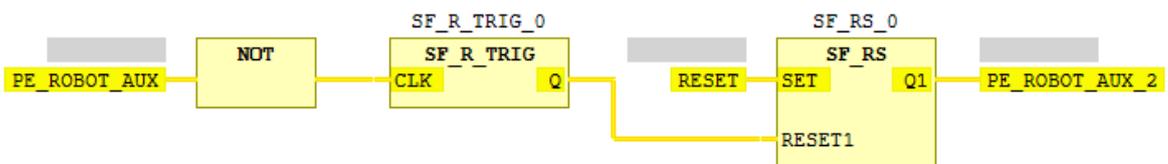
Como se ha comentado, la señal proveniente de la salida del controlador (pin 13 y 14) proporciona un contacto abierto si el robot se ha parado por una parada de emergencia, de lo contrario actúa como un contacto cerrado. Esta señal se quiere utilizar para obligar al PLC a que sea necesario rearmar el sistema de seguridad, aunque la parada de emergencia haya sido provocada externamente al sistema.

El problema radica en que el PLC, al necesitar un rearme, manda la señal al controlador de que haga una parada de emergencia y a su vez el controlador manda la señal (contacto abierto) al PLC. Esto provocaría un bucle del cual el PLC no sería capaz de salir.

Para evitarlo se ha decidido crear la variable "PE_ROBOT_AUX_2" que adquiera un valor "FALSE" siempre que la señal "PE_ROBOT_AUX" cambie su valor de 1 a 0, es decir, únicamente durante el flanco de bajada. Ahora, cuando se pulsa el botón de rearme, es necesario que "PE_ROBOT_AUX_2" adquiera un valor 1 independientemente del estado de "PE_ROBOT_AUX".

Se ha decidido utilizar la FB estándar de seguridad "SF_RS" que entrega el valor 1 cuando la entrada SET tiene valor 1, pero cuando la entrada RESET1 tiene valor 1 la salida tendrá valor 0. Lo que caracteriza a esta FB es la prioridad de la entrada RESET1, es decir, si ambas entradas tienen valor 1, la salida será 0.

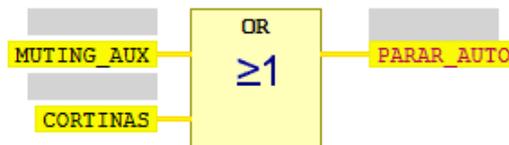
Por otro lado, se ha utilizado la FB estándar de seguridad "SF_R_TRIG" para obtener un valor 1 únicamente cuando la entrada (CLK) cambien de valor 0 a valor 1 (flanco de subida). Como lo que interesa es que cuando "PE_ROBOT_AUX" cambie de 0 a 1 su valor, "PE_ROBOT_AUX_2" tenga valor 0. Por lo tanto, se utiliza un inversor de valor a la entrada (CLK) del FB "SF_R_TRIG".



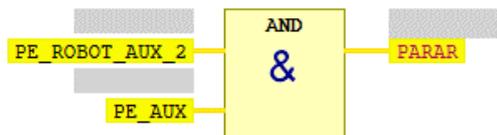
5.4.7. Solicitud de parada de emergencia

Hay que distinguir entre la parada de emergencia para el modo automático y la parada de emergencia para cualquier modo. Ver apartado 4.9. En el caso de la solicitud de parada de emergencia para cualquier modo, se utiliza la variable "PARAR". Para el otro caso se utiliza la variable "PARAR_AUTO".

El valor de "PARAR_AUTO" vendrá dado por la operación booleana "OR" entre el valor de las variables "MUTING" y "CORTINA". Esto con el objetivo de que, si la funcionalidad de Muting está activa, no se produzca la solicitud de parada de emergencia.



En el caso de la variable "PARAR", se necesitará la supervisión simultánea del estado del botón de paro de emergencia (PE_AUX) y si el SCARA no ha entrado en parada de emergencia (PE_ROBOT_AUX_2). Se consigue utilizando la operación booleana "AND". El valor será 1 únicamente cuando las dos variables de entrada tenga valor 1.



5.4.8. Led del botón de rearme

La iluminación del botón de rearme, como se ha explicado en el apartado 4.9, se activará únicamente cuando el sistema de seguridad necesite un rearme. Hay que recordar que cuando no se ha detectado ninguna situación de peligro, los valores de las variables "PARAR" y "PARAR_AUTO" se mantendrán en valor 1, por lo que para activar el led se necesitara invertir este valor con un "NOT".

Adicional, se debe tener en cuenta que cuando "MODO_AUX" tiene valor 0, significa que el SCARA está funcionando en modo manual, por lo que, aunque se active el paro de emergencia en modo automático, el sistema de seguridad no requerirá ningún rearme. Así que se invertirá el valor de "MODO_AUX" para que cuando el robot SCARA este en modo manual, no se encienda el led a no ser que se active el paro de emergencia "PARAR".



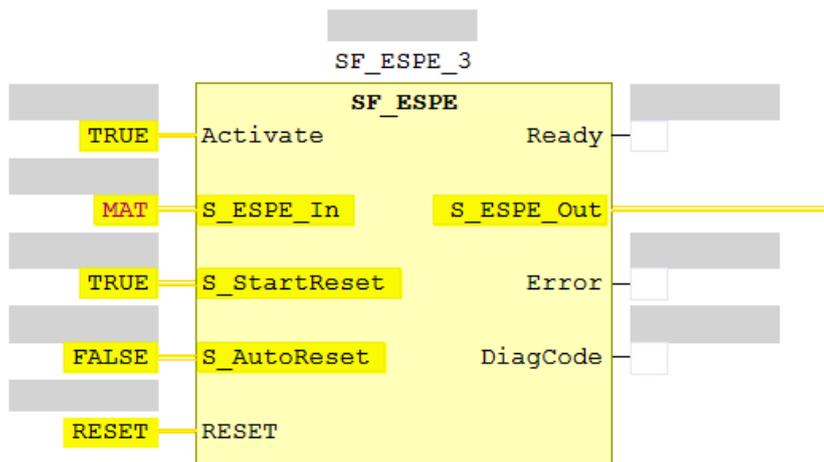
5.4.9. Alfombra de seguridad

La alfombra no se ha considerado en la programación del PLC porque, como se explicará en el apartado 6, no se usará en el montaje en el Laboratorio. De igual forma, para usar la alfombra será necesario crear una variable tipo SAFEBOOL asociada a la unidad N5, ver anexo 5, exactamente al conector Si02 y Si03 como se ve en la Figura 44.

EIP/Unidad	NX-SIH400				
	▼ Safety Inputs and Status				
EIP/Unidad 5	Si00 Logical Value	R	SAFEBOOL		
	Si01 Logical Value	R	SAFEBOOL		
	Si02 Logical Value	R	SAFEBOOL	MAT	alfombra
	Si03 Logical Value	R	SAFEBOOL		
	Safety Connection Status	R	SAFEBOOL		
	Safety Input Terminal Status	R	SAFEBOOL		

Figura 44 Crear variable MAT para usar la alfombra. (Fuente propia)

Para monitorizar el estado de seguridad de la alfombra se puede usar el FB de seguridad “SF_ESPE”. Este debe necesitar un reinicio manual con la variable “RESET” y asignar el valor del estado de la alfombra a una variable auxiliar como por ejemplo “MAT_AUX”.



Se necesitará la supervisión simultánea del estado de las cortinas y la alfombra para actuar sobre la variable “PARAR_AUTO”, por lo que se propone utilizar la operación booleana “AND” entre la variable “MAT_AUX” y la operación booleana OR de las variables “MUTING_AUX” y “CORTINAS”.

6. Montaje en el Laboratorio

Para realizar el montaje, como se ha explicado, se han utilizado el material con el que se dispone en el Laboratorio. Entre los elementos se incluye:

- Armario eléctrico que incluye el PLC SL3300 con todas sus unidades y el acoplador (como se muestra en la Figura 26), la fuente de alimentación, varios relés, un diferencial, un desconector por conmutación y varios conectores para facilitar el cableado, así como algunos carriles DIN. Ver Figura 45.
- Robot SCARA Mitsubishi (RH-3FH5515-D1-S15), controlador (CR750-D), mando de guiado(R32TB) y elemento terminal. Ver Figura 9.
- Un botón de paro de emergencia (A22EL-M-24A-02)
- Un pulsador luminoso azul (A22NL-BPM-TAA-G100-AC)
- 3 cortinas fotoeléctricas (F3SJ-A0245P30) con sus respectivos cables de conexión y soportes para sujetarlos a un perfil de aluminio
- 2 soportes (perfiles de aluminio) para colocar el resguardo que se puede ver en la Figura 16.
- Resguardo transparente



Figura 45 Armario eléctrico con el PLC NX-SL3300. Incluye todo el cableado que había previamente. (Fuente propia)

Lo primero que se ha realizado ha sido la reubicación del controlador. La nueva posición es junto al ordenador en su mesa. Lo siguiente ha sido colocar los soportes y el resguardo para comenzar a delimitar el espacio restringido del SCARA y evitar que se tenga acceso directo a dicho espacio desde la mesa del ordenador. En la Figura 46 se puede ver el trabajo comentado.

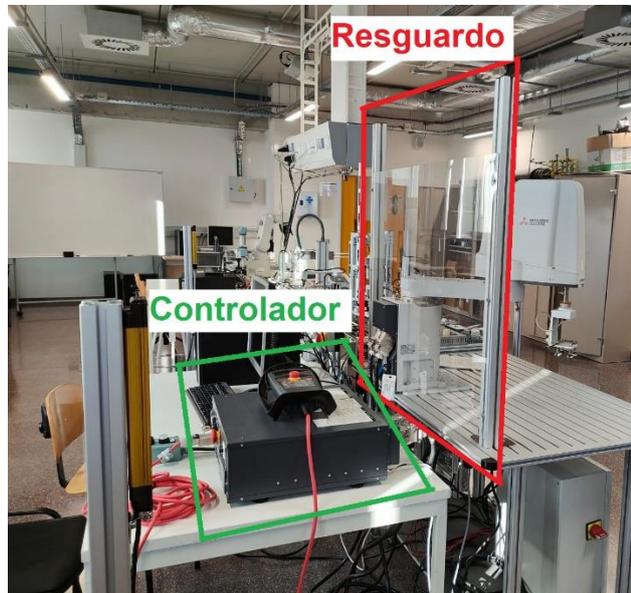


Figura 46 Nueva posición del controlador y mando de guiado. También se ve el resguardo que se ha instalado. (Fuente propia)

El siguiente paso ha sido desconectar todos los cables que se ven en la Figura 45. Como no se tenía acceso a la documentación del conexionado eléctrico realizado previamente con el PLC, resultaba más eficiente volver hacer todo el cableado bajo conveniencia. En la Figura 47 se ve el armario eléctrico con los cables de alimentación del PLC, de esta manera se pudieron realizar pruebas de conexión con el programa Sysmac Studio y la configuración inicial para comenzar a realizar el proyecto en el programa.

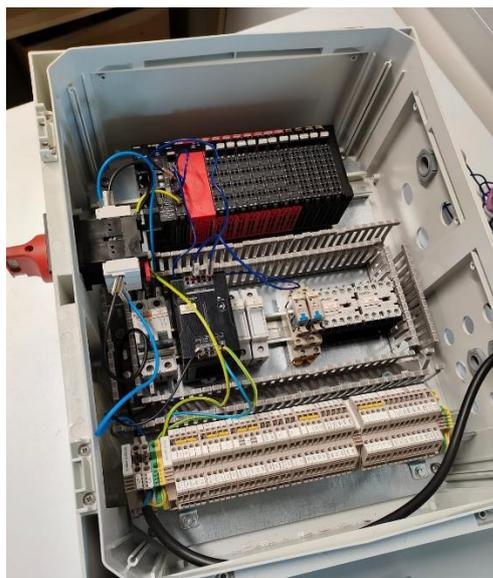


Figura 47 Alimentación del PLC. (Fuente propia)

Por otro lado, el botón de paro de emergencia y el pulsador luminoso azul tenían conectado un cable de sensor, similar al de la Figura 42. Esto requirió que se abrieran estos dispositivos para verificar el número del cable correspondiente a cada conexión del dispositivo. En la Figura 48 se puede ver el interior del pulsador de emergencia; esa fue la manera de verificar el número.



Figura 48 Interior del botón de paro de emergencia. (Fuente propia)

Para las cortinas fotoeléctricas es necesario un soporte para posicionarlas verticalmente, para ello se planteó inicialmente el diseño de la Figura 49 utilizando perfiles de 40 x 40 mm. Se compraron 4 perfiles de 2000 mm de longitud, ver [29], con lo que se pensaba realizar 4 soportes para cubrir los 3 laterales del espacio de seguridad, según el layout del apartado Layout. Adicional, se compraron 16 escuadras para unir las patas con el soporte, ver [30].

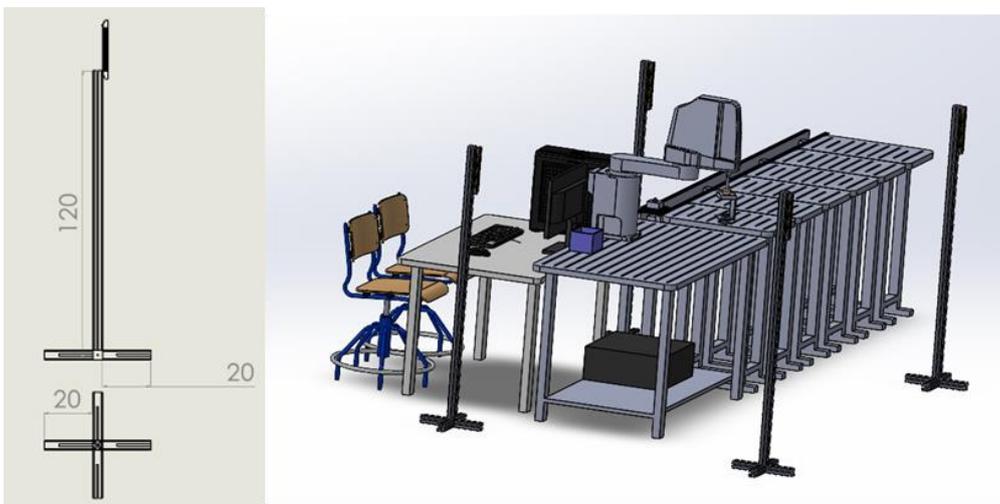


Figura 49 Diseño inicial del soporte (izquierda) y distribución de los 4 soportes en el laboratorio (derecha). (Fuente propia)

Al final se optó por cambiar el diseño del soporte por dos razones. La primera es que en el diseño de seguridad se plantea una altura de detección de aproximadamente 1400 mm. El otro motivo es que resultaba más estable colocar las patas más largas (300 mm) y se decidió colocar solo 2 patas y utilizar 2 escuadras para sustituir las patas restantes. El diseño final se puede ver en la Figura 50.



Figura 50 Soportes empleados para posicionar las cortinas fotoeléctricas de forma vertical. (Fuente propia)

Las cortinas fotoeléctricas que hay en el laboratorio no tienen la altura de detección del diseño de seguridad elaborado, por lo que existirá la posibilidad de que se burle el sistema de seguridad pasando por debajo de la zona de detección de las cortinas. La solución más fácil es comprar las cortinas propuestas y sustituirlos por las actuales. De igual forma, se realizó el montaje utilizando las cortinas disponibles. En la Figura 50 se puede apreciar cómo se ven las cortinas sujetas a los soportes.

Para facilitar la ubicación de los soportes se han dejado marcas en el suelo que indican como van posicionados. Ver Figura 51.



Figura 51 Indicador de posición de las cortinas fotoeléctricas. (Fuente propia)

Para facilitar la identificación de las cortinas, según lo explicado en el apartado 4.14, se le asignó un color a cada cortina. A la cortina 1 le corresponde negro, a la cortina 2 blanco y a la cortina 3 blanco. Ver figura

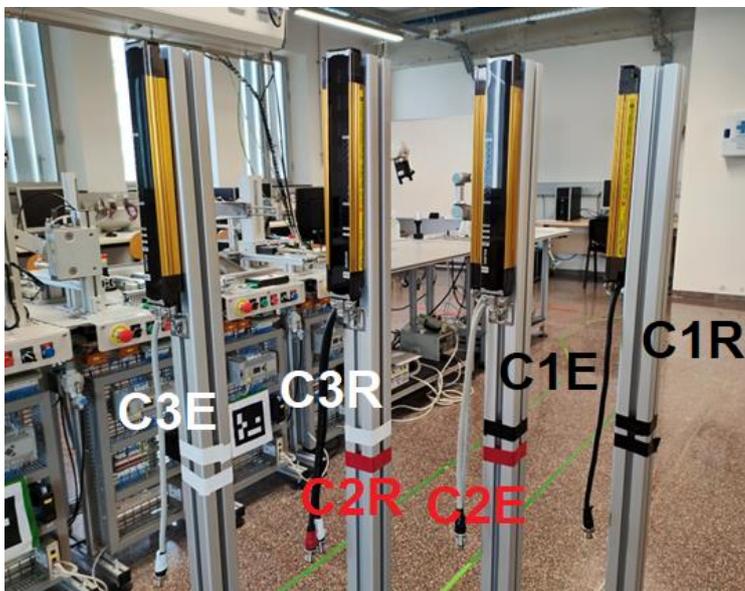


Figura 52 Asignación de colores a las cortinas para facilitar su identificación. (Fuente propia)

Respecto al armario eléctrico, se realizaron todas las conexiones pertinentes para conectar todos los elementos de seguridad siguiendo las indicaciones del Anexo C, Anexo D y Anexo E. El resultado se puede apreciar en la Figura 53

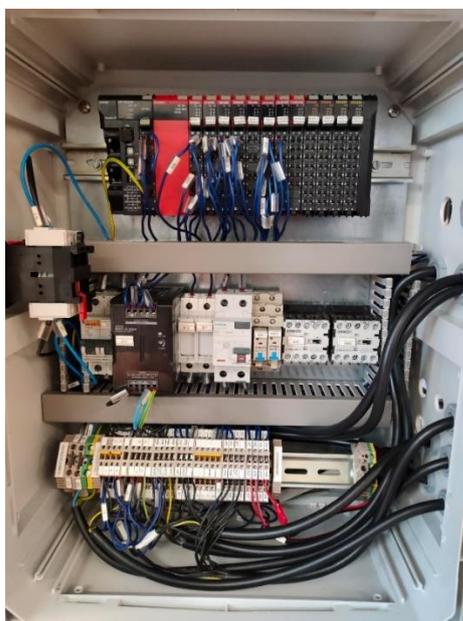


Figura 53 Armario eléctrico del PLC NX-SL3300. Incluye todo el cableado actual. (Fuente propia)

Por otro lado, el botón de rearme del sistema y el botón de paro de emergencia se han posicionado siguiente el layout del apartado Layout4.14. Ver Figura 54.

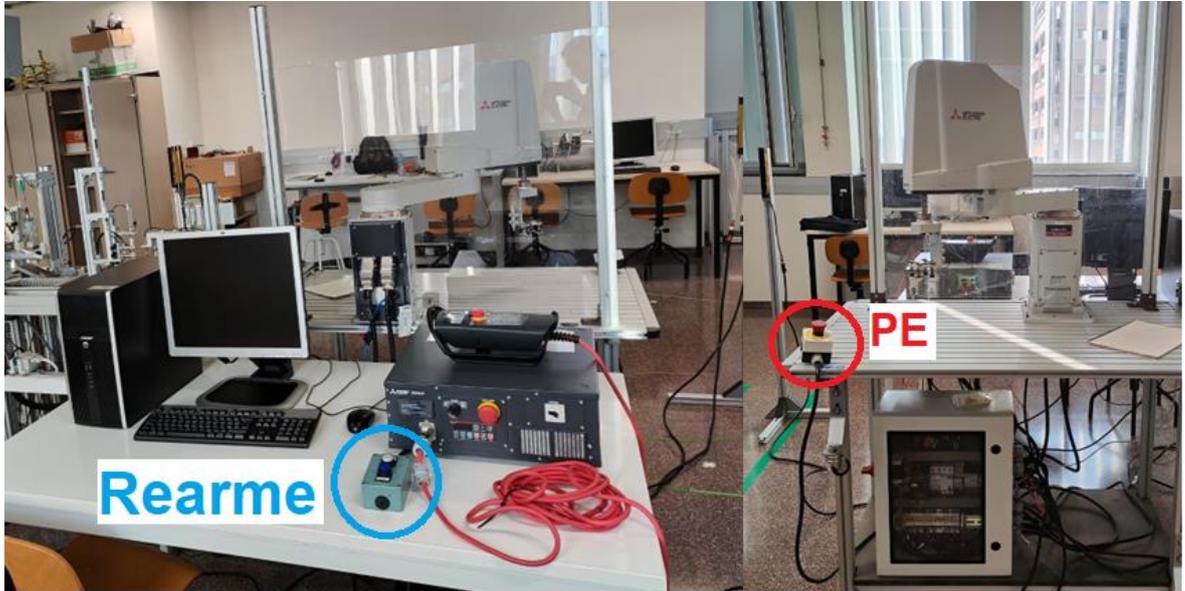


Figura 54 Ubicación del botón de rearme (izquierda) y botón de paro de emergencia (derecha). (Fuente propia)

En cuanto a la señal de Muting, se ha propuesto usar el interruptor diferencial 5SV3314-6KL de Siemens para simular la señal. Esto con el objetivo de facilitar la activación de esta funcionalidad en caso de ser requerido. Por ejemplo, se podría usar el SCARA sin necesidad de conectar las cortinas siempre que el interruptor diferencial (señal de Muting) este habilitado (circuito cerrado). Con esta funcionalidad no se intenta motivar a burlar el sistema de seguridad, sino facilitar el uso del sistema diseñado con el uso académico que se le da al SCARA. También se quería dejar la puerta abierta a incorporar el sistema de seguridad con aplicaciones más complejas, por ejemplo, el uso del robot móvil para recoger el material con ayuda del SCARA. En este caso será necesario diseñar un mecanismo de comunicación entre el robot móvil y el PLC de seguridad, con el fin de activar la funcionalidad de Muting. En la Figura 55 se puede ver el interruptor diferencial activado.



Figura 55 Interruptor diferencial(encendido) que hará la función de "Muting". (Fuente propia)

Por cuestiones de tiempo de entrega, la alfombra de seguridad propuesta no llegará hasta finales de año, por lo tanto, no se podrá realizar el montaje con ella. De igual forma, como se comenta en el apartado 5.4.9, se deja indicado como realizar la programación de la alfombra y en el Anexo C se ve como conectar la alfombra al PLC. Esto con el objetivo de que en un futuro se incluya la alfombra al montaje del laboratorio. De cualquier forma, en la Figura 56 se puede apreciar cómo queda el montaje final del sistema de seguridad.



Figura 56 Montaje del sistema de seguridad. (Fuente propia)

Para finalizar, en la Figura 57 se ve el armario eléctrico desde fuera, con el indicativo de peligro eléctrico para advertir a las personas de que se debe manipular las conexiones con cuidado. Como medida de seguridad, para impedir el acceso libre a cualquier persona, el armario cuenta con un mecanismo de cierre por llave y un desconector por conmutación con posibilidad de bloqueo con un candado, como se ve en la Figura 58. En la misma figura se ve a la derecha la llave necesaria para abrir el armario.



Figura 57 Vista frontal del armario eléctrico (izquierda) y la llave necesaria para abrirlo (derecha). (Fuente propia)

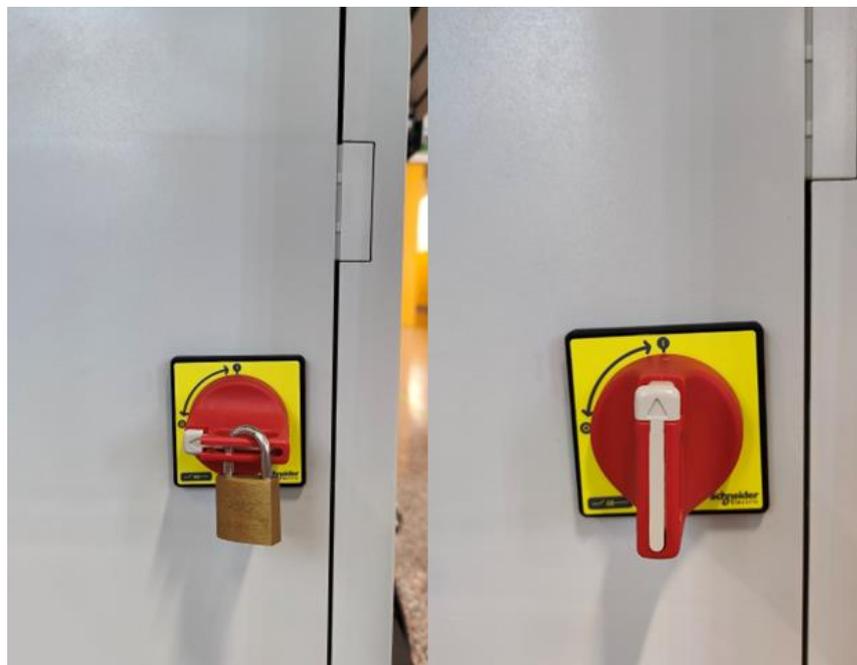


Figura 58 Desconector con bloqueo (izquierda) y en posición de encendido del PLC (derecha). (Fuente propia)

7. Conclusiones

La primera conclusión es que las normativas referentes a la seguridad están muy resumidas y son intuitivas, es decir, incluyen varios diagramas para poder seguir los procedimientos que proponen. Asimismo, estas normativas, al estar resumidas, necesitan referenciar constantemente a otras normas, y esto es lo que hace difícil que se apliquen sin estudio previo. Por lo tanto, una buena síntesis de la norma ayuda, a modo de guía, a entender y poder aplicar estas normas. Esto era lo que se buscaba con la realización de este trabajo y se cree que se ha conseguido.

Por otro lado, se ha logrado realizar un diseño de seguridad aplicando varios métodos y elementos de seguridad. Así que el objetivo de diseñar un sistema de seguridad que sea ilustrativo para los estudiantes se ha conseguido. El único problema es que como no han llegado los elementos de seguridad no se han podido probar, pero se entiende que, con las explicaciones dejadas en este documento, en un futuro se podrá efectuar el montaje completo.

En cuanto al montaje, a pesar de contar con material limitado, se ha logrado que el sistema de seguridad montado en el laboratorio sea fiel al diseño propuesto en este trabajo. Aunque como se comentó, es un sistema que se puede burlar con facilidad si el estudiante así lo desea. Lo que se puede asegurar es que podrá prevenir muchos accidentes derivados de descuidos por parte del estudiantado. Así mismo, serán ellos los que velarán en que sus compañeros acaten el sistema de seguridad para no interrumpir con el funcionamiento del robot constantemente. Igualmente, el espacio disponible en el laboratorio dificulta el montaje propuesto. Será necesario reubicar la mesa de trabajo al lado izquierdo del SCARA.

También se dejó la puerta abierta a que el sistema de seguridad montado se pueda integrar con proyectos futuros que se tenga con el robot SCARA, como la integración del sistema de ensamblaje flexible (FAS200) y el robot móvil (Robotino). Para ello se logró incorporar, por programación, la opción de realizar la funcionalidad de silenciar las cortinas.

Para finalizar, la principal mejora que se le puede hacer al sistema de seguridad es la incorporación de un sensor láser de seguridad y la integración de un PLC de control al SCARA, para poder explotar al máximo todas las funciones de seguridad que podría ofrecer el sistema y no solo las paradas de emergencia.

8. Presupuesto

En la tabla 6 se puede ver el desglose del costo económico que supone todo el material necesario para montar un sistema robótico con un sistema de seguridad.

Tabla 6 Presupuesto del material del diseño del sistema de seguridad

Nombre	Proveedor	ud	Costo unitario	Total
Robot SCARA				14.000,00 €
Robot RH-3FH5515-D1-S15	Mitsubishi	1		
Elemento terminal		1		
Controlador	Mitsubishi	1		
Consola de programación	Mitsubishi	1		
PLC de seguridad				
NX-EIC202	OMRON	1	398,20 €	398,20 €
NX-SL3300	OMRON	1	300,50 €	300,50 €
NX-SIH400	OMRON	4	279,73 €	1.118,92 €
NX-SOD400	OMRON	3	279,73 €	839,19 €
NX-ID4442	OMRON	2	53,55 €	107,10 €
NX-OD4256	OMRON	2	58,70 €	117,40 €
Cable de programación	OMRON	1	27,00 €	27,00 €
Alfombra de seguridad				
UMMA-1000-1000-1	OMRON	1	366,75 €	366,75 €
UMRT4	OMRON	4	79,68 €	318,72 €
UMOC	OMRON	4	19,07 €	76,28 €
XS3F-LM8PVC4S5M	OMRON	1	5,95 €	5,95 €
Cortinas fotoeléctricas				
F3SJ-A1095P30	OMRON	3	3.765,60 €	11.296,80 €
Cable F39-JD0303BA	OMRON	3	244,17 €	732,51 €
Botones				
Pulsador azul A22NL-BPM-TAA-G100-AC	OMRON	1	23,32 €	23,32 €
Caja vacía negra	Schneider	1	20,87 €	20,87 €
PE A22EL-M-24A-02	OMRON	1	61,11 €	61,11 €
Caja vacía amarilla	Schneider	1	20,87 €	20,87 €
Alimentación				
Fuente de alimentación S8VK-S12024	OMRON	1	125,00 €	125,00 €
Diferencia 5SV3314-6K	Siemens	1	26,74 €	26,74 €
Desconector por conmutación 194E-A100-1753-6N	Allen Bradley	1	123,11 €	123,11 €

Soportes cortinas				
Perfil de aluminio de 2 m 40x40 mm	RS-Online	4	46,41 €	185,64 €
Escuadra de 8 mm	RS-Online	16	12,93 €	206,88 €
Resguardo				
Plancha de poliestireno		1	10,00 €	10,00 €
Perfil de aluminio de 2 m 40x40 mm	RS-Online	1	46,41 €	46,41 €
Escuadra de 8 mm	RS-Online	4	12,93 €	51,72 €
Otros				
Mesa del SCARA	SMC	1	12.000,00 €	12.000,00 €
Armario eléctrico, carril DIN, conectores y cables		1	300,00 €	300,00 €
Cable eléctrico 100 m		1	14,87 €	14,87 €
Otro material variado		1	300,00 €	300,00 €
			TOTAL	43.221,86 €

En la tabla 7 se puede ver el desglose del coste del diseño y montaje del sistema de seguridad propuesto en este trabajo. Se ha tenido en cuenta que el precio por hora de un ingeniero junior oscila los 25 euros.

Tabla 7 Coste económico de mano de obra del proyecto

Trabajo	Horas	precio por h	Total
Diseño del sistema de seguridad	40	€ 25,00	1.000,00 €
Programación PLC	10	€ 25,00	250,00 €
Pruebas PLC	10	€ 25,00	250,00 €
Esquemas de conexiones	2	€ 25,00	50,00 €
Elaborar armario eléctrico	10	€ 25,00	250,00 €
Montaje inicial	4	€ 25,00	100,00 €
Validación del montaje	6	€ 25,00	150,00 €
Diseño y fabricación soportes	4	€ 25,00	100,00 €
Total			2.150,00 €

En total es necesario el desembolso de 45371,86 euros para la relación de este proyecto. El precio es sin IVA y no se ha tenido en cuenta el tiempo dedicado al estudio de la normativa y de cómo se programa en el PLC SL-3300.

9. Referencias

- [1] UE, «Reglamentos, directivas y otros actos legislativos,» [En línea]. Available: https://european-union.europa.eu/institutions-law-budget/law/types-legislation_es. [Último acceso: 24 mayo 2022].
- [2] UE, «Normas en Europa,» [En línea]. Available: https://europa.eu/youreurope/business/product-requirements/standards/standards-in-europe/index_es.htm. [Último acceso: 24 Mayo 2022].
- [3] UNE-EN ISO 13857:2020, *Seguridad de las máquinas. Distancias de seguridad para impedir que se alcancen zonas peligrosas con los miembros superiores e inferiores.*
- [4] J. Jimeno Bernal, «Se crea UNE, la Asociación Española de Normalización, separándose formalmente de AENOR,» 3 Abril 2017. [En línea]. Available: <https://ingenierosindustrialesdelestado.es/2017/04/03/se-crea-une-la-asociacion-espanola-de-normalizacion/>. [Último acceso: 25 Mayo 2022].
- [5] UNE-EN ISO 12100:2010, *Seguridad de las máquinas. Principios generales para el diseño. Evaluación del riesgo y reducción del riesgo.*
- [6] UNE-EN ISO 14120:2016, *Seguridad de las máquinas. Resguardos. Requisitos generales para el diseño y construcción de resguardos fijos y móviles..*
- [7] UNE-EN ISO 10218-2:2011, *Robots y dispositivos robóticos. Requisitos de seguridad para robots industriales. Parte 2: Sistemas robot e integración.*
- [8] O. Görnemann, «PREVENCIÓN INTEGRAL,» Febrero 2011. [En línea]. Available: <https://www.prevencionintegral.com/canal-orp/papers/orp-2013/aplicacion-evaluacion-riesgos-en-diseno-maquinaria-segura>. [Último acceso: 25 Mayo 2022].
- [9] OMRON, «SAFETY SOLUTION BASIC GUIDE.,» [En línea]. Available: https://assets.omron.eu/downloads/catalogue/en/v2/y107_safety_solution_basic_guide_en.pdf. [Último acceso: 6 Junio 2022].

- [10] UNE-EN ISO 10218-1:2012, *Robots y dispositivos robóticos. Requisitos de seguridad para robots industriales. Parte 1: Robots.*
- [11] MITSUBISHI, «CR750 Safety Manual,» [En línea]. Available: <https://manualzz.com/doc/9085172/cr750-safety-manual>. [Último acceso: 23 Mayo 2022].
- [12] P. Ponsa Asensio, *Seguridad. Conceptos básicos*, Barcelona, 2021.
- [13] UNE-EN ISO 13855:2011, *Seguridad de las máquinas. Posicionamiento de los protectores con respecto a la velocidad de aproximación de partes del cuerpo humano..*
- [14] UNE-EN ISO 13849-1:2016, *Seguridad de las máquinas. Partes de los sistemas de mando relativas a la seguridad. Parte 1: Principios generales para el diseño..*
- [15] OMRON, «Guía de seguridad,» 2012. [En línea]. Available: https://assets.omron.eu/downloads/catalogue/es/v7/y207_machine_safety_catalogue_es.pdf. [Último acceso: 12 Mayo 2022].
- [16] S. Tornil Sin, *Práctica 1. El robot RH-3FH y el entorno de programación RT Toolbox2*, 2021.
- [17] MITSUBISHI, «Manual de especificaciones especiales(Controlador CR750-D y CR751-D),» Enero 2013. [En línea]. Available: http://www.geva-roboter.at/files/rh-3fh_series_standard_specifications.pdf#page=97&zoom=100,147,847. [Último acceso: 3 Junio 2022].
- [18] S. Tornil Sin, *Práctica 3. Programación del robot(II) RH-3FH*, 2021.
- [19] MITSUBISHI, «Short operating instructions Industrial robot RV-SD/RH-SDH, RV-SQ/RH-SQH,» Noviembre 2011. [En línea]. Available: <https://www.manualslib.com/manual/2067093/Mitsubishi-Electric-Sd-Series.html?page=38#manual>. [Último acceso: 29 Mayo 2022].
- [20] OMRON, «NX-series Safety Control Unit,» [En línea]. Available: https://assets.omron.eu/downloads/manual/en/v3/z930_nx_series_safety_control_unit_use_rs_manual_en.pdf#page=193&zoom=100,0,548. [Último acceso: 3 Junio 2022].

- [21] OMRON, «Sysmac Studio Free for 30-Days,» [En línea]. Available: <https://automation.omron.com/en/us/forms/download-sysmac-studio-trial>. [Último acceso: 20 Abril 2022].
- [22] OMRON, «F3SJ Safety Light Curtain Datasheet,» [En línea]. Available: https://assets.omron.eu/downloads/datasheet/en/v3/f074_f3sj_safety_light_curtain_datash eet_en.pdf. [Último acceso: 11 Junio 2022].
- [23] OMRON , «UMA Series Safety Mat Datasheet,» [En línea]. Available: https://assets.omron.eu/downloads/datasheet/en/v8/a250_uma_series_safety_mat_datash eet_en.pdf. [Último acceso: 13 Junio 2022].
- [24] OMRON, «NX-series EtherNet/IP™ Coupler Unit - NX-EIC Datasheet,» [En línea]. Available: https://assets.omron.eu/downloads/datasheet/en/v6/nx-series_ethernet_ip%E2%84%A2_coupler_unit_-_nx-eic_datasheet_en.pdf. [Último acceso: 13 Junio 2022].
- [25] OMRON, «Fuente de alimentación S8VK-S12024,» [En línea]. Available: <https://industrial.omron.es/es/products/S8VK-S12024>. [Último acceso: 13 Junio 2022].
- [26] SUMIDEC, «COSAS QUE TIENES QUE SABER SOBRE LA PROTECCIÓN DIFERENCIAL,» [En línea]. Available: <https://www.sumidelec.com/blog/cosas-que-tienes-que-saber-sobre-la-proteccion-diferencial>. [Último acceso: 25 Mayo 2022].
- [27] SIEMENS, «Interruptor diferencial 5SV3314-6KL,» [En línea]. Available: <https://mall.industry.siemens.com/mall/es/es/Catalog/product?mlfb=5SV3314-6KL>. [Último acceso: 25 Mayo 2022].
- [28] RS-ONLINE, «Desconector por conmutación sin fusible,» [En línea]. Available: <https://pt.rs-online.com/web/p/interruptores-de-desconexion-no-protegidos-por-fusible/2617903>. [Último acceso: 25 Mayo 2022].
- [29] RS-ONLINE, «Perfil de Aluminio, perfil de 40 x 40 mm x 2000mm de longitud,» [En línea]. Available: <https://es.rs-online.com/web/p/tubos-y-perfiles/7613313>. [Último acceso: 13 Mayo 2022].

- [30] RS-ONLINE, «Componente de conexión RS PRO, para ranura de 8mm,» [En línea]. Available: <https://es.rs-online.com/web/p/componentes-de-conexion/7675698>. [Último acceso: 13 Mayo 2022].
- [31] OMRON, «Guía de selección de componentes de seguridad,» [En línea]. Available: https://assets.omron.eu/downloads/datasheet/en/v3/f074_f3sj_safety_light_curtain_datash eet_en.pdf. [Último acceso: 3 Junio 2022].
- [32] OMRON, «NX-series Safety Control Unit User's Manual,» [En línea]. Available: https://assets.omron.eu/downloads/manual/en/v3/z931_nx_series_safety_control_unit_inst ructions_reference_manual_en.pdf. [Último acceso: 14 Junio 2022].

Anexo A: Manual de usuario del sistema de seguridad

1. Se debe comprobar de que el PLC está alimentado antes de encender el controlador del SCARA.



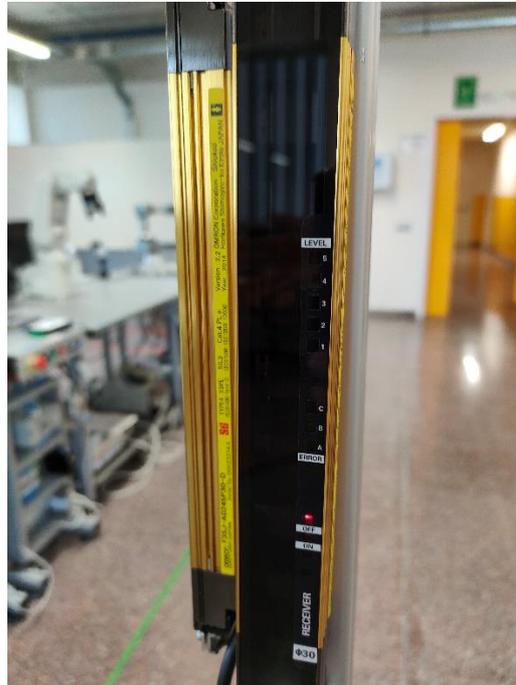
2. Es necesario verificar que las cortinas están conectadas correctamente siguiendo la referencia de colores en los cables. También es necesario revisar que las cortinas no presentan ningún problema de comunicación entre el receptor y emisor. Se debe observar la siguiente iluminación en las cortinas:



- 2.1. Un posible fallo es cuando el receptor parpadea el indicador A y B en rojo. El problema es que no hay comunicación entre el receptor y emisor, por lo que es necesario revisar que se han conectado correctamente las cortinas.



- 2.2. Si el receptor solo enciende el indicador "off", significa que no están correctamente posicionadas las cortinas y el receptor no puede recibir los haces de luz del emisor.



3. En caso de no desear conectar las cortinas, es necesario abrir el armario eléctrico utilizando la llave de acceso y activar la función de Muting (Activar el diferencial de siemens en el armario).



4. Al encender el PLC se requerirá rearmar el sistema de seguridad. Para ello se debe usar el botón (azul) de rearme junto al control del SCARA. Tendrá un indicativo luminoso cuando sea necesario el rearme. Para rearmar el sistema será necesario mantener pulsado el botón por más de un segundo.



5. Si después de mantener pulsado el botón no se apaga, el indicativo es porque algún elemento del sistema de seguridad está en estado "seguro", es decir, hace falta solucionar el problema con el elemento.
 - 5.1. En el caso de las cortinas, se debe verificar como se indica en el paso 2 o realizar el paso 3.

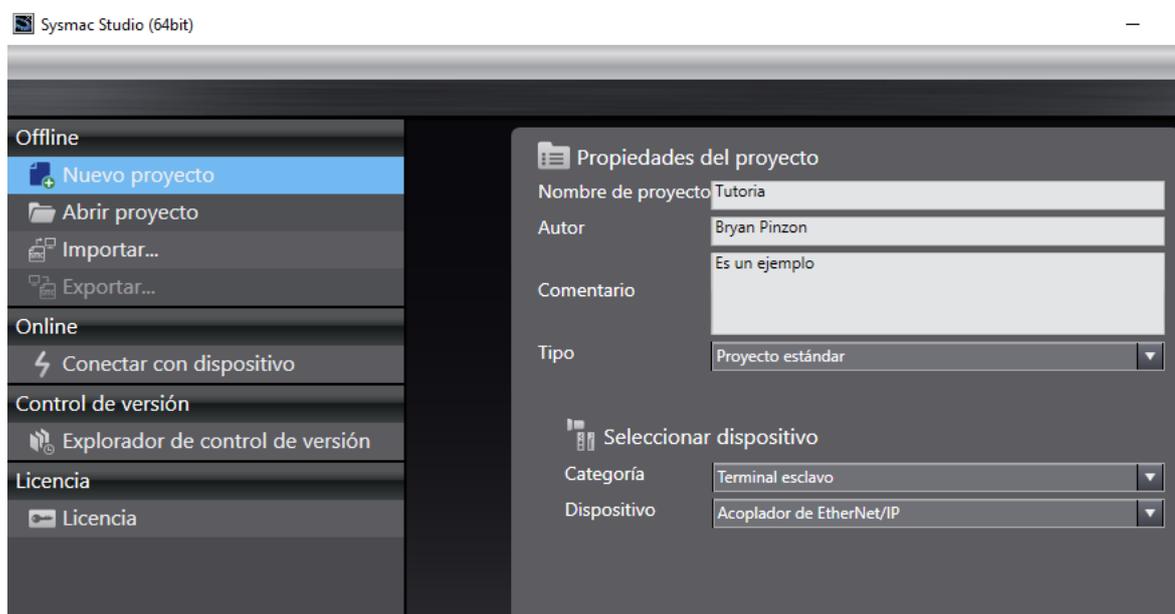
- 5.2. En el caso de la alfombra, hay que verificar que no se esté encima de ella.
- 5.3. Verificar que el botón de paro de emergencia este rearmado.
- 5.4. Habrá que revisar el conexionado eléctrico en caso de que no se solucione el problema aplicando los pasos anteriores.
6. Cada vez que se active la solicitud de parada de emergencia, será necesario restablecer los dispositivos de seguridad y rearmar el sistema de seguridad como se indica en el paso 4.
7. Si el robot está funcionando en modo manual, las cortinas y la alfombra de seguridad no provocarán que el robot se pare, por lo tanto, no será necesario rearmar el sistema hasta que se cambie de modo o se pulse el botón de paro de emergencia.
8. Si el robot está funcionando en modo automático, todos los elementos de seguridad podrán provocar un paro de emergencia. Será necesario siempre restablecer los elementos de seguridad afectados y rearmar el sistema de seguridad.
9. Pulsar el paro de emergencia del controlador o del mando de guiado obligará a que se deba rearmar el sistema de seguridad también.
10. Después de cualquier error o parada de emergencia, será necesario pulsar el botón de “reset” en el controlador o mando de guiado después de haber rearmado el sistema de seguridad.

Anexo B: Tutorial de configuración Sysmac Studio

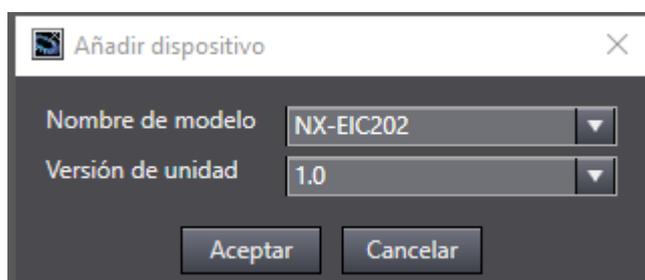
Antes de realizar cualquier paso, es necesario contar con el programa de Sysmac Studio instalado en el ordenador. Se puede utilizar el siguiente enlace para descargar la versión de prueba de 30 días: <https://automation.omron.com/en/us/forms/download-sysmac-studio-trial>

Se explicará el procedimiento a seguir para configurar el PLC de seguridad NX-SL3300 con el acoplador NX-EIC202. No aplica para configurar otro tipo de PLC convencionales.

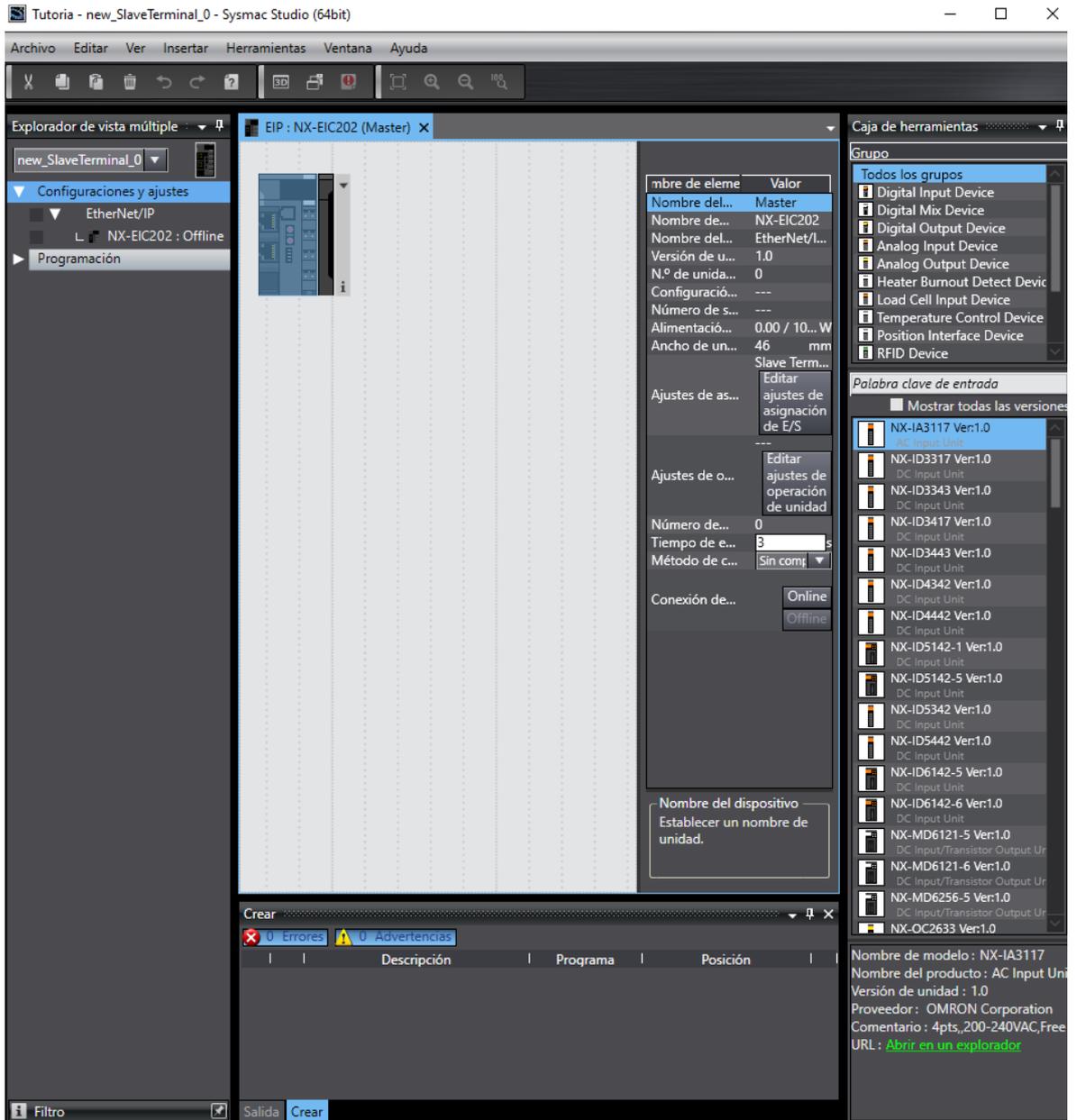
1. Seleccionar “Nuevo proyecto”, **tipo** proyecto estándar, **categoría** terminal esclavo y **Dispositivo** Acoplador de EtherNet/IP. Dadle a crear.



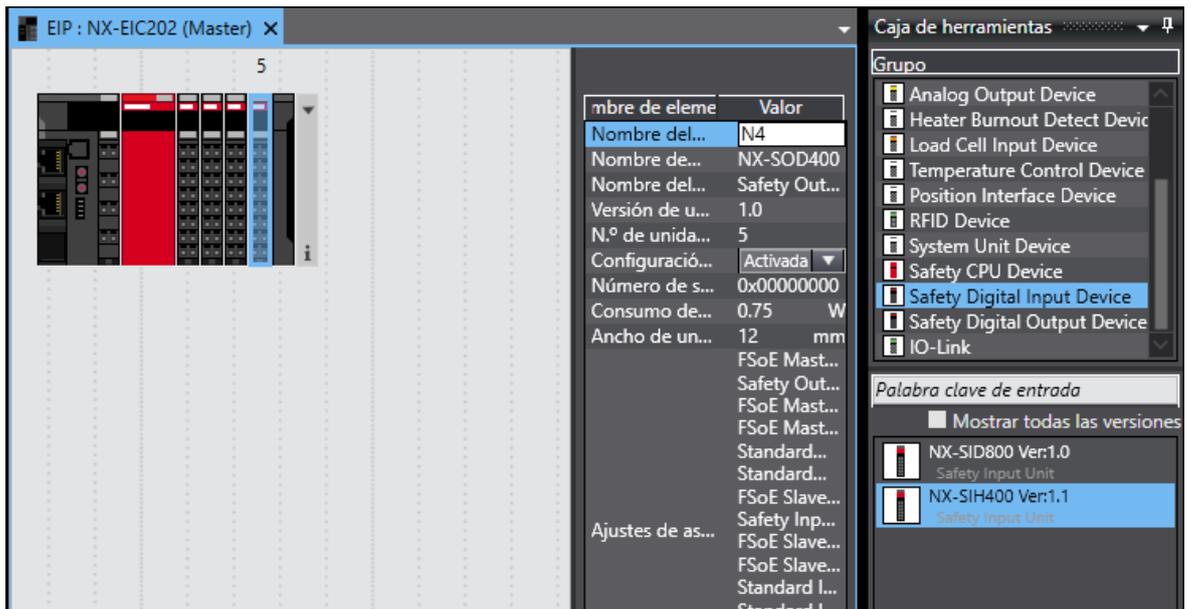
2. Seleccionar NX-EIC202 en Nombre de modelo y versión de unidad 1.0.



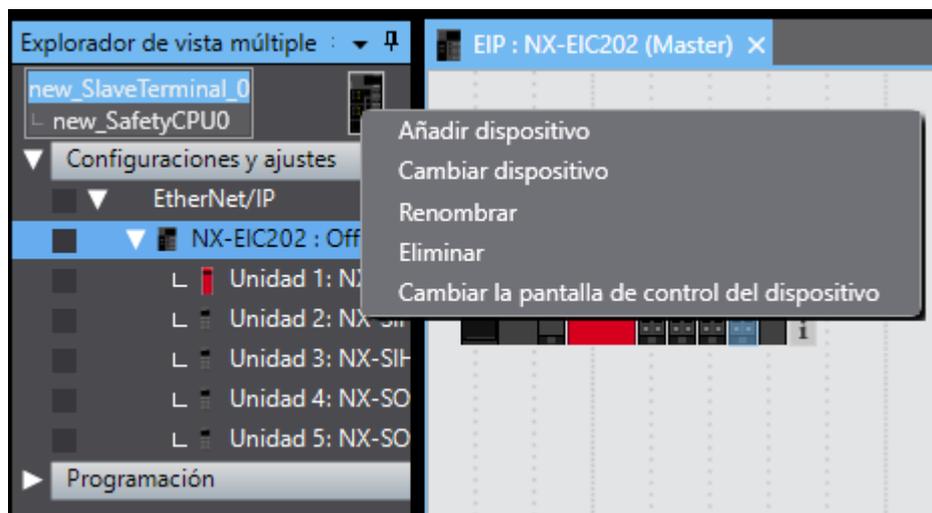
3. En el Explorador de vista múltiple (ventana de la izquierda) hay que seleccionar configuración y ajustes, EtherNet/IP, NX-EIC202. Deberá salir una ventana como la siguiente:



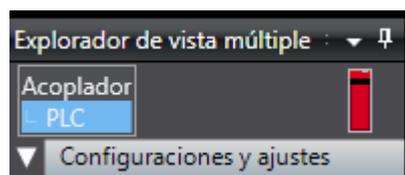
4. En la ventana Caja de herramientas hay que buscar las unidades de seguridad, es importante poner el PLC NX-SL3300 y las unidades de entradas y salidas que se tenga en el orden que se quieran conectar en físico. Para hacerlo es necesario arrastrar el elemento desde la ventana de la derecha hasta la ventana del medio donde está la figura del acoplador. E



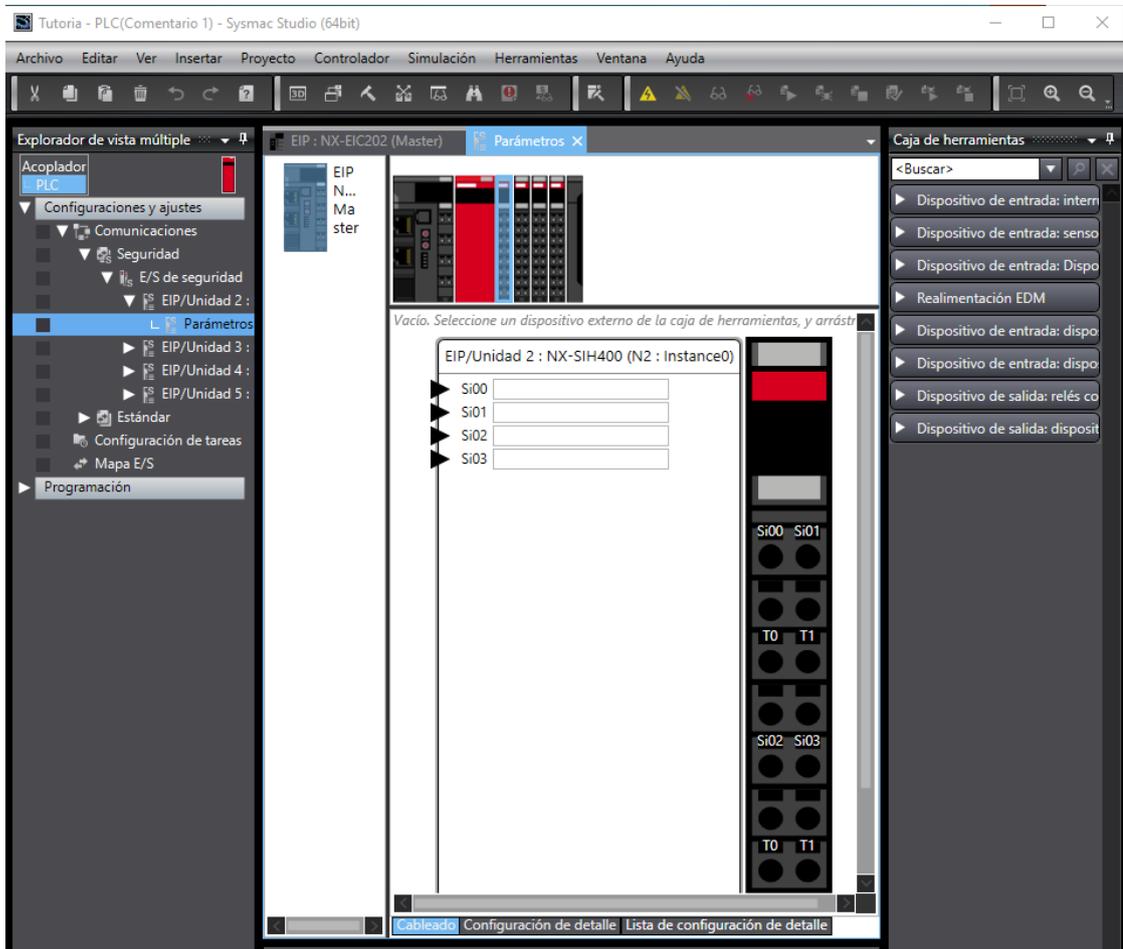
- Una vez que se hayan colocado todas las unidades con las que se dispone, se puede cambiar el nombre al acoplador de "new_SlaveTerminal_0" a algo menos genérico como "Acoplador". Para realizar el cambio de nombre es necesario ubicarse en la ventana del Explorador de vista múltiple y dar clic derecho sobre el icono del acoplador y seleccionar Renombrar.



- En la misma ventana de explorador de vista múltiple se puede seleccionar el PLC (new_SafetyCPU0). Se puede cambiar el nombre siguiendo el procedimiento del paso 5.



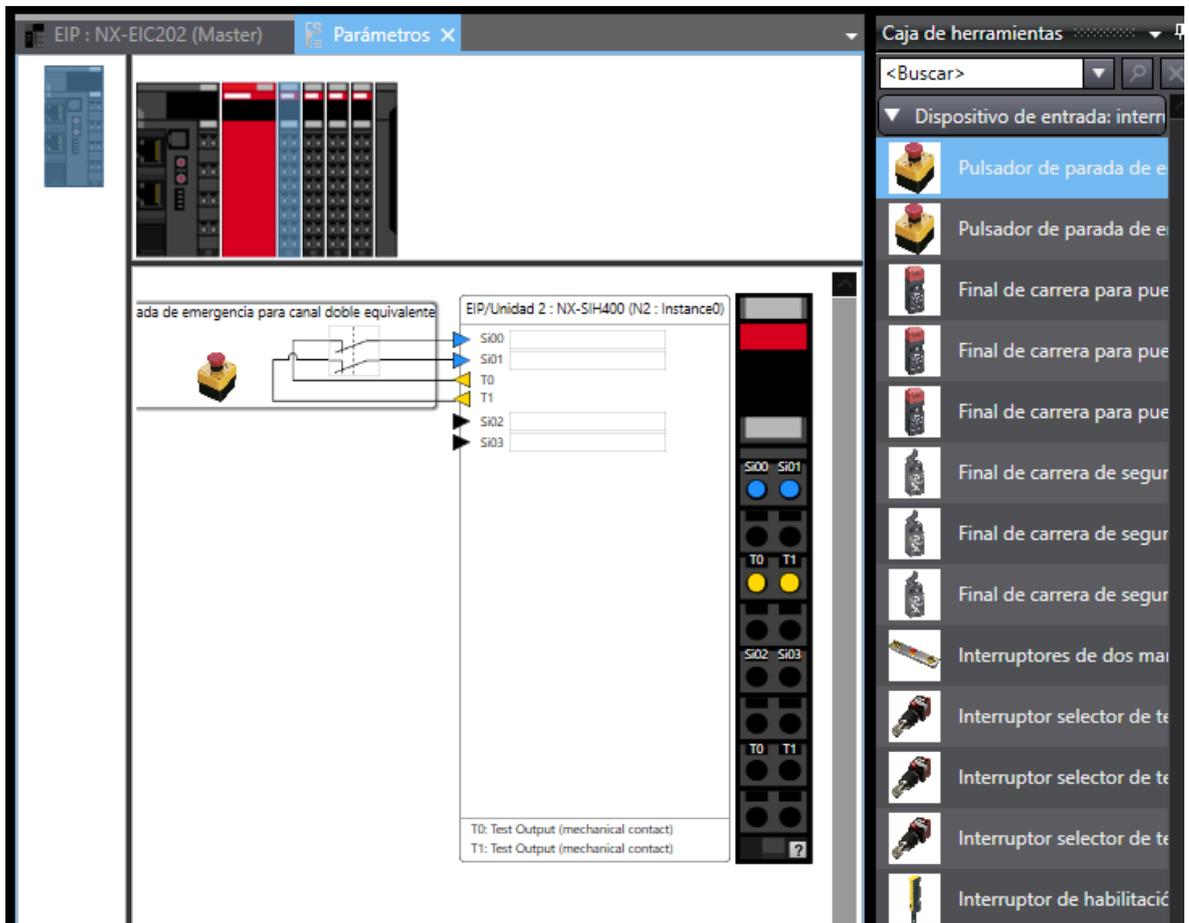
7. Cuando tengamos seleccionado el PLC, podremos comenzar a realizar las conexiones con los elementos de seguridad. Para ello, en la ventana Explorador de vista múltiple hay que seleccionar *Configuraciones y ajustes*, *Comunicaciones*, *Seguridad*, *E/S de seguridad*, *EIP/Unidad 2*, *Parámetros*. Saldrá una ventana como esta:



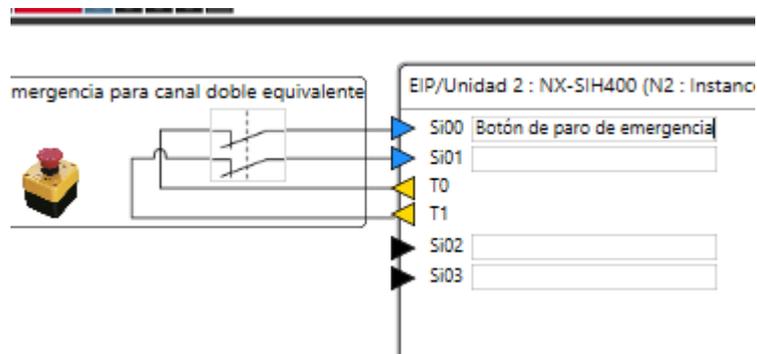
8. En la ventana Caja de herramientas (derecha) disponemos de los posibles elementos que podemos conectar al PLC de seguridad. En la ventana parámetros podemos navegar por las diferentes unidades dando clic sobre la unidad en el esquema pequeña en la parte superior:



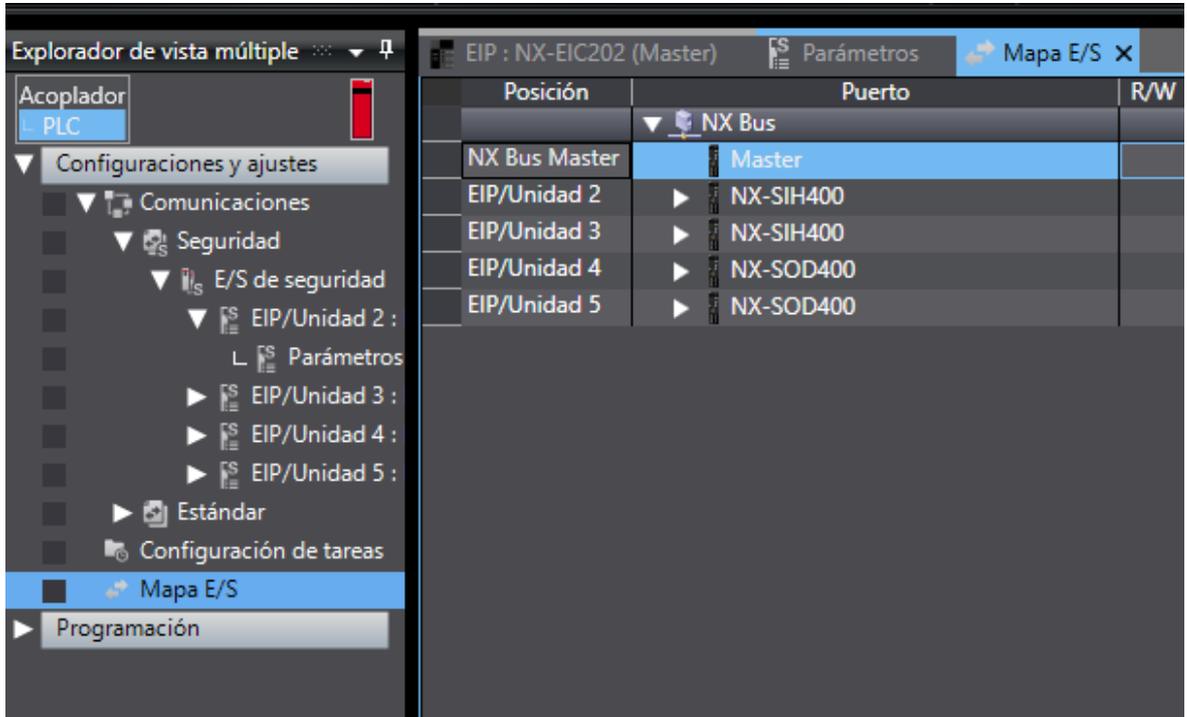
9. En alguna unidad de entrada de seguridad (ejemplo la NX-SIH400) se pondrá un pulsador de parada de emergencia.



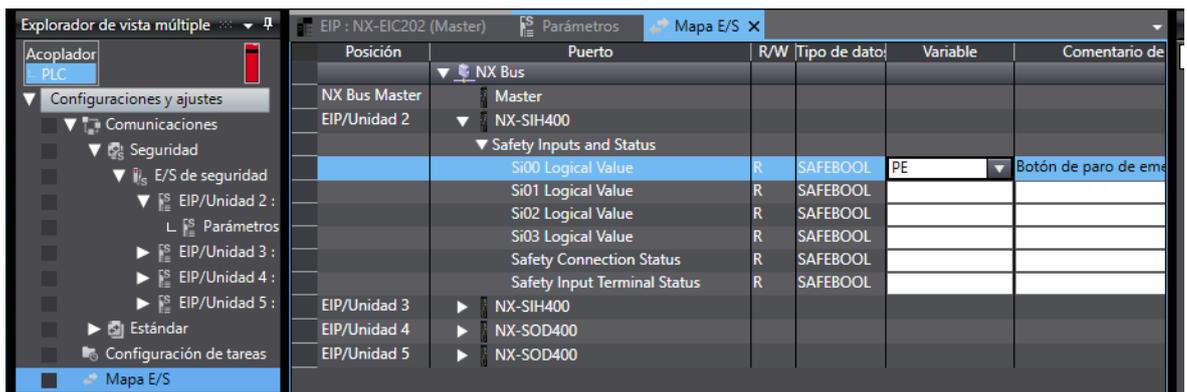
10. En el recuadro del Si00 se puede poner un comentario para facilitar saber que variable está asociada a esa entrada. No es necesario ponerle comentario al Si01 porque es una señal redundante y no podremos asignarle una variable diferente.



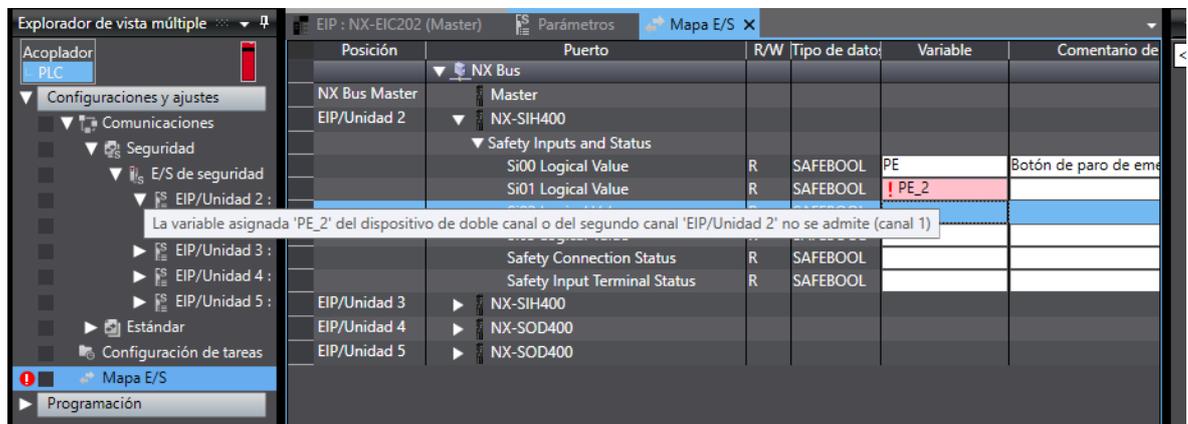
- Una vez colocado todos los dispositivos que vamos a utilizar, tanto entradas como salidas, procedemos a asignar las variables asociadas a ellos. Para ello debemos ir a Mapa E/S en la ventana de la izquierda.



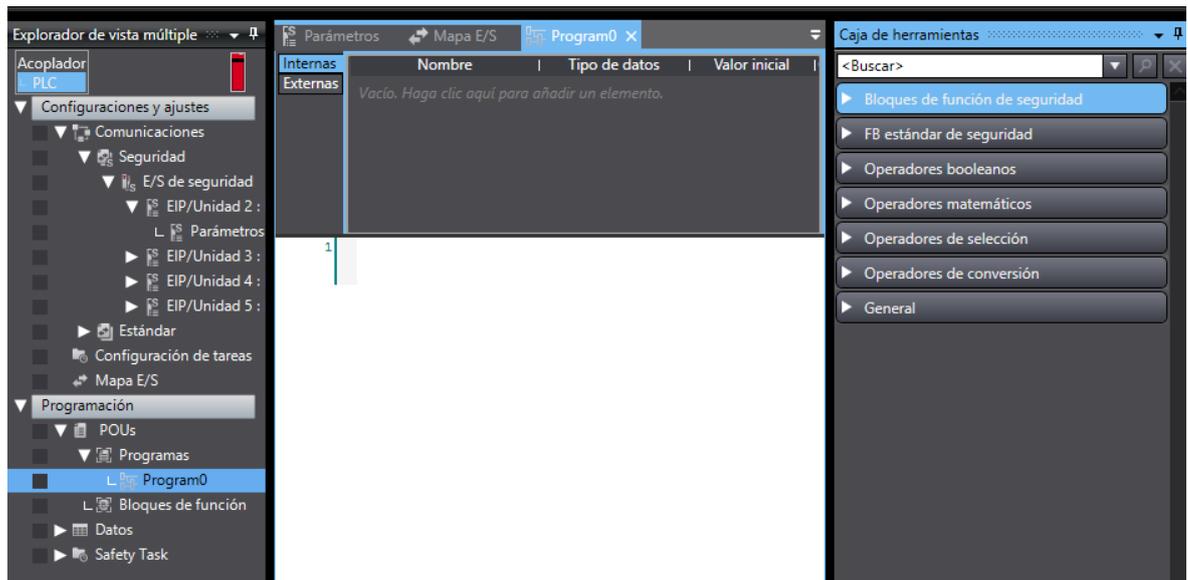
- Debemos desplegar la unidad en la que tengamos dispositivos conectados para asignarle una variable. En el espacio de Variable hay que colocar el nombre de la variable. Es importante utilizar nombres cortos y con sentido para facilitar la programación.



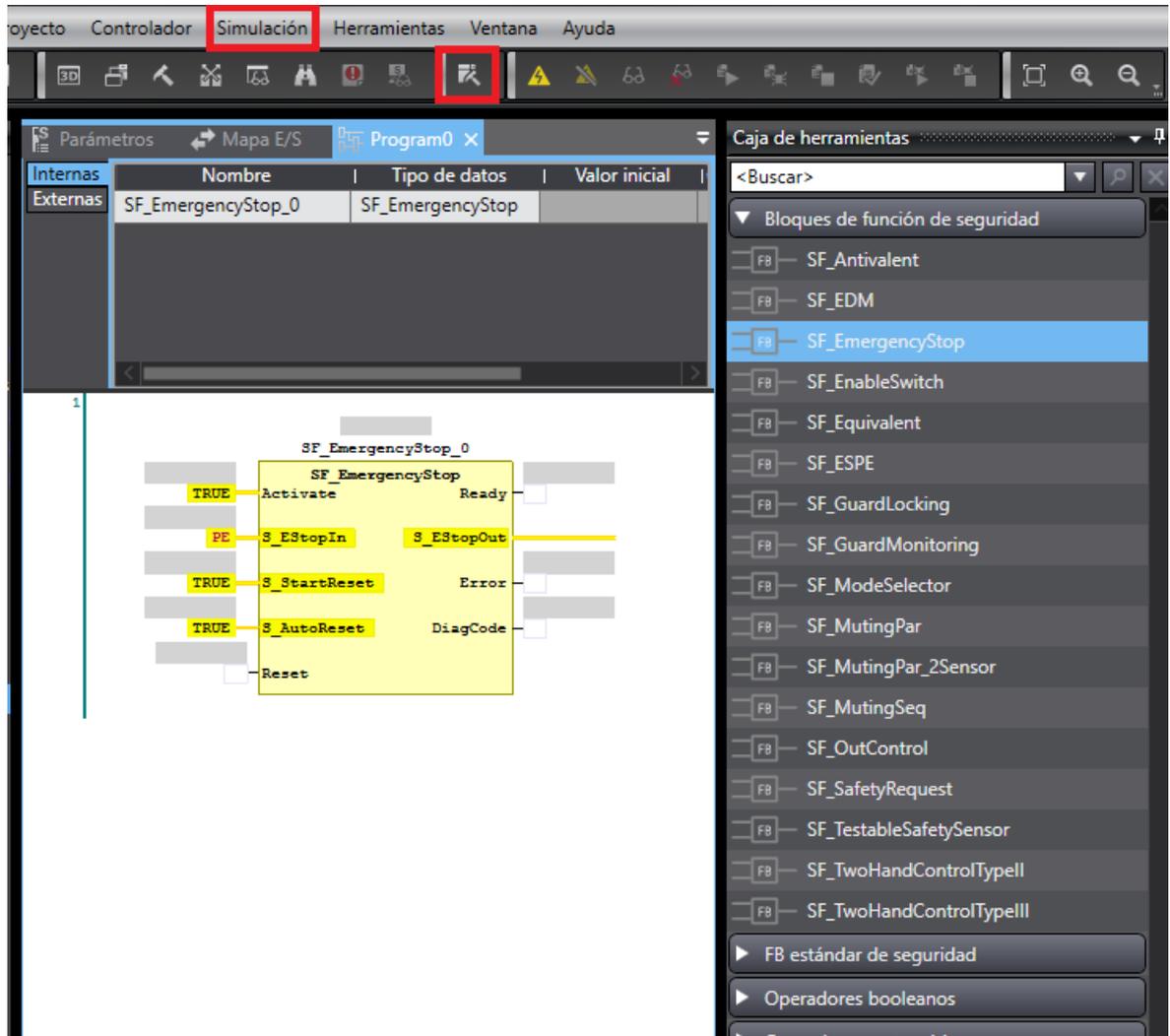
13. Si intentamos asignar una variable a la otra entrada (Si01) nos dará un error al tratarse de una señal redundante. Por eso es importante en el paso 9 seleccionar el dispositivo correcto.



14. Una vez definidas todas las variables, en la ventana de la izquierda podemos ir a programación, POU's, Programas, Program0. En ese espacio es donde debemos realizar el programa de PLC utilizando los bloques de función y los operadores que proporciona Sysmac Studio. Para entender mejor la parte de la programación, se puede consultar el apartado 5.4 del este trabajo. Programa

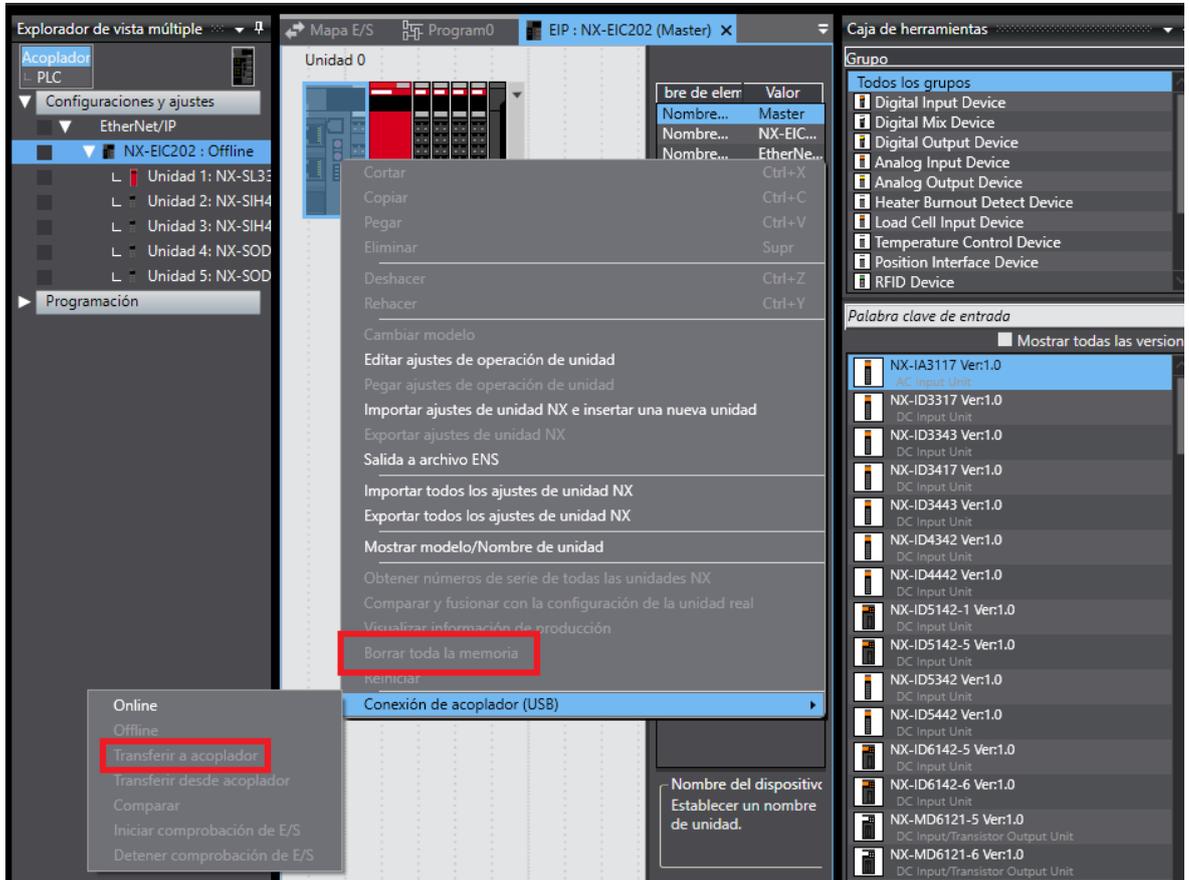


15. Una vez creado el programa, antes de realizar cualquier otra cosa es recomendable compilarlo para detectar fallos. También está la opción de la simulación que permite comprobar el funcionamiento del programa antes de subirlo al PLC.



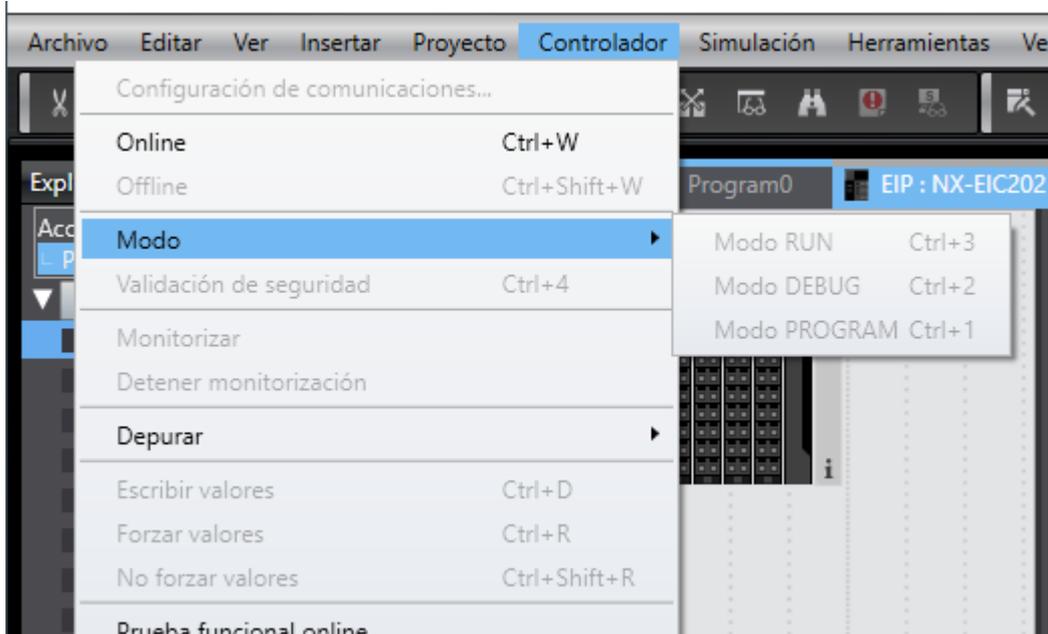
16. Una vez verificado el programa, es hora de subirlo al PLC. Para eso se debe conectar el PLC con el ordenador vía USB (usar conectar USB tipo B).
17. La conexión entre el Sysmac Studio y el PLC ocurre si se selecciona *Controlador, online* (*Ctrl+W*). El online permite ver como se está ejecutando el programa del PLC si estuviera cargado.

18. Hay que ir a Acoplador y seleccionar Configuraciones y ajustes, EtherNet/IP, NX-EIC202. Después darle clic derecho sobre el acoplador en la ventana que se ha abierto y seleccionar *Conexión de acoplador*, *Transferir a Acoplador*. Se recomienda utilizar la opción de borrar toda la memoria para evitar problemas con programas que pudiera tener el acoplador o el PLC.



19. En el proceso de transferencia al acoplador aparecerán muchas ventanas, algunas para introducir nombres o contraseñas y otras para aceptar. No se recomienda poner contraseña al programa para facilitar la reprogramación.

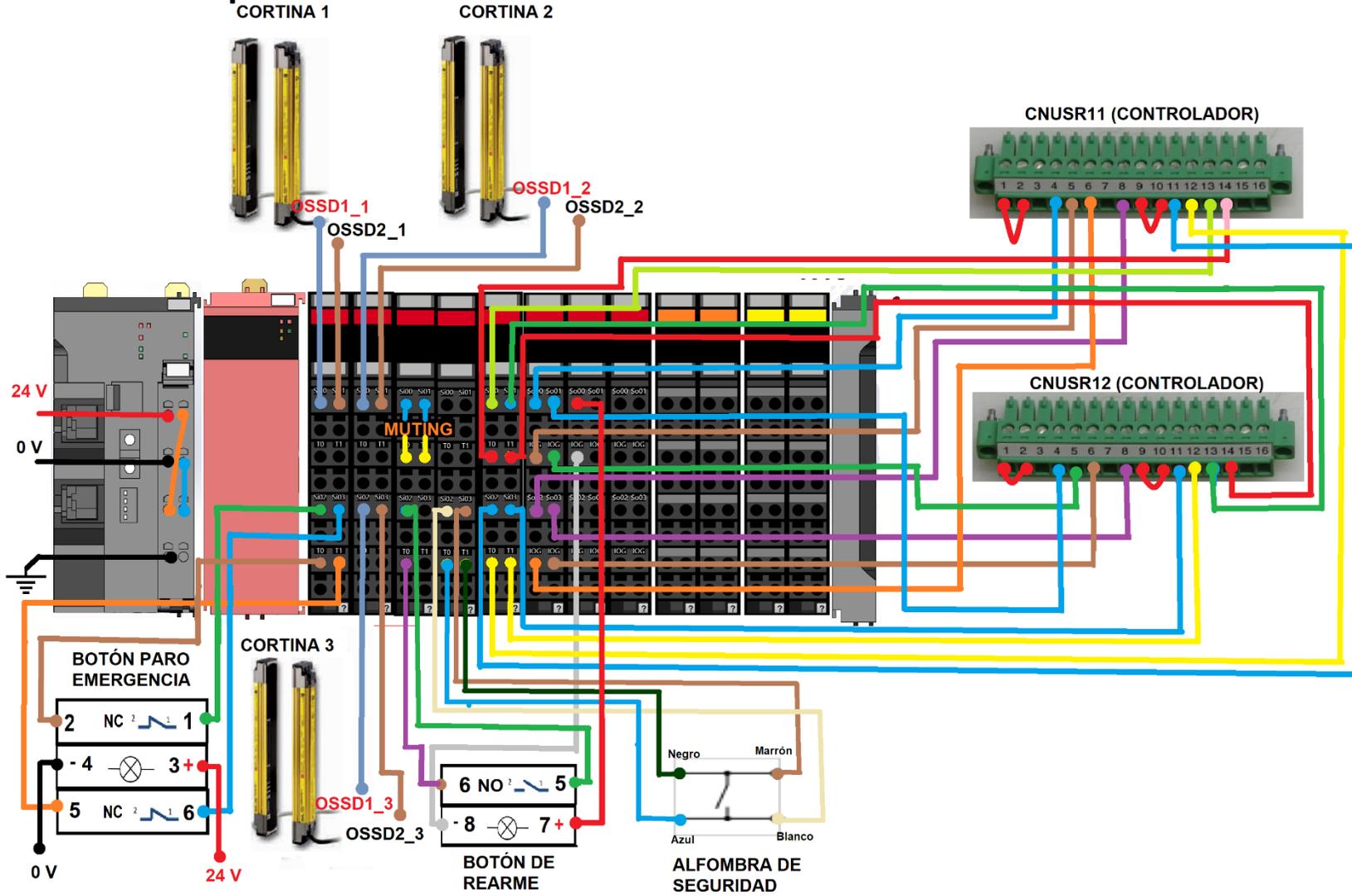
20. Una vez realizada la transferencia, es necesario volver a seleccionar el PLC y seleccionar Controlador, Modo, Modo PROGRAM (Ctrl+1). Volverán a aparecer varias ventanas, habrá que darle aceptar.



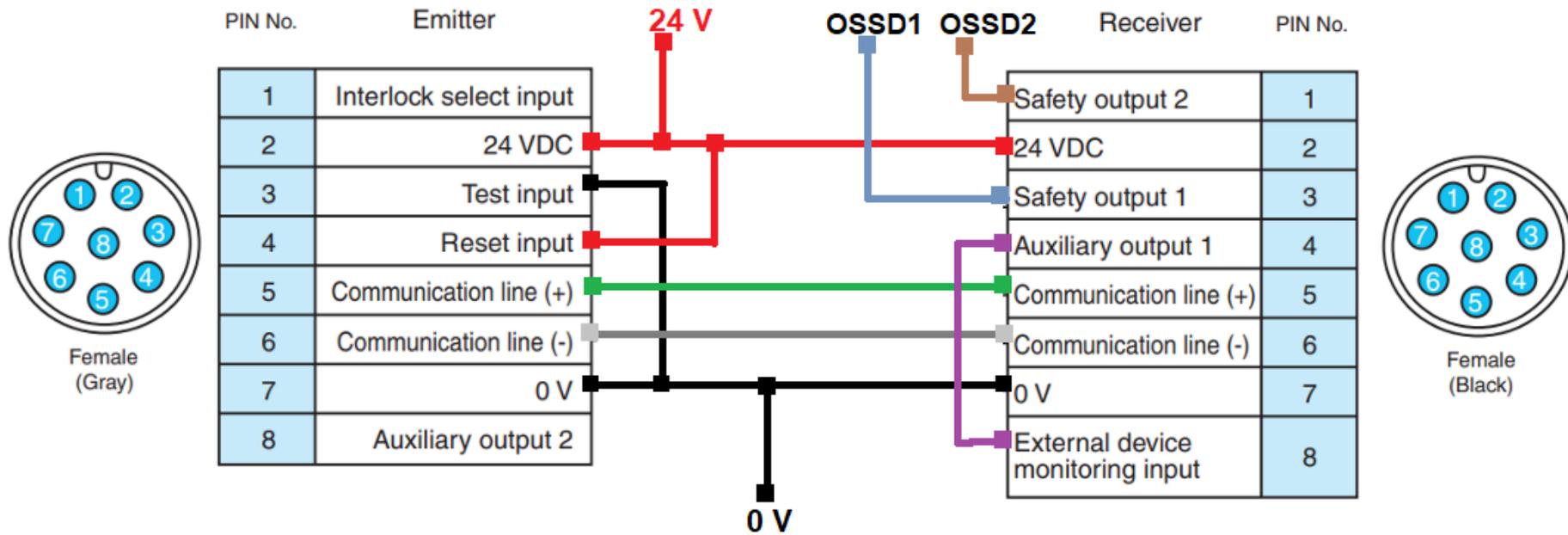
21. Hay que repetir el paso anterior para entrar en el Modo DEBUG. Una vez en ese modo habrá que seleccionar Controlador, Validación de seguridad (Ctrl+4). Volverán a aparecer varias ventanas, habrá que darle aceptar.
22. Una vez finalizada la validación de seguridad, se puede forzar al PLC a entrar en Modo RUN (Ctrl+3). De igual forma, la próxima vez que el PLC se encienda, iniciara automáticamente en Modo RUN.

Con esto ya se ha finalizado el tutorial de como configurar el PLC SL-3300 y subir el programa al PLC.

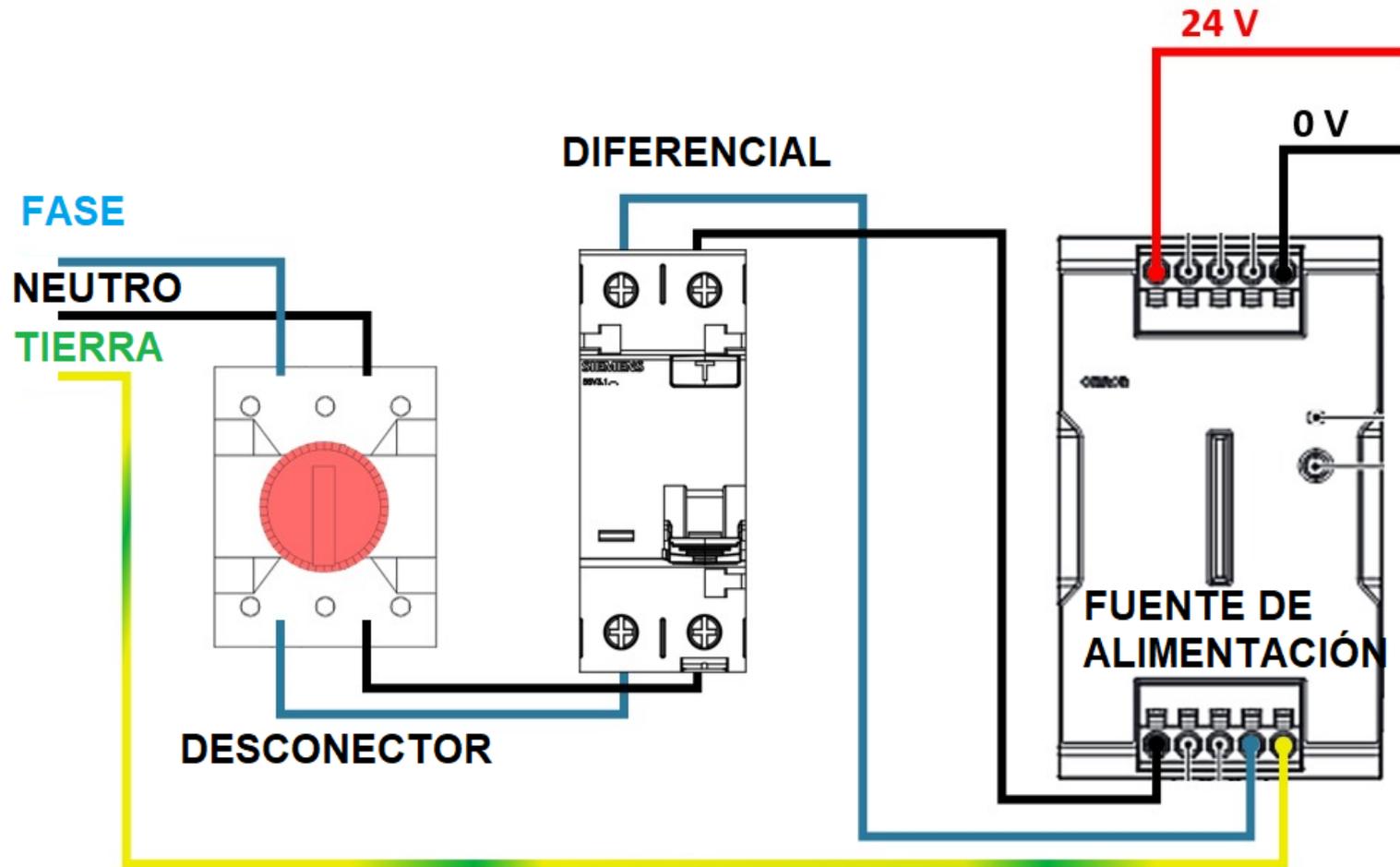
Anexo C: Esquema conexiones PLC



Anexo D: Conexión eléctrica de las cortinas fotoeléctricas

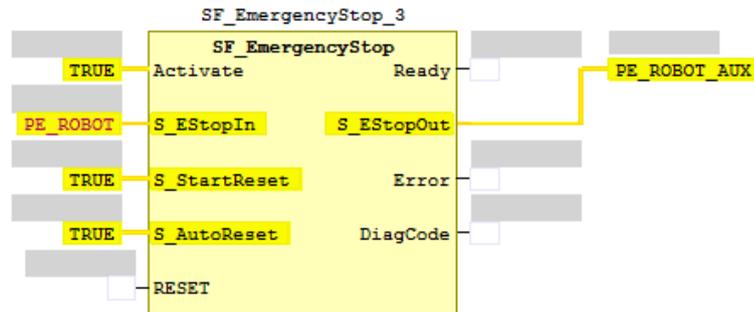


Anexo E: Conexión fuente de alimentación

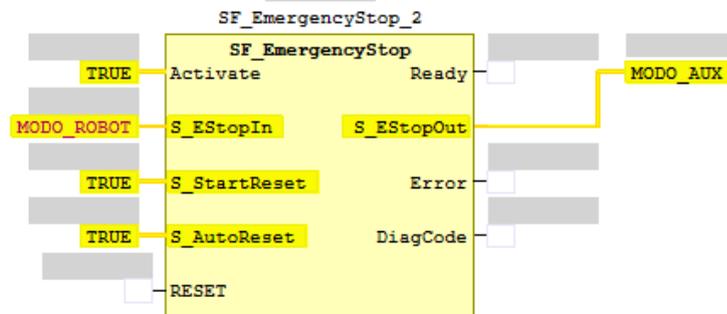


Anexo F: Programa del PLC

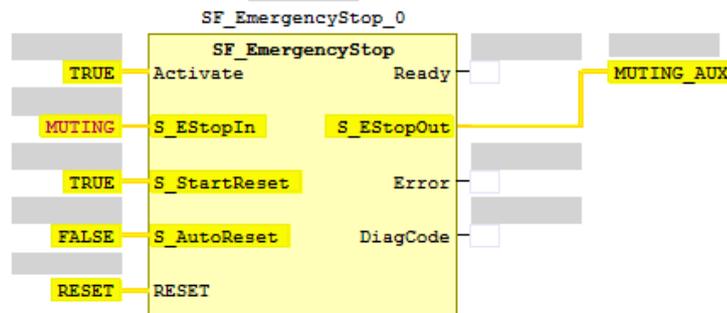
1 DEL CONTROLADOR SE OBTIENE SI SE HA SOLICITADO ALGUN PARO DE EMERGENCIA (EMERGENECIA 0 V)



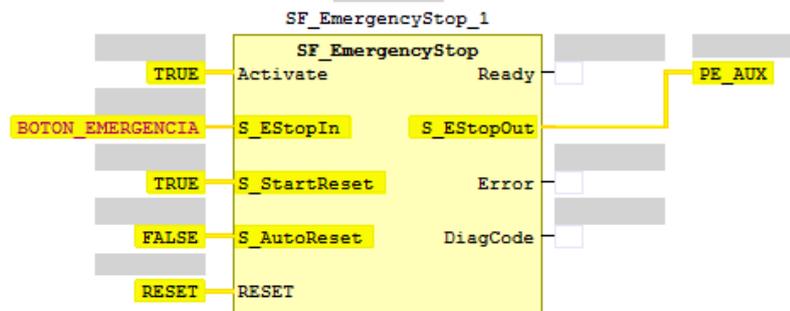
2 DEL CONTROLADOR SE OBTIENE EL MODO DE FUNCIONAMIENTO DEL ROBOT (AUTOMATICO 24 V)



3 VERIFICA LA SEÑAL PARA REALIZAR LA FUNCION DE MUTING

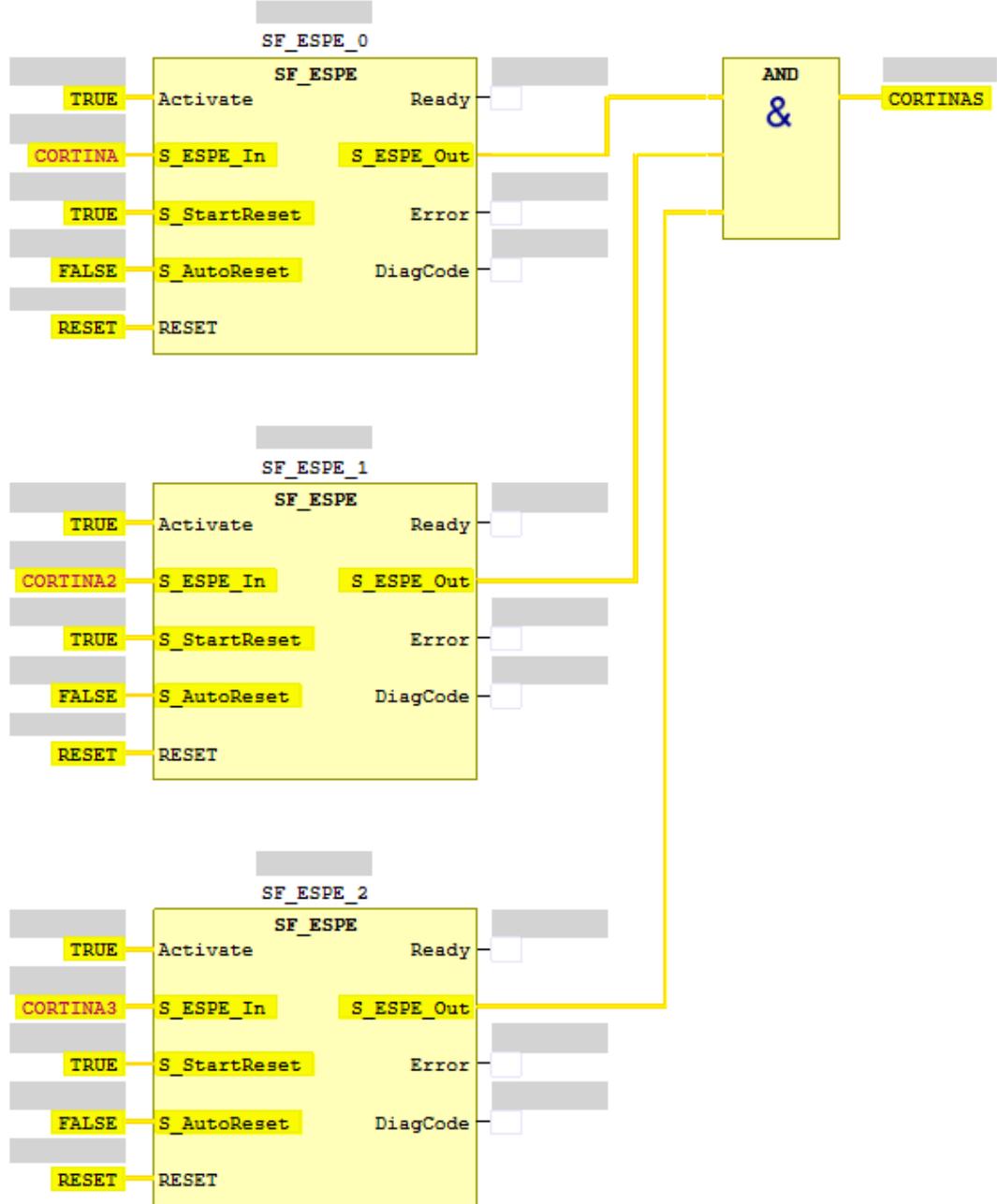


4 VERIFICA SI EL BOTON DE PARO DE EMERGENCIA SE PULSA (0 V)



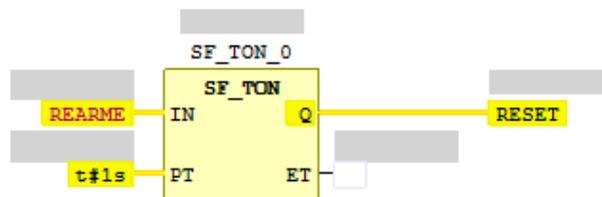
5

VERIFICA EL ESTADO DE LAS 3 CORTINAS POR SI ALGUNA DETECTA A ALGUNA PERSONA U OBJETO

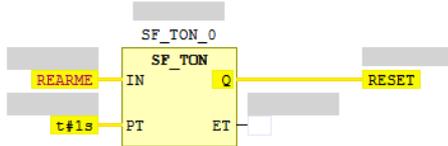


6

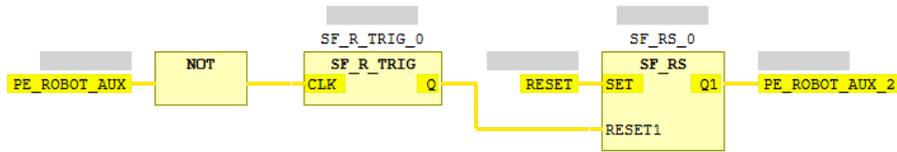
FUNCION PARA HACER RESET A TODOS LOS BLOQUES DE FUNCION DE SEGURIDAD ANTERIORES. ES NECESARIO QUE SE MANTENGA PULSADO POR UN SEGUNDO.



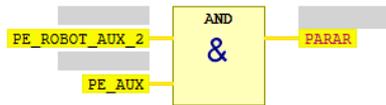
6 FUNCION PARA HACER RESET A TODOS LOS BLOQUES DE FUNCION DE SEGURIDAD ANTERIORES.
ES NECESARIO QUE SE MANTENGA PULSADO POR UN SEGUNDO.



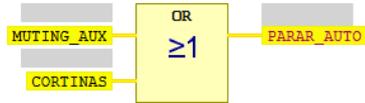
7 FUNCION QUE EVITA QUE EL ROBOT Y EL PLC SE QUEDEN EN BUCLE AL ACTIVARSE UNA EMERGENCIA.
LA IDEA ES QUE CUANDO "PE ROBOT AUX" CAMBIE SU VALOR DE 1 A 0 (FLANCO DE SUBIDA), "PE ROBOT_AUX_2" VALGA 0.
PERO AL PULSAR "RESET", AUNQUE "PE ROBOT AUX" TENGA VALOR 0, "PE ROBOT_AUX_2" VALDRA 1.
ES NECESARIO REALIZAR ESTO PORQUE SI NO EL PLC SIEMPRE ESTARIA EN MODO "PARO DE EMERGENCIA" AL DEPENDER DEL ESTADO DEL ROBOT QUE TAMBIEN ESTARIA EN "PARO DE EMERGENCIA".



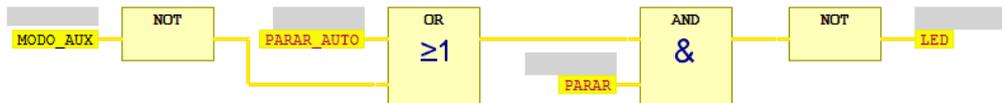
8 SI SE ACTIVA LA PARADA DE EMERGENCIA POR PULSAR EL BOTON DE PARADA DE EMERGENCIA, EL PLC MANDARA LA PETICION AL CONTROLADOR DE PARADA DE EMERGENCIA. SE REQUERIRA UN REARME PARA SALIR DE ESTE ESTADO.
TAMBIEN, SI SE ACTIVA EL PARO DE EMERGENCIA INTERNO DEL CONTROLADOR, EL PLC ENTRADA EN MODO "PARO DE EMERGENCIA".
ESTA ES LA RAZON POR LA QUE SE NECESITA LA FUNCION ANTERIOR.



9 EVITA QUE SE INICIE EL PARO DE SEGURIDAD AUNQUE LAS CORTINAS HAYAN DETECTADO ALGO, SIEMPRE QUE EL MUTING ESTE ACTIVO.



10 AL ACTIVARSE LA PARADA DE EMERGENCIA EN MODO AUTOMATICO, SE ENCENDERA EL INDICADOR LED DEL BOTON DE REARME.
TAMBIEN SE ACTIVARA CUANDO SE ACTIVE LA PARADA DE EMERGENCIA "PARAR".



Anexo G: Tabla para calcular C_{RO}

Tabla 1 de la norma UNE-EN ISO 13855:2011, ver [13, p. 26]. La imagen también es de la norma.

Altura de la zona peligrosa a	Altura del borde superior de la zona de detección del equipo de protección electrosensible b											
	900	1 000	1 100	1 200	1 300	1 400	1 600	1 800	2 000	2 200	2 400	2 600
	Distancia de seguridad suplementaria hacia la zona peligrosa C_{RO}											
2 600 ^a	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2 500	400	400	350	300	300	300	300	300	250	150	100	0
2 400	550	550	550	500	450	450	400	400	300	250	100	0
2 200	800	750	750	700	650	650	600	550	400	250	0	0
2 000	950	950	850	850	800	750	700	550	400	0	0	0
1 800	1 100	1 100	950	950	850	800	750	550	0	0	0	0
1 600	1 150	1 150	1 100	1 000	900	850	750	450	0	0	0	0
1 400	1 200	1 200	1 100	1 000	900	850	650	0	0	0	0	0
1 200	1 200	1 200	1 100	1 000	850	800	0	0	0	0	0	0
1 000	1 200	1 150	1 050	950	750	700	0	0	0	0	0	0
800	1 150	1 050	950	800	500	450	0	0	0	0	0	0
600	1 050	950	750	550	0	0	0	0	0	0	0	0
400	900	700	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
200	600	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Cuando se obtiene un valor de cero, el cálculo de la distancia mínima, S , se debería hacer conforme a los apartados 6.2 a 6.4.

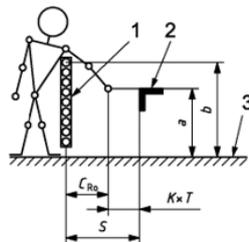
NOTA 1 Los equipos de protección electrosensibles con una altura

- del borde superior de la zona de detección inferior a 900 mm están excluidos ya que no ofrecen protección suficiente contra el burlado o el paso por encima
- del borde inferior de la zona de detección superior a 300 mm con respecto al plano de referencia no ofrecen protección suficiente contra el paso por debajo arrastrándose.

NOTA 2 Los datos de esta tabla se obtuvieron de un estudio de la BG alemana, véase [22].

NOTA 3 La mayor parte de los valores indicados en esta tabla son inferiores a los valores indicados en las tablas 1 y 2 de la Norma ISO 13857:2008, puesto que las partes del cuerpo humano no pueden apoyarse sobre los dispositivos de protección en el caso de alcance por encima.

^a El alcance por encima a la zona peligrosa es imposible.



Leyenda

- 1 Equipo de protección electrosensible
- 2 Zona peligrosa
- 3 Plano de referencia
- a Altura de la zona peligrosa
- b Altura del borde superior de la zona de detección del equipo de protección electrosensible
- C_{RO} Distancia suplementaria que una parte del cuerpo puede recorrer hacia la zona peligrosa antes de que se active el protector (véanse los valores en la tabla 1)
- S Distancia mínima para el alcance por encima

Anexo I: Resumen categorías en la SRP/CS

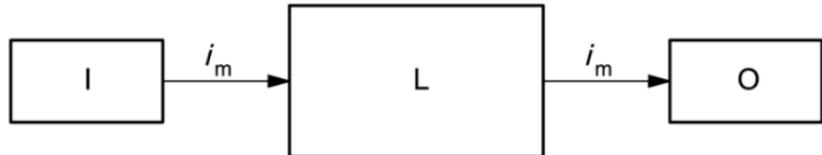
Tabla 10 de la Norma UNE-EN ISO 13849-1:2016 [14]. Para la totalidad de los requisitos ver el capítulo 6 de la misma Norma.

Categoría	Resumen de requisitos	Comportamiento del sistema	Principios para obtener la seguridad	MTTF _D de cada canal	DC _{avg}	CCF
B (véase 6.2.3)	Las SRP/CS y/o sus dispositivos de protección, así como sus componentes, se deben diseñar, construir, seleccionar, montar y combinar de acuerdo con las normas pertinentes de manera que puedan soportar las influencias esperadas. Se deben utilizar los principios básicos de seguridad.	Si se produce un defecto, este puede conducir a la pérdida de la función de seguridad.	Se caracterizan principalmente por la selección de los componentes.	Baja a media	Nula	No pertinente
1 (véase 6.2.4)	Se deben aplicar los requisitos de B. Se deben utilizar componentes de eficacia probada y principios de seguridad de eficacia probada.	La aparición de un defecto puede conducir a la pérdida de la función de seguridad, pero la probabilidad de que se produzca dicho defecto es menor que en la categoría B.	Se caracterizan principalmente por la selección de los componentes.	Alta	Nula	No pertinente
2 (véase 6.2.5)	Se deben aplicar los requisitos de B y utilizar los principios de seguridad de eficacia probada. La función de seguridad debe ser comprobada a intervalos adecuados por el sistema de mando de la máquina (véase 4.5.4).	La aparición de un defecto puede conducir a la pérdida de la función de seguridad en el intervalo entre dos comprobaciones. Mediante la comprobación se detecta la pérdida de la función de seguridad.	Se caracterizan principalmente por la estructura.	Baja a alta	Baja a media	Véase el anexo F
3 (véase 6.2.6)	Se deben aplicar los requisitos de B y utilizar los principios de seguridad de eficacia probada. Las partes relativas a la seguridad se deben diseñar de manera que: – un solo defecto en cualquiera de estas partes no conduzca a la pérdida de la función de seguridad, y – siempre que sea razonablemente factible, se detecte dicho defecto.	Cuando se produce un solo defecto, la función de seguridad se desempeña siempre. Algunos defectos se detectan, pero no todos. La acumulación de defectos no detectados puede conducir a la pérdida de la función de seguridad.	Se caracterizan principalmente por la estructura	Baja a alta	Baja a media	Véase el anexo F
4 (véase 6.2.7)	Se deben aplicar los requisitos de B y utilizar los principios de seguridad de eficacia probada. Las partes relativas a la seguridad se deben diseñar de manera que: – un solo defecto en cualquiera de estas partes no conduzca a una pérdida de la función de seguridad, y – se detecte dicho defecto en el momento de, o antes de, la siguiente solicitud de la función de seguridad, pero si esta detección no es posible, una acumulación de defectos no detectados no debe conducir a la pérdida de la función de seguridad.	Cuando se produce un solo defecto, la función de seguridad se desempeña siempre. La detección de defectos acumulados reduce la probabilidad de pérdida de la función de seguridad (DC alta). Los defectos serán detectados a tiempo para impedir la pérdida de la función de seguridad.	Se caracterizan principalmente por la estructura	Alta	Alta incluyendo la acumulación de defectos	Véase el anexo F

Anexo J: Arquitectura de las categorías en la SRP/CS

Los siguientes diagramas se pueden encontrar en el capítulo 6 de la Norma UNE-EN ISO 13849-1:2016 [14].

- Categoría B y Categoría 1



Leyenda

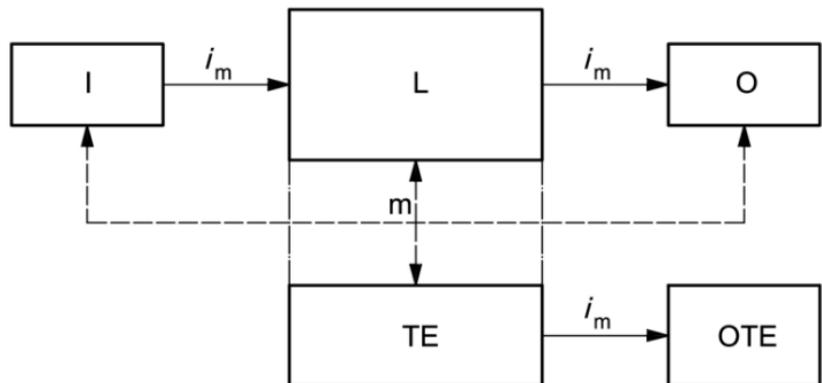
i_m Medios de interconexión

I Dispositivo de entrada, por ejemplo, sensor

L Lógica

O Dispositivo de salida, por ejemplo, contactor principal

- Categoría 2



Leyenda

i_m Medios de interconexión

I Dispositivo de entrada, por ejemplo, detector

L Lógica

M Control

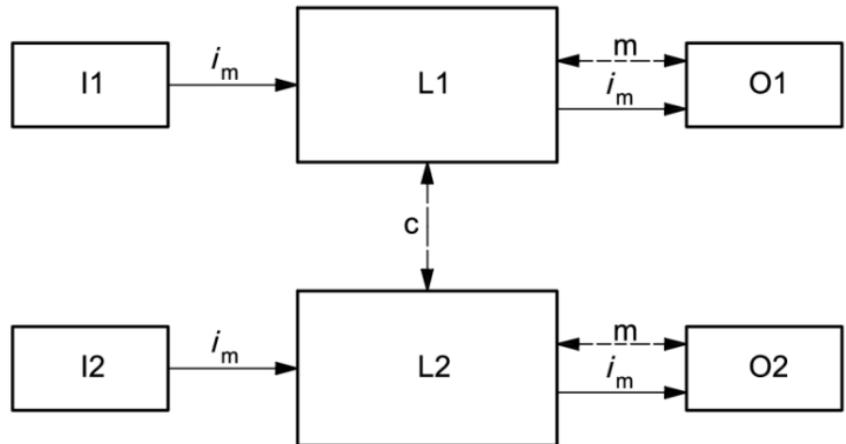
O Dispositivo de salida, por ejemplo, contactor principal

TE Equipo de ensayo

OTE Salida del TE

Las líneas a trazos representan la detección de defectos razonablemente practicable.

- Categoría 3



Leyenda

i_m Medios de interconexión

c Control cruzado

I1, I2 Dispositivo de entrada, por ejemplo, detector

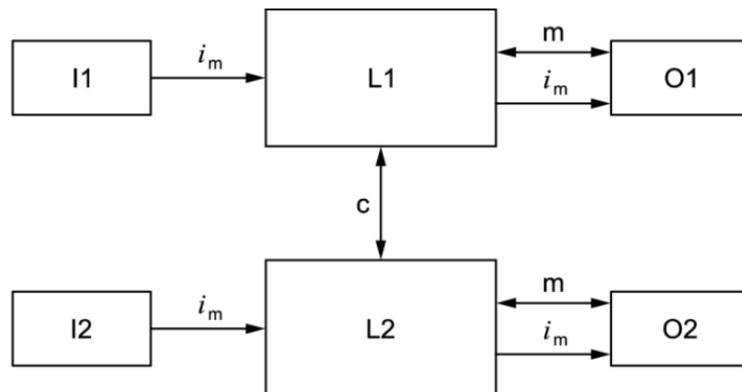
L1, L2 Lógica

m Control

O1, O2 Dispositivo de salida, por ejemplo, contactor principal

Las líneas a trazos representan la detección de defectos razonablemente practicable.

- Categoría 4



Leyenda

i_m Medios de interconexión

c Control cruzado

I1, I2 Dispositivo de entrada, por ejemplo, detector

L1, L2 Lógica

m Control

O1, O2 Dispositivo de salida, por ejemplo, contactor principal

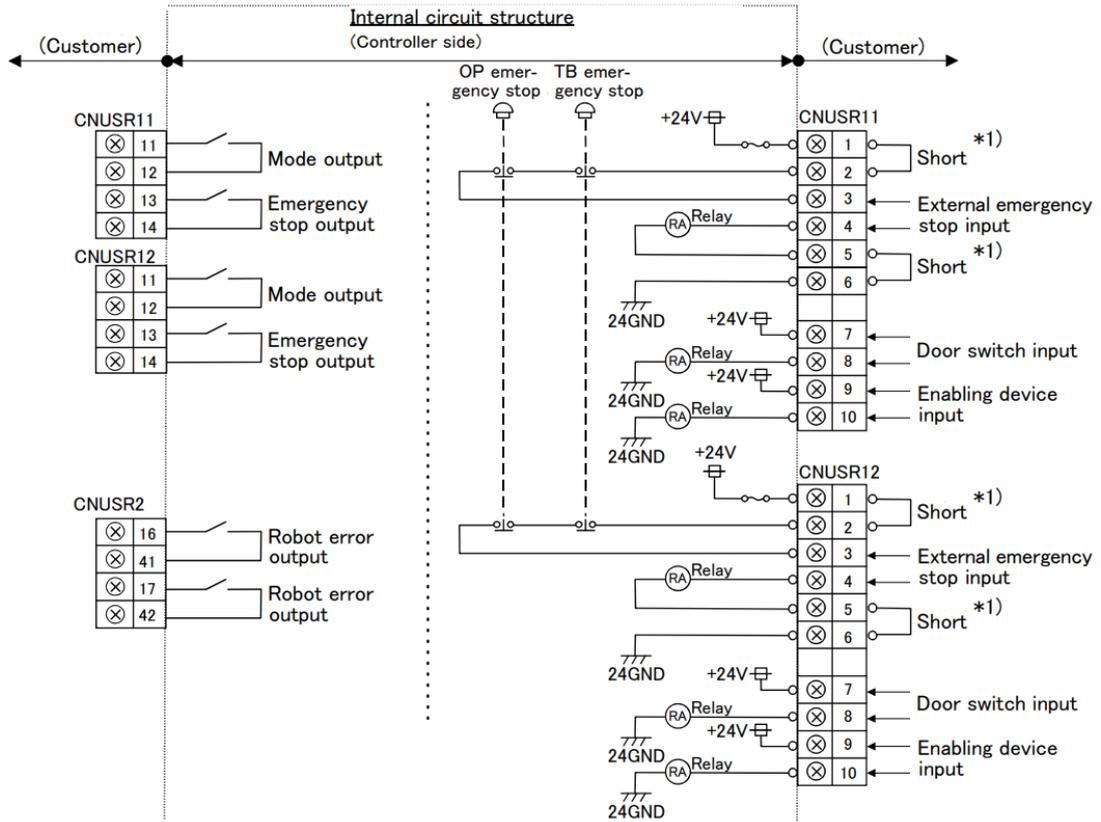
Las líneas continuas para el control representan una cobertura del diagnóstico más alta que en la arquitectura tipo para la categoría 3.

Anexo K: Puntuación de las medidas contra los CCF

La siguiente tabla se pueden encontrar en el anexo F de la Norma UNE-EN ISO 13849-1:2016 [14].

	Medida contra los CCF	Puntuación
1	Separación/Aislamiento	
	Separación física entre las vías de las señales, por ejemplo: separación en el cableado/tuberías; detección de cortocircuitos y circuito abiertos en cables por ensayos dinámicos; blindaje separado para cada vía de señal de cada canal; distancias de aislamiento y líneas de fuga suficientes en tarjetas de circuitos impresos.	15
2	Diversidad	
	Utilizar diferentes tecnologías/principios de diseño o principios físicos, por ejemplo: primer canal electrónico o electrónico programable y segundo canal electromecánico cableado; diferente iniciación de la función de seguridad para cada canal (por ejemplo, posición, presión, temperatura); y/o medición digital y analógica de variables (por ejemplo, distancia, presión o temperatura); Y/o componentes de diferentes fabricantes.	20
3	Diseño/aplicación/experiencia	
3.1	Protección contra sobretensión, sobrepresión, sobreintensidad, sobretemperatura, etc.	15
3.2	Utilización de componentes de eficacia probada.	5
4	Evaluación/Análisis	
	Para cada parte de las partes relativas a la seguridad del sistema de mando se ha llevado a cabo un análisis de los modos de fallo y sus efectos y sus resultados se han tenido en cuenta con el fin de evitar los fallos de causa común en el diseño.	5
5	Competencia/formación	
	Formación de los diseñadores para entender las causas y consecuencias de los fallos de causa común.	5
6	Medio ambiente	
6.1	Para sistemas eléctricos/electrónicos, prevención de la contaminación y de las perturbaciones electromagnéticas (CEM) para proteger contra los fallos de causa común de conformidad con las normas pertinentes (por ejemplo, la Norma IEC 61326-3- 1). Sistemas fluidicos: filtración del medio a presión, prevención de la absorción de impurezas, drenaje del aire comprimido, por ejemplo, de conformidad con los requisitos del fabricante del componente en lo que se refiere a la pureza del medio a presión. NOTA Para sistemas combinados fluidicos y eléctricos, se deberían considerar ambos aspectos.	25
6.2	Otras influencias Consideración de los requisitos relativos a la inmunidad contra todas las influencias ambientales pertinentes, tales como, la temperatura, los choques, las vibraciones, la humedad (por ejemplo, tal como se especifica en las normas pertinentes).	10
	Total	[máx. alcanzable 100]
Puntuación total	Medidas para evitar los CCF ^a	
65 o mejor	Cumple los requisitos	
Menos de 65	Proceso fallido seleccionar medidas adicionales	

Anexo L: Conexiones externas de paro de emergencia del controlador CR750-D



CAUTION Please do not carry out an insulation pressure test. Moreover, it becomes the cause of failure if it connects incorrectly.

Please refer to the example of safety measures of "Standard Specifications Manual".

*1) This terminal is opened at factory shipping (unconnected). If power supply inside the controller is used, short-circuit the terminal.

[Note] In the customer's system, do not ground the + side of 24V power supply prepared by customer for connect to the controller. (related with emergency stop and parallel input/output) If it connects with the controller under the condition that the + side is grounded, it will lead to failure of controller.